

**MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU**

**2000-LUVUN TUTKAHAKUISTEN ILMATAISTELUOHJUSTEN  
TEKNINEN VERTAILU JA TULEVAISUUDENNÄKYMÄT**

Pro Gradu -tutkielma

Yliluutnantti  
Oskari Tähtinen

SMOHJ10  
Ilmasotalinja

Maaliskuu 2016

## MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

Kurssi SMOHJ10	Linja Ilmasotalinja
Tekijä Ylil Oskari Tähtinen	
Tutkielman nimi <b>2000-LUVUN ILMATAISTELUOHJUSTEN TEKNINEN VERTAILU JA TULEVAISUUDENNÄKYMÄT</b>	
Oppiaine, johon työ liittyy Sotatekniikka	Säilytyspaikka Kurssikirjasto (MPKK:n kirjasto)
Aika 31.03.2016	Tekstisivuja 74      Liitesivuja 0
<b>TIIVISTELMÄ</b> <p>Tutkielma käsittelee nykyisiä ja lähitulevaisuuden ilmataisteluohjuksia, niiden suorituskykyä ja kehitysnäkymiä. Tutkimus on rajattu käsittelemään ilmasta ilmaan -ammuttavia tutkahakupäällä varustettuja ilmataisteluohjuksia, jotka suorittavat loppuhakeutumisen kohteelle aktiivisena tai puoliaktiivisena.</p> <p>Tämä tutkielma on luonteeltaan kvalitatiivinen eli laadullinen tutkimus. Tutkimuksessa käytettävät tutkimusmenetelmät ovat kirjallisuuskatsaus sekä matemaattinen mallinnus. Tutkimusongelmana oli selvittää, minkälaisia teknologioita ja suorituskykyjä nykyaikaisissa tutkahakupäällä varustetuissa ilmataisteluohjuksissa on ja miten ne tulevat lähitulevaisuudessa muuttumaan. Tutkimusongelmaan vastaamiseksi asetettiin alatutkimuskysymyksiä, jotka ovat: “Minkälaisia teknologisia ratkaisuja nykyaikaisissa ilmataisteluohjuksissa on?”, “Minkälaisia teknologioita tuleviin ilmataisteluohjuksiin on tulossa?” sekä “Miten ohjusten ominaisuudet vaikuttavat niiden taktiseen suorituskykyyn yksinkertaisessa ilmataisteluskenaariossa?”.</p> <p>Kahteen ensimmäiseen apututkimuskysymykseen vastataan tutkimuksen luvuissa 3 ja 4, “Ilmataisteluohjusten tekniikka” sekä “Nykyaikaisia ja lähitulevaisuuden ilmataisteluohjuksia” vastaavasti. Näissä tutkimusaineistona on käytetty ohjusteknologian käsikirjoja, puolustusalan ja ase-teollisuuden ammattilaisaikakausjulkaisuja ja uutisartikkeleita, sekä internet-lähteitä. Viimeiseen apututkimuskysymykseen vastataan luvussa 5, “Ilmataisteluohjusten suorituskyvyn tarkastelu”, jossa käytetään matemaattista mallinnusta ilmataisteluskenaariossa ohjusten ominaisuuksien tutkimiseen ja selvittämään näiden vaikutus ohjusten suorituskykyyn.</p> <p>Tutkimuksen tuloksena havaitaan, että nykyaikaisessa tutkahakuisessa ilmataisteluohjuksessa on aktiivinen, mekaanisesti keilaava perinteinen tutkahakupää, yksi- tai kaksivaiheinen kiinteää ajoainetta käyttävä rakettimoottori ja yksisuuntainen datalinkki. Kooltaan tällainen nykyaikainen ohjus on hieman alle 4 m pitkä ja painaa 150 – 200 kg, josta taistelulatauksen osuus on 15 – 25 kg.</p> <p>Lähitulevaisuudessa ohjusten moottoriteknologiassa tullaan siirtymään pääasiallisesti kaksivaiheisiin raketti- sekä ramjet-moottoreihin, jotka käyttävät ajoaineisiin lisättyjä metalli- ja nanopartikkeleita emissioiden pienentämiseen ja työntövoiman kasvattamiseen. Työntövoiman säätelymahdollisuus auttaa kasvattamaan ohjusten kantamaa ja liikehtimiskykyä, ja tätä kautta maalin tuhoamistodennäköisyyttä. Ohjusten kantama tulee kasvamaan 150 – 200 kilometriin. Ns. normaaliin ilmataisteluohjusten lisäksi suurikokoisten ja painavien pitkän kantaman ilmataisteluohjusten määrä tulee lisääntymään. Nämä ovat kooltaan 4 – 6 m ja painavat 250 – 400 kg, josta taistelulatauksen määrä on jopa 60kg. Pitkänkantaman ilmataisteluohjusten kantama on jopa 300 km, joka muodostaa uhkan erityisesti verrattain hitaille ja huonosti liikehtiville tukeutumiskoneille kuten ilmatankkaus- ja taistelunjohtokoneille.</p> <p>Kaksisuuntainen datalinkki tulee yleistymään ohjuksissa, kuten myös kyky lukita hakupää kohteeseen ennen laukaisua. Muita trendejä ovat suunnattavien ja monikäyttöisten taistelulatausten käyttö ohjuksissa sekä ohjusten multirole-kyky, jolloin samaa ohjusta voidaan käyttää sekä ilmasta ilmaan -ilmataisteluohjuksena, ilmasta maahan -rynnäkköohjuksena sekä mahdollisesti ilmatorjuntaohjusjärjestelmissä maasta ilmaan -</p>	

ohjuksena. Eksoottisten ajoaineiden ja moottoriteknologioiden, kuten pulssidetonatiomootoreiden, käyttöönotto sarjatuotantoisissa ilmataisteluhjuksissa ei ole lähitulevaisuudessa todennäköistä.

Ilmataisteluhjusten suorituskyvyn osalta havaittiin mallinnuksen tuloksena, että tehokas hakupää ja suuri kantama ovat toivottuja ominaisuuksia ohjuksella, myös vaikka ne saavutettaisiin ohjuksen nopeuden kustannuksella. Ohjuksen suurella nopeudella on suurin hyöty takaa-ajotilanteessa. Lisäksi nopea ohjus vähentää maalin reagointiaikaa ja rajoittaa sen mahdollisuuksia suorittaa väistöliikettä, jotka molemmat lisäävät ohjuksen tuhoamistodennäköisyyttä. Muita ohjuksen suorituskyvyn kannalta oleellisia tekijöitä ovat hakupään laaja näkökenttä, ohjuksen hyvä liikehtimiskyky sekä kehittyneet elektronisen häirinnän väistömenetelmät ja aktiivisen tutkahakupään aaltomuotojen hallinta.

Lähitulevaisuuden ohjukset joutuvat toimimaan yhä haastavammassa elektronisen häirinnän ympäristössä viidennen sukupolven hävittäjien ja DRFM-häirintälähettiläimien yleistyessä. Mekaanisesti keilaava tutkahakupää tulee väistymään elektronisesti keilaavan AESA-tutkahakupään tieltä, jolloin saavutetaan paremmat häirinnänväistöominaisuudet, kasvaneet lukitusetäisyydet ja ohjuksen ampuvalle hävittäjälle suurempi taktinen toiminnanvapaus ja pienemmät uhkatasot. Ohjelmistoperusteiset tutkat tulevat tekemään ohjusten päivittämisestä ja uhkakirjastojen ajan tasalla pitämisestä uusien uhkamallien ilmestyessä aiempaa helpompaa ja edullisempää.

#### AVAINSANAT

Ilmavoimat, ilmataistelut, asetekniikka, ohjukset, rakettimoottorit, sensorit, hakupäät, tutkahakupäät, sytyttimet, ruudit, matemaattinen mallintaminen

## SISÄLLYSLUETTELO

<b>1</b>	<b>JOHDANTO</b> .....	<b>1</b>
1.1	Esittely.....	1
1.2	Aiempi tutkimus .....	4
1.3	Tutkimusongelma .....	5
1.4	Rajaukset.....	6
1.5	Käsitteiden määrittely.....	8
<b>2</b>	<b>AINEISTO JA TUTKIMUSMENETELMÄT</b> .....	<b>11</b>
2.1	Tutkimusmenetelmien esittely.....	11
2.2	Aineiston esittely .....	13
2.3	Aineiston luotettavuuden tarkastelu.....	13
<b>3</b>	<b>ILMATAISTELUOHJUSTEN TEKNIikka</b> .....	<b>15</b>
3.1	Yleistä .....	15
3.2	Taistelulataus .....	17
3.3	Propulsio .....	19
3.4	Aerodynamiikka ja ohjausjärjestelmä .....	25
3.5	Ohjausmenetelmä ja ohjautus.....	27
3.6	Hakupää.....	30
3.7	Datalinkki.....	33
3.8	Elektronisen sodankäynnin ominaisuudet.....	35
<b>4</b>	<b>NYKYISIÄ JA LÄHITULEVAISUUDEN ILMATAISTELUOHJUKSIA</b> .....	<b>37</b>
4.1	Ohjusten nimeäminen.....	37
4.2	Ohjusten kehityksen yleiskuva.....	38
4.3	Länsimaiset tutkaohjukset.....	40
4.4	Muut kuin länsimaiset tutkaohjukset.....	45
4.5	Tulevaisuuden ohjusten kehityssuuntia .....	52
<b>5</b>	<b>ILMATAISTELUOHJUKSEN SUORITUSKYVYN TARKASTELO</b> .....	<b>55</b>
5.1	Ohjusten suorituskyvyn mittaaminen.....	55
5.2	Skenaarion esittely .....	57
5.3	Skenaarion laskennassa käytetyt kaavat .....	58
5.4	Skenaarion oletusten ja validiteetin tarkastelu.....	59
5.5	Skenaarion tulokset.....	60
5.6	Vaihtoehtoisten skenaarioiden pohdintaa .....	63
5.7	Ohjusten muiden ominaisuuksien vaikutuksia suorituskykyyn .....	64
<b>6</b>	<b>TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET</b> .....	<b>66</b>
6.1	Ohjusten nykyisiä ja lähitulevaisuuden teknologisia ratkaisuja .....	67
6.2	Nykyaikaisia ja lähitulevaisuuden ohjuksia.....	69
6.3	Ohjusten ominaisuuksien vaikutus suorituskykyyn ilmataisteluskenaariossa ....	72
6.4	Pohdintaa .....	73
	<b>LÄHTEET</b> .....	<b>75</b>



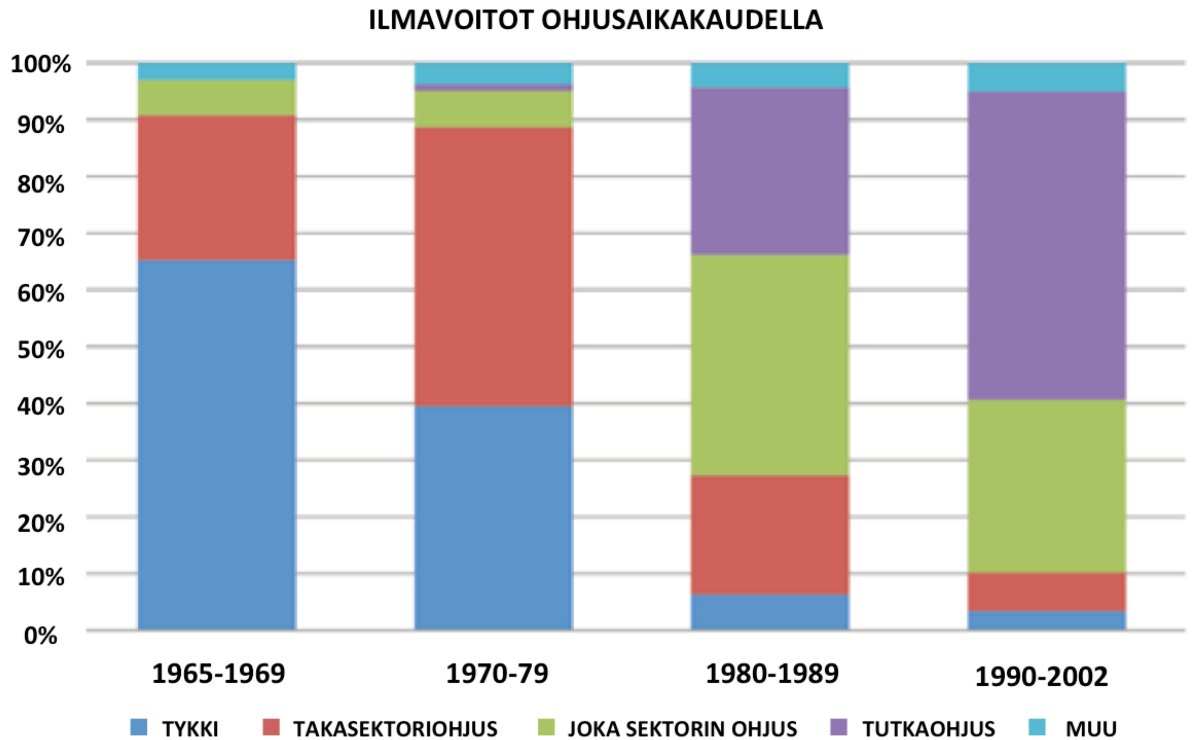
# **2000-LUVUN TUTKAHAKUISTEN ILMATAISTELUOHJUSTEN TEKNINEN VERTAILU JA TULEVAISUUDENNÄKYMÄT**

## **1 JOHDANTO**

### **1.1 Esittely**

Ilmataisteluohjukset muodostavat modernin ilmataisteluhävittäjän suorituskyvyn selkärangan, ja näiden merkitys ilmasodankäynnissä on viimeisen puolen vuosisadan aikana kasvanut merkittävästi. Vietnamin sodan aikaisista alkeellisista lyhyen kantaman ja kapean ammutasektorin ohjuksista on tultu pitkä matka moderneihin ilmataisteluohjuksiin. Moottoritekniikan ja aerodynamiikan kehitys on moninkertaistanut ohjusten kantaman, ja samanaikaisesti sensoritekniikan kehitysasteet ovat mahdollistaneet ohjusten ampumisen kaikista sektoreista ja entistä kauempaa.

Ilmasodankäynti on muuttunut konetykein sodittavista kaksintaisteluista nykyiseen moderniin, pääasiallisesti näköetäisyyden ulkopuolella käytävään niin sanottuun tutkasodankäyntiin. Nykyisessä ilmasodassa ammutapäätökset ja maalinosoitukset tehdään lähes yksinomaan tutkaan perustuen, ilman että maalia välttämättä nähdään lainkaan visuaalisesti. Kuvassa 1 on esitetty ohjusaikakaudella, 1960-luvulta 2000-luvulle, erityyppisillä aseilla saavutettujen ilmavoittojen määrä. Kuva auttaa hahmottamaan ilmasodankäynnin luonteen kehitystä ja ohjusten, erityisesti tutkaohjusten, merkitystä siinä.



Kuva 1. Tutkahakuisten ohjusten merkitys nykypäivän ilmasodassa [68]

Viime vuosituhaten lopun näköetäisyyden ulkopuolelta ammuttavat tutkahakuiset ohjukset eivät välttämättä ole kuitenkaan niin ylivoimaisia kuin on annettu ymmärtää. Alustavat ohjusvalmistajien testit ennustivat yksittäisen AIM-7F Sparrow -ohjuksen tuhoamistodennäköisyydeksi simulaatioihin ja koeammuntoihin perustuen noin 70%. Sparrow otettiin palveluskäyttöön 1960-luvun lopulla Vietnamin operaatio Rolling Thunderissa, jossa se yhdessä aikansa kehittyneimpien infrapunaohjusten kanssa onnistui saavuttamaan ainoastaan 10–15%:n tuhoamistodennäköisyyden. Vietnamin sodan jälkeen ohjukset kehittyivät edelleen, mutta niin myös ilma-alusten niitä vastaan kohdistamat vastatoimet. Kaksikymmentä vuotta Vietnamin sodan jälkeen Desert Storm -operaatiossa saavutettiin ohjuksilla jälleen vain 23%:n tuhoamistodennäköisyys, joka oli kuitenkin edes kohtalainen parannus aiempaan verrattuna. [68, s. 24]

Taistelulentokoneiden teknologiset kehitystrendit muun muassa aerodynamiikan, häiveominaisuuksien, moottoriteknologian, verkottuneisuuden ja sensoreiden osalta määrittelevät pitkälti myös tulevaisuuden ilmataisteluohjusten kehitysnäkymät. Yksittäisen ohjuksen 100%:n tuhoamistodennäköisyys säilynee jatkossakin saavuttamattomana tavoitteena, kun hävittäjien suorituskyky ja vastatoimenpiteiden tehokkuus kasvavat kilvan ja rinta rinnan ohjusteknologian kanssa. Uusien ilmataisteluohjusten tulee kyetä lentämään entistä pidemmälle ja löytämään kohteita, joiden tutkapaikkipinta-ala on kertaluokkaa pienempi kuin aiemmissa hävittäjissä, ja kyetä tuhoamaan ne huolimatta niiden aiempaa ketterämmästä liikehtimis- ja väistökyvystä sekä merkittävästi viimeisen neljän vuosikymmenen aikana kehittyneistä vastatoimenpiteistä. [40]. Erityisesti vastatoimenpideteknologiat, kuten DRFM-muistit, tulevat asettamaan suuria haasteita ohjusten suorituskyvylle. [47]

Tutkimuksessa luodaan katsaus tutkahakupäällä varustettujen ilmasta ilmaan -ohjusten nykytilaan ja tutkitaan, minkälaisia suorituskykyjä ja ominaisuuksia tulevaisuuden ilmataisteluohjuksissa tulee todennäköisimmin olemaan. Kun nämä ohjusten tekniset ominaisuudet on kartoitettu, tutkimuksessa mallinnetaan, miten nykyisten ja tulevaisuuden ilmataisteluohjusten tekniset ominaisuudet vaikuttavat niiden suorituskykyyn yksinkertaisessa ilmataisteluskenaarioissa. Skenaarioissa tarkastellaan ohjusten ominaisuuksien vaikutusta yksinkertaistetun ilmataisteluskenaarion lopputulokseen.

Tutkimuksen tarpeellisuuden taustaa on hyvä hieman avata. Hävittäjälentokone on huipputeknologinen ja kompleksi itsenäinen taistelujärjestelmä. Sen asejärjestelmän tehokkuudesta suuri osa riippuu hävittäjän tilannetietoisuuden tasosta. Tilannetietoisuus puolestaan on pääasiallisesti riippuvainen hävittäjän sensorien ominaisuuksista (tutka, elektro-optiset sensorit), elektronisen sodankäynnin kyvystä (elektroninen vaikuttaminen ja suojaus) sekä verkottuneisuudesta (datalinkki).

Eniten koko taistelujärjestelmän ulottuvuutta (ja sitä kautta tilannetietoisuudella saavutettua tehokkuutta) rajoittava tekijä on käytettävä asejärjestelmä. Tällä hetkellä hävittäjien aktiiviset elektronisesti keilaavat tutkat pystyvät havaitsemaan ja seuraamaan kohteita etäisyyksiltä, jotka ovat huomattavasti suurempia kuin mihin nykyisillä ilmataisteluohjuksilla kyetään vaikuttamaan. Kehitys ohjusten moottoriteknologiassa ja sensorien suorituskyvyssä pyrkii kuromaan tätä lavetin ja asejärjestelmän suorituskykykuilua umpeen. Yleinen laskentatehon kasvu Mooren lakia mukaillen vaikuttaa myös ilmataisteluohjusten suorituskykyyn. Kehittynyt signaalikäsittely ja ohjautusalgoritmit parantavat sekä ohjusten laukaisualuetta, maksimikantamaa että elektronisen sodankäynnin kykyä.

Tutkimuksen tärkeyttä ja ajankohtaisuutta puoltaa voimakkaasti Suomen Ilmavoimien tämänhetkisen hävittäjäkaluston ja aseistuksen elinkaaren lopun häämöttäminen 2020-luvun lopussa. Kun Suomen ilma-ase päivitetään hävittäjäkaluston uusinnan ja ohjuspäivitysten yhteydessä vastaamaan tämän vuosituhannen taistelukentän vaatimuksia, on oleellista tiedostaa ilma-aseen tulevaisuuden kehitystrendit, ja se, minkälaista teknologiaa on odotettavissa omaan sekä vastustajan käyttöön.

Jos emme tunne meille tarjottavaa teknologiaa ja sen ominaisuuksia, joudumme perustamaan hankintapäätöksemme lähinnä asevalmistajien mainospuheille. Koska hankittavan taistelujärjestelmän elinkaarikustannukset tullaan laskemaan miljardeissa euroissa, ei meillä valtiona ole varaa tehdä kalliita virhepäätöksiä tietämättömyydestä johtuen. On tärkeä kartoittaa, minkälaisia teknologioita tulevissa ilmataisteluohjuksissa on mahdollista ottaa käyttöön, ja ymmärtää, mikä niiden vaikutus on ohjusten suorituskykyyn ja sitä kautta taistelujärjestelmän ja koko ilmapuolustuksen suorituskykyyn.

## 1.2 Aiempi tutkimus

Tulevaisuuden hävittäjiä (viidennen sukupolven sekä sitä seuraavia hävittäjiä) on tutkittu tai tutkitaan parhaillaan Maanpuolustuskorkeakoulussa sekä kandidaatti-, maisteri- että esiupseerikurssitasolla. Näissä tutkimuksissa on kuitenkin pääsääntöisesti keskitytty lavettien liikehtimisominaisuuksiin tai niiden sensoreihin ja verkottuneisuuteen.

Ilmataisteluoohjuksia tai niissä käytettäviä teknologioita ei ole tutkittu Maanpuolustuskorkeakoulussa lähes kymmeneen vuoteen. Viimeisin suoraan aiheeseen liittyvä tutkielma on kadetti Arto Ukskosken ”Tekniikan rajoitukset ilmataisteluoohjusten suorituskykyyn, uudet ilmataisteluoohjukset ja ohjustekniikan tulevaisuuden näkymät” pro gradu -työ vuodelta 2007. Kymmenen vuotta on pitkä aika jatkuvasti kehittyvällä huipputeknologisella alalla, joten on hyvinkin aiheellista päivittää tutkimustilannetta ilmataisteluoohjusten osalta.

Ilmataisteluoohjuksissa käytettäviä eri teknologioita on tutkittu kansainvälisesti perustutkimuksena kattavasti jo vuosikymmenten ajan ja tutkitaan edelleen. Erityisesti erilaisia taktisten ohjusten moottorivaihtoehtojen teknologiaa on tutkittu laajalti siviili- ja sotilasteknologian tutkimuslaitoksissa. Suurin osa tutkimuksesta on luonteeltaan erittäin fokuosoitunutta ja hyvin kapeisiin ilmataisteluoohjusten osajärjestelmien sektoreihin keskittyviä. Yleisemmän tason kokonaisvaltaisia ilmataisteluoohjuskenttää kartoittavia tutkimuksia ei ole lähimenneisyydessä julkaistu.

### 1.3 Tutkimusongelma

Tämän tutkimuksen päätutkimusongelma on:

Minkälaisia teknologioita ja suorituskykyjä nykyaikaisissa tutkahakupäällä varustetuissa ilmataisteluoohjuksissa on ja miten ne tulevat lähitulevaisuudessa muuttumaan?

Tämän päätutkimusongelman lisäksi alatutkimusongelmat ovat:

1. Minkälaisia teknologisia ratkaisuja nykyaikaisissa ilmataisteluoohjuksissa on?
2. Minkälaisia teknologioita tuleviin ilmataisteluoohjuksiin on tulossa?
3. Miten ohjusten ominaisuudet vaikuttavat niiden taktiseen suorituskykyyn yksinkertaisessa ilmataisteluskenaariossa?

Näihin kysymyksiin vastataan tutkimuksessa kolmijakoisesti. Ensimmäisenä luvussa 3, ”Ilmataisteluojusten tekniikka”, kartoitetaan, minkälaisia teknisiä ratkaisuja nykyaikaisissa ohjuksissa on käytössä ja minkälaisia teknologisia trendejä ja kehitysnäkymiä ohjuksissa on odotettavissa seuraavan noin kahdenkymmenen vuoden ajanjaksolla. Toiseksi luvussa 4, ”Nykyisiä ja lähitulevaisuuden ilmataisteluojuksia”, selvitetään, mitä ohjuksia on tällä hetkellä operatiivisessa käytössä ja minkälaisia suunnittelu- tai testausvaiheessa olevia ohjuksia on tulossa lähitulevaisuudessa käyttöön. Tutkimuksen tulosten saamiseksi realistiseen kontekstiin käytetään tätä tukemaan luvussa 5, ”Ilmataisteluojusten suorituskyvyn tarkastelu”, yksinkertaista ilmataisteluskenaariota, jota vasten ohjusten suorituskykyä ja teknologiaa peilataan. Näin saadaan parempi käsitys siitä, minkälaiset tekijät, ominaisuudet ja suorituskyvyt ovat oleellisia ohjuksille ilmasodankäynnissä.

#### 1.4 Rajaukset

Tutkimuksessa tarkastellaan nykyaikaisia tutkahakupäällä varustettuja ilmataisteluojuksia ja niiden kehitystrendejä. Käytännössä tämä tarkoittaa tutkimuksen rajaamista ilmakehässä toimiviin, pääasiallisesti lyhyen ja keskipitkän kantaman ohjuksiin, jotka hakeutuvat tutkasäteilyyn aktiivisesti, puoliaktiivisesti tai passiivisesti.

Ilmataisteluojusten historiallista kehitystä ei tarkastella, vaan rajataan tutkittavat ohjukset suuripiirteisesti otsikon mukaisesti 2000-luvun ohjuksiin. Raja ei ole ehdoton, ja tutkimuksessa tiedostetaan, että suuri osa nykyaikaisista ilmataisteluojuksista on aiempien versioiden pohjalle rakennettuja jatkokehitelmiä. Esimerkkinä tästä käy Yhdysvaltalaisen Raytheonin kehittämä AIM-120 AMRAAM (*Advanced Medium Range Air-to-Air Missile*) -ohjusperhe. Ensimmäisen AMRAAMin, AIM-120A:n, kehitys käynnistettiin jo vuonna 1975. Uusin, AIM-120D-ohjus on vasta saatu palveluskäyttöön 2010-luvulla. [31] Vaikka ohjukset ovat samaa sukua ja ulkoisesti hyvin saman näköisiä, on niiden teknologia ja suorituskyky aivan eri luokkaa keskenään. Tutkielman rajauksen tarkoituksena on siis keskittyä nykyaikaisiin, käytössä oleviin ohjusmalleihin, ja vain tarvittaessa sivuta niiden kehityshistoriaa, missä tämä tuo tutkimukseen lisäarvoa.

Toisin kuin hävittäjissä, ilmataisteluohjuksissa ei ole käytössä varsinaista selkeää jaottelua sukupolviin (esim. F/A-18 *Hornet* 4. sukupolvi, F-22 *Raptor* ja F-35 *Lightning II* 5. sukupolvi). Näköetäisyyden sisäpuolella käytettävät ns. kaartotaisteluohjukset, jollaisia ensimmäiset ilmataisteluohjukset nimenomaan olivat, ovat jaoteltavissa sukupolviin pääasiallisesti infrapunahakupään kehitysaskelien mukaan. Näköetäisyyden ulkopuolella käytettävien ilmataisteluohjusten kehitys on ollut luonteeltaan diskreettien hyppäysten sijaan enemmän jatkuvaa kehitystä, eikä selkeää jaottelua sukupolviin ole mahdollista tai järkevää suorittaa. Tutkimuksessa käsiteltävät pidemmän matkan ohjukset rajataan käsittämään modernit, käytössä olevat ilmataisteluohjukset ja missä tarpeellista, niiden aiemmat kehitysversiot.

Tutkimus rajataan käyttämään ainoastaan julkisia lähteitä. Ilmataisteluohjusten tarkat suorituskykyarvot ovat salaista tietoa, johon on käytännössä mahdotonta päästä käsiksi, ellei satu työskentelemään ohjuksen valmistajalla tai sellaisen valtion ilmavoimissa, jossa ko. ohjus on suunniteltu tai jonka käyttöön ohjusta on ostettu. Toiseksi, koska tutkimuksessa tutkitaan pääasiallisesti ohjusten teknisiä ominaisuuksia yleisellä tasolla, eivät juuri tiettyjen ohjusten absoluuttiset suoritusarvot tuo merkittävää lisäarvoa tutkimukselle. Kolmantena syynä rajaukseen on tahtotila pitää työn turvaluokka julkisena.

Tutkimuksen näkökulma keskittyy lähinnä ohjusten teknisiin ominaisuuksiin ja niiden mahdollisiin vaikutuksiin yksinkertaisessa ilmataisteluskenaariossa. Ohjusten taktisiin käyttöperiaatteisiin ei tutkimuksessa oteta syvällisesti kantaa, lukuun ottamatta mahdollisia tilanteita, joissa uusi teknologia mahdollistaa jonkin yksittäisen suoritusarvon asteittaisen parannuksen sijaan täysin uudenlaisen taktiikan käytön. Tällöinkin asian käsittelyn taso on taktiselta kannalta tarkasteltuna enemmän toteava kuin syväluotaava.

Miehittämättömien ilma-alusten ja miehittämättömien taisteluilma-alusten (UAV jaUCAV) osalta on havaittavissa trendi, jossa näiden merkitys sodankäynnissä ja lukumäärä taistelukentällä kasvavat huomattavasti. Miehittämättömien ilma-alusten torjuminen perinteisillä ilmataisteluohjuksilla ei ole laajassa mittakaavassa kustannustehokasta, johtuen ohjusten korkeasta yksikköhinnasta suhteessa maalien suureen lukumäärään. Torjunta ei välttämättä aina ole edes mahdollista, johtuen miehittämättömien ilma-alusten muita ilma-aluksia potentiaalisesti pienemmistä tutka- ja lämpöherätteistä. Aihe on tuore, ajankohtainen ja verrattain vähän tutkittu. Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan käsitellä miehittämättömiä ilma-aluksia vastaan erityisesti suunniteltuja tai suunnitteilla olevia ilmataisteluohjuksia, eikä oteta kantaa miehittämättömien ilma-alusten torjumiseen liittyvään problematiikkaan. Nämä aiheet rajataan tutkimuksen ulkopuolelle.

### 1.5 Käsitteiden määrittely

**A-Pole** Etäisyys laukaisevan koneen ja kohteen välillä silloin, kun ammuttu aktiivinen ohjus aloittaa maalinetsinnän omalla tutkallaan.

**AESA-tutka** (*Actively Electronically Scanned Array*) Elektronisesti keilaava tutka, jossa on yhden, mekaanisesti kääntyvän antennin sijaan satoja lähetin-vastaanotinpareja, joiden aaltorintamaa voidaan hallita sähköisesti. Perinteiseen tutkaan verrattuna AESA-tutka on monin verroin tarkempi, suorituskykyisempi ja huoltovarmempi.

**BVR** (*Beyond Visual Range*) Käsitteellä tarkoitetaan karkeasti yli 20 km etäisyydellä tapahtuvaa ilmataistelua näköetäisyyden ulkopuolella.

**Datalinkki** Langaton tiedonsiirtomenetelmä, jolla mahdollistetaan joko yksi- tai kaksisuuntainen kommunikaatio kahden toimijan välillä (esim. hävittäjä – hävittäjä, hävittäjä – maa-asema tai hävittäjä – ohjus)

**ECM** (*Electronic Counter Measures*) Elektroniset vastatoimenpiteet hyökkäystä vastaan. Esimerkkinä silput ja soihdut, joilla hyökkäyksen kohteena oleva ilma-alus pyrkii harhauttamaan ilmataisteluohjuksen hakupäätä hakeutumaan ohi varsinaisesta maalista.

**ECCM** (*Electronic Counter Measures*) Elektronisen häirinnän vastatoimenpiteiden vastatoimenpiteet. Esimerkiksi ohjuksen suorittama signaaliprosessointi tms. menetelmä, jolla hakupää pyrkii havaitsemaan häirinnän tai vastatoimenpiteet ja väistämään ne.



**F-Pole** Etäisyys laukaisevan koneen ja kohteen välillä ohjuksen osumahetkellä.

### Hävittäjien sukupolvet

4. **sukupolvi:** Esimerkiksi F/A-18 *Hornet*, JAS 39 *Gripen*, ja Su-27 *Flanker*. Neljännen sukupolven hävittäjille on ominaista hyvät kaartotaisteluominaisuudet, kohtalainen avioniikka ja sensorikyky ja heikot häiveominaisuudet.
- 4½. **sukupolvi:** Epävirallinen nimitys, myös 4+++-nimi on käytössä. Usein kehitysversioita 4. sukupolven hävittäjistä, joiden avioniikkaa ja sensoreita on päivitetty sekä häiveominaisuuksia parannettu mm. integroiduilla rakenteita mukailevilla lisäpolttoainesäiliöillä ja sisäisillä asekuiluilla.
5. **sukupolvi** Uusin hävittäjä sukupolvi, jonka määrittävinä tekijöinä ovat kehittyneet häiveominaisuudet ja suunnattavat suihkusuuttimet (työntövoimaohjaus), kehittynyt sensorifuusio ja AESA/PESA-tutkat. Esimerkkejä viidennen sukupolven hävittäjistä ovat F/A-22 Raptor ja PAK FA-50.

**Ilmastaisteluohjus** Ilma-aluksesta laukaistava ohjus, jonka tarkoitus on tuhota tai lamauttaa toinen ilma-alus tai ohjus.

**Ilmastaisteluohjusten sukupolvet** Määritetty näköetäisyyden sisäpuolella käytettäville infrapunaohjuksille löyhästi seuraavasti (suluisia esimerkki ko. sukupolven ohjuksesta):

1. **sukupolvi:** Ammunta mahdollista vain kohteen takasektorista (*AIM-9*)
2. **sukupolvi:** Ohjuksen hakupään näkökenttä laajempi (*AIM-9D*)
3. **sukupolvi:** Joka aspektin laukaisukyky (*AIM-9M*)
4. **sukupolvi:** Kyky laukaista ohjus jopa yli 90° koneen aseakselin sivuun (*off-boresight*) (*AA-11 Archer*)
5. **sukupolvi:** Kuvantavat hakupäät, kehittynyt signaaliprosessointi (*AIM-9X, Python 5*)

**LOAL (*Lock-On After Launch*)** Ohjuksen kyky lukittua maaliin vasta laukaisun jälkeen. Mahdollistaa esim. infrapunaohjuksen ampumisen sisäisestä asekuilusta tilanteessa, jossa ohjuksen sensori ei kykene vielä laukaistaessa näkemään maalia.

**LOBL (*Lock-On Before Launch*)** Ohjuksen toimintamoodi, jossa kohde havaitaan ohjuksen sensorilla ennen laukaisua. Perinteiset infrapunaohjukset vaativat aina lukituksen ennen laukaisua (esim. *AIM-9M Sidewinder*)

**Länsimainen** Tässä tutkimuksessa länsimailla käsitetään lapeasti NATO-maat sekä länsimaisella kalustolla operoivat. Länsimaisen ohjuksen määritelmä sisältää siis mm. Israelin, Japanin ja Etelä-Korean.

**PESA-tutka** (*Passive Electronically Scanned Array*) AESA-tutkan sukua oleva vaiheohjattu tutka, jossa on vain yksi radiosäteilyn lähde, jonka energia lähetetään säteileville elementeille. Yksinkertaisempi rakentaa kuin AESA-tutka, jossa jokaisessa lähetin/vastaanotinyksikössä on erillinen radiosäteilyn lähde.

**Ramjet** suom. Patoputkimoottori. Reaktiomoottorityyppi, jossa ei ole liikkuvia osia.

**R<sub>max</sub>** Ohjuksen maksimikantama. Dynaaminen arvo, joka muuttuu riippuen mm. ampujan ja maalin korkeudesta, nopeudesta, keskinäisestä sijainnista ja lentosuuntien eroista. Julkisissa lähteissä usein kerrottu joko optimaalinen maksimikantama (korkealta korkealle kohtilentävään maaliin) tai vaihtoehtoisesti kantama tyypillisessä ilmataistelutilanteessa (keskikorkeudesta keskikorkeuteen kohtilentävään maaliin)

**Scramjet** Yliäänipatoputkimoottori (*Supersonic Ramjet*)

**WVR** (*Within Visual Range*) Näköetäisyyden sisäpuolella tapahtuva lähietäisyyden ilmataistelu, jossa koneiden väliset etäisyydet ovat tyypillisesti alle 20 km.

## 2 AINEISTO JA TUTKIMUSMENETELMÄT

### 2.1 Tutkimusmenetelmien esittely

Tämä tutkimus on luonteeltaan kvalitatiivinen monimenetelmätutkimus. Mikään yksittäinen tutkimusmenetelmä ei itsessään kykene vastaamaan tutkimuksen tutkimuskysymyksiin, mistä syystä tutkimuksessa on päädytty käyttämään tutkimusmenetelmänä pääasiallisesti kirjallisuuskatsausta, kvalitatiivista sisällönanalyysia sekä ohjusten arvioinnissa ja vertailussa matemaattista mallinnusta skenaarion tarkastelussa. [14 s. 68]

Kirjallisuuskatsauksen avulla etsitään, analysoidaan ja luokitellaan aiemmin tuotettua tietoa ja käytetään sitä oman työn pohjana. Tämän tutkimuksen menetelmänä käytetään survey-tyyppistä kirjallisuuskatsausta, jossa lopputulos sisältää pelkän kirjallisuusselvityksen lisäksi myös tutkijan analyysia ja omaa pohdintaa. Jotta tutkimusmenetelmää voidaan käyttää tieteellisessä tutkimuksessa, tulee lähteiden tulee olla ajantasaisia ja niitä pitää olla riittävä määrä, ja lisäksi niiden tulee olla relevantteja eli aiheenmukaisia sekä sopivia tiedon tarpeeseen nähden. [14 s. 42]

Tässä tutkimuksessa kirjallisuuskatsauksella kartoitetaan ohjusten kehitystä, nykytilaa sekä tulevaisuudennäkymiä. Laadullisen sisällönanalyysin avulla kirjallisuusselvityksellä saadusta tiedosta pyritään löytämään ne oleellimmat tekijät, jotka eniten ohjaavat ja parhaiten määrittävät lähitulevaisuuden ilmataisteluohjusten kehityssuuntaa. [14 s. 69]

Ohjusten vertailu toteutetaan sekä kvalitatiivisin että kvantitatiivisin menetelmin. Kun ohjuksista on saatavissa numeerista ja uskottavaa dataa, tätä käytetään hyväksi ohjusten keskinäisessä vertailussa taulukoimalla eri lähteiden tieto ja vertailemalla ohjuksia keskenään. Kvalitatiivista, ns. pehmeää, sanallista tietoa ohjuksen suorituskyvyistä tai niiden käyttämistä teknologioista, ilman niitä tukevaa numeerista dataa, hyödynnetään yleisemmällä tasolla.

Haasteena tämänkaltaisessa tutkimuksessa on saavuttaa riittävä varmuus siitä, että on onnistuttu löytämään ilmataisteluohjusten oleelliset uudet kehitysasteet ja teknologiat. Tähän haasteeseen tutkimus pyrkii vastaamaan käyttämällä mahdollisimman monipuolisia lähteitä, jotka on hankittu iteratiivisen tiedonhakuprosessin avulla. Tämä iteratiivinen tiedonhaku voidaan mieltää tiedon fuusioksi, jossa useista eri lähteistä saatavia heikkoja signaaleja hyödyntäen pyritään tunnistamaan oleelliset megatrendit ja ilmiöt ohjusteknologian saralta, ja keskittämään lisätiedon haku näihin ilmiöihin ja teknologioihin. Konkreettisenä suoritteena tämänlainen tiedonhaku on enemmän intuitiivista yritys ja erehdys -menetelmää, kun tutkitaan jatkuvasti haarautuvia polkuja, joista osa johtaa umpikujaan, jolloin peruutetaan, ja osa poluista taas avaa uusia polkuja, jotka vievät tutkimusta eteenpäin. Tarpeeksi pitkälle vietyä tällaisella menetelmällä saavutetaan riittävän kattava (muttei aukoton tai täydellinen) kokonaiskuva ohjusteknologian kehitysnäkymistä ja pelikentästä tutkimuksen laajuus huomioiden. [39]

Ilmataisteluskenaarion mallintamiseen käytetään matemaattista mallinnusta. Matemaattisella mallinnuksella pyritään saamaan kvantitatiivisia tuloksia mallinnettavasta ilmiöstä. Matemaattiset mallit eivät tyypillisesti pyri kuvaamaan mallinnettavaa ilmiötä kokonaisuudessaan, vaan ne ovat luonteeltaan yleensä yksinkertaisia. Vaikka monimutkainen malli olisi mahdollista ratkaista numeerisesti, ei monien eri parametrien arvoja välttämättä tiedetä vaan ne jouduttaisiin arvaamaan. [50] Tässä tutkimuksessa matemaattista mallinnusta käytetään ilmataisteluskenaariossa, jossa mallinnetaan hävittäjien ja ohjuksen liikettä sekä hakupään toimintaa ja näiden ominaisuuksien vaikutusta skenaarion lopputulokseen.

Ohjusten vertailussa olisi ihanteellista luoda todellista maailmaa kuvaava stokastinen simulaatiomalli tarjoamaan objektiivista ja kvantitatiivista tietoa ohjusten eroista suorituskyvyssä ja ominaisuuksissa. [50] Johtuen ohjusten todellisten suoritusarvojen erittäin hankalasta, käytännössä olemattomasta saatavuudesta, ei ohjusten simulointi ole mahdollista tämän tutkimuksen puitteissa. Yhtenä vaihtoehtona tulevaisuuden ohjusten kvalitatiivisten ominaisuuksien ja suorituskykyjen arviointiin olisi soveltaa aikasarja-analyysiä, jossa ohjusten eri ominaisuuksien ja suorituskykyjen kehitystä ekstrapoloitaisiin. Koska ei ole kuitenkaan viitteitä siitä, että ohjusten suorituskyky kasvaisi lineaarisesti saati saumattoman jatkuvasti, ei tälläkään menetelmällä saataisi kovinkaan luotettavia tuloksia. [20, s. 111]

## 2.2 Aineiston esittely

Tutkimuksen aineisto on jaettavissa kahteen osaan. Teoriaosan pohjana käytetään *American Institute of Aeronautics and Astronauticsin* (AIAA) taktisen ohjussarjan julkaisuja, pääasiallisesti *Tactical Missile Aerodynamics*, *Tactical Missile Guidance* sekä *Tactical Missile Propulsion* -kirjoja, joita voidaan pitää ilmataisteluohjusalan perusteoksina. Teoriaosan muina lähteinä käytetään suomenkielistä sotateknistä kirjallisuutta (mm. Sotatekninen arvio ja ennuste 2025, Digitaalinen taistelukenttä), ulkomaisten aseteknologisten konferenssien julkaisuja, sekä mm. US Navyn julkaisemia ohjesääntöjä ja manuaaleja (*Ordnanceman*, *Fundamentals of Naval Weapons Systems*). Tulevan ohjusteknologian kartoituksessa käytetään lähteinä ohjusvalmistajien tiedotteita, eri ilmataistelu- ja muiden ohjusten kehitysohjelmista julkistettuja tietoja sekä alan aikakauslehtien ja luotetuimpien verkkojulkaisujen sähköisiä artikkeleita.

Tutkimuksen osassa, jossa kartoitetaan nykyisiä ja tulevia ohjuksia, on julkista materiaalia huomattavasti vähemmän käytettävissä. Suurin osa ohjusten tutkimuksesta sekä suoritusarvoista on asevalmistajien liikesalaisuuksia, eikä niihin käytännössä ole mahdollista päästä käsiksi ellei ole ostamassa ko. valmistajan ohjusta. Tästä syystä pääasiallisin lähteinä joudutaan käyttämään alan aikakauslehtien uutisia ja artikkeleita (mm. *Aviation Week & Space Technology*, *Air Forces Monthly*, *Airforce Technology*), puolustusteollisuuden tietopankkeja (esim. Jane's), itsenäisten tutkimuslaitosten julkaisuja (esim. *CSBA*) sekä internet-lähteitä.

## 2.3 Aineiston luotettavuuden tarkastelu

Tutkimuksessa käytetään hyväksi hyvin monipuolisesti erityyppisiä lähteitä. Ilmataisteluohjusten fysikaalisen teoriapohjan kartoittamisessa on pyritty käyttämään alan keskeisiä perusteoksia ja käsikirjoja sekä tieteellisissä sarjoissa julkaistuja tutkimustuloksia. Näiden luotettavuutta ei ole tarpeen kyseenalaistaa.

Nykyisten ja tulevien ohjusten osalta tutkimuksessa turvaudutaan pääasiallisesti valmistajien julkaisemiin tietoihin, luotettavina pidettyihin internet-lähteisiin ja sotilasteknologiin aikakausi- ja ammattilehtiin. Hirsjärvi tuo *Tutki ja kirjoita* -kirjassaan esiin kolme tekijää, joiden avulla lähdemateriaalin luotettavuutta voidaan arvioida. Nämä ovat kirjoittajan tunnettavuus ja arvovalta, lähteen ikä sekä lähteen uskottavuus. Lähteen uskottavuuteen liittyy myös julkaisijan arvovalta ja vastuu. [20]

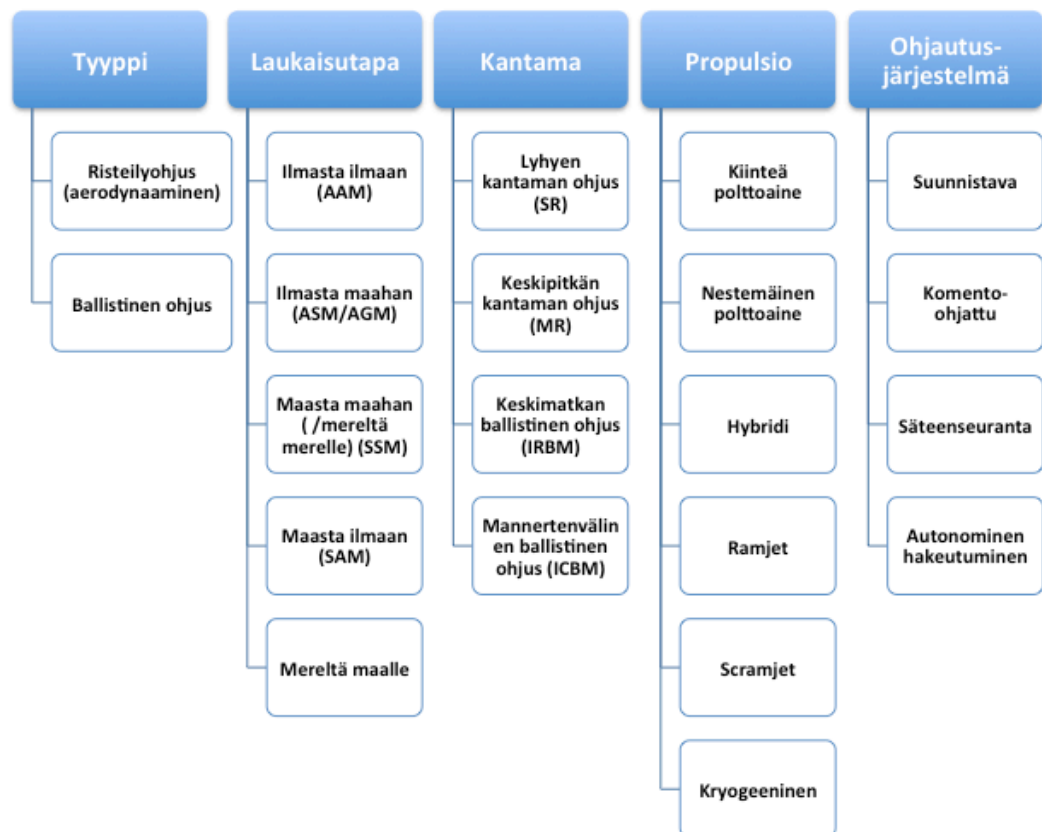
Valmistajien ilmoituksiin numeeristen arvojen ja suorituskykyjen osalta on suhtauduttava skeptisesti. Julkisissa lähteissä ohjusten suorituskykyjen avainarvot saattavat vaihdella merkittävästikin. Tästä syystä tutkimuksessa tukeudutaan mahdollisimman monen eri lähteen tietoon, jotka arvioidaan lähteen luotettavuuden perusteella. Tutkimushypoteesi on, että eri ohjusten lähteissä annetut arvot ovat keskenään suunnilleen yhtä paljon todellisista arvoista eroavia (ts. valmistajat valehtelevat keskimäärin samansuuntaisesti ja yhtä paljon), jolloin eri ohjuksia voidaan tutkimuksen laajuus ja turvaluokka huomioiden käsitellä vertailukelpoisina.

### 3 ILMATAISTELUOHJUSTEN TEKNIikka

#### 3.1 Yleistä

Tämän luvun tarkoitus on luoda lukijalle käsitys ilmataisteluohjusten rakenteesta, toimintaperiaatteesta sekä tyypillisimmistä osajärjestelmistä. Tämän lisäksi luvussa kartoitetaan ilmataisteluohjusten teknologisia kehitysnäkymiä ja rakenneratkaisuja etuineen ja haittoineen, jotta tutkimuksessa saadaan muodostettua mahdollisimman kattava kokonaiskuva ilmataisteluohjusten nykyisistä kehitystrendeistä.

Ohjuksia voidaan jaotella monella eri tavalla, eikä yhtä ainoaa yleispätevää jaottelua ole olemassa. [17, s. 16] Yksi tapa on jakaa ohjukset eri kategorioihin niiden tyypin, laukaisutavan, kantaman, propulsiotyypin ja ohjautusjärjestelmien perusteella. Kuvassa 2 on esitetty kaaviona tällainen ohjusten jaottelutapa.



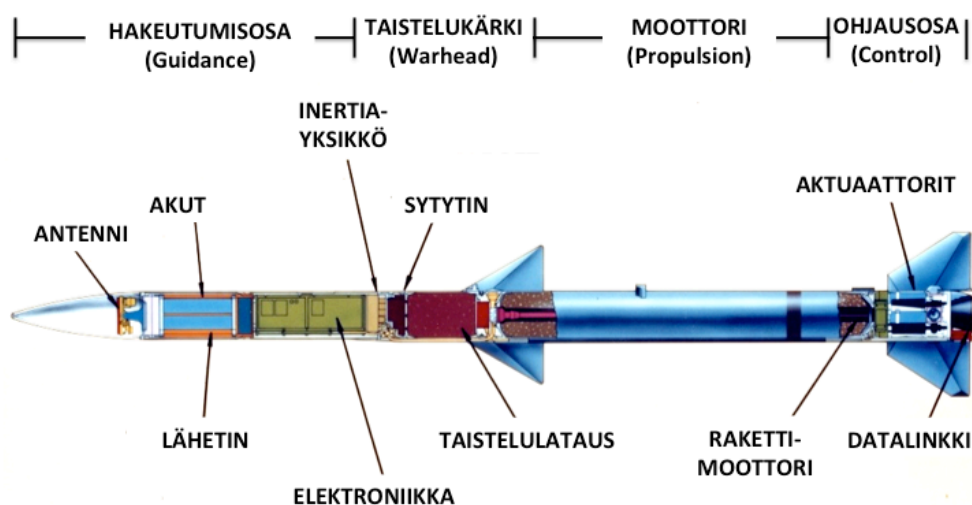
Kuva 2. Ohjusten eräs jaottelutapa [6]

Tässä tutkimuksessa keskitytään ilmakehässä toimiviin aerodynaamisiin, tutkahakupäällä varustettuihin ilmasta ilmaan -ohjuksiin. Ilmataisteluhjukset (*Air-to-Air Missiles, AAM*) jaotellaan tyypillisimmin niiden kantaman (lyhyt tai keskipitkä, SR / MR) ja sen perusteella, ovatko ne aktiivisia, puoliaktiivisia vai passiivisia. Aktiivinen ohjus havaitsee kohteen omalla sensorillaan ja pystyy suorittamaan hakeutumisen sen perusteella. Puoliaktiivisessa ohjuksessa ei ole omaa lähetintä, vaan se vaatii erillisen kohteen valaisun. Passiiviset ohjukset hakeutuvat kohteen itsensä tuottamaan säteilyyn, esimerkiksi infrapunasäteilyyn tai tutkasäteilyyn.

Ilmataisteluhjuksen tehtävä on irrota laukaisupisteessä turvallisesti lavetista, lentää kohteelle ja tuhota tai lamauttaa se. Jotta tämä olisi mahdollista, seuraavien edellytysten tulee täyttyä:

- Ohjuksella on oltava riittävä nopeus maalin saavuttamiseksi
- Ohjuksen tulee kyetä liikehtimään lennon aikana siten, että törmäyskurssi maalin kanssa säilyy
- Ohjuksen tulee kyetä saavuttamaan riittävä tuhovaikutus kohteessa
- Ohjuksella tulee olla riittävä suorituskykyalue (etäisyys/korkeus), jolla se on tehokas
- Ohjuksen tulee olla laukaistavissa tarpeeksi nopeasti
- Ohjuksen ja sen komponenttien tulee olla turvallisia käsitellä, säilyttää ja käyttää. [77]

Ilmataisteluhjus voidaan sen rakenteen perusteella jakaa perinteisesti neljään osaan: hakeutumisosaan, ohjausosaan, moottoriin ja taistelukärkeen. Tämä on havainnollistettu kuvassa 3.



Kuva 3. Esimerkki tyypillisen aktiivisen ilmataisteluhjuksen pääosista [47]



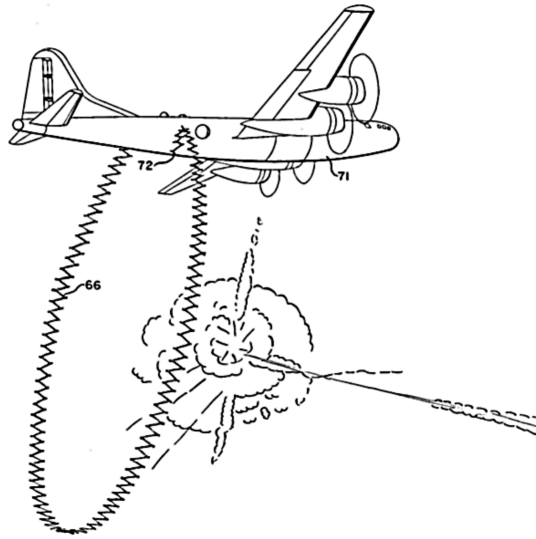
Hakeutumisosa mahdollistaa ohjuksen kohteen havaitsemisen ja siihen hakeutumisen. Se koostuu tyypillisesti akusta, elektroniikasta, inertiyksiköstä, vastaanottimesta ja, aktiivisen ohjuksen ollessa kyseessä, lähettimestä. Ilmataisteluohjusten akut ovat tyypillisesti lämpöakkuja, jotka käynnistyvät ohjuksen laukaisuhetkellä ja riittävät tuottamaan sähköä vain lyhyeksi (mutta ohjuksen hakeutumisen kestäväksi) ajaksi. Lämpöakkujen etuna on helppo varastoitavuus, pitkä hyllyikä ja välitön sähköntuotto. [44, s. 3] Tulevaisuudessa ohjusten elektronisen signaaliprosessoinnin kehittyessä ja sen vaatimusten kasvaessa ohjusten sähköntarve tulee kasvamaan, ellei ohjusten prosessorien hyötysuhdetta kyetä parantamaan samassa suhteessa.

Inertiyksikkö vastaa ohjuksen navigointilaskelmista sekä asento- ja paikkatiedon ylläpitämisestä. Lisäksi nykyaikaisissa ohjuksissa on usein datalinkki, jonka avulla ohjus vastaanottaa ohjauskomentoja (yksisuuntainen datalinkki) tai tämän lisäksi pystyy lähettämään ampuvalle koneelle tietoa tilastaan (kaksisuuntainen datalinkki). [47]

Ohjausosa vastaa ohjuksen lentoradan hallinnasta ja hakeutumisosalta tulleiden ohjauskomentojen toteuttamisesta. Ohjaus on tyypillisesti toteutettu mekaanisilla aerodynaamisilla aktuaattoreilla, mutta nykyään yhä useammin myös työntövoimankääntöohjauksella, jolla saavutetaan ohjaussiivekkeiden puuttuessa pienempi vastus ja parempi liikehtimiskyky. Ohjaamiseen tarvittavaa voimaa ei oteta ohjuksen akuilta, johtuen niiden pienestä kapasiteetistä. Ohjainpintojen tai suihkuvirtauksen poikkeuttamiseen vaadittava voima otetaan sen sijaan ohjuksen työntövoimasta tai kineettisestä energiasta generaattorilla. [16, s. 155].

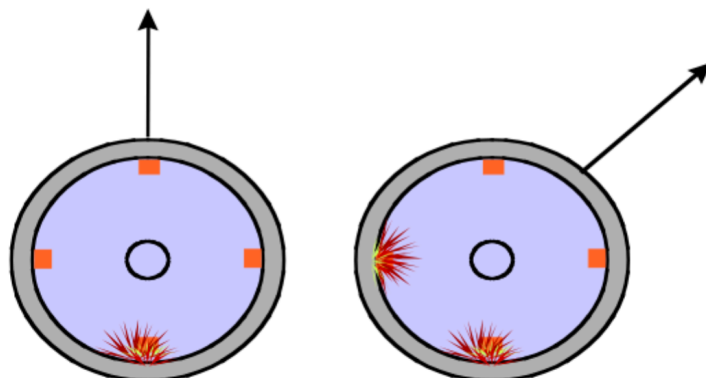
### 3.2 Taistelulataus

Ilmataisteluohjuksen taistelulataus on tyypillisesti n. 15 – 20 kg (pitkänkantaman ohjuksissa jopa 50 – 60 kg ) ja taistelukärki tyypiltään aksisymmetrinen fragmentoituva tai ns. jatkuvasauvainen (*continuous rod*). Ensin mainitussa taistelukärki pitää sisällään satoja pieniä metallikappaleita, jotka ohjuksen räjähtäessä leviävät hyvin suurella nopeudella lävistäen kohteen. Jälkimmäinen, eli jatkuvasauvainen taistelukärki puolestaan koostuu useista, päistään yhdistetyistä metallitangoista, jotka räjähtäessään muodostavat siksak-kuvion, joka toimii kohteen leikkaavana tasona (havainnollistettu kuvassa 4). [79; 83]



Kuva 4. Jatkuvasauvaisen taistelukärjen vaikutusperiaate [44]

Jatkuvasauvaisen taistelukärjen haittapuolena on se, että vain pieni osa taistelukärjen sisältämästä tuhopotentiaalista kohdistuu haluttuun kohteeseen. Kehittyneet sytyttimet, jotka aistivat kohteen läheisyyden lisäksi myös sen sijainnin suhteessa ohjukseen, ovat mahdollistaneet merkittävästi kasvaneen tuho vaikutuksen yhdessä suunnattavien taistelukärkien kanssa. Kuvassa 5 on esitetty asymmetrisesti syttyvän suunnattavan AI-taistelukärjen (*Asymmetric Initiated Warhead*) toimintaperiaate, joka on tyypillisin käytössä oleva ratkaisu ilmataisteluohjuksissa. AI-taistelukärjellä saadaan jatkuvasauvaisen taistelukärkeen verrattuna huomattavasti suurempi osa taistelulatauksen tuho vaikutuksesta kohdistettua maaliin. [78]



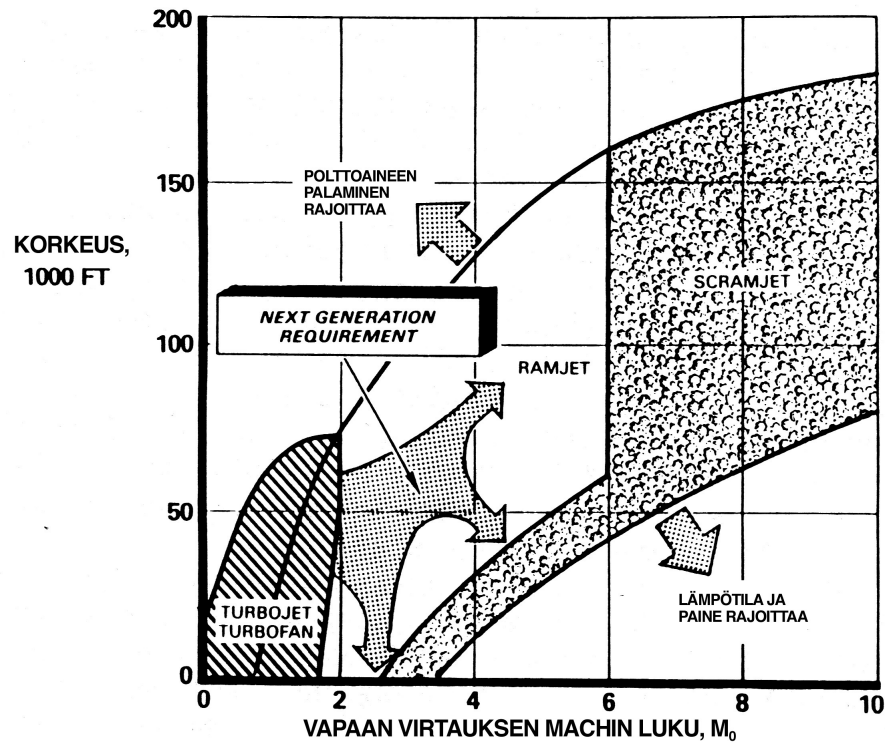
Kuva 5. Suunnattavan AI-taistelukärjen toimintaperiaate [78]

Sylinterimäisen taistelulatauksen lisäksi myös N-kulmaisten sylintereiden käyttöä taistelukärjissä on tutkittu. Neli- tai jopa yksisuuntaisen taistelulatauksen käytöllä saavutettaisiin merkittävä suorituskykyisiä verrattuna aksisymmetriseen taistelukärkeen. Ongelmaksi muodostuu taistelulatauksen tuho vaikutuksen kääntäminen oikeaan suuntaan tarpeeksi nopeasti ja luotettavasti. Ongelmaan ei ole esitetty käyttökelpoisia ratkaisuja, joten vaikka tällä teknologialla onkin suuri potentiaali, ei sitä todennäköisesti olla implementoimassa ilmataisteluohjuksiin ainakaan lähitulevaisuudessa. [78]

Tulevaisuuden ilmataisteluohjusten taistelukärkien lupaavin teknologinen kehitys liittyy muovautuvaan taistelukärkeen (*deformable warhead*). Muovautuvassa taistelukärjessä taistelulatauksen fragmentaatio sylinteri on ympäröity radiaalisesti sekundaariräjähteillä, jotka kykenevät epäsymmetrisellä räjäytyksellään muuttamaan fragmentaatiolatauksen poikkileikkausta ympyrästä kolmiomaiseksi. Tällä tavoin merkittävä osa sirpalevaikutuksesta saadaan kohdistettua kohti maalia (kolmion kyljen normaalin suuntaan) kapeana keilana, jonka leveyttä pystytään säätämään ja optimoimaan syyttimen suuntaresoluution mukaan. Muovautuvalla taistelukärjellä kyetään saavuttamaan 300 – 500% suurempi tuho vaikutus aksisymmetriseen taistelukärkeen verrattuna. [78; 79]

### 3.3 Propulsio

Ilmataisteluohjusten moottoreiden tehtävä on muuttaa ajoaineen kemiallinen energia työntövoimaksi, kiihdyttää ohjus sellaiseen nopeuteen (ja mahdollisesti ylläpitää tätä nopeutta), että se kykenee lentämään törmäyskurssilla maaliin. Taktisissa ohjuksissa käytettävät moottoriratkaisut on jaettavissa rakettimoottoreihin, jotka käyttävät kiinteätä tai nestemäistä ajoainetta tai näiden yhdistelmää (*hybridi*), ramjet- ja scramjet -moottoreihin, yhdistelmämoottoreihin (combined cycle), joihin lukeutuvat turboramjet, air turbo rocket ja ejector ramjet, sekä pulssidetonaatiomoottoreihin. [5, s. 5] Kuvassa 6 on esitettyä eri moottorityyppien käyttöalueita eri korkeus- ja nopeusalueilla.



Kuva 6. Eri moottorityyppien käyttöalueita [18, s. 132]

### 3.3.1 Ajoaineet

Ilmataisteluohjuksissa käytetään pääsääntöisesti kiinteää ajoainetta. Nestemäiseen ajoaineeseen verrattuna kiinteän ajoaineen etuna on hyvä varastoitavuus (se on kemiallisesti vakaa) ja suurempi tiheys. Haittapuolina kiinteässä ajoaineessa on kuitenkin pienempi ominaisimpulssi ja työntövoiman säätelyn vaikeus. Hybridirakettimoottoreissa käytetään kiinteää ajoainetta ja nestemäistä hapetinta. Tämän etuna saavutetaan työntövoiman säätely hapettimen virtausta säätämällä ja parempi käyttö- ja varastointiturvallisuus, koska hapetin ja ajoaine säilytetään erillään palotapahtumaan asti. [66]

Nestemäistä ajoainetta käyttävien raketimoottoreiden kehitys on keskittynyt tyypillisesti käytettävän, erittäin myrkyllisen ja reaktiivisen hydratsiinin korvaamiseen. Tästä saavutettavat edut liittyvät lähinnä varastoinnin ja käsittelyn turvallisuuden ja kustannusten alentumiseen, ei niinkään suorituskyvyn parantumiseen. Hydratsiinille vaihtoehtoisia ajoaineita ovat mm. korkeaenergiset ioninesteet ja vetyperoksidi, joka hydratsiinista poiketen ei ole hypergolinen, eli se ei syty spontaanisti sekoitessaan useimpien myrkyttömien ajoaineiden ja alkoholien kanssa. Hypergolisuudella saavutetaan raketimoottorissa hyvä käyttövarmuus, erityisesti jos työntövoimaa halutaan säädellä katkomalla palotapahtumaa, koska ajoaineen uudelleensyntyminen on lähes automaattista. [5, s. 17]

Kiinteiden ajoaineiden kehityksessä on pääasiallisesti keskitytty ohjuksen pakokaasujen minimoimiseen näkyvän valon alueella ja nanometallipartikkeleiden käyttöön kiinteän ajoaineen seassa. Mitä pienempi ohjuslaukaisun näköheräte on, sitä vaikeampaa vihollisen on havaita ohjuslaukaisu ja suorittaa oikea-aikaiset väistötoimenpiteet. Metallipartikkeleiden (pääsääntöisesti alumiinin) käyttö ajoaineen seassa kasvattaa ajoaineen palamislämpötilaa ja lisää työntövoimaa, mutta samalla lisää pakokaasujen määrää. Ultra- ja nanopartikkeleita käyttämällä voidaan pakokaasuhaittaa pienentää ja saavuttaa silti työntövoimahyöty. [5, s. 19]

Muut kiinteiden ajoaineiden kehitysaskleet liittyvät palotapahtuman parempaan ymmärtämiseen ja hallintaan virtaussimulaatioiden avulla, jolloin moottoreiden hyötysuhdetta ja toimintavarmuutta kyetään kasvattamaan. [5, s. 20]

Hybridiajoainetta käyttävissä moottoreissa yhtenä suurimpana haasteena on nestemäisen ja kiinteän ajoaineen sekoittumisen hitaus (pieni regressionopeus), joka rajoittaa saatavaa työntövoimaa. Hybridimoottorien kehitys onkin keskittynyt ajoaineen regressionopeuden kasvattamiseen, jolloin erityisesti tilavuudeltaan rajoittuneissa ilmataisteluojusten moottoreissa saadaan aikaiseksi suurempi työntövoima. [5, s. 20] Merkittävimmät keinot tämän ongelman ratkaisemiseksi liittyvät käytettävän ajoaineen valintaan, siihen lisättäviin lisäaineisiin (em. metallipartikkelit) ja ajoaineen rakeiden (*grain*) geometriaan ja/tai injektorin geometriaan. Näillä lähestymistavoilla ollaan saavutettu huomattavia edistysaskelia hybridimoottoreiden käytön järkevyydessä ilmataisteluojusten mahdollisena työntövoimalähteenä. [58]

### 3.3.2 Rakettimoottorit

Ilma-aluksissa käytettävät moottorit tuottavat työntövoimaa kiihdyttämällä kaasuvirtausta lentosuuntaan nähden vastakkaiseen suuntaan. Työntövoima on moottorista kaasuun kohdistuvaa kiihdyttävää voimaa vastaava reaktiovoima, ja se voidaan laskea virtaavan kaasun liikemäärän muutoksen avulla. Rakettimoottoriin ei virtaa kaasua sisään, joten liikemäärän muutos saadaan aikaan kiihdyttämällä ajoaineen ja hapettimen palamisessa muodostuva kaasu levosta mahdollisimman suureen nopeuteen. Sisäänvirtauksen liikemäärä on rakettimoottorissa nolla ja liikemäärän muutos on yhtä suuri kuin kaasun liikemäärä suuttimen ulosvirtausreunalla. [56; 57]

Ilmataisteluohjusten rakettimoottorit ovat olleet pääsääntöisesti yksivaiheisia, kiinteää ajoainetta käyttäviä moottoreita (SSSP, *Single Stage Solid Propellant*). Tämän lähestymistavan etuna on toimintavarmuus ja ohjuksen helppo varastoitavuus. Huonona puolena siinä on se, ettei ohjuksen työntövoimaa kyetä lennon aikana säätämään. Tällainen ohjus polttaa kaiken ajoaineensa lennon alkuvaiheessa kiihdyttäessään maksiminopeudelle, jonka jälkeen se liittää kohteelle jatkuvasti nopeuttaan menettäen. [5 s. 18]

Muuttuvatyöntövoimaisten rakettien työntövoimaa voidaan säädellä tarpeen mukaan lennon aikana. Tällöin tarpeen mukaan ohjus voi lentää lyhyen matkan erittäin nopeasti, tai erittäin pitkän matkan hitaammin, tehtävän vaatimusten mukaisesti. Työntövoiman säätely voidaan toteuttaa esimerkiksi käyttämällä muuttuvapinta-alaista pakoaukkoa, tai tietyssä määrin jopa useampivaiheisia rakettimoottoreita. Rakettityypit, jotka voivat säädellä työntövoimaa ovat tyypiltään pääsääntöisesti hybridejä, yhtä tai kahta eri ajoainetta käyttäviä, kaksi- tai monipulssimoottoreita, tai kiinteää ajoainetta käyttäviä rakettimoottoreita, joissa on edellä mainittu säädettävä pakopinta-ala. [5]

Nykyään yhä useammassa uudessa ilmataisteluohjuksessa käytetään kaksivaiheisia rakettimoottoreita, joissa ensimmäinen vaihe antaa ohjukselle alkukiihtyvyyden (*booster stage*) ja toinen vaihe (*coast/cruise stage*) ylläpitää ohjuksen nopeutta lennon aikana mahdollistaen mm. suuremman loppuhakeutumisen liikehtimiskyvyn ja sitä kautta suuremman osumatodennäköisyyden. [5, s. 20] Ensimmäisissä ilmataisteluohjusten kaksivaiherakettimoottoriratkaisuissa vaiheet seurasivat toisiaan välittömästi. Uudemmissa toteutuksissa on mahdollista käynnistää toinen vaihe milloin tahansa ensimmäisen jälkeen, jolloin ohjuksen nopeusprofiilia ja liikehtimiskykyä pystytään paremmin säätämään ja osumatodennäköisyyttä kasvattamaan. Tällöin lyhyen matkan torjunnoissa on mahdollista käyttää maksimityöntövoimaa, ja maksimikantaman torjunnoissa ylläpitää ohjuksen nopeutta pidemmän aikaa. [67].

Eräessä sotilasilmailuajakausi-julkaisussa on spekuloitu kaksoispulssimoottoreiden terminaalivaiheen suuremman nopeuden ja sen aiheuttaman suuremman liikehtimiskuormituskerran vaatimuksen aiheuttavan haasteita kohteeseen osumiselle [47, s. 58]. Tätä haastetta ei ole kuitenkaan yleisesti tunnistettu ongelmaksi alan kirjallisuudessa, ja uusien ilmataisteluohjusten yleisesti parantunut liikehtimiskyky riittänee kumoamaan lisääntyneen terminaalinopeuden mahdollisesti aiheuttamat haitalliset vaikutukset.

### 3.3.3 Ramjet- ja Scramjet-moottorit

Ramjet-moottori (suom. *patoputkimoottori*) on ilmaa hengittävä suihkumoottori, jossa ei ole aksiaalista kompressoria. Palamistapahtumassa tarvittavan ilman kompressio tapahtuu hyödyntämällä ohjuksen eteenpäin suuntautuvaa liikettä. Ramjet-moottorit ovat hyvin tehottomia aliaääninopeudella, joten ne tarvitsevat toisen työntövoimajärjestelmän yliaääninopeuden saavuttamiseksi. Paras hyötysuhde ramjetilla saavutetaan noin Machin luvulla 2,5 – 5. [82, s. 365]. Nopeuden kasvaessa ramjetin hyötysuhde aluksi kasvaa, kunnes kompression seurauksena kuumentuvan tuloilman lämpötila alkaa lähestyä pakokaasun lämpötilaa ja saatavissa oleva hyötysuhde pienenee. [82, s. 367]

Scramjet (*Supersonic Ramjet*) eli yliaäänipatoputkimoottori toimii muutoin kuten ramjet, mutta ilmavirtausta moottorin sisällä ei hidasteta sokkiaalloilla alisoonisiksi, vaan se pysyy koko ajan ylisoonisena. Scramjet-moottorilla on mahdollista saavuttaa hypersoonisia nopeuksia, mutta sen ongelmat ovat samat kuin ramjet-moottorilla: pääasiallisesti moottorin toimimattomuus aliaääninopeudella sekä lisäksi haasteet ajoaineen syöttämisessä yliaänivirtaukseen tehokkaasti. [82, s. 434]

Scramjet-moottorin toiminta on demonstroitu onnistuneesti muun muassa Yhdysvaltojen puolustusteknologian kehitysjärjestön, DARPA:n, X-51 Waverider -ohjelmassa, jossa scramjet-moottorilla varustettu ohjus saavutti suurimmillaan nopeuden Mach 5,1. [84] Ohjuksen hypersooninen nopeus aiheuttaa ohjuksen ulkopinnan erittäin voimakasta lämpenemistä, joka voi vaurioittaa ohjusta ja jopa hajottaa sen ilmassa. Ohjuksen jäähdytykseen käytetään X-51-ohjuksessa hypersoonisen palotapahtuman sivutuotteena syntyvää vettä, jota kierrätetään ohjuksen ilmanottoaukon ja sivuseinién sisällä, jolloin ohjuksen lämpötila pystytään pitämään tarpeeksi alhaisena. [84]

Tyypillisessä ramjet-moottorin ilmataisteluohjusimplementaatiossa on moottoriin integroitu rakettimoottori. Tämä toimii ohjuksen lennon alkuvaiheessa boosterirakettina kiihdyttäen ohjuksen yliaänipuolelle, minkä jälkeen ramjet-moottori alkaa toimia. Tällöin boosterivaihe joko lakkaa toimimasta, tai alkaa toimia kaasugeneraattorina ja syöttää ajoainerikasta mutta happivajaata ajoaineseosta ramjetin sisään virtaavaan ilmaan. [4]

Ramjet- ja scramjet-moottoreiden suuren nopeuden ja pitkän kantaman eräänä hieman yllättävänä etuna on niiden laukaisumahdollisuus kaukana maalista hitaasti lentävistä aselaveteista, kuten pommikoneista. Tyypillisesti ilmataisteluohjuksen ampuvan lavetin tarvitsee lentää lähi- tai ylisoonisella nopeudella, jotta ohjuksen kantama saadaan käyttökelpoisen suureksi. Ramjet- ja scramjet-moottoreilla varustetuilla ilmataisteluohjuksilla ei välttämättä ole tätä vaatimusta lavetille, kunhan ohjus saadaan ensin jollakin muulla keinolla kiihdytettyä lähisooniselle nopeusalueelle. [43]

Ramjet-moottorin käyttö ilmataisteluohjuksen työntövoimanlähteenä on herättänyt runsaasti valmistajien mielenkiintoa. Teknologian käyttö MDBA Meteor -ohjuksessa osoittaa, että ramjet-moottori on saavuttanut riittävän maturiteetin ja luotettavuuden käytettäväksi sarjavalmisteisessa ilmataisteluohjuksessa. Todennäköistä onkin, että ramjet-moottoreita tullaan lähitulevaisuudessa näkemään ilmataisteluohjuksissa enemmänkin.

### 3.3.4 Muut moottoritekniikat

Pulssidetonaatiomoottorit (*Pulse Detonation Engine*, PDE) toimintaperiaate perustuu toistuviin, hallittuihin detonaatioihin, eli räjähdysiin. Räjähdyksien eroaa deflagraatiosta (räjähdysenomaisesta palamisesta) ja normaalista palotapahtumasta (esim. polttomoottorit) sen merkittävästi suuremmalla räjähdysnopeudella ja kaasunmuodostuksella. Detonaatio on erittäin taloudellinen ja hyötysuhteeltaan hyvä keino ajoaineen sisältämän kemiallisen energian muuttamiseen lämmöksi. Detonaation moottoreissa hyödyntämisen haasteina ovat ilma-ajoaineseoksen riittävän nopea sekoittuminen suurissa nopeuksissa sekä detonaation pitäminen hallittuna. [38]

Verrattuna rakettimoottorin vakiopaineessa tapahtuvaan palotapahtumaan, detonaatiomoottorin käytännössä vakiotilavuudessa tapahtuva palo(räjähdys)tapahtuma on termodynaamiselta hyötysuhteeltaan lähes kaksinkertainen. Pulssidetonaatiomoottori mahdollistaa täten aiempaa kompaktimmat ja taloudellisemmat moottorit ilmataisteluohjuksiin. [38] Pulssidetonaatiomoottoreita tutkitaan laajalti, mutta käytännön sovelluksia ilmataisteluohjuksiin ei ole julkistettu.



Yhdistelmämoottorilla tarkoitetaan tässä yhteydessä moottoria, jossa yhdistetään useampia eri propulsioelementtejä yhteen moottoriin siten, että niiden toimintasyklit ovat vuorovaikutuksessa keskenään. Yhdistelmämoottori pyrkii hyödyntämään eri moottorityyppien vahvuudet ja minimoimaan niiden heikkoudet. Esimerkiksi turbojet-moottorilla on hyvä ominaisimpulssi pienellä nopeudella, ja ramjet-moottorilla taas suurella nopeudella. [5, s. 11]

Eri yhdistelmämoottorityyppjä ovat mm. *turboramjet*, *air turborocket* (ATR) sekä *ejector ramjet*. Turboramjet on yhdistelmä suihkumoottoria ja ramjet-moottoria, jossa siirtymä pelkästään ramjetin tuottamaan työntövoimaan tapahtuu tyypillisesti noin nopeudella Mach 3. ATR-moottori on käytännössä turbojetin, raketin ja ramjetin yhdistelmä. ATR:ssä turpiinia pyörittää erillinen kaasugeneraattori (raketti), jolloin suurillakaan nopeuksilla turpiinille sisäänmenevä ilma ei kuumene liikaa, toisin kuin perinteisessä turbojetissä. Suurilla, yli Mach 3 nopeuksilla, kompressorin pyörimisnopeutta täytyy rajoittaa, jolloin moottori toimii käytännössä ramjet-moottorina. ATR-moottorin tarvitsee noin 0,3 Machin nopeuden tuottaakseen työntövoimaa. Alustavien tutkimusten mukaan ATR:n hyötysuhde pysyy hyvänä 3 Machin nopeudelle asti, jonka jälkeen sen suorituskyky heikkenee olennaisesti. [5, s. 12; 5 s. 36]

Ejector ramjet on ilmaa hengittävä moottori, jossa on yksi tai useampi raketti sijoitettuna ennen palotilaa. Rakettien pakokaasujen energia kasvattaa palokammion painetta ja sitä kautta kasvattaa moottorin suoritusarvoja perinteiseen ramjet-moottoriin verrattuna. Ejector ramjetin suurin vahvuus on kyky tuottaa työntövoimaa myös aliääninopeudella, toisin kuin perinteinen ramjet. [5, s. 12]

### 3.4 Aerodynamiikka ja ohjausjärjestelmä

Suurin osa käytössä olevista ilmataisteluojuksista ovat muodoltaan sylinterimäisiä ja pituusakselinsa suhteen symmetrisiä. Ne sisältävät nostovoimaa tuottavia siivekkeitä ja ohjaussiivekkeitä symmetrisesti ohjuksen ympärille asennettuina. Ohjuksen runko toimii kantavana rakenteena kaikille sen osajärjestelmille, ja muodostaa käytännössä kaiken ohjuksen tarvitseman nostovoiman. [18, s. 11]

Siivekkeitä käytetään pääasiallisesti ohjuksen ohjaamiseen, ei nostovoiman tuottamiseen. Ohjaussiivekkeet asennetaan tyypillisesti krusiformimuotoon, joko painopisteeseen tai sen molemmille puolille. Painopisteen etupuolella olevat siivekkeet vähentävät ohjuksen stabiiliteettia ja lisäävät liikehtimiskykyä, mutta tämä lähestymistapa vaatii usein kookkaammat takasiivekkeet ohjuksen vakauttamiseen. Tästä syystä usein lyhyen kantaman lähitaisteluohjuksissa on siivekkeet edempänä kuin pitkän kantaman ohjuksissa. [17, s. 26]

Johtuen muun muassa ohjuksen valmistusvirheiden aiheuttamasta epäsymmetriasta, liikehtimisen synnyttämistä kallistusmomenteista sekä ilmakehän häiriöistä pyrkii ohjus pyörimään pituusakselinsa ympäri. Tätä pyrkimystä pyritään pienentämään ohjuksen asennetuilla kallistuksen vaimennusperäsimillä, *rolleroneilla*. Niiden toiminta perustuu ilmapirran vaikutuksesta pyöriviin hammastettuihin kiekkoihin, jotka toimivat hyrrinä ja pyrkivät vakauttamaan ohjuksen lennon. [17, s. 32]

Yhä useampi ohjus käyttää ohjaamiseen siivekkeiden lisäksi työntövoimaohjausta. Työntövoimaohjauksessa moottorin tuottamaa työntövoimaa käännetään sivuun ohjuksen lentolinjalta, jolloin ohjus saadaan kääntymään. Etuna saavutetaan hyvä liikehtimiskyky sekä mahdollisesti pienempi vastus matkalentovaiheessa. Haittapuolena työntövoimaohjauksessa on sen kyvyttömyys ohjata ohjusta moottorin ajoaineen loputtua, so. tyypillisesti loppuhakeutumisen aikana. [17, s. 31]

Symmetrisestä pyörähdyskappalemuotista eroavat merkittävästi ns. ducted rocket- ja waverider-ohjukset, joista esimerkkeinä ensimmäisestä ramjet-ohjus MBDA Meteor ja jälkimmäisestä X-51 Waverider -ohjus. Ramjet-moottori hyödyntää palamistapahtumaan ilmaa, joka johdetaan palokammioon Meteorin tapauksessa kahdesta ilmanottoaukosta, jotka sijaitsevat epäsymmetrisesti asennettuina ohjuksen alapinnalle. [4].

Waverider-ohjuksen toiminta eroaa perinteisestä ”lentävän rungon” ohjuksen toimintaperiaatteesta merkittävästi. Waverider-ohjuksen suunnittelu lähtee liikkeelle kiilamaisen kappaleen halutun ylisoonisen nopeuden sokkiaallon muodon laskemisella, jonka perusteella ohjuksen muoto suunnitellaan siten, että se on jatkuvasti kehittämänsä shokkiaallon takapuolella. Nimitys waverider, *aallolla ratsastaja*, tuleekin siitä, että ohjus käyttää nostovoiman tuottamiseen omaa shokkiaaltoaan ja sen takapuolelle muodostuvaa painetihentymää. Tällä lähestymistavalla saadaan minimoitua ohjuksen ylääänisokkivastus ja optimoitua suorituskyky tietyille Machin luvulle. Verrattuna perinteiseen ohjukseen, waverider-ohjuksella on mahdollista saavuttaa huomattavasti pienempi vastus, suurempi nostovoima sekä muita suotuisia interferenssivaikutuksia suurilla nopeuksilla. [18, s. 200]

Waverider-ohjusten ongelmana on niiden optimaalinen toiminta vain hyvin kapealla nopeusalueella ja toiminnan kannalta välttämättömien komponenttien, kuten moottorin ja elektroniikan, sijoittamisen aiheuttamat poikkeamat puhtaaseen aerodynaamiseen muotoon. Lisäksi suuret hypersooniset nopeudet aiheuttavat merkittäviä, käytännössä vielä ratkaisemattomia materiaalitekniisiä ongelmia, johtuen ohjuksen erittäin voimakkaasta aerodynaamisesta lämpenemisestä. [18, s. 203] Lähitulevaisuudessa materiaalitekniologian kehitys ja eksoottiset teräkset sekä nanomateriaalit mahdollistavat ohjuksille huomattavan suuret nopeudet, mutta näiden materiaalien verrattain korkea hinta tulee rajoittamaan niiden käyttöä massamaisesti tuotetuissa ilmataisteluohjuksissa.

### 3.5 Ohjausmenetelmä ja ohjautus

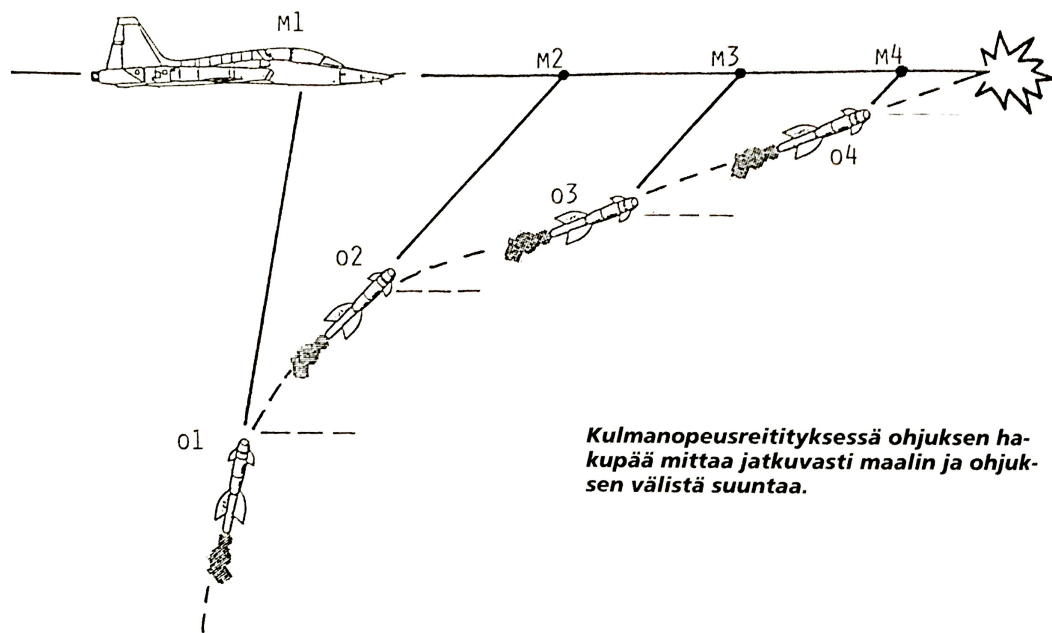
Ohjuksen ohjaamiseksi on käytössä kaksi ohjausmenetelmää, joista voidaan käyttää toista tai molempia. Nämä ovat sivuluisuohjaus (*Skid-to-Turn*, STT) ja kallistusohjaus (*Bank-to-Turn*, BTT). Pyörähdyssymmetrisen ohjuksen tapauksessa ohjuksella ei ole varsinaista ylä- tai alapuolta, vaan ohjus lentää kaikissa asennoissa ”oikein päin”. Tällöin helpoin ja tehokkain tapa kääntää ohjusta on yksinkertaisesti kääntää ohjuksen nopeusvektoria haluttuun suuntaan, käytännössä siis tuottaa sivuluisua hetkellisesti. Tätä kutsutaan sivuluisuohjaukseksi. [18, s. 11]

Pyörähdysakselinsa suhteen epäsymmetristen ohjusten tapauksessa käytetään yleensä ilma-alustenkin käyttämää kallistusohjausta. Esimerkiksi ramjet-moottoreiden häiriöttömän toiminnan vaatimuksina on usein ohjuksen melko kapean kohtauskulma-alueen ja mahdollisimman pienen sivuluisun säilyttäminen. [7] Sivuluisun välttämiseksi ohjusta ohjataan pyörittämällä ensin ohjuksen nostovoimavektori samaan tasoon halutun törmäyspisteen kanssa ja tämän jälkeen tuottamalla ohjukselle positiivinen kohtauskulma kääntämällä sitä poikittaisakselinsa suhteen. [18, s. 13]

Sivuluisuohjauksen etuna kallistusohjaukseen verrattuna on sen tarjoama nopeampi ohjausvaste ja sitä kautta parempi liikehtimiskyky. Kallistusohjauksella on hitaampi ohjausvaste, mutta se mahdollistaa ilmaa hengittävien moottoreiden vaatiman kapeamman lentoalueen säilyttämisen ja sitä kautta koko moottoriteknologian hyödyntämisen. [7] Meteor-ohjuksessa yhdistetään molemmat ohjaustavat, jolloin alkuhakeutumisen aikana käytetään kallistusohjausta, ja loppuhakeutumisen aikana nopeampaa sivuluisuohjausta liikehtimiskyvyn maksimoimiseksi. [36]

Ohjuksen ohjautukseen, eli navigointiin haluttuun kohteeseen on monia menetelmiä. Yksinkertaisin näistä on niin sanottu koirankäyräreitti, jossa ohjus pitää kohteen jatkuvasti suoraan edessään. Jos ohjuksen ja maalin nopeussuhde on yli yhden, osuu ohjus kohteeseensa. Menetelmän haittoina on epäoptimaalinen (pitkä) reitti törmäyspisteeseen ja huono toimivuus kohtilentäviä maaleja vastaan. [17, s. 34]

Kehittyneempi ohjautusmenetelmä on kulmanopeusreititys (*proportional navigation*). Kulmanopeusreitityksessä ohjus pyrkii pitämään ohjuksen nopeusvektorin ja maalin välisen tähtäyskulman vakiona. Kuvassa 7 havainnollistetaan kulmanopeusreitityksen toimintaperiaate. Kulmanopeusreititys on yleisin tällä käytössä olevista ilmataisteluohjusten ohjautusmenetelmistä [7; 17, s. 35]. Sen suurimpina ongelmia on ohjuksen ja maalin muuttuva nopeussuhde ja ohjuksen hakupään näkökentän mahdollinen ylittyminen. Ohjuksen ollessa suhteellisen hidas, tyypillisesti laukaisuvaiheessa ennen kiihdytystä tai lennon loppuvaiheessa (esimerkiksi laukaistaessa ohjus matalalta korkealla lentävään maaliin), ohjuksen vaatima ennakkokulma maalin kulman pitämiseksi vakiona on niin suuri, että maali ei pysy ohjuksen näkökentässä ja ohjus ei kykene hakeutumaan maaliin.



Kuva 7. Kulmanopeusreitityksen toimintaperiaate [17, s. 36]

Kulmanopeusreititystä parempia vaihtoehtoja on tutkittu viime vuosikymmenenä runsaasti. Nämä ovat tyypillisesti ohjukselta kohtuullista laskentatehoa vaativia optimointiprosesseja, joilla pyritään löytämään ohjuksen aerodynaaminen ja hakupään suorituskyky huomioiden paras mahdollinen reitti kohteelle. Eri lentoradoilla voidaan saavuttaa esimerkiksi joko mahdollisimman lyhyt lentoaika, mahdollisimman suuri energia törmäyshetkellä tai suurempi varmuus siitä, että ohjuksen hakupää kykenee säilyttämään maalin jatkuvasti näkökentässään. Näitä eri menetelmiä kutsutaan *trajectory shaping* -menetelmiksi. Joissain *trajectory shaping* -menetelmissä hyödynnetään neuraaliverkkoja ohjautuskäskyjen syntetisoimiseksi reaaliaikaisesti [22; 81]. Tulevista ohjuksista ainakin AIM-120D- ja I-Derby ER- ohjusten on ilmoitettu käyttävän yksinkertaisen kulmanopeusreitityksen sijaan kehittyneempiä ohjautusalgoritmeja [31; 32].

Todennäköistä on, että ohjusten elektroniikan laskentakapasiteetin kasvaessa suurin osa tulevista ohjuksista hyväksikäyttää kehittyneempiä ohjautusmenetelmiä. Maalaisjärjellä on pääteltävissä, että erilaiset *trajectory shaping* -menetelmät ovat merkittävässä asemassa optimaalisen hyödyn saamisessa ohjuksen mahdollisesti säädeltävästä työntövoimasta. Ohjausalgoritmin on tiedettävä, kuinka paljon työntövoimaa on käytössä, jotta se kykenee hyödyntämään sitä oikea-aikaisesti ja siten, että osumatodennäköisyys sen seurauksena kasvaa, eikä niin, että väärässä paikassa käytetty työntövoima saattaisi estää torjunnan kokonaan.

### 3.6 Hakupää

Ilmataisteluohjukset voivat hakeutua kohteeseensa aktiivisesti, puoliaktiivisesti tai passiivisesti. Passiivisessa hakeutumisessa ohjus ei itsessään lähetä mitään, vaan hakeutuu kohteen lähettämään emissioon, esimerkiksi lämpösäteilyyn (lämpöhakuinen ohjus) tai tutkasäteilyyn (ns. *anti-radiation*-ohjus). Puoliaktiivinen ohjus vaatii kolmannen osapuolen valaisemaan kohdetta aktiivisesti, jolloin ohjus hakeutuu kohteesta heijastuvaan säteilyyn. Aktiivisessa hakeutumisessa ohjukseen asennettu tutka valaisee maalia ja ohjus ohjautuu siitä heijastuvan kaiun perusteella. Joissakin aktiivisissa ohjuksissa on lisäksi mahdollisuus siirtyä passiiviseen hakeutumiseen, mikäli ohjus havaitsee sitä häiritsevän (ns. *home-on-jam*-moodi). [17, s. 40]

Useimmissa aktiivisissa ohjuksissa alkuhakeutuminen suoritetaan puoliaktiivisena hakeutumisena tai inertiasuunnistuksen avulla. Jälkimmäisessä tapauksessa ohjus hakeutuu ampuvalta lavetilta saamaansa ennakkopisteen koordinaatteihin, joita lavetti voi päivittää hakeutumisen aikana datalinkin välityksellä. Ohjus alkaa lähettää omalla tutkallaan vasta lähellä maalia, minkä hyvänä puolena on se, ettei ohjuksen omaa tutkaa voida häiritä elektronisesti kuin vasta hakeutumisen loppuvaiheessa. [17, s. 40] Jos aktiivinen tutkahakuinen ohjus on mahdollista lukita maaliin ennen ammuntaa, niin että sen tutka on aktiivinen koko hakeutumisen ajan, kutsutaan tätä *Lock-On-Before-Launch*-ominaisuudeksi (LOBL).

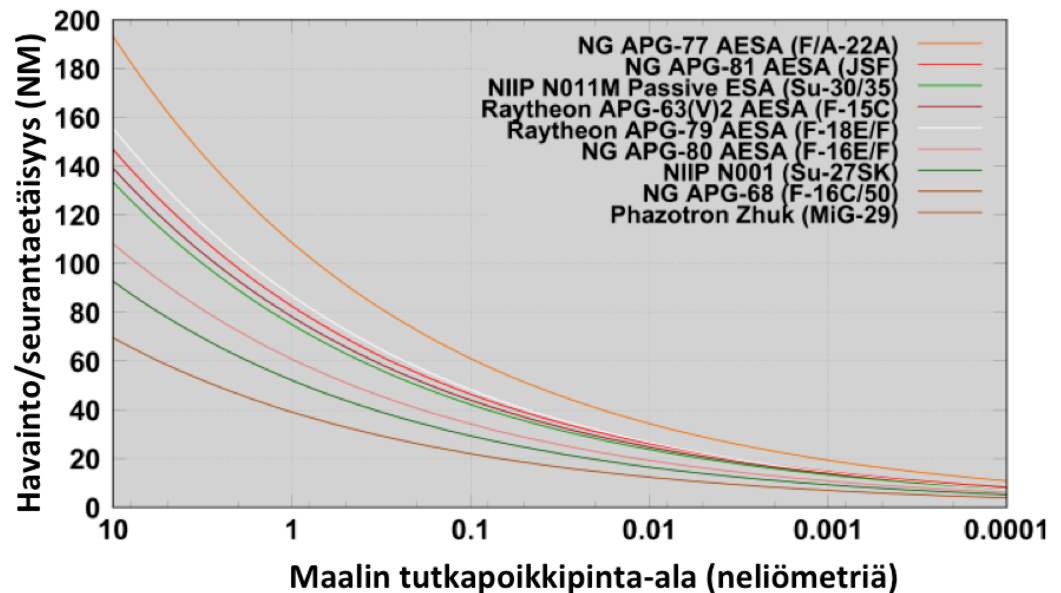
Aktiivisten ohjusten hakupäät ovat pääsääntöisesti tutkahakupäitä. Tutka on laite, joka lähettää sähkömagneettista säteilyä kapeana keilana kohteeseen ja vastaanottaa kohteesta heijastunutta säteilyä. Aktiivisen ilmataisteluohjuksen hakupään tutkat ovat tyypiltään seurantatutkia. Niiden tehtävänä on tuottaa maalin tarkka sijainti määrittämällä sen etäisyys, suunta ja nopeus. Maalinseurantatutkan vaatimuksena on maalin paikkatiedon ja nopeusvektorin määrittämisen lisäksi nopea maalitiedon päivittäminen. Tästä syystä maalinseurantatutkat toimivat valvontatutkia suuremmilla taajuuksilla, joilla saavutetaan hyvä nopeusresoluutio, suuri antennivahvistus sekä hyvän kulmaresoluution lisäksi käytettävän antennin pieni koko. [49] Perinteisesti ilmataisteluohjuksen hakupäissä käytetään monopolssitutkia ja mekaanisesti keilaavia tasoantenneja [8; 17, s. 40].

Mekaanisesti keilaavan antennin huonoina puolina on antennin hitausmomentista johtuvat rajoitukset keilan suuntaamisessa [49, s. 196]. Ilmataisteluohjuksen lähetteen aaltomuoto on yleensä pulssitettua ja sen pulssintoistotaajuus korkea tai keskikorkea. Ohjusten laskentatehon kasvaessa on otettu käyttöön myös pseudosatunnaisia aaltomuotoja, joilla saavutetaan parempi elektronisen häirinnän sietokyky. [8]

Ilma-alusten kehittyneiden omasuojajärjestelmien johdosta ilmataisteluohjuksen hakupäälle asetettavat vaatimukset ovat kasvaneet. Haluttuja ominaisuuksia ovat mm. pieni huipputeho ohjuksen pienemmän havaittavuuden ja energiankulutuksen takia, kehittyneet aaltomuodot häirinnänväistöön, toiminta laajalla aallonpituusalueella taajuusmuodon vaihtelun mahdollistamiseksi, pieni koko, kyky havaita häivemaaleja ja edullinen yksikköhinta. [3]

Mekaanisesti keilaava antenni on väistyvää teknologiaa. AESA-tutkassa on yhden lähetin-vastaanotinyksikön ja mekaanisesti keilaavan antennin sijaan antenniryhmä, jossa on useita itsenäisiä lähetin-vastaanotinyksiköitä. [41, s. 230] AESA-tutkassa antennikeilan suuntaa pystytään siirtämään vaiheohjauksella paikasta toiseen huomattavasti mekaanista pyyhkäisyä nopeammin ja keilan muotoa ja lähetettävää aaltomuotoa pystytään hallitsemaan huomattavasti perinteistä tutkaa tarkemmin ja monipuolisemmin [49, s. 197]. Suuren keilausnopeuden nopeuden lisäksi AESA-tutkalla on perinteiseen tutkaan verrattuna etuina havaintoetäisyyksien merkittävä kasvaminen, suuri luotettavuus ja viansieto, tutkapaikkipinta-alan ja keilan muodon hallinta sekä merkittävästi parantuneet häirinnänsieto-ominaisuudet. [8; 41, s. 230]

Kuvassa 8 on esimerkki eri hävittäjäutkien havaintoetäisyyksistä eri tutkapaikkipinta-alan (RCS, *Radar Cross Section*) maaleja vastaan. Vaikka tutkat eivät olekaan suoraan vertailukelpoisia toisiinsa, on kuvasta helppo havaita, että tyypillisen AESA-tutkan havaitsemisetäisyydet ovat perinteiseen mekaaniseen pulssitutkaan verrattuna yli kaksinkertaisia. Vertailun vuoksi julkisissa lähteissä F-35 JSF:n tutkapaikkipinta-alaksi on ilmoitettu  $n \cdot 0,002 \text{ m}^2$  ja F-22 Raptorin  $0,0004$  [68]. Neljännen sukupolven hävittäjän tutkapaikkipinta-ala on tyypillisesti alle  $5 \text{ m}^2$ :n luokkaa, kun taas suurten kuljetus- ja ilmatankkaus koneiden tutkapaikkipinta-alat saattavat olla jopa  $100 \text{ m}^2$ . [64]



Kuva 8. Eri tutkatyyppien teoreettisia suorituskykyeroja [45]

Tulevaisuudessa on mahdollista, että ilmataisteluohjuksissa nähdään kaksitoimintoisia hakupäitä (*dual mode seeker*), joissa voi olla yhdistettynä esim. tutka- ja kuvantava infrapunahakupää (IIR) [73] tai lasertutka- ja infrapuna-hakupäät. [10] Dual Mode -hakupäillä voidaan myös viitata aktiivisiin tutkaohjuksiin, joissa on perinteisen häirintäsignaaliin hakeutumislogiikan lisäksi erillinen passiivisesti säteilyyn hakeutuva hakupää [23] tai ohjuksin, joissa on erilliset puoliaktiiviset ja aktiiviset hakeutumislogiikat [34; 80].

Yhdysvaltalaiselle Raytheonille on vuonna 2010 myönnetty patentti IIR- ja tutkahakupäistä. Patentissa kuvantava infrapuna- ja tutkahakupää jakavat yhteisen optisen järjestelmän, jossa käytetään infrapunäsäteilyä läpäisemättömiä mutta tutkasäteilyä läpäiseviä jakolevyjä sisääntulevan signaalin jakamiseksi oikeille vastaanottimille. [73] Englantilaiselle BAe Systemsille puolestaan on vuonna 2005 myönnetty patentti yhdistetystä IIR- ja LIDAR -hakupäistä. Patentissa molemmat, sekä IIR- että LIDAR-hakupäät käyttävät yhteistä kuvatasoa, jolla saavutetaan yksinkertaisempi rakenne, pienempi koko ja vältytään kahden eri tason suuntaamisongelmilta. [10] Siitä, tullaanko näitä patenttiratkaisuja näkemään lähitulevaisuuden ilmataisteluohjuksissa, ei ole tietoa.

### 3.6.1 Yhdistetty hakupää ja sytytin

Tyypillisesti ilmataisteluohjuksissa hakupää ja sytytin ovat erillisiä komponentteja. Sytyttimiä on monia eri tyyppisiä, mm. laseriin tai tutkaan perustuva lähisytytin (*proximity fuse*) ja törmäyssytytin (*impact fuse*), jotka voivat toimia itsenäisesti tai yhdessä. [77, s. 150].



Uutena innovaationa sytyttimien ja hakupäiden saralla on hakupäähän integroitu sytytin, jolloin erilliselle sytyttimelle ei ole tarvetta ja ohjuksesta vapautuu tilaa esimerkiksi suuremmalle määrälle ajoainetta pidemmän kantaman mahdollistamiseksi. Vuonna 2008 USAF:n tutkimuslaboratorio pyysi useita asevalmistajia kehittämään ko. teknologiaa SITES-ohjelman alla (*Seeker Integrated Target Endgame Sensor*, vapaasti suomennettuna hakupäähän yhdistetty loppuhakeutumisen teknologia). Tästä syntyneitä teknologiaa oli tarkoitus hyödyntää Yhdysvaltojen NGM-ohjusohjelmassa (*Next Generation Missile*), josta oli tarkoitus syntyä seuraaja AMRAAM-ohjukselle. Ohjelma kuitenkin peruttiin mm. budjettisyistä 2010-luvun alkupuoliskolla. Ensimmäinen ohjus, jossa hakupäähän yhdistettyä sytytintä on mainostettu käytettävän, on vuonna 2015 julkistettu Israelilaisen Rafaelin keskipitkän kantaman I-Derby ER -tutkaohjus. [74]

### 3.7 Datalinkki

Eri datalinkkien ominaisuudet, niiden käyttämät teknologiat ja taajuusalueet yksityiskohtineen ovat ymmärrettävästi tiukasti varjeltuja teollisuus- ja sotasalaisuuksia. Tämä johtuu osaltaan tahdosta salata niiden todellinen suorituskyky ja toisaalta siitä, että järjestelmää on vaikeampi häiritä, jos sen tarkkoja toimintaparametreja ei tunneta. Tästä ja aiheeseen liittyvän julkisen lähdemateriaalin vähäisyydestä johtuen tässä tutkielmassa ei paneuduta datalinkkien teknisiin ominaisuuksiin tarkemmin, vaan tarkastelu pidetään yleisluonteisella toimintaperiaatetasolla.

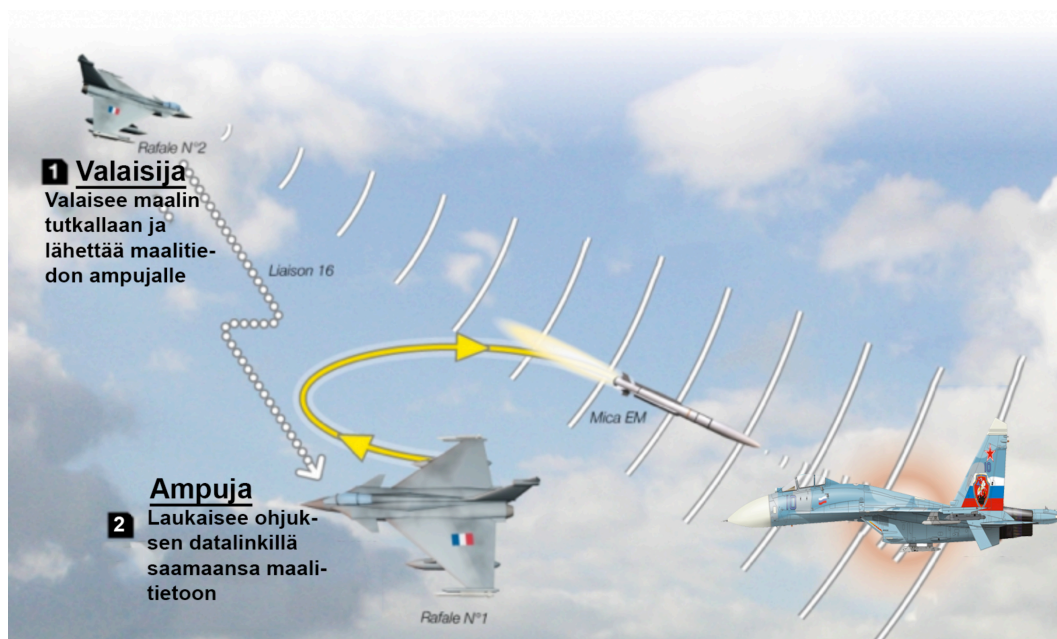
Kun ohjus laukaistaan kaukaa (etäisyydeltä, jolla sen oma sensori ei kykene vielä havaitsemaan maalia), ohjus hakeutuu aselavetin laskemaan ennakkopisteeseen inertia- tai satelliittiavusteisesti suunnistamalla. Jos ohjuksen lentoaika on pitkä ja maali liikehtii, ohjuksen käyttämä ennakkopiste on todennäköisesti väärä, eikä se kykene löytämään maalia. Tästä syystä lähes kaikissa keskipitkän- ja pitkän kantaman ohjuksissa on datalinkki.

Datalinkkiä, jossa ohjus pelkästään vastaanottaa tietoa lentonsa aikana, kutsutaan yksisuuntaiseksi datalinkiksi. Yksisuuntaisen datalinkin avulla ohjus kykenee vastaanottamaan sen laukaisseelta lavetilta päivitettyä maalitietoa, jolloin ennakkopistettä pystytään muuttamaan ja lisäämään ohjuksen ohjautumistodennäköisyyttä. Lisäksi yksisuuntaisen datalinkin avulla on mahdollista keskeyttää ohjuksen lento tai ohjata ohjus uuteen maaliin. [2] Myös tulevaisuuden lämpöhakuisiin ohjuksiin tullaan lisäämään datalinkkiominaisuus, joka mahdollistaa ohjuksen lukittumisen vasta laukaisun jälkeen. Tästä on hyötyä laukaistaessa ohjus tilanteessa, jossa sen sensorilla ei ole mahdollisuutta havaita kohdetta ennen laukaisua, kuten kaukaa tai aselavetin asekuilusta ammuttaessa. [61]

Kaksisuuntaisella datalinkillä ohjus kykenee lähettämään tietoa omasta tilastaan (mm. kinematiikka, ohjautuminen, mahdollinen lukittuminen) ampuvalle lavetille tai kolmannelle, kohdetta valaisevalle osapuolelle. Tällä saavutetaan taktista etua, koska ampuvan lavetin tilannetietoisuus kasvaa ja tämä kykenee tekemään päätöksen tarvittaessa uuden ohjuksen laukaisusta tai suunniteltua aikaisemmasta irtautumisesta ohjuksen itsensä lähettämän tiedon perusteella. Lisäksi ohjus on mahdollista uudelleenmaalittaa lennon aikana. [54]

Taktisesti mielenkiintoisin datalinkin käyttöperiaate liittyy tilanteisiin, joissa maalin valaisijana toimii joku muu kuin ampuva lavetti. Tällöin maali ei välttämättä saa varoitusta tätä kohtaan ammutusta ohjuksesta ennen kuin ohjus avaa tutkansa lähietäisyydellä. Tyypillisesti valaiseva kone lähettää maalitietoa lentokoneen datalinkin (esimerkiksi *Link-16*) avulla ampuvalle lavetille, joka lähettää maalitiedon ohjukselle ohjuksen datalinkkiä hyväksikäyttäen. Riippuen datalinkkien nopeudesta, kyseisestä menettelystä aiheutuu enemmän tai vähemmän viivettä tiedon välittymiselle, joka saattaa vaikuttaa ohjuksen osumatodennäköisyyteen. [12] Esitetyn kaltainen tilanne on havainnollistettu kuvassa 9.

Kaksisuuntaisen datalinkin käyttö mahdollistaa periaatteessa myös ohjuksen maalitiedon päivittämisen kolmannen osapuolen toimesta, jolloin edellä mainittu viive voitaisiin minimoida. Tällaista toiminnallisuutta ei kuitenkaan ole mainostettu ohjusvalmistajien julkisissa materiaaleissa, mutta on hyvin mahdollista, että tämän vuosikymmenen aikana käyttöön otetuissa tai -otettavissa ohjuksissa kyseinen ominaisuus löytyy.



Kuva 9. Datalinkin käyttöperiaate ammuntatilanteessa [4]

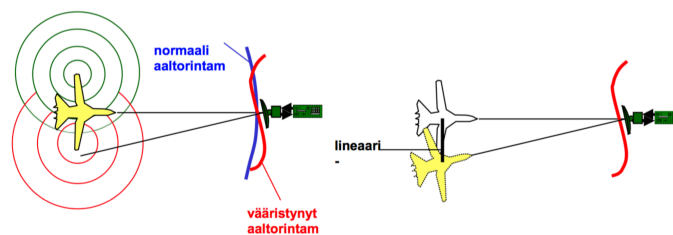
### 3.8 Elektronisen sodankäynnin ominaisuudet

Elektronisella sodankäynnillä (ELSO) tarkoitetaan sähkömagneettista säteilyä käyttävien järjestelmien tiedustelua, valvontaa, niihin vaikuttamista sekä näiden järjestelmien vaikutuksilta suojautumista. Sähkömagneettista spektriä käyttävät valvonta- ja asejärjestelmät eivät ole itsessään kuitenkaan osa elektronista sodankäyntiä. Kun sähkömagneettisen spektrin avulla pyritään edistämään tai haittaamaan näiden järjestelmien toimintaa, on kyse elektronisesta sodankäynnistä. Elektroninen sodankäynti jakautuu elektroniseen tukeen (ELTU), elektroniseen suojautumiseen (ELSU) ja elektroniseen vaikuttamiseen (ELVA). [49, s. 23]

Ilmataisteluohjuksen toiminta on voimakkaasti riippuvainen sähkömagneettisen spektrin käytöstä ja hallinnasta. Aktiivisen ilmataisteluohjuksen osalta tämä kulminoituu sensoriin (tutkaan) ja datalinkkiin. Ilmataisteluohjuksen maali, eli ilma-alus, pyrkii puolustautumaan ammuttua ohjusta vastaan joko päihittämällä ampuvan lavetin sensorin, ohjuksen sensorin tai viime kädessä päihittämällä ohjuksen kinematiikan väistöliikehännällä. Viimeistä kohtaa lukuun ottamatta vaikuttamiskeinot liittyvät pääasiallisesti sähkömagneettisen spektrin ominaisuuksien hyödyntämiseen ELSU- ja ELVA-menetelmin. Käytännössä keinot, joita maali käyttää, ovat ampuvan lavetin tai ohjuksen vastaanottimen elektroninen häirintä ja harhauttaminen sekä aktiivinen elektroninen suojautuminen omasuojaheitteitä käyttäen sekä ilma-aluksen häiveominaisuuksien hyödyntäminen. [49 s. 24] Näistä toimenpiteistä käytetään englanniksi termiä ECM, *Electronic Countermeasures*.

Ohjuksen toimenpiteet harhautusta ja häirintää vastaan ovat elektronisia puolustustoimenpiteitä, joista käytetään englanniksi termiä ECCM, *Electronic Counter-Countermeasures*. Keinot, joilla ohjus suorittaa elektronisia puolustustoimenpiteitä liittyvät pääasiallisesti antenniin ja lähettimeen. Antenniin liittyviä ELPU-keinoja on mm. etsintäavaruuden hallinta, keilanleveyden pienentäminen sekä adaptiiviset antennitasot. Lähetinpuolen keinoja ovat lähetystehon kasvattaminen sekä lähetystaajuuden ja aaltomuotojen hallinta. Lähetystehon kasvattaminen on ilmataisteluohjuksen tapauksessa vain rajallisesti mahdollista, huomioiden tutkan koko- ja teho vaatimukset. Aaltomuotoja ja lähetystaajuuksia monimutkaisella ja pseudosatunnaisella tavalla muokkaamalla on mahdollista väistää häirintää erittäin tehokkaasti, koska häirintälähetin joutuu jakamaan rajallisen häirintätehonsa laajemmalle kaistalle. [65]

Perinteisen aktiivisen ilmataisteluhjuksen mekaanisesti keilaava hakupää on monopolssitutka. Verrattuna kartiokeilaustutkaan se on verrattain vaikeasti häiritävissä. Suurimman uhkan ilmataisteluhjoksille elektronisen vaikuttamisen osalta muodostaa digitaaliset RF-muistihäirintälähettimet (DRFM, *Digital Radio Frequency Memory*), joiden käyttö on lisääntynyt merkittävästi teknologian kehittyessä, halventuessa ja pienentyessä. DRFM-häirintä perustuu saapuvan tutkasignaalin tallentamiseen ja lähettämiseen viivästettynä tai ns. cross-eye-menetelmällä (haritushäirintä) kahdesta eri lähteestä. Kuvassa 10 on havainnollistettu cross-eye-häirinnän toimintaperiaate. Häirinnän vaikutuksesta vastaanottimelle heijastuva aaltorintama ei ole enää kohtisuorassa maaliin nähden, mistä syystä vastaanotin laskee maalin paikan vääräksi. Cross-eye-häirintä on tehokasta erityisesti lyhyillä etäisyyksillä, toisin sanoen erityisesti ohjuksen loppuhakeutumisen aikana [49, s. 241]. DRFM-häirintälähettimiä on jo otettu käyttöön venäläisissä ja kiinalaisissa hävittäjissä, ja amerikkalaiset pitävätkin tällä hetkellä DRFM-häirintää erittäin vakavana uhkana ei-AESA-tutkalla varustetun AMRAAMin loppuhakeutumisen onnistumiselle. [53; 69]



Kuva 10. Cross-eye-häirintämenetelmän toimintaperiaate [49, s. 241]

Käytännössä monimutkaiset häirinnänväistö-, pulssinkoodaus ja taajuushallintamenetelmät vaativat kohtuullisen paljon signaaliprosessointikykyä ohjukselta. Antennikeilan tehokas hallinta ei käytännössä onnistu mekaanisesti keilaavalta tutkalta. Parhaat edellytykset tehokkaan häirinnänväistöön saavutetaan AESA-tutkalla, jossa pystytään sähköisesti hallitsemaan antennikuviota ja vaihtelevaan lähetystaajuutta yksittäisten pulssien sisälläkin. [8]

Tulevaisuudessa on mahdollista, että ilma-alusasenteisia laseraseita käytettäisiin alusten omasuojana ohjusten torjumiseksi. Ensimmäinen todennäköinen implementaatio liittyisi ohjuksen optisen hakupään sokaisuun laserilla. Myöhemmässä vaiheessa, jos lasereiden teho ja tarkkuus kehittyvät tarpeeksi, on mahdollista että koko ohjus voitaisiin tuhota kuumentamalla sen kriittiset järjestelmät käyttökelvottomiksi. [52] Ei ole kuitenkaan todennäköistä, että laser-omasuojajärjestelmiä tulisi ottaa käyttöön seuraavan 15 vuoden kuluessa.

## 4 NYKYISIÄ JA LÄHITULEVAISUUDEN ILMATAISTELUOHJUKSIA

Tutkimuksen tässä luvussa esitellään tärkeimmät tällä hetkellä käytössä olevat ja lähitulevaisuudessa käyttöön otettavat ilmataisteluohjukset. Ohjusten kartoittaminen tällä tavalla on hyvin perusteltua tutkimuksen kannalta, koska vain näin tehden voidaan luvussa 3 esitetyt erilaiset teknologiset ratkaisut ja lähitulevaisuuden innovaatiot sijoittaa järkevästi aikajanelle ja ymmärtää, mitkä näistä teknologioista ovat jo käytössä, mitkä ovat tulossa käyttöön lähitulevaisuudessa ja mitkä ovat vasta täysin kehitysasteella.

Tässä luvussa keskitytään uusimpiin ohjuksiin ja niiden mahdollisiin uusiin kehitysversioihin sekä julkistettuihin ohjuksiin, jotka eivät ole vielä päätyneet tuotantoon.

### 4.1 Ohjusten nimeäminen

Ohjusten nimeämiskäytäntö vaihtelee paljon eri maiden ja valmistajien välillä. Yhdysvaltojen asevoimien käyttämät ohjukset on nimetty heidän omalla nimeämiskäytännöllään, joka joissain tapauksissa eroaa valmistajan käyttämästä nimestä, jos valmistajamaa on joku muu kuin Yhdysvallat. Erityisesti kiinalaisten ja venäläisten ohjusten nimeämiskäytäntöihin liittyy paljon epäselvyyksiä ja paikoin ristiriitoja johtuen saman ohjuksen useista eri kehitysmalleista ja prototyypeistä sekä julkisen tiedon vähyydestä.

Tässä tutkimuksessa ohjusten nimeämisen osalta pyritään käyttämään valmistajan ohjukselle antamaa nimeä, ja jos mahdollista, myös ohjuksen NATO-luokittelun mukaista nimeä ja lempinimeä. Kuvassa 11 on esitelty Yhdysvaltojen asevoimien ja NATO-luokittelun mukaiset ohjusten nimeämistavat [1]. Huomattavaa on, että suurin osa Yhdysvaltojen ulkopuolella tämän vuosituhatosen aikana kehitetyistä ohjuksista ei välttämättä noudata kumpaakaan nimeämistapaa.



Kuva 11. Yhdysvaltojen käyttämä ohjusten nimeämistapa sekä NATO-luokittelun mukainen nimeämistapa.

## 4.2 Ohjusten kehityksen yleiskuva

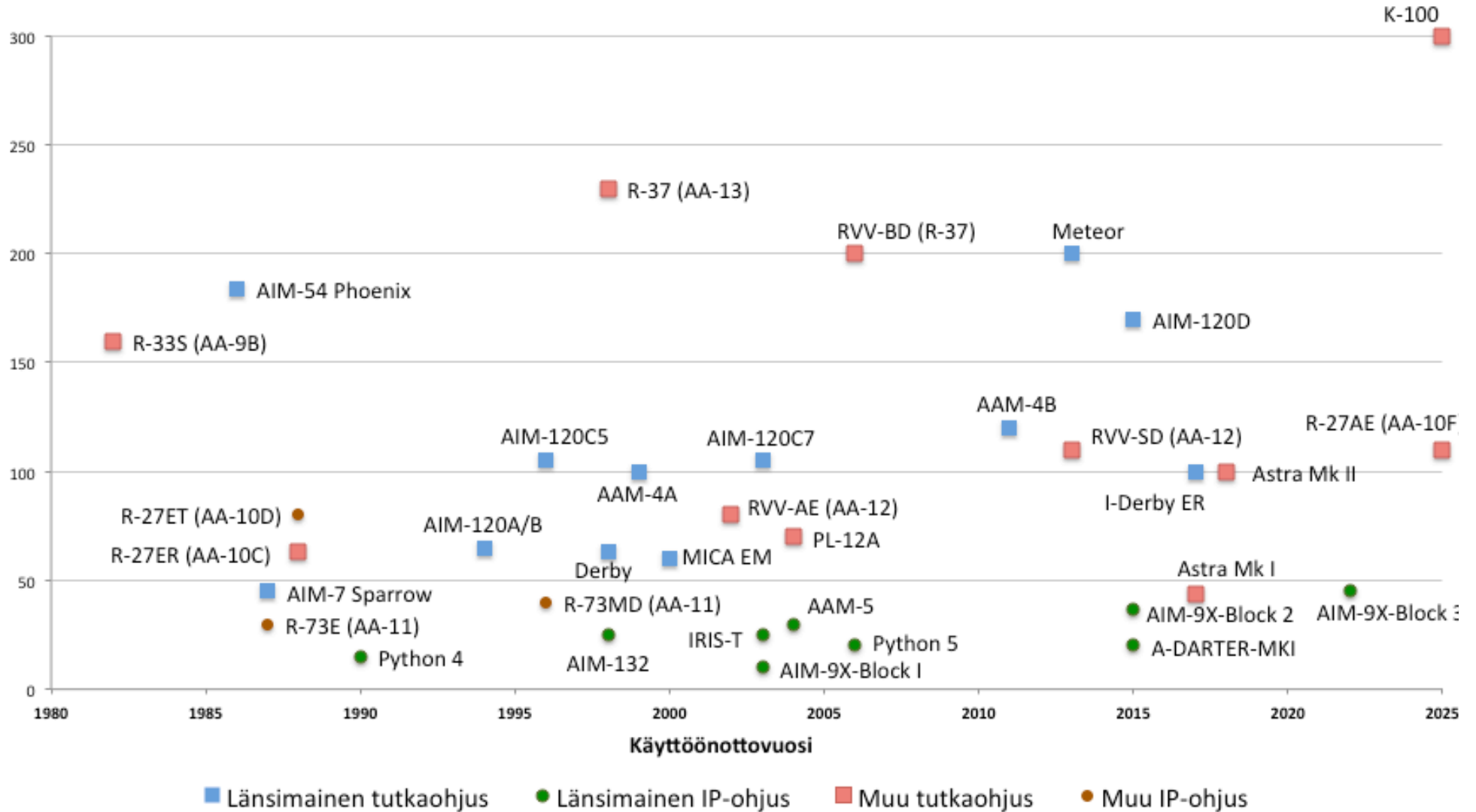
Kuvassa 12 on esitelty hajontakuvaajalla suurin osa 1985-vuodesta eteenpäin käyttöönotetuista ilmataisteluojuksista, niiden käyttöönottovuodet sekä ilmoitetut kantamat. Kuvaajan tarkoitus on antaa lukijalle perspektiiviä ilmataisteluojusten kehityksestä kantaman osalta. Kuvaajaan on sisällytetty tutkahakuisten ohjusten lisäksi myös lämpöhakuisia ohjuksia. Kuvaajan tiedot ovat peräisin tutkimukseen tehdystä taustatyöstä ja on koottu useasta eri lähteestä. Kuvaajassa vuoteen 2025 sijoitetuttujen ohjusten osalta ei ole varmuutta mahdollisesta tulevasta käyttöönottovuodesta. Näiden ohjusten osalta on myös mahdollista, että niiden kehitys ja tuotanto on lopetettu.

Kuvaajassa on huomionarvoista, että sen vasemmassa yläneljänneksessä sijaitsevat kylmän sodan aikaiset pitkän matkan (LRAAM) ohjukset R-33 (AA-9 Amos), R-37 (AA-13 Arrow) ja AIM-54 Phoenix eivät ole enää tuotannossa. Ne ovat mukana kuvaajassa lähinnä antamaan perspektiiviä ohjusten ohjustekniikan mahdollisuuksiin ja maksimikantamiin. R-37-ohjuksen vuoden 2006 evoluutiomalli RVV-BD sen sijaan on tuotannossa. AA-10/11/12 -perheiden ohjuksista ovat mukana uusimmat käytössä olevat ohjusversiot, joista vanhimmat on otettu käyttöön jo 1980-luvulla.

Jos unohdetaan edellä mainitut, tuotannosta poistuneet pitkän kantaman ohjukset, on havaittavissa trendi tutkahakuisten ilmataisteluojusten kantaman kasvusta 2000-luvulla. Ennen tätä suuri osa tutkaohjuksista sijoittui kantamaltaan 50 – 100 km väliin. Vuosituhannen vaihteen jälkeen huomattavan usean ohjuksen kantama on yli 100 km.

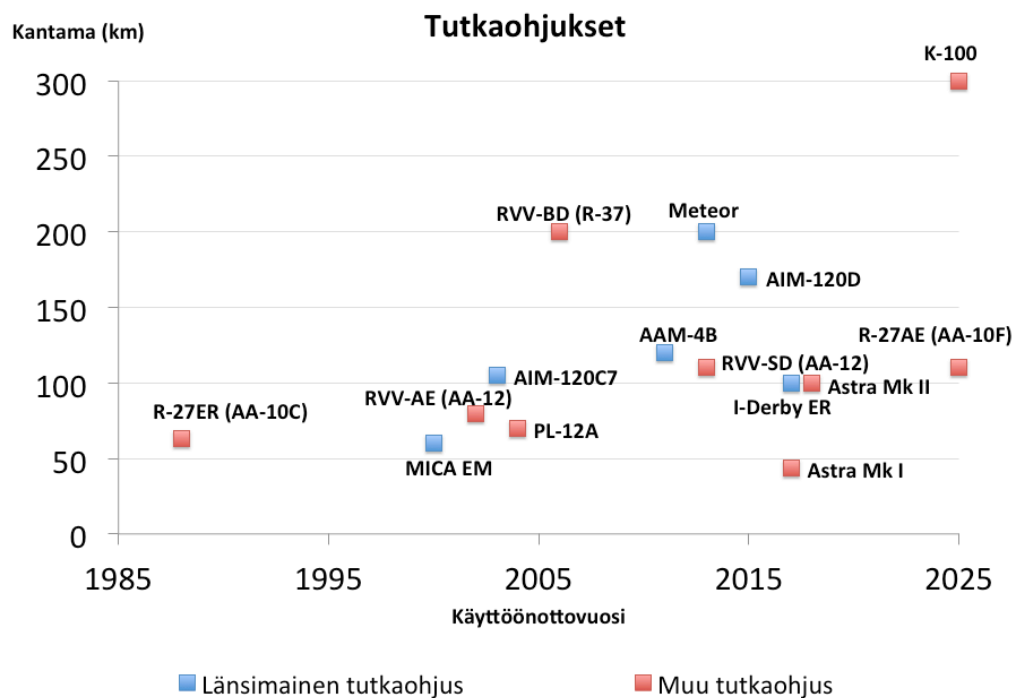
Kantama (km)

## Merkittävimmät ilmataisteluohjukset



Kuva 12. Nykyisin käytössä olevat ilmataisteluohjukset jaoteltuna niiden käyttöönottovuoden ja kantaman mukaan

Kuvassa 13 on tarkemmin kuvattu tutkimuksessa käsiteltävät tutkaohjukset. Kuvaajasta on havaittavissa länsimaisten tutkaohjusten osalta trendinä kasvava maksimikantama ( $R_{MAX}$ ). Suurin syy trendille löytyy MBDA Meteorin ja AIM-120D -ohjuksen muita länsiohjuksia merkittävästi pidemmistä kantamista. Tässäkin kuvaajassa K-100- ja R-27AE-ohjukset, joiden tilanteesta tuotannon ja kehityksen suhteen ei ole varmuutta, ovat sijoitettuina vuoteen 2025.



Kuva 13. Nykyaikaisia ja lähitulevaisuuden ilmataisteluohjuksia

### 4.3 Länsimaiset tutkaohjukset

#### 4.3.1 AAM-4B

AAM-4B on japanilaisen Mitsubishi-yhtiön kehittämä keskipitkän kantaman tutkahakuinen ilmataisteluohjus, joka tunnetaan myös nimellä Type 99. Ohjus on kehitetty korvaamaan Japanin ilma-itsepuolustusvoimilla aiemmin käytössä ollut AIM-7 Sparrow -ohjus. Ohjuksen moottorina on kiinteää ajoainetta käyttävä kaksoispulssirakettimoottori. B-mallin ohjuksen maksimikantamaksi on ilmoitettu 120 km. Lisäksi ohjuksessa on kaksisuuntainen datalinkki, joka mahdollistaa ohjuksen maalitiedon päivittämisen myös muusta kuin sen laukaisseesta koneesta. [34] Ohjus on tähän mennessä integroitu käyttöön Japanin F-2-hävittäjässä.



A-mallin ohjuksen hakupää oli perinteinen mekaanisesti keilaava tutkahakupää, mutta 2011 käyttöön otettu B-malli on maailman ensimmäinen palveluskäytössä oleva ohjus, jossa on elektronisesti keilaava AESA-tutka. [34] AESA-tutkalla ohjuksen on mahdollista löytää kohteensa aiempaa kauempaa, jolloin ampuva kone pystyy lopettamaan maalitiedon päivittämisen aiemmin ja pitämään suuremman etäisyyden viholliseen. [59]

Verrattuna esimerkiksi AIM-120-ohjuksiin, AAM-4B on poikkipinta-alaltaan noin neljänneksen suurempi ja painaa lähes kolmanneksen enemmän. Ohjus on suunniteltu tarkoituksella tyypillistä ilmataisteluohjusta suuremmaksi, jotta sitä voitaisiin mahdollisesti myöhemmin käyttää myös muita kohteita, kuten laivoja, vastaan. [34]

Ohjuksen kehitystyöstä alun perin vastannut japanilainen Teknisen tutkimuksen ja kehityksen keskus (TRDI) on 2000-luvulla tutkinut erilaisia moottoritekniologioita, kuten ramjetia ja muuttuvatyöntövoimaisia moottoreita, mutta näiden käytöstä mahdollisesti tulevaisuudessa ilmataisteluohjuksissa ei ole tietoa [34].

#### 4.3.2 AIM-120C-7 ja -120D AMRAAM

AIM-120 AMRAAM (*Advanced Medium-Range Air-to-Air Missile*) on yhdysvaltalaisen Raytheon Companyn valmistama tutkahakuinen keskipitkänmatkan ilmataisteluohjus. Ohjus on laajalti käytössä ja integroitavissa lähes kaikkiin länsimaisiin hävittäjiin. [31] Tällä hetkellä uusimmat palveluskäytössä olevat AMRAAM-perheen ohjusmallit ovat AIM-120C-7 ja AIM-120D.

AIM-120C-7 on C-sarjan AMRAAM-ohjusten viimeinen kehitysversio, joka on aiempia C-sarjan ohjuksia merkittävästi kehittyneempi. Ohjuksessa on päivitetty antenni ja vastaanotin, merkittävästi kehittynyt ELSO-kyky uuden signaalinkäsittelyelektroniikan ja ohjelmistossa käytettävän korkeamman abstraktiotason C++-ohjelmointikielen ansiosta. Lisäksi ohjuksen elektroniikan kokoa on kyetty pienentämään, jolloin ohjuksessa on vapautunut tilaa tuleville päivityksille. Merkittävin osa C7-version päivityksistä liittyy ELSO-kyvyn parantumiseen ja uusien uhkamallien torjuntaan. [11, s. 233]

AIM-120D-ohjus eroaa C-7-mallista pidemmällä kantamalla sekä uusilla ominaisuuksilla, kuten sisäisellä GPS:llä, kaksisuuntaisella datalinkillä ja päivitetyllä ohjelmistolla [62]. Virallisten tietojen mukaan D-mallin AMRAAMilla olisi jopa kaksi kertaa suurempi  $R_{MAX}$  kuin C-7-mallilla. Valmistajan mukaan D-mallissa ei kuitenkaan ole uutta moottoria, vaan kasvanut kantama saavutetaan uudella hakeutumisalgoritmillä ja paremmalla energianhallinnalla, johon GPS:n tuoma parantunut hakeutumisvaiheen navigointitarkkuus oletettavasti liittyy. Tutkijan oman arvion mukaan on hyvin mahdollista, että C-7-päivityksen pienentyneen elektroniikan tarjoama ylimääräinen tila on käytetty D-mallissa ajoineen määrän lisäämiseen, jolloin on saavutettu pidempi paloaika ja suurempi kantama. Jane'sin arvio D-mallin maksimikantamasta on 160 km, joka on merkittävästi (yli 50%) suurempi kuin C-7-ohjuksella, muttei kuitenkaan yhtä suuri kuin MBDA Meteorilla. [31]

AIM-120-ohjuksia käytetään myös NASAMS-ilmatorjuntaohjusjärjestelmässä. Tähän liittyen Raytheon on kehittämässä pidemmän kantaman AMRAAM-ER (*Extended Range*) -ohjusta, joka on suunniteltu varta vasten NASAMSille maasta ilmaan ammuttavaksi. Ohjuksessa on uusi moottori, joka on kehitysversio RIM-162 Evolved Sea Sparrow -ilmatorjuntaohjuksesta, joka taas on kehitetty keskipitkän matkan AIM-7 Sparrow -ilmataisteluohjuksesta. [63] Joissakin lähteissä on spekuloitu AMRAAM-ER-ohjuksen mahdollisesta saamisesta ilmalusikäyttöön tulevaisuudessa, mutta virallista tietoa asiasta ei ole. [31]

Erään lähteen mukaan Yhdysvaltojen laivaston tutkimuskeskus (*US Office Of Naval Research*) olisi vuonna 2008 tilannut Raytheonilta tutkimuksen muuttuvatyöntövoimaisen rakettimoottorin käyttämisestä AIM-7 Sparrow ja AIM-120 AMARAM -ohjusten voimanlähteenä. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, voisiko ko. moottorityypin avulla ohjuksen lentoparametreja hienosäätää eri tehtävätyyppien toteuttamiseksi. Tutkimuksesta ei ole kuulunut tämän jälkeen, mikä antaa viitteitä siitä, että toimivaa ratkaisua ei kyetty kehittämään. [33]

#### 4.3.3 I-Derby ER

I-Derby ER on Israelilaisen Rafaelin kehittämä aktiivinen keskipitkän kantaman tutkahakuinen ilmataisteluohjus, joka julkistettiin vuonna 2015. Ohjus on kehitetty Rafaelin aiemman, jo tuotannosta poistuneen Derby-ohjuksen pohjalta, joka taas oli käytännössä tutkahakupäällä varustettu versio saman yhtiön Python 4 -infrapunaohjuksesta. [74]

Ohjuksen voimanlähteenä toimii kaksivaiheinen rakettimoottori, jonka jälkimmäiseen vaiheeseen käynnistää ohjuksen autopilotti tilanteen mukaan, jolloin saavutetaan parempi loppuhakeutumisen liikehtimiskyky. Lisäksi lähisytytin on integroitu osaksi hakupäätä, josta vapautunut tila mahdollistaa suuremman ajoainemäärän. Ohjuksen kantamaksi valmistaja on ilmoittanut keskikorkeudessa transsoonisella nopeudella kohtilentävään maaliin 100 km. Rafael uskoo ohjuksen ”päihittävän AMRAAM C7 -ohjuksen sekä hinnassa että suorituskyvyssä, muttei kilpailevan Meteor-ohjuksen kanssa”. [74]

Merkittävä uusi ominaisuus ohjuksessa on ohjelmistotutka (*Software Defined Radar*, SDR). Verrattuna perinteiseen tutkaan, ohjelmistotutka mahdollistaa tutkan joustavan päivittämisen, jolloin uusia aaltomuotoja, pulssintoistotaajuuksia ja signaalinkäsittelymenetelmiä pystytään ottamaan tulevaisuudessa käyttöön joustavasti uusien uhkien ilmestyessä ilman tutkan komponenttien fyysistä päivittämistä. [13]

Ohjuksessa on lisäksi ainakin yksisuuntainen datalinkki, joka mahdollistaa ohjuksen maalitiedon päivittämisen lennon aikana. Ohjus on sekä LOAL- että LOBL-kykyinen, jolloin pystytään ampumaan lyhyiltä etäisyyksiltä valmiiksi maaliin lukittuneena ilman päivitystarvetta. [32]

#### 4.3.4 Meteor

Meteor on eurooppalaisen MBDA-yrityksen kehittämä ensimmäinen sarjatuotannossa oleva ramjet-moottorilla työntövoimansa kehittävä keskipitkän/pitkän kantaman ilmataisteluohjus, jonka toimitukset alkoivat vuonna 2013. Ohjus on fyysiseltä kooltaan AMRAAMIN kokoluokkaa, mutta painaa lähes 200 kg, eli melkein neljänneksen tätä enemmän. [36]

Ohjuksen ulkomuoto poikkeaa konventionaalisista, pituusakselin suhteen symmetrisistä ohjuksista merkittävästi. Ramjet-moottorin kaksi ilmanottoaukkoa ovat sijoitettuna asymmetrisesti ohjuksen alapuolelle. Ohjuksen kärkiosa sisältää aktiivisen tutkahakupään, inertiasuunnistusjärjestelmän sekä sähköjärjestelmän osat. Ohjuksen takaosassa sijaitsee ramjet-moottori ja booster-raketti. [36]

Bayern-Chemie-yhtiön kehittämä propulsioratkaisu toimii kaksipuolaisesti. Ohjuksen lennon alussa booster-raketti käyttää kaiken ajoaineensa ohjuksen kiihdyttämiseen noin kaksinkertaiseen äänennopeuteen. Tämän jälkeen ramjet-moottori, jonka palamistapahtuma tapahtuu rakettimoottorin ajoaineen vapauttamassa tilassa, alkaa toimia. Työntövoima on säädeltävissä lennon aikana, jolloin ohjus voi säästää energiaansa loppuhakeutumiseen. Toiminta-ajatuksena on, että ohjus käyttää kaiken ajoaineensa loppuhakeutumisen aikana, jolloin ohjuksesta saadaan mahdollisimman kevyt mahdollistamaan optimaalinen liikehtimiskyky. [36; 70]

Ohjuksessa on kaksisuuntainen datalinkki sekä LOAL- että LOBL-kyky. Ohjaus toteutetaan yhdistelmänä perinteisiä siivekkeitä ja työntövoimaohjausta. Johtuen ohjuksen epäsymmetrisestä muodosta, ohjus käyttää alkuhakeutumisvaiheessa lentokoneille tyypillistä kallistusohjausta, mutta loppuhakeutumisen aikana kykenee käyttämään nopeamman liikehtimisen mahdollistavaa sivuluisuohjausta. Tästä on etuna parempi reagointikyky maalin väistöliikkeisiin, jolloin osumatodennäköisyyttä saadaan kasvatettua. [36; 70]

Valmistajan mukaan Meteorin  $R_{MAX}$  kohtilentävää maalia vastaan on tilanteesta riippuen kolme tai jopa kuusi kertaa suurempi kuin perinteisen, yksivaiheisella rakettimoottorilla varustetun ilmataisteluhjuksen (kuten esimerkiksi AIM-120B). Meteorin  $R_{NE}$  (*Range No-Escape*), eli etäisyys, jolta ammuttuna maali ei voi liikehdinnällään paeta ohjusta, on kolme kertaa AIM-120B:n vastaavaa suurempi ja pakenevaa maalia vastaan jopa viisi kertaa suurempi. [36; 70] Eräänä esimerkkinä ohjuksen ylivertaisesta suorituskyvystä muihin käytössä oleviin ohjuksiin verrattuna valmistaja on kertonut anekdootinomaisesti ohjuksen osuvan kohteeseensa jopa tilanteessa, jossa ohjus ammutaan 80 km etäisyydeltä, vaikka maali samanaikaisesti kääntyisi pakoon ja kiihdyttäisi yläääninopeudelle. [36]

#### 4.3.5 MICA EM

MICA EM on myös Meteorin suunnitteleen MBDA-yrityksen valmistama MICA-ohjusperheeseen kuuluva tutkahakuinen ilmataisteluoetus. Ohjus on suunnittelultaan varsin konventionaalinen ja sisältää hyvin perinteisiä ratkaisuja. Yksivaiheinen rakettimeoottori mahdollistaa valmistajan mukaan n. 60 km maksimikantaman. Ohjus on fyysiseltä kooltaan Meteorin ja AMRAAMin pienempi (pituus 3,1 m vs. 3,7 m) ja painaa vain hieman yli 100 kg. Ohjuksessa on perinteinen aktiivinen tutkahakupää ja yksisuuntainen datalinkki. Ohjuksen ohjaus tapahtuu ohjaussiivekkeiden lisäksi työntövoiman suuntauksella, joka mahdollistaa tutkaohjukselle poikkeuksellisen hyvän liikehtimiskyvyn lähietäisyydellä käytävissä taisteluissa. [37]

Ohjukselta tekee erityisen se, että hakupäätä lukuun ottamatta ohjus on käytännössä identtinen MICA IR -infrapunaohjuksen kanssa. Tällä saavutetaan epäilemättä merkittäviä tuotannollisia ja taloudellisia hyötyjä, mutta ohjusten suorituskykyyn tästä ei ole merkittävää hyötyä, pois lukien aiemmin mainitun työntövoimaohjauksen sisällyttäminen myös tutkahakupää-malliin. [37]

### 4.4 Muut kuin länsimaiset tutkaohjukset

#### 4.4.1 ASTRA Mk I / II

Astra intialaisen DRDO:n (*Defence Research And Development Organisation*) 1980-luvulla käynnistämä aktiivinen tutkaohjushanke, jonka ensimmäisen vaiheen Astra Mk I -ohjus piti alun perin ottaa palveluskäyttöön vuonna 2013 Su-30MKI ja MiG-29-hävittäjissä. Vuoteen 2016 mennessä ohjusta ei ole vielä saatu palveluskäyttöön. Vuonna 2015 kuitenkin tiedotettiin jo ohjuksen seuraajan, Astra Mk II -ohjuksen kehittämisestä. Näillä näkymin Mk I -ohjus saadaan käyttöön 2017 ja Mk II vuonna 2018. [24; 75]

Mk I -ohjuksen suorituskyky on nykymittapuulla melko vaatimaton. Ohjus on kooltaan AMRAAMin luokkaa, ja sen voimanlähteenä on yksivaiheinen kiinteää ajoainetta käyttävä rakettimeoottori, jolla se saavuttaa 44 km kantaman. Ohjuksessa on kuitenkin aktiivinen hakupää ja LOBL-kyky. [24; 76] Astra Mk II -ohjus on suunniteltu aerodynaamisesti täysin uusiksi ja on Mk I -mallia pidempi. Siinä on kaksivaiheinen rakettimeoottori, jolla ohjus saavuttaa 100 km kantaman. [15; 24]

#### 4.4.2 PL-12A

PL-12A on ensimmäinen Kiinassa valmistettu aktiivinen tutkahakuinen ilmataisteluoitus, joka on myös nimellä SD-10A tunnettu. Ohjuksen kehitystyö alkoi vuonna 1985, ja palveluskäyttöön ohjuksen ensimmäinen versio päätyi vuonna 2005 Kiinan J-9-monitoimihävittäjässä. Ulkoisilta mitoiltaan ohjus on AMRAAMin kokoluokkaa, ja kantamaksi ilmoitetaan yli 70 km. Ohjuksessa on aktiivinen hakupää ja kaksivaiheinen rakettimoottori sekä yksisuuntainen datalinkki. Ohjuksen taistelulataus on 24 kg ja siinä on [23]

#### 4.4.3 R-27 (AA-10 Alamo) -ohjusperhe

Venäläisen Vympelin kehittämä R-27-ohjusperhe, NATO-nimeltään AA-10 Alamo, käsittää useita eri ohjuskalleja ja niiden kehitysversioita. Ensimmäisistä R-27-ohjuksista R-27E (AA-10A) oli varustettu puoliaktiivisella tutkahakupäällä ja R-27T (AA-10B) infrapunahakupäällä. Näiden kehitysversiot olivat R-27ER (AA-10C) ja R-27ET (AA-10D) vastaavasti, joissa ohjuksen kokoa ja ajoineen määrää oli kasvatettu ohjusten suorituskyvyn ja kantaman lisäämiseksi. Näiden lisäksi on olemassa R-27P (AA-10E) -ohjus, jossa on passiivinen tutkasäteilyyn hakeutuva hakupää. [26; 48] R-27ER on näistä viimeisin palveluskäyttöön otettu tutkahakuinen ohjus, jonka käyttöönotto tapahtui jo vuonna 1988. R-27ER:ssä on kaksoispulssirakettimoottori ja puoliaktiivinen hakupää, ja sen kantama on 63 km. [26; 72]

Uusin kehitysvaiheessa oleva tutkahakuinen R-27-perheen ohjus on R-27EA, jossa puoliaktiivinen hakupää on korvattu täysin aktiivisella hakupäällä ja ohjuksen kantamaa kasvatettu 110 kilometriin. Tämä on toteutettu todennäköisesti ajoineen määrää lisäämällä, sillä verrattuna R-27ER-ohjuksen R-27EA on 30 kiloa painavampi. [26; 48] Tarkkaa tietoa ohjuksen kehitysohjelman vaiheesta ei ole julkaistu. Jane'sin lähteiden mukaan on mahdollista, että R-27AE:n kehitys olisi lakkautettu kokonaan ja sen sijaan keskitytty jo alun perin aktiiviseksi tutkaohjukseksi suunnitellun AA-12 Adder -ohjuksen kehittämiseen vientimarkkinoille R-27EA-ohjukselle kehitettyä teknologiaa hyödyntäen. [29; 60]

#### 4.4.4 RVV-AE/SD (AA-12 Adder) -ohjusperhe

RVV-AE ja RVV-SD ovat venäläisen JSC Tactical Missile Corporationin kehittämää aktiivisia tutkaohjuksia, joiden kehitys perustuu aiempaan R-77-ohjuksen. Sekä RVV-AE/SD- että R-77-ohjuksia kutsutaan NATO-nimellä AA-12 Adder, mutta valmistaja itse on luopunut R-77-nimen käytöstä. [29] RVV-AE- ja RVV-SD-ohjukset ovat molemmat aktiivisella tutkahakupäällä varustettuja keskipitkänmatkan ilmataisteluoituksia. [15; 29; 48]

RVV-AE-ohjusta on myyty 2000-luvun alusta alkaen enimmäkseen Venäjän ulkopuolelle Sukhoi-hävittäjäkauppojen mukana, pääasiallisesti Intiaan ja Kiinaan [29]. SD-mallin ohjusta on toimitettu Venäjän ilmavoimille vuodesta 2012 alkaen. Sekä AE- että SD-mallin ohjuksissa on yksivaiheinen rakettimoottori, joka antaa ensimmäiselle 80 km ja jälkimmäiselle 110 km kantaman [15; 29; 60; 72]. SD-mallin suurempi kantama selittyy ohjuksen hieman kasvaneella koolla ja painonkasvulla, josta oletettavasti suurin osa johtuu lisätystä ajoaineen määrästä. SD-malliin on tehty myös aerodynaamisia parannuksia ja sen liikehtimiskyky on kasvanut 9G:stä 12G:hen. Tämän lisäksi ohjuksen hakeutumisalgoritmeja on parannettu. [29; 60]

Ohjus on mahdollista laukaista sekä LOAL- että LOBL-moodissa. Suuri osa ohjuksen teknologiasta on venäläistä alkuperää, mm. ohjausjärjestelmä, inertianavigointijärjestelmä sekä hakupää. [23; 46] Jane'sin lähteiden mukaan on mahdollista, että ohjuksessa on kaksitoiminen hakupää, jossa yhdistyy sekä aktiivinen että passiivinen tutkahakupää. [23] Venäjällä on mitä todennäköisimmin tutkittu Adder-ohjuksen kantaman kasvattamista käyttämällä siinä ramjet-moottoriteknologiaa. [23] Tuotantoon asti ei ole kuitenkaan päätyntä yksikään venäläinen ramjet-teknologiaa käyttävä ohjus.

#### 4.4.5 RVV-BD

RVV-BD on venäläisen Vympelin kansainvälisille markkinoille kehittämä pitkän kantaman ilmataisteluoohjus. Eri lähteissä liikkuu ristiriitaista tietoa siitä, onko ohjus kehitysversio R-33 Amos- vai R-37 Arrow -ohjuksesta. On myös mahdollista, että RVV-BD on molempien näiden teknologiaa hyödyntävä puhtaalta pöydältä suunniteltu ohjus. [25; 27; 28] Ohjus on ulkomitoiltaan suuri. Pituudeltaan se on hieman yli neljä metriä ja halkaisijaltaan 38 cm, joka on yli kaksinkertainen verrattuna AMRAAMiin. Ohjus painaa 510 kg, josta taistelulatauksen osuus on 60 kg. [28; 72]

Ohjuksessa on aktiivinen tutkahakupää, joka kykenee lukittumaan hävittäjäluokan maaliin 40 km etäisyydeltä. Ohjuksen työntövoiman lähteenä toimii kaksoispulssirakettimoottori, joka mahdollistaa ohjukselle 200 km maksimikantaman. [28]

#### 4.4.6 K-100

K-100, myös nimillä Izdeliye-172 ja KS-172 tunnettu ohjus, on venäläisen Novator NPO:n kehittämä pitkänkantaman tutkahakuinen ilmataisteluojus. Ohjus esiteltiin ensimmäisen kerran vuonna 1993, jonka jälkeen ohjukselta ei ole liikkunut paljoakaan tietoa julkisuudessa. Vuonna 2006 kerrottiin, että ohjuksen kehitystyö jatkuu edelleen ja sillä olisi mahdollista aseistaa Su-35BM-hävittäjä. Tällä hetkellä ei ole tietoa, onko ohjus palveluskäytössä Venäjällä vai onko sen kehitys ja käyttö lopetettu ja keskitytty ainoastaan RVV-BD-ohjuksen kehittämiseen. [25]

K-100-ohjukselta julkaistut spesifikaatiot lupaavat ohjukselle jopa 300 km kantaman. Näin suuri kantama on saavutettu tekemällä ohjukselta jopa RVV-BD:tä isompi. Sen pituus on 6 m ja paino 400 kg, josta taistelulatauksen osuus on 50kg. Ohjuksen moottorina on kaksivaiheinen raketimoottori, mutta toisin kuin RVV-BD:ssä sen hakupää on kuitenkin vain puoliaktiivinen. [25] Ohjuksen pitkästä kantamasta on vaikea saada kaikki hyöty irti, jos maalia pitää valaista koko ohjuksen lennon ajan. Tästä syystä onkin hyvin uskottavaa, että Venäjän ilmavoimat haluaa keskittyä K-100-ohjuksen sijaan teknisesti edistyneemmän RVV-BD-ohjuksen kehittämiseen.

#### 4.4.7 Yhteenveto tutkaohjuksista

Taulukoissa 1 ja 2 on koottu yhteen länsimaisten ja muiden tutkaohjusten ominaisuuksia näiden keskinäisen vertailun helpottamiseksi.

Taulukko 1. Länsimaiset tutkaohjukset

	AAM-4B	AIM-120C-7	AIM-120D	I-Derby ER	Meteor	MICA EM
Vuosi	2011	2003	2015	2017	2013	2000
Hakupää	AESA	Aktiivinen	Aktiivinen	Aktiivinen	Aktiivinen	Aktiivinen
Moottori	2-vaihe	?	?	2-vaihe	RAMJET	1-vaihe
Range (km)	120	105	170	100	200	60
Paino (kg)	222	151	152	118	190	112
Pituus (m)	3,7	3,7	3,7	3,62	3,7	3,1
Halkaisija (mm)	200	178	180	160	178	160
TST-lataus (kg)	?	20	20	23	?	12
Datalinkki	2-Way	1-Way	2-Way	1-Way	2-Way	1-Way
Thrust Vectoring	-	-	-	-	Kyllä	Kyllä
LOBL	On	-	-	On	On	On



Länsimaiset tutkaohjukset ovat hieman vanhempaa ja modulaariseksi sekä edulliseksi suunniteltua MICA EM -ohjusta lukuun ottamatta pääsääntöisesti fyysiseltä kooltaan melko homogeeninen joukko. Tämä on ymmärrettävää johtuen länsimaisen hävittäjäkaluston kohtuullisen suuresta heterogeenisyydestä. Ohjusten ollessa fyysisesti samaa kokoluokkaa on saavutettavissa etuja ohjusten sertifiointissa eri konetyypeille ja eri kantotavoille (esim. pyloneissa, siivenkärjissä, sisäisissä asekuiluissa).

Kaikissa julkistetuissa tulevilla länsimaalaisissa tutkaohjuksissa on perinteinen mekaanisesti keilaava tutkahakupää, pois lukien AAM-4B-ohjus, jossa on AESA-hakupää. Kaikille ohjuksille luvataan kantama 100 – 200 km välille, joka saavutetaan perinteisellä yksi- tai kaksivaiheisella, kiinteää ajoainetta käyttävällä rakettimoottorilla. Poikkeuksen tähän muodostaa Meteor-ohjus, joka saavuttaa ramjet-moottorillaan joukon pisimmän kantaman, 200 km. Ohjuksista vain AAM-4B:ssä, AIM-120D:ssä sekä Meteorissa on kaksisuuntainen datalinkki, muissa on yksisuuntainen. Työntövoimaohjausta ei käytetä kuin Meteorissa ja Mica EM -ohjuksissa. AMRAAM-ohjuksia (AIM-120C-7 ja -120D) lukuun ottamatta kaikilla ohjuksilla on LOBL-kyky.

Taulukko 2. Muut kuin länsimaiset tutkaohjukset

	ASTRA Mk I	ASTRA Mk II	PL-12	R-27ER	R-27AE	RVV-AE	RVV-SD	RVV-BD	K-100
Vuosi	2017	2018	2004	1988	-	2002	2012	2006	-
Hakupää	Aktiivinen	Aktiivinen	Aktiivinen	Semiakt.	Aktiivinen	Aktiivinen	Aktiivinen	Aktiivinen	Semiakt.
Moottori	1-vaihe	2-vaihe	2-vaihe	2-vaihe	2-vaihe	1-vaihe	1-vaihe	2-vaihe	2-vaihe
Range (km)	44	100	70	63	110	80	110	200	300
Paino (kg)	154	175	199	350	350	175	190	510	700
Pituus (m)	3,57	3,83	3,93	4,78	4,78	3,60	3,71	4,06	6,00
Halkaisija (mm)	178	178	203	230	260	200	200	380	400
TST-lataus (kg)	15	15	24	39	39	22,5	22,5	60	50
Datalinkki	1-Way	1-Way	1-Way	1-Way	1-Way	1-Way	1-Way	1-Way	1-Way
Thrust Vectoring	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LOBL	On	On	-	-	-	-	-	-	-

Muut kuin länsimaiset ohjukset ovat huomattavasti länsimaisia heterogeenisempi joukko. Vanhin vertailuun otettu ohjus on R-27ER (AA-10C) vuodelta 1988. Uusimmista ohjuksista ei ole vielä julkaistu tietoa niiden mahdollisesta käyttöönottoajankohdasta. Eri ohjukset edustavat huomattavan monen eri maan ja valmistajan näkemyksiä ja filosofioita ilmasodankäynnistä, siihen tarvittavista aseista ja näiden mahdollisista kohteista.

Ohjuksista Astra MkI ja MkII, PL-12 ja R-27-sarjan ohjukset sekä RVV-AE ja RVV-SD ovat selkeimpiä vastineita länsimaisille moderneille ilmataisteluohjuksille. Näistä vanhinta R-27ER-ohjusta lukuun ottamatta kaikissa ohjuksissa on aktiivinen tutkahakupää ja Astra Mk II- ja RVV-ohjukset pois lukien kaksivaiheinen kiinteää ajoainetta käyttävä rakettimoottori. Ohjusten kantama vaihtelee noin 50 kilometristä hieman yli 100 kilometriin. Huomattavaa on, että ainoastaan Astra-ohjuksissa on LOBL-kyky, eikä missään ohjuksessa käytetä työntövoimaohjausta. RVV-AE, leikkisää ”Amraamski”-lempinimeä kantava ohjus, yltää ominaisuuksiltaan lähelle modernia AMRAAMia, mutta jää useimmilla suorituskyvyn mittareilla hieman tätä heikommaksi. RVV-AE:n kehitysversio RVV-SD:ssä on 110 km kantama, mutta edelleen verrattain vanhahtavaa moottoriteknologiaa ja vain yksisuuntainen datalinkki.

Pitkänmatkan ohjukset RVV-BD ja K-100-puolestaan vastaavat ohjuksia, joita länsimailla ei ole ollut käytössä 1980-luvun AIM-54 Phoenixin jälkeen. Näille ohjuksille ominaista on massiivinen koko ja suuret taistelulataukset sekä kantamat, jotka yltyvät jopa 300 kilometriin. On todennäköistä, ettei näin suuria ohjuksia ole tarkoitettu liikehtimiskykyisten hävittäjien torjuntaan, vaan pikemminkin tuhoamaan kaukana vihollislinjojen takana lentävä kallisarvoisia kohteita, kuten ilmatankkaus- ja AWACS-taistelunjohtokoneita. Tankkereiden ja taistelunjohtokoneiden hidas nopeus ja huono liikehtimiskyky hävittäjiin verrattuna tekevät näistä haavoittuvia maaleja pitkän kantaman ohjuksille. Pitkän kantaman ohjukset, kuten RVV-BD ja K-100 ovat suuresta koostaan johtuen pienempiä ilmataisteluohjuksia heikommin liikehtiviä, mutta torjuttaessa käytännössä liikehtimiskyvyttömiä ja mahdollisesti olemattomalla omasuojalla varustettuja isoja kuljetuskoneluokan maaleja tämä ei välttämättä heikennä ohjusten osumatodennäköisyyttä pitkällä matkoilla merkittävästi.

Taulukossa 3 on kerätty yhteen kaikkien ohjusten tiedot. Taulukossa on laskettu ohjusten ominaisuuksien jakautuminen jaoteltuina ensin länsimaisiin ja muihin ohjuksiin ja lopuksi yhdistettynä. Ohjusten numeerisista arvoista on laskettu keskiarvo ja keskihajonta.

Taulukko 3. Yhteenveto nykyisistä ja lähitulevaisuuden ohjuksista

	Länsi	Muut	Yht
Lkm.	6	9	15
Puoliaktiivinen hakupää	0%	22%	13%
Aktiivinen hakupää (mek.)	83%	78%	80%
Aktiivinen hakupää (AESAs)	17%	0%	7%
Yksivaiheinen rakettimoottori	17%	33%	27%
Kaksivaiheinen rakettimoottori	33%	67%	53%
Ramjet-moottori	17%	0%	7%
Kantama (km)	126 ±51	120 ±81	123 ±68
Paino (kg)	158 ±42	311 ±188	234 ±164
Pituus (m)	3,6 ±0,2	4,3 ±0,8	3,9 ±0,7
Halkaisija (mm)	176 ±15	248 ±85	212 ±74
TST-lataus (kg)	19 ± 5	32 ±16	25 ±15
2-Way datalink	3	0	3
LOBL	4	2	6

Kun tehdään yhteenveto kaikista käsitellyistä ohjuksista, voidaan muodostaa rajallinen käsitys siitä, minkälainen on tyypillinen nykyaikainen tutkahakuinen ilmataisteluoitus. Tyypillisessä ohjuksessa on aktiivinen, tulevaisuudessa kenties yhä useammin AESA-tutkalla varustettu hakupää. Työntövoimaa tuottaa kaksivaiheinen rakettimoottori, jolla saavutetaan yli 100 km:n kantama. Ohjuksen ”taktisista mitoista”, kuten fyysisestä koosta ja painosta on mahdollista vetää huomattavasti rajallisempia johtopäätöksiä. Ohjukset on karkeasti jaettavissa ”normaalikokoisiin” ohjuksiin sekä suurikokoisiin ja painaviin pitkän kantaman ohjuksiin. Länsimaiset ohjukset ovat n. 160 kg painavia, AMRAAMin kokoluokkaa olevia 3,7 m pitkiä ja 18 cm:n halkaisijan ohjuksia. Muut kuin länsimaalaiset ”normaaliluokan” ohjukset ovat n. 40 kg painavampia ja hieman kookkaampia. Ylipäätään trendinä on havaittavissa suunnittelufilosofioiden ero: länsimaat panostavat pienempiin, mutta teknisesti edistyneisiin ohjuksiin ja muut maat kookkaampiin ja suuremman taistelulatauksen ohjuksiin, joiden suuremman taistelulatauksen tuoma kasvanut tuho vaikutus mahdollisesti pienentää osumatarkkuuden vaatimuksia. LOBL-kyky on yhä yleisempi ominaisuus, kuten myös ainakin länsimaisissa ohjuksissa kaksisuuntainen datalinkki.

#### 4.5 Tulevaisuuden ohjusten kehityssuuntia

2000-luvulla länsimailla on ollut käynnissä useita erillisiä ohjusten kehitysohjelmia. Näistä lähes kaikki on kuitenkin hyllytetty tai lakkautettu kokonaan budjettisyistä johtuen. Yksi merkittävä syy investointirahan vähyteen on F-35 JSF -hävittäjäprojektin ennakoitua merkittävästi suuremmat kehitys ja yksikkökustannukset, jotka ovat vaikuttaneet konetta valmistavien ja hankkivien valtioiden puolustusbudjetteihin huomattavasti. Tutkimalla ohjusten kehitysohjelmia, vaikka ne olisivatkin sittemmin lakkautettu, on saatavissa arvokasta tietoa siitä, minkälaisia ohjusteknologioita asevoimat ja asevalmistajat ovat kehittämässä ja minkälaisia kykyjä ollaan todennäköisimmin ottamassa käyttöön, ohjelmien hyllyttämisestä huolimatta.

NGM-ohjelma (*Next Generation Missile*), jonka alkuperäinen nimi oli JDRADM (*Joint Dual Role Air Dominance Missile*), oli vuonna 2008 käynnistetty Yhdysvaltojen ohjuskehitysohjelma, jonka tavoitteena oli luoda korvaaja AMRAAMille ja tutkasäteilyyn hakeutuvalla AGM-88 HARM (*High Speed Anti-Radiation Missile*) -tutkantuoja-ohjukselle. [74] Tavoitteena oli rakentaa viidennen sukupolven hävittäjille ohjus, joka pystyttäisiin laukaisemaan sekä ilmasta ilmaan- että ilmasta maahan -aseena. Kooltaan ohjus olisi ollut AMRAAMin kokoluokkaa ja tarpeeksi pieni, jotta sitä olisi voitu kantaa häivehävittäjien sisäisissä asekuiluissa. Ilmasta ilmaan -roolissa ohjuksen vaatimuksena oli hyvä liikehtimiskyky, ammuntamahdollisuus suurille kulmille asekselistä sivuun, aiempaa pidempi kantama näköetäisyyden ulkopuolella käytävään taisteluun ja kaksisuuntainen datalinkki. Ohjelma lakkautettiin kuitenkin vuonna 2012 perusteena se, ettei tekniikan maturiteetti ollut riittävä ohjelman toteuttamiseksi suunnitellusti sekä Yhdysvaltojen ilmavoimien ”muut, korkeammat prioriteetit”, jotka käytännössä liittyivät F-35-hävittäjän kehitykseen. [35]

Ennen NGM/JDRADM-ohjelmia tutkittiin myös alustavasti mahdollisuutta yhdistää tutkahakupäällä varustetun AMRAAMin ja lämpöhakuisen AIM-9X Sidewinder - lähitaisteluohjuksen BVR- ja WVR-kyvyt yhteen ohjukseen osana DRAAM-ohjelmaa (*Dual Role Air to Air Missile*). Tämä ohjelma ei kuitenkaan edennyt alkua pidemmälle, koska USAF halusi keskittyä ennemmin AIM-9X Block II -ohjuksen kehittämiseen muun muassa kasvattamalla sen kantamaa ja lisäämällä siihen datalinkkiominaisuuden. Samaan aikaan AMRAAMin kehitystä jatkettiin julkistamalla aiempaa merkittävästi pidemmälle kantava D-malli. [35]

T3-ohjelma (*Triple Target Terminator*) on Yhdysvaltalaisen DARPA:n teknologiankehityshanke, joka käynnistettiin samoihin aikoihin NGM-ohjelman kanssa. T3:n tarkoitus on tuottaa nopea pitkänkantaman monitoimiohjus ilma-aluksia, risteilyohjuksia ja maamaaleja vastaan käytettäväksi. [35] Ohjuksessa tulee todennäköisesti olemaan monitoimihakupää, kaksisuuntainen datalinkki, kehittyneet häirinnänväistöominaisuudet ja monitoimitaistelulataus, joka pystyy tuhoamaan sekä ilma- että maamaaleja. [9] DARPA on solminut T3-ohjelmaan liittyen kehityssopimukset sekä Boeingin että Raytheonin kanssa. Näistä ainakin Boeingin ohjelma on edennyt koeammuntoihin asti, joista yhtiön edustaja totesi vuonna 2015 heidän ohjuksensa lentäneen ”AMRAAMia nopeammin ja pidemmälle”. [71]

Yksi merkittävä trendi tulevaisuudessa on halpojen miehittämättömien ilma-alusten ja taisteluilma-alusten määrän lisääntyminen. Näitä ilma-aluksia on verrattain helppo tuottaa taistelukentälle hävittäjiin verrattuna suurina lukumäärinä, ja niiden hinta voi olla huomattavasti edullisempi kuin hävittäjien. Miehittämättömien ilma-alusten torjuminen huippukehittyneillä ilmataisteluohjuksilla ei välttämättä ole taloudellisesti järkevää. [41, s. 236]. Tästä syystä on olemassa tarve kehittää erityisesti näiden torjuntaan suunniteltuja edullisia ilmataisteluohjuksia, joita voidaan ampua suuria määriä.

Uusin julkistettu länsimainen ilmataisteluohjusten kehitysohjelma on US Air Force Research Laboratoryn vuonna 2016 Raytheon Missile Systemsille myöntämä SACM-ohjelma (*Small Advanced Capability Missile*). SACM:n tarkoituksena on tuottaa ohjus, joka on halpa, tappava pieni ja kevyt. Tavoitteeseen pääsemiseksi ohjukselta vaaditaan kehittyntä muotoilua, korkean impulssin työntövoimaa, laajan näkökentän hakupää sekä ”suunnattavaa kineettistä ja ei kineettistä vaikutuskykyä”. Ohjusta on tarkoitus tuottaa ja kantaa laveteissa massamaisesti. Ohjusohjelma toimiikin vastapainona suurimmalle osalle nykyisistä ilmataisteluohjuksista, jotka ovat hyvin monimutkaisia ja kalliita. [21; 42]

Vahvistamattomien huhujen mukaan Raytheon olisi jo vuonna 1991 testannut ramjet-moottorilla varustettua AMRAAMin versiota, mutta yritys kiistää tämän. [31] Tutkimusta VFDR-moottorien (*Variable Flow Ducted Rocket*) käytöstä ilmataisteluohjuksissa on tehty 2000-luvulla, mutta tarkempia tuloksia tai mahdollisia implementaatiota ei ole julkistettu. [31]

Edellä mainittujen ohjelmien ja ohjusten kehitysversioiden lisäksi myös muut kuin länsimaat ovat julkistaneet erinäisiä ohjusohjelmia, joiden nykytilasta ei kuitenkaan ole varmaa tietoa. Etelä-Amerikkalaisen Denel Dynamicsin kerrotaan kehittävän tuotannosta poistuneen R-Darter-tutkaohjuksen kehitysversiota, jossa olisi ramjet-moottori ja yli 100km kantama. [30] Lähteiden vähyyden perusteella on pääteltävissä, ettei ohjusta ainakaan aivan lähitulevaisuudessa olla ottamassa käyttöön.

Vuonna 2015 Kiina julkisti uuden PL-15-”ilmaherruusohjuksen”, jolla on tarkoitus aseistaa ainakin Kiinan viidennen sukupolven J-20-hävittäjä. PL-15 on suora seuraaja olemassa olevalle PL-12A-ohjukselle. Ohjuksella on tarkoitus saavuttaa noin 150 – 200 km kantama. Ohjuksessa on oletettavasti AESA-hakupää, kehittynyt signaaliprosessointikyky sekä hyvät häirinnänväistöominaisuudet. [51]

## 5 ILMATAISTELUOHJUKSEN SUORITUSKYVYN TARKASTELU

### 5.1 Ohjusten suorituskyvyn mittaaminen

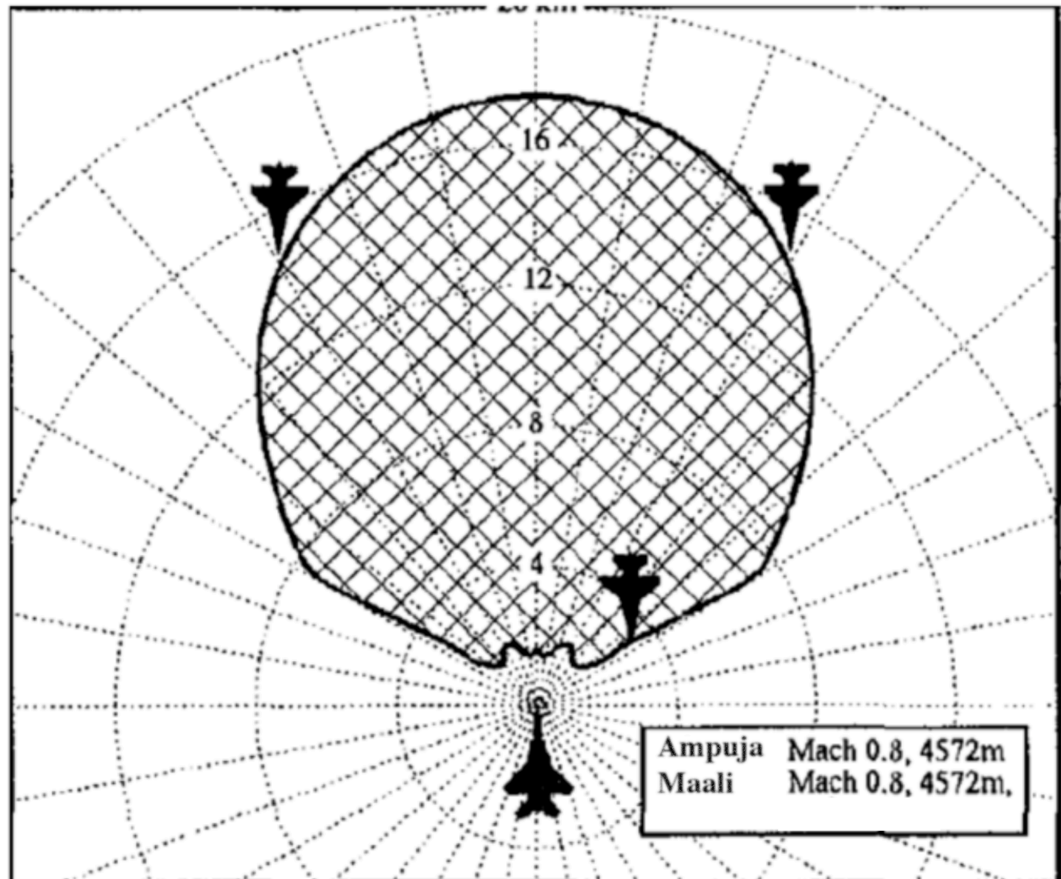
Ohjusten suorituskykyä voidaan tarkastella useilla eri mittareilla. Ohjuksella, joka on aerodynaamisesti puhdas, jossa on tehokas moottori sekä paljon ajoainetta, saavutetaan todennäköisesti suuri maksimikantama. Jos maali kuitenkin sijaitsee merkittävästi maksimikantamaa lähempänä ja liikehtii voimakkaasti, joutuu ohjus jatkuvasti muuttamaan ennakkopistettään. Tällöin kauas suoraviivaisesti lentämään optimoitu ohjus menettää energiaansa todennäköisesti enemmän kuin liikehtimiskykyiseksi luotu lyhyemmän kantaman lähi-ilmataisteluohjus.

Liikehtimiskykyiselle ohjukselle suotavia ominaisuuksia ovat puolestaan mahdollisimman aerodynaaminen muoto ja pieni massa. Tällöin kuitenkin taistelulatauksen määrää joudutaan mahdollisesti rajoittamaan, jolloin on riski, ettei yksi ohjus riitä tuhoamaan suurikokoista tai hyvin suojattua kohdetta. Pienen taistelulatauksen kompensoimiseksi ohjuksen tulee päästä lähemmäs maalia, sen syytin tulee optimoida toimimaan maalin heikkoja kohtia vastaan ja taistelulatauksen tuhovoimaa per räjähdysainemassayksikkö täytyy kasvattaa jollain keinolla ja niin edelleen.

Edellä kuvattu dilemma on vain yksi yleisluontoinen esimerkki ilmataisteluohjuksen eri ratkaisuiden ja osajärjestelmien yhteistoiminnasta ja suunnittelukompromisseista. Sen tarkoituksena on havainnollistaa, miten koko ohjuksen suorituskyky on sen eri osa-alueiden suorituskyvyn summa. Se myös tarkoittaa sitä, että ohjuksen tuhovoiman yleisluontoinen analyttinen ja objektiivinen tarkastelu on hyvin haastavaa dynaamisissa ilmataistelutilanteissa, joissa tunnettujen sekä tuntemattomien muuttujien määrä on suuri.

Paras yksittäinen määre, joka kuvaa ohjuksen suorituskykyä on ohjuksen  $P_K$ , eli tuhoamistodennäköisyys.  $P_K$  on kuitenkin hyvin vaihteleva muuttuja ja erittäin tilannesidonainen. Tietty  $P_K$  saavutetaan tietyissä olosuhteissa, tietyillä ohjuksen laukaisuparametreilla tietyissä olosuhteissa toimivaan maalin. Ohjuksen valmistaja on käytännössä ainoa taho, jolla on riittävän tarkka tieto ohjuksen suorituskyvystä ja joka pystyy laskemaan ohjukselle laukaisualueet, joilta ammuttuna ohjuksella saavutetaan haluttu, riittävän suuri  $P_K$ .

Näitä laukaisualueita kutsutaan sekä nimellä LAR (*Launch Acceptable Region*, hyväksyttävä laukaisualue) sekä WEZ (*Weapon Engagement Zone*, aseiden käyttöalue). Usein LAR:t ja WEZ:t julkaistaan kuvan 14 mukaisina kuvina eri korkeus- ja nopeusalueille sekä maalin eri lentosuunnille ja sijaintiin suhteessa laukaisijaan). Laukaisualuekuvaajasta on luettavissa muun muassa ohjuksen maksimi- ja minimikantamat eri ammutakulmille. [19]



Kuva 14. Esimerkki ohjuksen laukaisualueesta [19]

Ilman erittäin syvällistä tietoa ohjuksen kinematiikasta, moottoriteknologiasta ja hakupäästä sekä maalin liikehtimisestä ja herätteestä, on ohjuksen todellista suorituskykyä erittäin vaikea määrittellä. Tekemällä kuitenkin oletuksia ja yksinkertaistuksia julkaistujen tietojen pohjalta, on mahdollista mallintaa ohjuksen ominaisuuksien vaikutusta sen suorituskykyyn tietyissä tilanteissa.

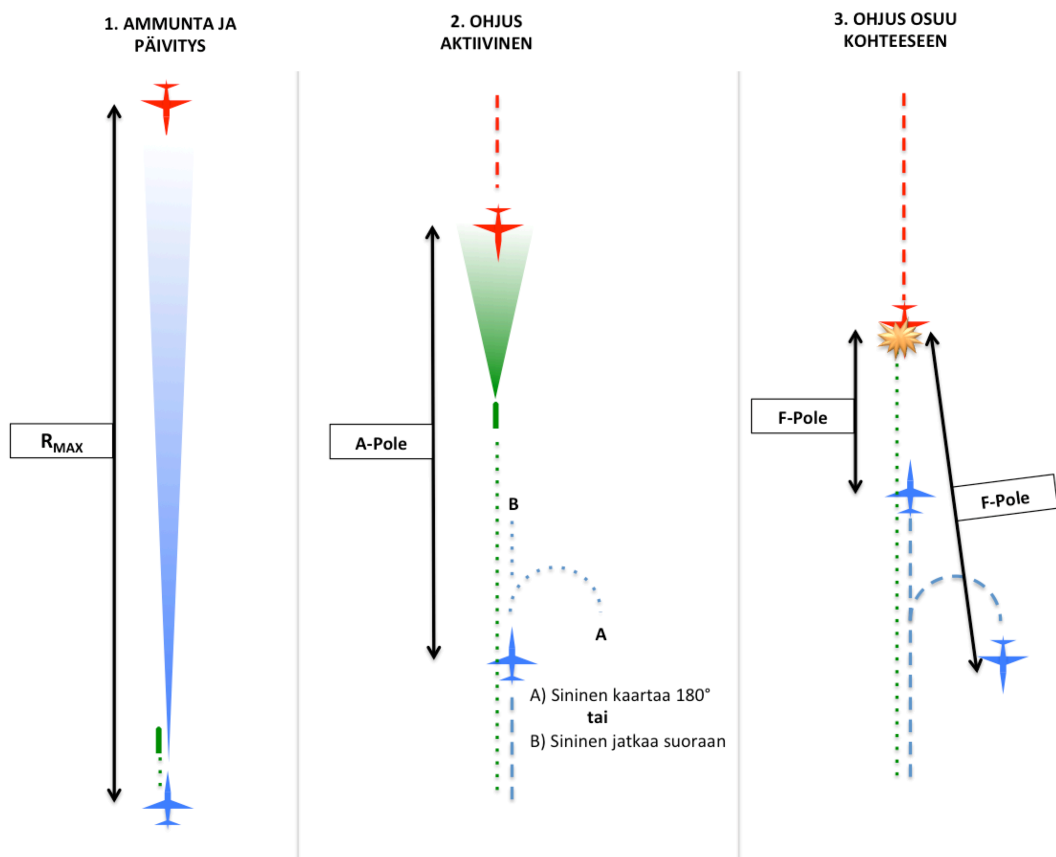


## 5.2 Skenaarion esittely

Tässä luvussa on tarkoitus pohtia aiemmissa luvuissa esiteltyjen ominaisuuksien vaikutusta ohjuksen suorituskykyyn. Seuraavaksi esitetään yksinkertaistettu näköetäisyyden ulkopuolella käytävä ilmataisteluskenario. Siinä kaksi saman nopeussuhteen hävittäjää ovat kohtaavalla lentoradalla samalla korkeudella. Skenaariossa sininen hävittäjä ampuu  $R_{MAX}$ -etäisyydeltä punaista ja päivittää ohjuksen aktiiviseksi jatkaen lentämistä suoraan.

Kun ammutun ohjuksen oma tutka siirtyy aktiiviseksi, tarkastellaan kahta vaihtoehtoa. Joko sininen suorittaa  $180^\circ$  kaarron pois päin punaisesta hävittäjästä (ns. *kääntää kylmäksi*) tai säilyttää offensiivisen hyökkäysgeometrian ja jatkaa suoraan. Muuttujina skenaariossa ovat ohjuksen ammuntaetäisyys, ohjuksen keskinopeus ja ohjuksen hakupään lukitusetäisyys eli etäisyys, jolta hakupää pystyy havaitsemaan maalin ja lukittumaan siihen.

Skenaariossa ohjuksen suorituskyvyllä tarkoitetaan ohjuksen eri muuttujien vaikutusta A-Pole- ja F-Pole-etäisyyksiin. A-Pole on sinisen ja punaisen hävittäjän välinen etäisyys silloin, kun ohjus siirtyy aktiiviseksi. F-Pole puolestaan on hävittäjien välinen etäisyys sinisen ohjuksen osuessa kohteeseensa. Skenaario on havainnollistettu kuvassa 15.



Kuva 15. Ilmataisteluskenaarion esittely

### 5.3 Skenaarion laskennassa käytetyt kaavat

Aika, joka ohjukselta kestää laukaisuhetkestä osumiseen (TOF, *Time Of Flight*) lasketaan jakamalla  $R_{MAX}$ -etäisyys ohjuksen keskinopeuden ja hävittäjän nopeuden summalla:

$$T_{TOF} = \frac{R_{MAX}}{V_{Ohjus} + V_{Hävittäjä}}$$

Ohjuksen passiivisena lentämä matka ennen aktiiviseksi siirtymistä on verrannollinen ohjuksen ja hävittäjän nopeuksien suhteeseen ja se saadaan kun  $R_{MAX}$ :n ja hakupään lukitusetäisyyden erotus jaetaan tällä nopeussuhteella:

$$D_{Passiivinen} = \frac{R_{MAX} - D_{Hakupään\ lukitusetäisyys}}{\left(\frac{V_{Ohjus}}{V_{Ohjus} + V_{Hävittäjä}}\right)}$$

Ohjuksen passiivisena lentämä aika lasketaan jakamalla ohjuksen passiivisena lentämä matka ohjuksen keskinopeudella:

$$T_{Passiivinen} = \frac{D_{Passiivinen}}{V_{Ohjus}}$$

A-Pole-etäisyys, eli sinisen ja punaisen hävittäjän välinen etäisyys hetkellä, kun ohjus on aktiivinen saadaan, kun kerrotaan hävittäjän kohtaamisnopeus (kaksi kertaa yhden hävittäjän nopeus) ajalla, jonka ohjus lentää passiivisena ja vähennetään tämä  $R_{MAX}$ -etäisyydestä:

$$D_{A-Pole} = R_{MAX} - 2 * V_{Hävittäjä} * T_{Passiivinen}$$

Kun ohjus on aktiivinen, sininen suorittaa 180° kaarron. Kaarron aikana sinisen ja punaisen välinen etäisyyden pieneneminen (*closure*) lasketaan kertomalla kaartoon kuluva aika punaisen hävittäjän nopeudella:

$$D_{Closure} = T_{180^\circ\ Kaarto} * V_{Hävittäjä}$$

F-Pole-etäisyys, eli sinisen ja punaisen välinen etäisyys ohjuksen osuessa kohteeseen lasketaan tilanteessa, jossa A-Pole:n jälkeen sininen kaartaa  $180^\circ$  saadaan kun vähennetään A-Pole-etäisyydestä matka, jonka punainen lähestyy sinistä kaarron aikana. Koska hävittäjien nopeus on yhtä suuri, pysyy näiden välinen etäisyys sinisen kaarron jälkeen vakiona ohjuksen loppulennon ajan hävittäjien lentäessä samaan suuntaan;

$$D_{F-Pole1} = D_{A-Pole} - D_{Closure}$$

F-Pole tilanteessa, jossa sininen jatkaa koko ohjuksen lennon ajan ”kuumana” kohti punaista hävittäjää, lasketaan kertomalla hävittäjien kohtaamisnopeus ohjuksen lentoajalla ja vähentämällä tämä  $R_{MAX}$ -etäisyydestä:

$$D_{F-Pole2} = R_{MAX} - 2 * V_{Hävittäjä} * T_{TOF}$$

#### 5.4 Skenaarion oletusten ja validiteetin tarkastelu

Skenaariossa tarkastellaan eri muuttujien vaikutusta A-Pole- ja F-Pole-etäisyyksiin. Nämä etäisyydet ovat oleellisia hävittäjän taktisen toiminnan suunnittelun ja toteutuksen kannalta. Nämä etäisyydet eivät ota kuitenkaan kantaa siihen, kuinka todennäköistä ohjuksen osuminen ja kohteen tuhoutuminen ( $P_K$ ) on esitetyissä tilanteissa.

Skenaarion mallinnus suoritetaan yksiulotteisena. Kun sinisen ampuma ohjus on aktiivinen, sinisen suorittama  $180^\circ$  kaarto kestää yhden minuutin. Sinisen hävittäjän kaarron aiheuttaman sivuttaissiirtymän vaikutusta F-Poleen ei huomioida, vaan laskennallisesti sininen hävittäjä kääntyy skenaariossa paikallaan. Punainen hävittäjä lentää koko skenaarion ajan suoraan eikä liikehdi. Korkeuden vaikutusta tarkasteltaviin muuttujiin ei huomioida.

Skenaarion muuttujien lukuarvot eivät edusta minkään tunnetun ohjuksen suorituskykyä, vaan ne on valittu ainoastaan havainnollistamistarkoituksessa. Äänennopeus ilmakehässä riippuu ilman lämpötilasta, joka standardi-ilmakehämallissa laskee lineaarisesti korkeuden mukana 11 km:ssä sijaitsevaan tropopausssiin asti. Tässä skenaariossa käytetään yksinkertaistusta Mach 1 = 1000 km/h, joka vastaa melko tarkasti todellista äänennopeutta 1 062 km/h standardi-ilmakehässä 11 km korkeudella. Tämä nopeus on myös hävittäjien nopeus, jolloin näiden kohtaavaksi nopeudeksi tulee Mach 2. Skenaariossa ei mallinneta ilmakehän vaikutusta ohjuksen kantamaan (esim. korkeus tai tuuli). Mahdollisen häirinnän tai punaisen hävittäjän liikehtelyn vaikutusta ohjuksen osumatodennäköisyyteen ei myöskään mallinneta.

Skenaariossa ohjuksen nopeutta käsitellään ainoastaan koko lennon keskiarvona.

Todellisuudessa tyypillinen ohjus kiihdyttää lentonsa alussa maksiminopeudelleen käyttäen ajoaineensa loppuun, jonka jälkeen ohjuksen nopeus pienenee jatkuvasti. Näin ollen mitä kauemmaksi ohjus ammutaan, sitä pienempi sen loppunopeus on. Tätä nopeuden muutosta lennon aikana ei ole skenaariossa huomioitu.

Todellisessa ammutatilanteessa sininen hävittäjä ammuttuaan ohjuksensa todennäköisesti hidastaisi nopeuttaan mahdollisimman pieneksi ja muuttaisi ohjaussuuntaansa punaisesta sivuun maksimikulmalle, jolla tutka kykenee vielä päivittämään maalitietoa ohjukselle. Tällä tavoin sinisen ja punaisen kohtaamisnopeus saadaan minimoitua ja F-Pole-etäisyyttä kasvatettua. Ammunnan jälkeinen liikehdintä yksityiskohtineen liittyy kuitenkin ampuvan lavetin kykyihin ja ominaisuuksiin, ei ammuttavan ohjuksen, joten näiden vaikutusten tarkastelua ei skenaariossa suoriteta.

## 5.5 Skenaarion tulokset

Ensimmäisessä esimerkissä lasketaan arvot nimellistä suorituskykyä edustavalle ohjukselle, johon muita ohjuksia verrataan. Verrokkiohjuksen  $R_{MAX}$  on 50 km, sen keskinopeus lennon aikana Mach 3 ja hakupään lukitusetäisyys verrattain lyhyt 10 km. Näillä arvoilla saadaan ohjuksen kokonaislentoajaksi (TOF) kohteelle 45 s, A-Pole-arvoksi 30 km ja F-Pole-arvoksi 26 km, jos sininen kaartaa pois, ja 25 km jos sininen jatkaa suoraan.

Seuraavaksi tutkimuksessa tarkasteltiin yksittäisten muuttujien vaikutusta A-Pole- ja F-Pole-arvoihin, jota varten luotiin kuusi uutta ohjusta. Nämä ovat verrokkiohjusta pidemmän kantaman ohjukset ”RMAX1” ja ”RMAX2”, nopeammat ohjukset ”Nopea” ja ”Nopein” sekä kauempaa lukittuvat ohjukset ”Aktiivisempi” ja ”Aktiivisin”. Muuttujien lukuarvot ja tulokset esitetään taulukossa 4.

Taulukko 4. Ilmataisteluskenaarion tuloksia

	Perus	RMAX 1	RMAX 2	Nopea	Nopein	Aktiivisempi	Aktiivisin
Ohjuksen RMAX (km)	50	75 +50%	100 +100%	50 -	50 -	50 -	50 -
Ohjuksen keskinopeus (Mach)	3	3 -	3 -	4 +33%	5 +67%	3 -	3 -
Hakupään lukitusetäisyys (km)	10	10 -	10 -	10 -	10 -	20 +100%	40 +300%
Ohjuksen TOF (s)	45	68 +50%	90 +100%	36 -20%	30 +67%	45 -	45 -
<b>A-Pole (km)</b>	<b>30</b>	<b>43 +42%</b>	<b>55 +83%</b>	<b>34 +13%</b>	<b>37 +22%</b>	<b>35 +17%</b>	<b>45 +50%</b>
<b>F-Pole (km)</b>	<b>26</b>	<b>39 +47%</b>	<b>51 +95%</b>	<b>30 +15%</b>	<b>33 +25%</b>	<b>31 +19%</b>	<b>41 +57%</b>
(F-Pole jos sininen jatkaa suoraan)	25	37,5 +50%	50 +100%	30 +20%	33 +33%	25 -	25 -

Tuloksista on havaittavissa, että ohjuksen maksimikantamaa kasvattamalla A-Pole ja F-Pole kasvavat lähes suoraan samassa suhteessa ohjuksen kantaman kanssa. Ohjuksen lentoaika on kääntäen verrannollinen ohjuksen nopeuteen, mutta nopeudenlisän vaikutus A-Pole- ja F-Pole-etäisyyksiin on suhteessa huomattavasti pienempi, erityisesti jos ammunnan jälkeen sininen hävittäjä kaartaa pois punaisesta. Tämä on ymmärrettävää, sillä riippumatta ohjuksen nopeudesta maalit lähestyvät toisiaan jatkuvasti nopeudella Mach 2.

Jos sininen haluaa ammunnan jälkeen jatkaa suoraan, on ohjuksen nopeus kantaman lisäksi ainoa F-Pole-etäisyyttä kasvattava tekijä. Mitä kauempaa ohjuksen hakupää saadaan aktiiviseksi, sitä enemmän A-Pole- ja F-Pole-etäisyydet kasvavat. Hakupään lukitusetäisyydellä ei ole vaikutusta F-Pole-etäisyyteen, jos hävittäjä jatkaa A-Polen saavuttamisen jälkeen suoraan.

Tutkimuksessa luotiin seuraavaksi skenaarioon kuvitteellinen seuraavan sukupolven ”Next Gen”-ohjus. Verrokkiohjukseen verrattuna tällä uudella ohjuksella on ramjet-moottorin mahdollistamana kolme kertaa suurempi maksimikantama, kolmanneksen suurempi keskinopeus ja AESA-hakupään mukanaan tuoma neljä kertaa suurempi lukitusetäisyys. Taulukossa 5 on esitetty vertailun tulokset, kun tarkasteltavana on tällainen joka osa-alueella kehittyneempi ohjus.

Taulukko 5. Next Gen -ohjuksen suorituskyky

	Perus	Next Gen
Ohjuksen RMAX (km)	50	150 +200%
Ohjuksen keskinopeus (Mach)	3	4 +33%
Hakupään lukitusetäisyys (km)	10	40 +300%
Ohjuksen TOF (s)	45	108 +140%
<b>A-Pole (km)</b>	<b>30</b>	<b>106 +253%</b>
<b>F-Pole (km)</b>	<b>26</b>	<b>102 +288%</b>
(F-Pole jos sininen jatkaa suoraan)	25	90 +260%

Taulukosta on nähtävissä, miten tällaisella kuvitteellisella seuraavan sukupolven ilmataisteluohjuksella on saavutettavissa merkittäviä suorituskykyeroja perusohjukseen verrattuna. Suuresta laukaisuetäisyydestä johtuen ohjuksen lentoaika on lähes kaksi ja puoli kertaa verrokkiohjusta pidempi. Ohjuksen suuren nopeuden ja lukitusetäisyyden ansiosta A-Pole- ja F-Pole-etäisyydet ovat kasvaneet merkittävästi.

Ei ole kovin odottamatonta, että kaikilla mittareilla verrokkiohjusta paremmalla ohjuksella saavutetaan myös tätä merkittävästi parempi suorituskyky. Seuraavaksi tutkimuksessa tarkasteltiin, miten tietyillä osa-alueilla verrokkiohjusta huonommat ohjukset pärjäävät skenaariossa. Skenaarioon luotiin kaksi uutta ohjusta: ”Hidas Next Gen” ja ”AESA-ohjus”. Ensimmäisessä on edelleen 150 km maksimikantama ja 40 km lukitusetäisyys, mutta ohjuksen keskinopeus on vain Mach 1,5, eli vain 50% hävittäjän nopeutta suurempi. Jälkimmäisen, AESA-ohjuksen, kantama on sama 50 km kuin verrokkiohjuksella, mutta se myös on verrokkiohjusta merkittävästi hitaampi keskinopeudella Mach 1,5. Kehittyneen hakupäänsä ansiosta ohjus kykenee kuitenkin lukittumaan kohteeseensa jo 30 km etäisyydeltä. Taulukossa 6 on esitetty tämän mallinnuksen tulokset.

Taulukko 6. Hidas Next Gen - ja AESA-ohjus

	Perus	Next Gen	Hidas Next Gen	AESA-ohjus
Ohjuksen RMAX (km)	50	150 +200%	150 +200%	50 -
Ohjuksen keskinopeus (Mach)	3	4 +33%	1,5 -50%	1,5 -50%
Hakupään lukitusetäisyys (km)	10	40 +300%	40 +300%	30 +200%
Ohjuksen TOF (s)	45	108 +140%	216 +380%	72 +60%
<b>A-Pole (km)</b>	<b>30</b>	<b>106 +253%</b>	<b>62 +107%</b>	<b>34 +13%</b>
<b>F-Pole (km)</b>	<b>26</b>	<b>102 +288%</b>	<b>62 +135%</b>	<b>34 +29%</b>
(F-Pole jos sininen jatkaa suoraan)	25	90 +260%	30 +20%	10 -60%

Tuloksista on nähtävissä, miten hitaalla Next Gen -ohjuksella saavutetaan sen verrokkiohjusta puolet pienemmästä nopeudesta huolimatta yli kaksinkertaiset A-Pole- ja F-Pole-etäisyydet. Tällainen ohjus ei mahdollista hyökkäyksen jatkamista suoraan, mutta tilanteessa, jossa sininen kääntää kylmäksi, ohjus on erittäin suorituskykyinen. AESA-ohjuksen tapauksessa saavutetaan sen pienestä nopeudesta ja lyhyestä kantamasta huolimatta verrokkiohjusta suuremmat A-Pole- ja F-Pole-etäisyydet sinisen kaartaessa pois. AESA-ohjuksen lentoaika on kuitenkin merkittävästi verrokkiohjusta pidempi, ja näin ollen punaisella on enemmän aikaa saada ohjuslaukaisuvaroitusta ja yrittää väistää ohjus.

Ohjus, jonka hakupää kykenee lukittumaan suurelta etäisyydeltä, auttaa saavuttamaan suuren A-Pole-etäisyyden. Maalin on kuitenkin helpompaa väistää hidas kuin nopea ohjus. Näin ollen A-Pole nopealla ohjuksella, joka siirtyy aktiiviseksi vasta lähellä maalia, on pienempi, mutta ohjuksen suuri nopeus tekee sen väistämisen vaikeammaksi. Lisäksi jälkimmäisessä tapauksessa ammuttava maali saa tutkavaroituksen aktiivisesta ohjuksesta myöhemmin kuin ensimmäisessä tapauksessa, jolloin reagointiaika väistön aloittamiseen on pienempi ja osumatodennäköisyys sitä kautta suurempi.

## 5.6 Vaihtoehtoisten skenaarioiden pohdintaa

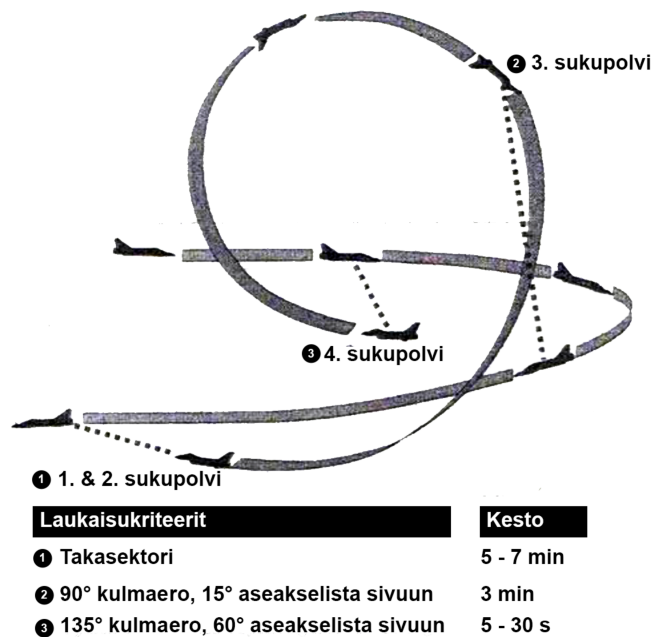
Mallinnuksessa tarkasteltiin ohjusten suorituskykyä ainoastaan tilanteissa, joissa koneet lentävät toisiaan kohti. Tilanteessa, jossa punainen on sinisen takaa-ajamana, ohjuksen suorituskykyyn, eli tässä tilanteessa siihen, saadaanko torjunta ja kuinka nopeasti, vaikuttaa pääasiallisesti ohjuksen rajallinen lentoaika sekä ohjuksen ja maalin nopeussuhde. A-Pole-etäisyydellä ei ole tässä tilanteessa taktisessa mielessä kovin suurta merkitystä. Koska sininen ei ole uhattuna, ei ole suurta väliä sillä, missä kohtaa tarkalleen ohjus muuttuu aktiiviseksi, kunhan se ylipäättään kykenee lentämään kohteelleen.

Ammuttaessa ohjus lähempää kuin maksimikantamalta ohjuksen osumatodennäköisyys kasvaa. Tämä johtuu pääasiallisesti siitä, että lyhyemmällä matkalla ohjuksella on loppuhakeutumisessa suurempi kineettinen energia ja parempi liikehtimiskyky.

Maksimikantamaa lyhyemmällä matkalla maalilla on lyhyempi reaktioaika ja pienempi mahdollisuus liikehtiä. Tällaisten tilanteiden mallintaminen on kuitenkin tutkimuksessa esitettyä skenaariota merkittävästi haastavampi tilanne mallintaa, johtuen lopputulokseen vaikuttavien tekijöiden sekä tuntemattomien muuttujien suuresta määrästä.

Nykyaikaisessa ilmasodankäynnissä perinteisen kaartotaistelun merkitys on pienentynyt. Jos kuitenkin näköetäisyyden sisäpuolella tapahtuvaan kaartotaisteluun joutuu, ovat ohjuksen suorituskykyyn vaikuttavat tekijät eri kuin BVR-skenaariossa. Kaartotaistelutilanteessa merkittäviksi tekijöiksi muodostuu kyky laukaista ohjus mahdollisimman nopeasti, tarvittaessa hyvin läheltä maalia, joka käyttää voimakkaasti omasuojaheitteitä ja/tai tutkahäirintälähetintä.

Tällöin merkittäviä tekijöitä maalin torjunnassa on ohjuksen hyvä liikehtimiskyky (suuri kiihtyvyyys, tehokkaat ohjainpinnat, työntövoimaohjaus), hakupään laaja näkökenttä, kyky laukaista ohjus asekselistä sivuun sekä hyvät häirinnänväistöominaisuudet. Kuvassa 16 on esitetty eri sukupolven lämpöhakuisten ohjusten käyttö lähitaistelussa. Vaikka kuva koskee lämpöhakuisia ohjuksia, pätevät samat lainalaisuudet myös tutkaohjusten käytössä taisteltaessa näköetäisyyden sisäpuolella.



Kuva 16. Eri sukupolvien lämpöhakuisten ohjusten käyttö kaartotaistelussa [45]

### 5.7 Ohjusten muiden ominaisuuksien vaikutuksia suorituskykyyn

Jotta sensori kykenee havaitsemaan maalin, tulee maalista saatava kaiu (hyötysignaali) olla vallitsevaa kohinatasoa voimakkaampi. Jos sensoria häiritään, kasvaneet kohinatasot saattavat peittää maalin kaiun alleen. Mitä lähempänä sensori on maalia, sitä suurempi osa sen lähettämästä energiasta osuu kohteeseen ja heijastuu takaisin. Tutkayhtälöstä tiedämme, että lähetettävän signaalin voimakkuus heikkenee etäisyyden neliössä. Maalista heijastuva kaiu heikkenee myös etäisyyden neliössä. Näiden yhteisvaikutuksena maalista heijastuvan kaiun energia on kääntäen verrannollinen etäisyyden neljänteen potenssiin.



Tarpeeksi lähellä maalia ollessaan tutka voi onnistua niin sanotussa läpipoltossa, eli sen vastaanottama signaali on voimakkaampi kuin häirintälähetteen, jolloin tutka havaitsee maalin. Jos ilmataisteluoohjus on puoliaktiivinen, tapahtuu valaisu ampuvan aselavetin toimesta. Vaikka ohjus olisi hyvin lähellä maalia, ei läpipolttoa välttämättä tapahdu, koska signaali vaimenee ensin valaisijan ja maalin välisen etäisyyden (joka on verrattain suuri) neliössä ja vasta sitten maalin ja ohjuksen etäisyyden neliössä. Tästä syystä aktiivisella ohjuksella on jo lähtökohtaisesti huomattavasti puoliaktiivista ohjusta paremmat edellytykset häirinnänväistöön.

Monitoimihakupäiden käytöllä on myös saavutettavissa merkittäviä taktisia etuja perinteiseen yksitoimiseen hakupäähän verrattuna. Tarpeeksi älykäs monitoimihakupää kykenee esimerkiksi havaitsemaan toimivansa häirityissä olosuhteissa ja päättämään, että osuminen tutkalla hakeutuen tulee todennäköisesti epäonnistumaan. Tällöin ohjus pystyy tarvittaessa lopettamaan aktiivisen lähettämisen ja hakeutumaan kohteelle passiivisesti ilman, että kohde välttämättä saa indikaatioita siitä, että häntä kohti on ammuttu. Passiivinen hakeutuminen voidaan tässä tilanteessa suorittaa joko kohteen oman tutkan säteilyyn, kohteen lähettämään tutkahäirintään tai kohteen lämpöjälkeen, vaihtamalla infrapunahakupäähän.

## 6 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän tutkimuksen päätutkimusongelma oli: ”Minkälaisia teknologioita ja suorituskykyjä nykyaikaisissa tutkahakupäällä varustetuissa ilmataisteluoohjuksissa on ja miten ne tulevat lähitulevaisuudessa muuttumaan?” Tähän tutkimus vastasi selvittämällä ohjusten yleisiä teknologisia ratkaisuja (ts. mikä on mahdollista) ja nykyisten ja lähitulevaisuuden ohjusten ominaisuuksia ja eroja sekä tarkastelemalla, miten ohjuksen eri suoritusarvot vaikuttavat sen taktiseen suorituskykyyn yksinkertaisessa ilmataisteluskenaariossa.

Tutkimuksessa käytettiin tutkimusmenetelminä kirjallisuusselvitystä sekä ilmataisteluskenaariossa matemaattista mallinnusta. Tutkimusmenetelmien valinta oli tutkimuksen aihe, laajuus ja rajaukset huomioiden onnistunut. Kirjallisuusselvityksellä vastattiin kahteen ensimmäiseen apututkimuskysymykseen, jotka olivat: ”Minkälaisia teknologisia ratkaisuja nykyaikaisissa ilmataisteluoohjuksissa on?” ja ”minkälaisia teknologioita tuleviin ilmataisteluoohjuksiin on tulossa?” Näihin tutkimuksessa vastattiin kaksijakoisesti. Luvussa 3, ”Ilmataisteluoohjusten tekniikka”, selvitettiin ohjusteknologian ratkaisuja ja tulevaisuuden mahdollisuuksia yleisemmällä, teoreettisella tasolla. Luvussa 4, ”Nykyisiä ja lähitulevaisuuden ilmataisteluoohjuksia”, kartoitettiin olemassa olevien ja julkistettujen lähitulevaisuuden ilmataisteluoohjusten ominaisuuksia ja teknisiä ratkaisuja.

Viimeiseen apututkimuskysymykseen, ”Miten ohjusten ominaisuudet vaikuttavat niiden taktiseen suorituskykyyn yksinkertaisessa ilmataisteluskenaariossa?”, tutkimuksessa vastattiin luvussa 5 ”Ilmataisteluoohjusten suorituskyvyn tarkastelu”. Luvussa esiteltiin ilmataisteluskenario ja sen mallinnuksen toteutus sekä mallinnuksen tulokset. Kaiken kaikkiaan valitut tutkimusmenetelmät tukivat tutkimuskysymyksiin vastaamista ja mahdollistivat järkevien ja oleellisten tulosten löytämisen.

## 6.1 Ohjusten nykyisiä ja lähitulevaisuuden teknologisia ratkaisuja

Lähitulevaisuudessa ilmataisteluohjuksissa käyttökelpoisimpia teknologioita työntövoiman tuottamiseen ovat yksi- ja kaksivaiheiset rakettimoottorit sekä ramjet-moottorit. Näiden osalta teknologia on osoittautunut tarpeeksi kehittyneeksi ja käyttövarmaksi käytettäväksi sarjatuotantoisissa ohjuksissa. Scramjet-moottori on teknologialtaan lupaava ratkaisu hypersoonisten ohjusten työntövoiman tuottamiseen, mutta ei vielä todennäköisesti tarpeeksi kypsä otettavaksi käyttöön sarjatuotanto-ohjuksessa. Eksoottisempia moottoriteknologioita, kuten pulssidetonaatiomoottori ja yhdistelmämoottoreita turboramjet, air turborocket ja ejector ramjet, tutkitaan laajalti, mutta näiden käytännön sovellutuksia ei ole näkyvissä lähitulevaisuuden ilmataisteluohjuksissa.

Aiemmin tyypillisessä ilmataisteluohjuksessa on ollut yksivaiheinen rakettimoottori, joka käyttää koko ajoaineensa loppuun lentonsa alun kiihdytysvaiheessa. Kiihdytyksen jälkeen ohjus hakeutuu saavuttamansa kineettisen energian avulla kohteelle. Tulevaisuudessa suuri osa ilmataisteluohjusten moottoreista kykenee ohjuksen työntövoiman portaattaiseen tai portaattomaan säätelyyn ohjuksen lennon aikana. Yksinkertaisin ratkaisu tämän toteuttamiseksi on erillisten kiihdytys- ja matkalentovaiheen implementointi moottoriin, jossa vaiheet seuraavat toisiaan peräjälkeen. Tästä hieman kehittyneemmässä ratkaisussa vaiheet ovat toisistaan riippumattomia, jolloin matkalentovaihe voidaan käynnistää tarpeen mukaan joko heti kiihdytysvaiheen jälkeen tai vasta myöhemmin. Ratkaisut, joissa työntövoimaa voi säädellä koko lennon aikana täysin portaattomasti ja tarvittaessa pysäyttää ja käynnistää palotapahtuma kokonaan eivät ole vielä lähitulevaisuudessa todennäköisiä.

Ajoaineissa merkittävä kehityssuunta on ultra- ja nanometallipartikkeleiden lisäys ajoaineen sekaan. Tällä menetelmällä on mahdollista saavuttaa suurempi palamislämpötila ja kasvanut työntövoima, ja lisäksi myös palotapahtuman pienempi heräte näkyvän valon alueella. Tulevaisuudessa on hyvin mahdollista, että ainakin joissain ilmataisteluohjuksissa siirrytään käyttämään hybridimoottoria, jossa ajoaine varastoidaan kiinteässä ja hapetin nestemäisessä muodossa. Tämän järjestelyn etuna on moottorin suurempi ominaisimpulssi, mahdollisuus työntövoiman säätelyyn sekä parempi varastointi- ja käyttöturvallisuus. Haasteena hybridimoottoreissa on ajoaineen ja hapettimen sekoittumisen hitaus, joka rajoittaa moottorista saatavaa työntövoimaa. Kehitys aiemmin mainituissa ajoaineen lisäpartikkeleissa sekä kehittyneen virtausmallinnuksen mahdollistama parempi injektorigeometrian suunnittelu auttavat hallitsemaan palotapahtumaa entistä paremmin, jolloin hybridiajoainetta käyttävää moottoria voidaan pitää lupaavana tulevaisuuden ratkaisuna.

Aerodynamiikan saralla ilmataisteluohjuksissa ollaan siirtymässä pois perinteisistä pyörähdyssymmetrisistä krusiformiohjuksista asymmetrisiin muotoihin. Tähän on syynä pääasiallisesti ilmaa hengittävien moottoreiden, kuten ramjetin vaatimat ilmanottoaukot ohjuksen ulkopinnalle, joita ei aina ole mahdollista tai järkevä asentaa symmetrisesti. Toinen ohjuksen asymmetristä muotoa ajava tekijä on waverider- ja ducted rocket -ohjusten vaatimat muodot. Asymmetristen muotojen käyttö on mahdollista kehittyneen virtauslaskennan sekä aiempaa tehokkaampien ohjausalgoritmien ansiosta, joilla voidaan yhdistää sivuluisu- ja kallistusohjausmenetelmien käyttö.

Ohjausmenetelmänä aerodynaamiset siivekkeet tulevat säilyttämään paikkansa ohjuksissa. Ohjuksen moottorin ajoaineen loputtua aerodynaaminen ohjaus on ainoa keino ohjuksen ohjaamiseksi. Työntövoimaohjauksen käyttö ilmataisteluohjuksissa tulee todennäköisesti lisääntymään, koska se mahdollistaa paremman liikehtimiskyvyn, ja mikäli ohjuksen työntövoima on säädeltävissä, myös työntövoimaohjauksen hyödyntämisen koko lennon aikana.

Uudet ilmataisteluohjukset eivät hakeudu kohteelleen koirankäyräreittiä tai yksinkertaista kulmanopeusreititystä käyttäen. Kehittyneemmät lentoradan optimointimenetelmät mahdollistavat ohjuksen mahdollisesti moduloitavan työntövoiman täysimääräisen hyödyntämisen, hakupään näkökenttärajoitusten huomioimisen ja tätä kautta osumatodennäköisyyden kasvattamisen. Lisäksi kehittyneet hakeutumisalgoritmit mahdollistavat ohjuksen paremman energian hallinnan, suuremmat kantamat ja loppuhakeutumisen paremman liikehtimiskyvyn.

Tulevaisuudessa pääsääntöisesti kaikki tutkahakuiset ilmataisteluohjukset kykenevät valaisemaan kohteen hakupäällään ja hakeutumaan siihen aktiivisesti. Ohjusten pääasiallisena sensorina tulee säilymään tutka, mutta jatkossa monitoimihakupäät tulevat yleistymään, jolloin samassa ohjuksessa voi olla sekä tutka- että kuvantava infrapunahakupää.

Yleisenä trendinä ohjuksissa on havaittavissa, että niiden elektroniikan koko pienenee ja laskentateho kasvaa. Ohjusten fyysinen koko pysyy kuta kuinkin muuttumattomana, jolloin ylijäänyt tila voidaan käyttää esimerkiksi suuremman ajoainemäärään säilytykseen.

Ohjusten monikäyttöisyys tulee ylipäätään muutenkin lisääntymään ja kaksisuuntainen datalinkki on jatkossa enemmän sääntö kuin poikkeus. Kaksisuuntainen datalinkki parantaa ampuvan lavetin tilannetietoisuutta, mahdollistaa suuremman etäisyyden säilyttämisen viholliseen, kasvattaa ohjuksen tuhoamistodennäköisyyttä sekä luo kyvyn ohjuksen uudelleenmaalittamiseen lennon aikana.

Ilmataisteluohjusten taistelulatauksen osalta merkittävimpinä kehityskohteina on suunnattavat taistelulataukset. Asymmetriset sekä muotoutuvat taistelukärjet mahdollistavat tuho vaikutuksen entistä tarkemman kohdistamisen maaliin, jolloin samalla räjähdysainemäärällä voidaan saavuttaa jopa 300 – 500 % suurempi tuhoamistodennäköisyys.

## 6.2 Nykyaikaisia ja lähitulevaisuuden ohjuksia

Nykyaikaisissa tutkahakuisissa ilmataisteluohjuksissa on havaittavissa kaksi kategoriaa: keskipitkän matkan ilmataisteluohjukset ja pitkän kantaman ohjukset. Pitkän kantaman ohjuksissa on nähtävissä lisäksi selkeä ero länsimaalaisten ja venäläisten pitkän kantaman ohjusten välillä. Ensin mainitut ovat verrattain pienikokoisia ja edustavat elektroniikan ja moottoriteknologian kärkeä. Jälkimmäiset ovat kooltaan ja painoltaan huomattavasti massiivisempia, eivätkä välttämättä teknisesti yhtä edistyneitä.

Tällä hetkellä palveluskäytössä olevista ohjuksista keskipitkän kantaman ohjukset ovat hieman alle neljä metriä pitkiä ja painavat 150 – 200 kg. Lähes kaikissa on aktiivinen hakupää, jossa on mekaanisesti keilaava tutka. Ohjusten työntövoiman tuottamisesta vastaa pääsääntöisesti kaksivaiheinen kiinteää ajoainetta käyttävä rakettimoottori, jolla ohjus saavuttaa keskimäärin 100 km kantaman. Ohjuksen taistelulatauksen määrä on tyypillisesti välillä 15 – 40 kg. Ohjuksessa on vähintään yksisuuntainen datalinkki ja länsimaalaisissa ohjuksissa yhä enenevässä määrin kaksisuuntainen datalinkki. Kyky lukita hakupää kohteeseen ennen ammuntaa (LOBL) tulee lisääntymään. Työntövoimaohjaus säilyy verrattain harvinaisena ominaisuutena.

Länsimaisia pitkän kantaman ohjuksia on tuotannossa vain kahdelta valmistajalta.

Raytheonin AIM-120D AMRAAM -ohjus käyttää rakettimoottoria ja MBDA Meteor ramjet-moottoria. Ohjukset saavuttavat 170-200 km kantaman. Ne ovat lähes saman kokoisia kuin keskipitkän matkan ohjukset tai hieman niitä isompia. Venäläiset pitkän kantaman ohjukset ovat olla merkittävästi kookkaampia, pituudeltaan 4 – 6 metriä ja painoltaan 200 – 400 kg. Myös näissä käytetään kaksivaiheisia rakettimoottoreita. Näiden ohjusten taistelulataus on jopa 40 – 60 kg, merkittävästi länsimaalaisia ohjuksia suurempi.

Yleisenä ilmataisteluohjustrendinä on havaittavissa suuri kiinnostus ramjet-moottorien käyttöön. Palveluskäyttöön tulleista ohjuksista ainoastaan MBDA Meteorissa on tällä hetkellä ramjet-moottori, mutta useampi valmistaja on tutkimassa tai on tutkinut ramjet-moottorien käyttöä olemassa olevien ohjusten kehitysversioissa.

Elektroniikan kehittymisellä ja sen fyysisen koon pienentymisellä on monia hyötyjä ilmataisteluohjukselle. Elektroniikan vapauttama tila voidaan käyttää suuremman ajoainemäärän kuljettamiseen, jolloin ohjuksen nopeutta ja kantamaa kyetään kasvattamaan kustannustehokkaalla tavalla. Kehittyneet ohjelmistot mahdollistavat aiempaa monimutkaisempien hakeutumisalgoritmien käytön. Näillä hakeutumisalgoritmeilla ohjuksen energiatasoa pystytään paremmin hallitsemaan ja sitä kautta kasvattamaan ohjuksen kantamaa, liikehtimiskykyä ja osumatodennäköisyyttä. Osana hakeutumisalgoritmien kehitystä ja ohjuksen energianhallintaa on ohjukseen mahdollista integroida GPS-vastaanotin, jolla parannetaan sen hakeutumisvaiheen suunnistustarkkuutta.

Kehittynyt signaaliprosessointi ja ohjelmistotutkat mahdollistavat aiempaa merkittävästi monipuolisemmat häirinnänväistöominaisuudet. Uusien uhkien ilmestyessä voidaan ohjuksen uhkakirjastoja sekä hakupään aaltomuotoja, pulssintoistotaajuuksia sekä signaalinkäsittelymenetelmiä päivittää tarpeen mukaan verrattain helposti ja kustannustehokkaasti.

Tulevaisuudessa yhä useammassa ohjuksessa tulee olemaan AESA-hakupää. Elektronisesti keilaavalla tutkalla saavutetaan merkittävästi parantuneet häirinnänsieto-ominaisuudet sekä kasvaneet lukitusetäisyydet. Monitoimisten hakupäiden tai kahden eri hakupään yhdistäminen samaan ohjukseen on herättänyt mielenkiintoa ohjusvalmistajissa, ja onkin hyvin mahdollista, että tulevaisuudessa tällaisia ohjuksia tullaan näkemään palveluskäytössä. Tutka- sekä infrapunahakupäällä varustetulla älykkäällä ohjuksella on mahdollista mukautua vallitsevaan tilanteeseen ja valita maalin ja tämän mahdollisen aktiivisen ja passiivisen omasuojahäirinnän perusteella parhaiten soveltuva loppuhakeutumisessa käytettävä hakupää.

Ohjusten monitoimisuus sekä yhteiskäyttö eri rooleissa tulee kasvamaan. Jo nykyään on AIM-120 AMRAAM -ohjusta mahdollista käyttää sekä ilmasta ilmaan -ohjuksena että ilmatorjuntaohjuksena NASAMS-ilmatorjuntaohjusjärjestelmässä. Tämä trendi tulee todennäköisesti yleistymään tulevaisuudessa, koska tällä tavoin on saavutettavissa synergiaetuja ohjusten kehitystyössä ja valmistuksessa. Ilmatorjunnan kanssa yhteiskäytettävien ohjusten lisäksi myös muunlaisia monitoimiohjuksia tullaan hyvin suurella todennäköisyydellä näkemään. Suurta kiinnostusta on osoitettu ilmataistelun- sekä rynnäköhjoksen yhdistämiseen, jolloin yhdellä ohjuksella voidaan vaikuttaa sekä ilma- että maamaaleihin. Mahdollisten kustannussäästöjen lisäksi tällä on saavutettavissa operatiivista hyötyä, jos hävittäjää ei tarvitse varustaa erikseen eri tehtävätyyppejä varten, vaan yhdellä ohjuksella voidaan suorittaa sekä ilmataistelua että rynnäkötoimintaa. Tällaisen ohjuksen toimiminen vaatii kuitenkin, että kehitetään taistelulataus ja sytytin, jotka toimivat tehokkaasti sekä ilma- että maamaaleja kohtaan.

Yksi tutkimuksen aikana esiin noussut kehityssuunta on miehittämättömien ilma- ja taisteluilma-alusten torjumisen problematiikka. Näiden ilma-alusten tuottaminen massamaisesti taistelukentälle on verrattain halpaa, mutta niiden torjunta nykyaikaisilla ilmataisteluohjuksilla maalien suuresta lukumäärästä johtuen kallista. Onkin havaittavissa suuri kiinnostus kehittää halpoja ohjuksia, jotka on suunniteltu nimenomaan kohtuullisen pienikokoisia ja matalaherätteisiä, hävittäjiin verrattuna heikosti liikehtiviä maaleja vastaan. Näitä ei kuitenkaan tutkimuksen rajaus huomioiden käsitelty tutkimuksessa tarkemmin. Asia on joka tapauksessa verrattain tuore, eikä julkista tietoa aiheesta ole juurikaan saatavissa.

### 6.3 Ohjusten ominaisuuksien vaikutus suorituskykyyn

#### ilmataisteluskenaariossa

Ilmataisteluskenaariossa esitettiin yksinkertainen ilmataistelutilanne, jossa sininen hävittäjä ampuu kohti lentävää, liikehtimätöntä punaista hävittäjää. Skenaariossa mallinnettiin ohjuksen maksimikantamaa, nopeutta ja hakupään suorituskykyä lukitusetäisyyden osalta ja tutkittiin näiden vaikutusta ilmataistelussa oleellisiin A-Pole ja F-Pole etäisyyksiin.

Skenaarion tuloksena havaittiin, että hakupään lukitusetäisyydellä on merkittävä vaikutus A-Pole- ja F-Pole-etäisyyksiin normaalissa tilanteessa, jossa hävittäjä ampuu, päivittää ohjuksen aktiiviseksi ja kääntää pois tilanteesta. Ohjuksen nopeudella ei ole merkittävää vaikutusta näihin etäisyyksiin, pois lukien tilanteessa, jossa sininen hävittäjä haluaa säilyttää hyökkäyksellisen otteen ja jatkaa ammunnan jälkeen suoraan. Tällöin mitä nopeampi ohjus on, sitä suurempi F-Pole-etäisyys on, ja sitä enemmän sinisellä hävittäjällä on aikaa analysoida tuhoutuiko kohde ja tarvittaessa ampua toinen ohjus.

Ohjuksen suuri kantama on A-Pole- ja F-Pole-etäisyyksien kannalta erittäin suotava ominaisuus, vaikka se saavutettaisiin ohjuksen nopeuden kustannuksella. Mitä kauempaa ohjus on aktiivinen, sitä suuremman etäisyyden sininen hävittäjä kykenee säilyttämään punaiseen hävittäjään. Tämä mahdollistaa siniselle hävittäjälle taktisesti suuremman toiminnanvapauden jatkotilanteessa, ja myös pitää sinisen hävittäjän kauempana uhkasta.

Ohjuksen suurella nopeudella ja sen mahdollistamalla hyvällä liikehtimiskyvyllä on eniten merkitystä maalin liikehtiessä. Heikosti liikehtiviä ja hitaasti lentäviä maaleja vastaan ohjuksen nopeudella ei ole yhtä suurta merkitystä.

Muita ohjuksen suorituskyvyn kannalta toivottuja ominaisuuksia ovat hakupään laaja näkökenttä, hyvät häirinnänväistöominaisuudet sekä mahdollisuus ampua ohjus hävittäjän asekselistä sivuun suurille kulmille.



## 6.4 Pohdintaa

Tutkimuksessa kyettiin löytämään vastaukset siihen, minkälaisia ilmataisteluoohjuksia niin länsimailla kuin muillakin mailla on tuotannossa ja mahdollisesti kehitteillä. Nämä ohjusten ominaisuudet ja suorituskyvyt määrittävät suurelta osin koko taistelujärjestelmän, eli monitoimihävittäjän suorituskyvyn ja ulottuvuuden rajat. Yksinkertaiset ohjusten suorituskyvyn mittarit, kuten nopeus ja kantama, eivät välttämättä kerro niiden todellista suorituskykyä kehittyneitä viidennen sukupolven hävittäjää vastaan häirityissä olosuhteissa.

Ilmiselvää on, että tulevaisuuden ilmataistelussa kehittyneiden maalien torjumiseen tarvitaan kehittyneitä ohjusteknologiaa. Hävittäjien kehittyneet omasuoja- ja häirintäjärjestelmät tekevät niiden torjunnasta perinteisellä, mekaanisesti keilaavalla tutkahakupäällä varustetulla ohjukella haastavaa. Muun muassa DRFM- ja haritushäirintämenetelmät yhdistettynä viidennen sukupolven hävittäjien erinomaisiin häiveominaisuuksiin ovat herättäneet useiden maiden ilmavoimien johtotasolla huolta siitä, kyetäänkö nykyisillä ohjuksilla tällaisten uhkien torjuntaan välttämättä lainkaan. Tulevaisuuden ohjuksissa tulee tästä syystä olemaan yhä suurempi merkitys perinteisen kinemaattisen suorituskyvyn lisäksi sähkömagneettisen spektrin hallinnalla ja elektronisen sodankäynnin ominaisuuksilla.

Tässä tutkimuksessa keskityttiin pääasiallisesti ilmataisteluoohjusten ominaisuuksiin hävittäjiä vastaan käytävässä ilmataistelussa. Tulevat erittäin pitkän kantaman ohjukset aiheuttavat hävittäjien lisäksi kuitenkin merkittävän uuden uhkan myös taistelulinjojen takana lentäville taistelua tukeville ilma-aluksille. Tulevaisuuden ilmaoperaatioissa taistelunjohto- ja ilmatankkaus-koneita joudutaan todennäköisesti siirtämään aiempaa huomattavasti kauemmas omista koneista uhkan ulottumattomiin. Tästä aiheutuu vääjäämättä seurannaisvaikutuksia. Hävittäjät joutuvat lentämään pidemmän matkan tankkereille, jolloin niiden reagointiaika pitenee ja toiminta-aika taistelussa pienenee. Mitä kauempana taistelunjohtokoneet sijaitsevat taistelusta, sitä heikompi niiden tarjoama tilannekuva on. Tämä tekee uhkien maalittamisesta hävittäjille hankalampaa, jolloin näiden ohjusten suorituskykyä ei välttämättä kyetä täysimääräisesti hyödyntämään.

Lähitulevaisuuden ohjuksissa on myös havaittavissa riski siitä, että hävittäjän suorituskyky tulee pullonkaulaksi ohjuksille. Ohjuksen suuresta kantamasta ja kehittyneestä hakupäästä ei ole hyötyä, ellei ohjusta kantava hävittäjä kykene löytämään ammuttavaa maalia sensoreillaan. Tätä riskiä pienentää kuitenkin ohjusten kehittyneet datalinkkiominaisuudet. Tällöin kohdetta voisi valaista esimerkiksi halpa ja tarvittaessa uhrattavissa oleva miehittämätön ilma-alus, joka lähettää maalitiedot ampuvalle koneelle ja mahdollisesti suoraan ilmassa olevalle ohjukselle.

Yksi skenaario tulevaisuuden ilmataisteluohjukselle voisi olla niin sanotun *loiter*-ohjuksen kehittäminen. Tällainen ohjus olisi sellainen, joka voitaisiin ampua taistelualueelle odottamaan jopa kauan ennen uhkan ilmestymistä. Ohjuksella tulisi tällöin olla kyky lentää odotuskuviota yläilmakehässä pienellä energiankulutuksella. Maalin ilmestyessä alueelle, ohjus voitaisiin datalinkin välityksellä ohjata kohteeseen ilman, että tämä saa juuri minkäänlaista ennakkovaroitusta ohjuksen ampumisesta. Tällainen ohjus toimisi erityisen hyvin puolustuksellisessa ilmatoiminnassa, jossa vihollinen vyöryttää taistelualueelle voimaa suuria määriä ja jossakin määrin ennakoidusti. Tällöin ohjuksen loiter-ajan ei tarvitsisi välttämättä olla ylenpalttisen suuri. Tällainen ohjus olisi todennäköisesti teknisesti täysin toteutettavissa, mutta tällä hetkellä kuitenkin lähempänä tieteiskirjallisuutta kuin todellisuutta.

Tulevaisuudessa hyviä jatkotutkimuksen kohteita olisivat miehittämättömien ilma-alusten torjumisen problematiikka ja siihen käytettävissä olevat aseet. Myös infrapunahakupäiden ja infrapunaohjusten kehitystä ja käyttöä viidennen sukupolven hävittäjiä vastaan olisi hyvä tutkia. Kuvantavat hakupäät ovat kehittyneet huimin harppauksin 2000-luvulla, ja näiden käytöllä voidaan hyvinkin paikata monia tutkahakuisten ohjusten puutteita.

**LÄHTEET**

- [1] *Air Force Joint Instruction: Designating and Naming Defense Military Aerospace Vehicles. 16-401*. 2003. 42 s. Saatavissa: <https://fas.org/irp/doddir/army/ar70-50.pdf>
- [2] Air Force Technology. *Meteor – Beyond Visual Range Air-To-Air Missile (BVRAAM)*. 2011. [viitattu 24.2.2016]. Saatavissa: <http://www.airforce-technology.com/projects/-meteor-beyond-visual-range-air-air-missile/>
- [3] Balaji, C. *Futuristic Radar Seekers: The AESA Approach*. 2007. Saatavissa: [http://sensorsresearchsociety.org/Sensors2007CD/IT\\_21.pdf](http://sensorsresearchsociety.org/Sensors2007CD/IT_21.pdf)
- [4] Bayern-Chemie. *Ramjet Missile Propulsion system*. [viitattu 1.9.2015]. Saatavissa <http://www.bayern-chemie.com/ramjet.htm>
- [5] Berglund, M., Tegnér, J. & Wingborg, N. *A Contemporary Study of Research on Tactical Missile Propulsion*. Linköping: Swedish Defence Research Agency, 2005. 75 s. ISSN 1650-1942. Saatavissa: [www.foi.se/ReportFiles/foir\\_1706.pdf](http://www.foi.se/ReportFiles/foir_1706.pdf)
- [6] Brahmos Aerospace. *Classification of Missiles*. [viitattu 7.2.2016]. Saatavissa <http://www.brahmos.com/content.php?id=10&sid=9>
- [7] Cloutier, J., Evers, J. & Feeley, J. *Assesment of Air-To-Air Missile Guidance And Control Technology*. IEEE Control Systems Magazine, 1989. Vol. 9, No. 6, pp. 27–34. ISSN 0272-1708.
- [8] Das, R. *Advances in Active Radar Seeker Technology*. Defence Science Journal, 2005. Vol. 55, No. 3, pp. 329-336. ISSN 0976-464X. Saatavissa: <http://publications.drdo.gov.in/ojs/index.php/dsj/article/download/1996/1033>
- [9] Defense Update. *Next Generation Air Dominance Missiles: T3*. 2010. [viitattu 22.11.2014]. Saatavissa: [http://defense-update.com/products/t/18112010\\_t3.html](http://defense-update.com/products/t/18112010_t3.html)

- [10] DeFlumere, M. *Patentihakemus US6864965 B2 "Dual-mode focal plane array for missile seekers"*. US Patent Office, 2005. Saatavissa: <https://www.google.com/patents/US6864965>
- [11] DOTE. *FY 2004 Annual report*. 2004. [Yhdysvaltojen budjettiraportti]. Saatavissa [http://www.globalsecurity.org/military/library/budget/fy2004/dot-e/other/2004-dot-e\\_annual-report.pdf](http://www.globalsecurity.org/military/library/budget/fy2004/dot-e/other/2004-dot-e_annual-report.pdf)
- [12] Erwin, S. *Air Force Wants Missiles Redirected in Flight*. National Defense Magazine, May, 2003. ISSN 0092–1491. Saatavissa: [http://www.nationaldefensemagazine.org/archive/2003/May/Pages/Air\\_Force\\_Wants3864.aspx](http://www.nationaldefensemagazine.org/archive/2003/May/Pages/Air_Force_Wants3864.aspx)
- [13] Eshel, N. *I-Derby ER – All New Performance*. Aviationweek.Com, 2015. [viitattu 7.2.2016]. Saatavissa: <http://aviationweek.com/paris-air-show-2015/i-derby-er-all-new-performance-0>
- [14] Eskola, J. & Suoranta, J. *Johdatus laadulliseen tutkimukseen*. 7. painos. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino, 2005. 266 s. ISBN 051-768-035-X.
- [15] European Security And Defence Press Association. *Back to the Future Air-to-Air Missiles*. 2014. [viitattu 29.8.2015]. Saatavissa: <http://www.esdpa.org/2014/01/back-to-the-future-for-air-to-air-missiles/>
- [16] Forbat, J. *Vickers Guided Weapons*. Gloucestershire: Tempus Publishing, 2007. 256 s. ISBN 0-7524-3769-0.
- [17] Heiskanen, S. *Ohjustekniikan perusteita*. Kangasala: AR-Kustannus, 1993. 136 s. ISBN 951-95821-3-4.
- [18] Hensch, M. *Tactical Missile Aerodynamics*. Washington, DC.: The American Institute of Astronautics and Aeronautics, 1992. 731s. ISBN 1-56347-015-2.
- [19] Herrmann, J. *Air-to-air missile engagement analysis using the USAF Trajectory Analysis Program (TRAP)*. In: AIAA Flight Simulation Conference, San Diego, 29–31. heinäkuuta 1996. Yhdysvallat. pp. 148-158.

- [20] Hirsjärvi, S., Remes, P. & Sajavaara, P. *Tutki ja kirjoita*. 6. painos. Helsinki: Tammi, 2000. 430 s. ISBN 951-26-4618-8.
- [21] Hughes, R. *Raytheon selected to deliver next-generation tactical air-to-air missile solutions*. London: Jane's Defence Weekly, 2016. [viitattu 8.3.2016]. Saatavissa: <http://www.janes.com/article/57493/raytheon-selected-to-deliver-next-generation-tactical-air-to-air-missile-solutions>
- [22] Jan, H., Lin, C., Chen, K., Lai, C. & Hwang, T. *Missile Guidance Design Using Optimal Trajectory Shaping and Neural Network*. Graduate Institute of Electrical And Communications Engineering, Feng Chia University, Taiwan, 2005. Saatavissa: <http://www.nt.ntnu.no/users/skoge/prost/proceedings/ifac2005/Fullpapers/01557.pdf>
- [23] Jane's Air-Launched Weapons. *PL-12 (SD-10, SD-10A)*. Jane's, 2015. [viitattu 29.2.2016]. Saatavissa: <https://janes.ihs.com/AirLaunchedWeapons/Display/1307787>
- [24] Jane's Air-Launched Weapons. *Astra*. Jane's, 2014. [viitattu 12.11.2015]. Saatavissa: <https://janes.ihs.com/AirLaunchedWeapons/Display/1306823>
- [25] Jane's Air-Launched Weapons. *K-100 (Izdeliye 172, KS-172, AAM-L)*. Jane's, 2015. [viitattu 29.2.2016]. Saatavissa: <https://janes.ihs.com/Janes/DisplayFile/JALW3024>
- [26] Jane's Air-Launched Weapons. *R-27 (AA-10 Alamo)*. Jane's, 2015. [viitattu 29.2.2016]. Saatavissa: <https://janes.ihs.com/AirLaunchedWeapons/Display/1307226>
- [27] Jane's Air-Launched Weapons. *R-33 Amos*. Jane's, 2015. [viitattu 29.2.2016]. Saatavissa: <https://janes.ihs.com/Janes/DisplayFile/JALW3596>
- [28] Jane's Air-Launched Weapons. *R-37, R-37M (AA-X-13), and RVV-BD*. Jane's, 2016. [viitattu 29.2.2016]. Saatavissa: <https://janes.ihs.com/Janes/Display/1307229>

- [29] Jane's Air-Launched Weapons. *R-77 (RVV-AE/SD, AA-12 Adder)*. Jane's, 2015. [viitattu 29.2.2016]. Saatavissa: <https://janes.ihs.com/AirLaunchedWeapons/Display/1307228>
- [30] Jane's Air-Launched Weapons. *R-Darter (V4)*. Jane's, 2014. [viitattu 12.11.2015]. Saatavissa: <https://janes.ihs.com/AirLaunchedWeapons/Display/1306836>
- [31] Jane's. Air-Launched Weapons: *AIM-120 AMRAAM*. Jane's Missiles & Rockets, 2015. [viitattu 15.9.2015]. Saatavissa: <https://janes.ihs.com/AirLaunchedWeapons/Display/1307244>
- [32] Jane's. Air-Launched Weapons: *Derby*. 2015. [viitattu 10.11.2015]. Saatavissa: <https://janes.ihs.com/AirLaunchedWeapons/Display/1306826>
- [33] Jane's. Air-Launched Weapons: *Sparrow*, 2015. [viitattu 8.2.2016]. Saatavissa: <https://janes.ihs.com/Janes/DisplayFile/JALW3613>
- [34] Jane's. Air-Launched Weapons: *Type 99 (AAM-4)*. Jane's Missiles & Rockets, 2015. [viitattu 10.11.2015]. Saatavissa: <https://janes.ihs.com/AirLaunchedWeapons/Display/1306827>
- [35] Jane's. *Joint Dual Role Air Dominance Missile (JDRADM), T3 and Next Generation Missile (NGM)*. Jane's Air Launched Weapons. [viitattu 1.4.2015]. Saatavissa: <https://janes.ihs.com/AirLaunchedWeapons/Display/1307881>
- [36] Jane's. *Meteor BVRAAM*. Jane's Air Launched Weapons. 2015. [viitattu 1.4.2015]. Saatavissa: <https://janes.ihs.com/AirLaunchedWeapons/Display/1306825>
- [37] Jane's. *MICA EM and MICA IR*. Jane's Air Launched Weapons, 2015. [viitattu 11.11.2015]. Saatavissa: <https://janes.ihs.com/AirLaunchedWeapons/Display/1307214>
- [38] Kailasanath, K. *Recent Developments in the Research on Pulse Detonation Engines*. AIAA Journal, 2003. Vol. 41, No. 2, pp. 145-159. ISSN 0001-1452.

- [39] Kamppinen, M., Kuusi, O. & Söderlund S. (toim.). *Tulevaisuudentutkimus - perusteet ja sovellukset*. 2. korjattu painos. Helsinki: Suomalaisen Kirjallisuuden Seura, 2003. 926 s. ISBN 951-746-389-8.
- [40] Kari, M., Hakala, A., Pääkkönen, E. & Pitkänen, M. (toim.). *Sotatekninen arvio ja ennuste 2025 Osa 1 - Teknologian kehitys*. Helsinki: Edita Prima, 2008. 564 s. ISBN 978-951-25-1888-3.
- [41] Kari, M., Hakala, A., Pääkkönen, E. & Pitkänen, M. (toim.). *Sotatekninen arvio ja ennuste 2025 Osa 2 - Teknologian kehitys*. Helsinki: Edita Prima Oy, 2008. 279 s. ISBN 978-951-25-1890-6.
- [42] Keller, J. *Raytheon to develop enabling technologies for next-generation missiles*. Military & Aerospace Electronics, 2016. Vol. 27, No. 2, pp. 23. ISSN 1046-9079.
- [43] Kelly, M. *Powering the Future: Advances in Propulsion Technologies Provide a Capability Road Map for War-Fighter Operations*. Air & Space Power Journal, 2004, Vol. 18, No. 1, pp. 51-60. ISSN 0897-0823. Saatavissa: <http://www.au.af.mil/au/afri/aspj/airchronicles/apj/apj04/spr04/spr04.pdf>
- [44] Kempton, M. Patentihakemus US 3228336 A "Rod Warhead". US Patent Office, 1966. Saatavissa: <http://www.google.com/patents/US3228336>
- [45] Kopp, C. *F/A-18E/F Super Hornet vs. Sukhoi Flanker*. Air Power Australia, 2007. [viitattu 6.3.2016]. Saatavissa: <http://www.ausairpower.net/DT-SuperBug-vs-Flanker.html>
- [46] Kopp, C. *PLA Air to Air missiles*. Ausairpower.net, 2014 [viitattu 29.2.2016]. Saatavissa <http://www.ausairpower.net/APA-PLA-AAM.html>
- [47] Kopp, C. *Post Cold War Air To Air Missile evolution*. DefenceToday, 2009. Vol. 7, No. 4, pp. 56-59. ISSN 1447-0446. Saatavissa: <http://www.ausairpower.net/SP/DT-AAM-Evolution-March-2009.pdf>

- [48] Kopp, C. *The Russian Philosophy of Beyond Visual Range Air Combat*. Ausairpower.net, 2014 [viitattu 3.3.2016]. Saatavissa <http://www.ausairpower.net/APA-PLA-AAM.html>
- [49] Kosola, J., Solanne, T. *Digitaalinen taistelukenttä - informaatioajan sotakoneen tekniikka*, 3. Painos. Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, 2013. 497 s. ISBN 978-951-25-2503-4.
- [50] Lappalainen, E., Jormakka, J (toim.). *Tekniset tutkimusmenetelmät Maanpuolustuskorkeakoulussa*. Helsinki: Edita Prima, 2004. 156 s. ISBN 951-25-1540-7.
- [51] Lin, J., Singer, P. *Chinese Air-to-Air Missile Hits Targets, spooks USAF General*. Popular Science, 2015. [viitattu 4.3.2016]. Saatavissa: <http://www.popsci.com/chinese-air-to-air-missile-hits-targets-spooks-usaf-general>
- [52] Majumdar, D. *Air Force Seeks Laser Weapons for Next Generation Fighters*. U.S. Naval Institute News, 2013. [viitattu 7.3.2016]. Saatavissa: <http://news.usni.org/2013/11/20/air-force-seeks-laser-weapons-next-generation-fighters>
- [53] Majumdar, D. *Pentagon Worries That Russia Can Now Outshoot U.S. Stealth Jets*. The Daily Beast, 2014. [viitattu 29.8.2015]. Saatavissa: <http://www.thedailybeast.com/articles/2014/12/04/pentagon-worries-that-russia-can-now-outshoot-u-s-stealth-jets.html>
- [54] MBDA Missile Systems. *MBDA's Meteor Missile is Dominating Air-to-Air Combat*. 2013. [viitattu 24.2.2016]. Saatavissa: [http://mbdainc.com/product\\_posts/meteor/](http://mbdainc.com/product_posts/meteor/)
- [55] McCabe, T. *The Limits of Tactical Aviation Technology*. Air & Space Power Journal, 2015, Vol. 29, No. 5, pp. 91-98. ISSN 1554-2505. Saatavissa: <http://www.airpower.maxwell.af.mil/digital/pdf/articles/2015-Sep-Oct/C-McCabe.pdf>



- [56] NASA. *Solid Rocket Engine*. Nasa.Gov [viitattu 1.4.2015]. Saatavissa: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/srockth.html>
- [57] Pankkonen, A. *Ilmaa hengittävien pitkän kantaman ilmataisteluohjusten ominaisuudet ja mallinnus*. Diplomityö. Espoo, 2006. Teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto, 117 s.
- [58] Pastrone, D. *Approaches to Low Fuel Regression Rate in Hybrid Rocket Engines*. International Journal Of Aerospace Engineering, 2012. Vol 2012, Id. 649753. 12 s. Saatavissa: <http://downloads.hindawi.com/journals/ijae/2012/649753.pdf>
- [59] Perret, B. *Japan Upgrading 60 F-2s With AAM-4, J/APG-2*. Aviation Week & Space Technology, 2012. [viitattu 17.12.2015]. Saatavissa: <http://aviationweek.com/awin/japan-upgrading-60-f-2s-aam-4-japg-2>
- [60] Pyadushkin M, Barrie, D. *Playing catch-up, Moscow pitches improved weapons for export and domestic users*. Aviation Week & Space Technology, 2010. Vol. 172 No. 2, pp. 53-53. ISSN 0005-2175.
- [61] Raytheon. *Dominating the Skies*. 2015. [viitattu 24.2.2016]. Saatavissa: <http://www.raytheon.com/news/feature/airdominance.html>
- [62] Raytheon. *Latest AMRAAM Variant Achieves Key Milestones*. [Lehdistötiedote 9.4.2015]. Saatavissa: <http://raytheon.mediaroom.com/2015-04-09-Latest-AMRAAM-variant-achieves-key-program-milestones>
- [63] Raytheon. *Raytheon completes lab testing on AMRAAM-ER, NASAMS integration*. [Lehdistötiedote 10.7.2015]. Saatavissa: <http://raytheon.mediaroom.com/2015-06-10-Raytheon-completes-lab-testing-on-AMRAAM-ER-NASAMS-integration>
- [64] Rezende, M., Martin, I., Faez, R., Miacci, M. & Nohara, E. *Radar Cross Section Measurements (8-12 GHz) of Magnetic and Dielectric Microwave Absorbing Thin Sheets*. Revista de Fisica Aplicada e Instrumentacao, 2002. Vol 15, no 1. pp. 24-29. ISSN 0102-6895. Saatavissa: [http://www.sbfisica.org.br/rfai/Vol15/Num1/v15\\_24.pdf](http://www.sbfisica.org.br/rfai/Vol15/Num1/v15_24.pdf)

- [65] Skolnik, M. *Radar Handbook*. 3<sup>rd</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 2008. 1328 s. ISBN 978-0071485470.
- [66] Space Propulsion Group, Inc. *Hybrid Rocket Propulsion Overview*. [viitattu 1.12.2015]. Saatavissa: <http://www.spg-corp.com/space-propulsion-group-resources.html>
- [67] Stadler, L., Hoffmann, S., Huber, J., Stingl, R. & Naumann, K. *The Flight Demonstration of the Double Pulse Motor Demonstrator MSA*. Bayern-Chemie. In: 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Nashville, TN, 25. – 28. heinäkuuta 2010. Yhdysvallat. pp. 1-12.
- [68] Stillion, J. *Trends In Air-To-Air Combat – Implications for future air superiority*. CSBA, 2015. Saatavissa: <http://csbaonline.org/wp-content/uploads/2015/04/Air-to-Air-Report-.pdf>
- [69] Sweetman, B. *Advanced jamming techniques proliferate rapidly*. Aviation Week and Space Technology, 2014. Vol. 176, No. 5, pp. 49. ISSN 0005-2175.
- [70] Sweetman, B., Batey, A. *Crown jewel of Europe's fighter weapon industry is MBDA's Meteor ramjet-powered air-to-air missile*. Aviation Week & Space Technology, 2014. Vol. 176, No. 23. ISSN 0005-2175.
- [71] Sweetman, B. *Boeing Discloses Advanced Missile Tests, Will Unveil Other Programs*. Aviation Week & Pace Technology, 2015. Vol 252, No. 35. ISSN 0005-2175.
- [72] Szulc, T. *Russian Air-To-Air Missiles – An Update*. Military Technology, 2010. Vol. 34, No. 7, pp. 79-81. ISSN 0722-3226.
- [73] Taylor, B., Jenkins, D. Patentihakemus US7786418 B2 ” *Multimode seeker system with RF transparent stray light baffles*”. US Patent Office, 2005. Saatavissa: <http://www.google.com/patents/US7786418>

- [74] Trimble, S. *Analysis: Long Range Fashion Catches on in IAF*. Flight Global, 2016. [viitattu 7.2.2016]. Saatavissa: <https://www.flightglobal.com/news/articles/analysis-long-range-fashion-catches-on-in-iaf-421153/>
- [75] Udoshi, R. *DRDO Makes progress with more Astra BVRAAM tests*. Jane's Defence Weekly, 2015. [viitattu 1.4.2015]. Saatavissa: <http://www.janes.com/article/50108/drdo-makes-progress-with-more-astra-bvraam-tests>
- [76] Udoshi, R. *India Successfully tests home-grown ASTRA AAM*. Jane's Defence Weekly, 2014. [viitattu 1.4.2015]. Saatavissa: <http://www.janes.com/article/37521/india-successfully-tests-home-grown-astra-aam>
- [77] US Navy. *Aviation Ordnanceman*. Naval Education and Training Professional Development and Technology Center, 2001. Saatavissa: [http://www.globalsecurity.org/military/library/policy/navy/nrtc/14313\\_fm.pdf](http://www.globalsecurity.org/military/library/policy/navy/nrtc/14313_fm.pdf)
- [78] Waggener S. *Relative Performance Of Anti-Air Missile Warheads*. In: 19th International Symposium of Ballistics, Interlaken, 7–11. toukokuuta 2001. Sveitsi. pp. 623-630. Saatavissa: [http://www.ciar.org/ttk/mbt/papers/symp\\_19/WM10\\_623.pdf](http://www.ciar.org/ttk/mbt/papers/symp_19/WM10_623.pdf)
- [79] Waggener S. *The Evolution of Air Target Warheads*. In: 23rd International Symposium of Ballistics, Tarragona, 16–20. huhtikuuta 2007. Espanja. pp. 67-75. Saatavissa: [http://aux.ciar.org/ttk/mbt/papers/isb2007/paper.x.isb2007.WM05.the\\_evolution\\_of\\_air\\_target\\_warheads.waggener.2007.pdf](http://aux.ciar.org/ttk/mbt/papers/isb2007/paper.x.isb2007.WM05.the_evolution_of_air_target_warheads.waggener.2007.pdf)
- [80] Wall, R. *Missile Boost*. Aviation Week & Space Technology, 2011. Vol 173, No. 30, pp. 25-26. ISSN 0005-2175.

- [81] Wang, H., Lin, D., Cheng, Z. & Wang, J. *Optimal Guidance Trajectory Shaping*. School of Aerospace and Engineering, Beijing Institute of Technology. 2013. Saatavissa: [http://ac.els-cdn.com/S1000936114000545/1-s2.0-S1000936114000545-main.pdf?\\_tid=d5f92e08-f72f-11e5-a344-00000aacb360&acdnat=1459422233\\_6b50052b200491a153b117721d49d451](http://ac.els-cdn.com/S1000936114000545/1-s2.0-S1000936114000545-main.pdf?_tid=d5f92e08-f72f-11e5-a344-00000aacb360&acdnat=1459422233_6b50052b200491a153b117721d49d451)
- [82] Ward, T. *Aerospace Propulsion Systems*. New York: John Wiley & Sons, 2010. 448 s. ISBN 978-0-470-82497-9.
- [83] Weapons and Systems Engineering Department. *Fundamentals of Naval Weapons Systems: Chapter 13 Warheads*. United States Naval Academy. [viitattu 27.10.2015]. Saatavissa <http://fas.org/man/dod-101/navy/docs/fun/index.html>
- [84] Westington, M. *X-51 WaveRider Unmanned Scramjet Aircraft, United States of America*. Air Force Technology, 2010. [Viitattu 18.9.2015]. Saatavissa: <http://www.airforce-technology.com/projects/x51-wave-rider/>