



Forskningsrender för styrda vapen

Del 1

PER BRÄMMING, FREDRIK MARSTEN EKLÖF, FREDRIK NÄSTRÖM,
JOHN ROBINSON, PETER STRÖMBÄCK

Per Brämning, Fredrik Marsten Eklöf, Fredrik
Näsström, John Robinson, Peter Strömbäck

Forskningsstrender för styrda vapen

Del 1

Titel	Forskningstrender för styrda vapen - Del 1
Title	Research trends for guided weapons - Part 1
Rapportnr/Report no	FOI-R--3652--SE
Månad/Month	Mars
Utgivningsår/Year	2013
Antal sidor/Pages	52 p
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	Försvarsmakten
Forskningsområde	Vapen, skydd och säkerhet
FoT område	Vapen och skydd
Projektnr/Project no	E36501
Godkänd av/Approved by	Lars Høstbeck
Ansvarig avdelning	Informations- och aerosystem

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk. All form av kopiering, översättning eller bearbetning utan medgivande är förbjuden.

This work is protected under the Act on Copyright in Literary and Artistic Works (SFS 1960:729). Any form of reproduction, translation or modification without permission is prohibited.

Sammanfattning

I denna rapport analyseras dagens forskningstrender inom styrda vapen med fokus på styrning, banplanering, navigering och bildalstrande IR-målsökare.

De tydligaste trenderna på systemnivå är införandet av styrförmåga till tidigare ostyrda vapen. Man kan konstatera att styrförmåga snart finns hos alla typer av vapen, och att de vapen som sedan tidigare har haft styrförmåga nu får ökad autonomitet (t.ex. så som "loitering munitions").

Miniatyrisering av komponenter, möjlighet att mekaniskt, elektrisk och optiskt integrera olika funktioner samt förbättrad beräkningskapacitet är förmågor som möjliggör de nya styrda vapnen.

Den ökade förmåga till navigering genom b.l.a. GPS och små, tåliga tröghetssensorer är en förutsättning för verkan med hög precision. Fler och oberoende satellitnavigeringssystem etableras och nya civila och militära signaler införs. Navigeringssystem baserade på atominterferometri är under utveckling och kan komma att få betydelse i svåra miljöer som navigering under vatten och där GPS är utstört.

Ytterligare ökad precision hos vapensystem fås med målsökare. En trend för IR-målsökare är att olika typer av sensorer kombineras för att få förbättrad allvädersförmåga och minskad störkänslighet. Nya material kan komma att få en betydelse för ökad sensorkänslighet och minskade kostnader.

Nyckelord: styrda vapen, trender, styrning, navigering, banplanering, IR, målsökare

Summary

The research trends for guided weapons are analyzed in this report with special focus on the topics of guidance, navigation, control (GNC) and imaging infrared seekers (IIR).

The most prominent trend on a system level is that previously unguided weapons are equipped with guidance capability. Precision-guided capability is soon introduced to all types of weapons and those already equipped are given increased autonomy (like loitering munitions).

The miniaturization of components, the capability of integrating mechanical, electronic and optical functions as well as improved computational capacity are capabilities that enable modern precision-guided weapons.

The increased capability in navigation through GPS and small, robust inertial sensors is a basis for precision engagement. Independent satellite navigation systems are established and new civil and military signals added for improved accuracy, robustness and Navigational Warfare capabilities. Navigation systems based on atom interferometry are being developed and could provide a solution to high accurate navigation in difficult environments such as under water and where GPS is jammed.

Increased precision can also be achieved with seekers. A current trend for seekers is that different sensors are combined to improve all weather capability and reduce sensitivity to counter measures. New types of materials can come to increase the sensitivity and reduce the cost.

Keywords: guided, weapons, precision, trends, guidance, navigation, control, IR, seeker

Förkortningar

I detta stycke listas vanligt förekommande förkortningar för att underlätta för läsaren.

Förkortning	Betydelse
AA	Air-to-Air
AGM	Air-to-Ground Missile
AIM	Air Intercept Missile
AMRAAM	Advanced Medium Range Air-to-Air Missile
ASRAAM	Advanced Short Range Air-to-Air Missile
BGM	Ballistic Guided Missile/Basic Guided Missile
BMD	Ballistic Missile Defence
BOC	Binary Offset Carrier
C/A	Coarse Acquisition (C/A-code)
CEP	Circular Error Probable
C-RAM	Counter-Rocket, Artillery, and Mortar
CLOS	Command to Line Of Sight
CWIS	Close-In-Weapon-System
DARPA	The Defence Advanced Research Projects Agency
ECF	European Correcting Fuze
FISST	Finite Set Statistics
GBAD	Ground Based Air Defence
GBU	Guided Bomb Unit
GLONASS	Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (Ryska motsvarigheten till GPS)
GNC	Guidance, Navigation and Control
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HAWK	Medellångräckviddig luftvärnsrobot (Homing All the Way Killer)
IG	Integrated Guidance
IMU	Inertial Measurement Unit
IR	Infrared
IRIS-T	IR-jaktrobot, Infra-Red Imaging System - Tail/Thrust Vector Controlled
IRIS-T SL	IRIS-T Surface Launched
IRIS-T SLS	IRIS-T Surface-Launched, Short-range guided Missile
JAGM	Joint Air-to-Ground Missile
JDAM	Joint Direct Attack Munition
LAM	Loitering Attack Munition

Förkortning	Betydelse
LOCAAS	Low Cost Autonomous Attack System
LQ	Linear Quadratic (Control)
LWIR	Long Wavelength Infrared
MEMS	Micro Electro Mechanical System
MCT	Mercury-Cadmium-Telluride
MGK	Mortar Guidance Kit
MGUE	Moderinized GPS User Equipment
MHT	Multi-Hypothesis-Tracking
MWIR	Mid wavelength Infrared
NAVWAR	Navigational Warfare
NLOS-LS	Non-Line-Of-Sight Launch System
NSAM	Naval Surface-to-Air Missile
OCG	Optimal Control Guidance
PAM	Precision Attack Munition
PGK	Precision Guidance Kit
PGMM	Precision Guided Mortar Munition
PHD	Probability Hypothesis Density
PLOCAAS	Powered Low Cost Autonomous Attack System
RAM	Rockets, Artillery and Mortars
RBS	Robotsystem
SDB	Small Diameter Bomb
SAASM	Selective Availability Anti-Spoofing Module
SPACIDO	Ett bankorrigerande tändrör från Nexter Munitions
TN	Tröghetsnavigering
TVC	Thrust Vector Control
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UCAV	Unmanned Combat Air Vehicle

Innehållsförteckning

1	Inledning	9
1.1	Syfte.....	9
1.2	Omfattning och avgränsning.....	9
1.3	Fortsatt arbete.....	9
2	Bakgrund	11
3	Trender hos vapensystem	13
3.1	Luft.....	13
3.2	Mark.....	13
3.3	Sjö.....	14
4	Styrning och banplanering	15
4.1	Traditionella tekniker.....	15
4.2	Nya Tekniker.....	23
4.3	Trender	31
5	Navigering	33
5.1	GPS	33
5.2	Atominterferometri	35
5.3	Integration av GPS och tröghetssensorer.....	37
5.4	Trender	38
6	Bildalstrande IR-målsökare	40
6.1	IRIS-T, JAGM och SDB II	40
6.2	IR-sensorer	40
6.3	Signalbehandling	42
6.4	Trender	43
7	Referenser	44

1 Inledning

I denna rapport presenteras en sammanfattning av forskningstrender inom ett antal områden som är av vikt för värdering av styrda vapen allmänt, och särskilt för Försvarmaktens behov i en nära framtid.

De områden som behandlas är banplanering, navigering, styrning (guidance, navigation and control, GNC) samt bildalstrande IR-målsökare. Rapporten innehåller även en del bakgrundsmaterial och historik om styrda vapen.

1.1 Syfte

Rapporten är framtagen dels för att ge den ovan nämnda sammanfattningen av forsknings-trenderna, och dels för att ge en uppfattning om det perspektiv som använts vid bearbetning av bakgrundsmaterialet. Motiven till några av de slutsatser som redovisas synliggörs med hjälp av de historiska fakta och tekniska data som redovisas.

Förutom att ge en sammanfattning av forskningstrender har arbetet med rapporten syftat till att fördjupa förståelsen för de mekanismer som lett till den status för området styrda vapen vi har idag och vilka framtida utvecklingslinjer som är mest troliga (och relevanta för Försvarmakten). Arbetet har dessutom givit tillfälle för författarna att diskutera olika teknologiers betydelse och ömsesidiga inflytanse. Det senare är speciellt viktigt för FOI, som har ett uppdrag att kunna tillhandahålla både systemkunskap över stora områden och samtidigt specialistkunskap om de ingående delområdena.

1.2 Omfattning och avgränsning

Som nämnts ovan är urvalet och perspektivet gjort med hänsyn till uttryckta eller bedömda behov hos Försvarmakten. Emellertid är Försvarmaktens spektrum av behov mycket stort, och tillgängliga resurser är begränsade. Detta har gjort att arbetet har fokuserats på några tillämpningar, speciellt vissa typer av precisionsvapen mot markmål och luftvärn, eftersom nya system och lösningar inom dessa områden planeras inom en nära framtid. Vidare har vi här bara redovisat vissa aspekter på precisionsvapen i dessa kategorier. Vi har till exempel inte redovisat trender inom framdrivning och verkan, som båda är av stor betydelse, och där viktig utveckling har skett, utan vi har inskränkt oss till GNC.

1.3 Fortsatt arbete

Denna omvärldsbevakning är tänkt att utökas med en andra del, där forskningstrenden inom framdrivning, verkan och radarmålsökare sammanfattas och dess inverkan på styrda vapen analyseras.

2 Bakgrund

Önskan att öka räckvidden på vapen har funnits sedan stenyxan och svärdet. Varje steg i räckvidd, såsom introduktion av pilbåge och armborst, har medfört stora fördelar för de som har haft tillgång till tekniken. Med ökande räckvidd uppstår dock snart problemet med precision. Detta gäller speciellt för moderna vapen som missiler med raketdrift, vilka har potential till både lång (interkontinental) räckvidd och kort tid till målet. Problemen med precision var skälet till att de tidiga riktigt långräckviddiga missilerna, såsom tyskarnas V-1 och V-2, mer kom att verka som terrorvapen än användbara verktyg för bekämpning av specifika militära mål. I och med introduktionen av kärnstridsspetsar kom emellertid denna brist på precision hos tidiga långräckviddiga missilssystem att bli av mindre betydelse, och under 1950-talet försköts i stället fokus, åtminstone delvis, till förmågan att bära en tung last över stora avstånd. Under 1960-talet kom detta att förändras.

I kalla krigets Europa var NATO-ländernas fruktan att NATOs oförmåga att möta ett storskaligt Sovjetiskt konventionellt anfall (med stridsvagnar) skulle tvinga NATO att använda kärnvapen på eget territorium, med uppenbart förödande konsekvenser för civilbefolkningen. Under senare delen av 1960-talet och tidiga 1970-talet började dock en väg ut ur detta dilemma skönjas. Det blev tydligt att introduktion av precisionsstyrning hos vapen kunde komma att förändra förutsättningarna för modern strid generellt och speciellt de för Europas försvar.

Erfarenheter från Vietnamkriget och Oktoberkriget 1973 hade visat, att om man snabbt kan slå ut specifika mål hos fienden med hög precision, så är denna förmåga direkt utbytbar mot den större kvantitet i styrkor (och förluster), levererad vapenlast och den tidsfördröjning som annars blir nödvändig för att få samma effekt med vapensystem med låg precision. (Med andra ord, precision är en s.k. force multiplier.) I fallet med Vietnamkriget var det frågan om broar i Nordvietnam som var nyckelmål, och i fallet med Oktoberkriget var det Egyptens tillgång till pansarvärnsvapen och luftvärnsmissiler i stor skala som hade avgörande betydelse och därmed tillförde striden nya dimensioner ([1],[2],[3]). Detta skiftade tillbaka fokus till precisionen hos vapensystemen och de möjligheter sådan förmåga ger till att "möta kvantitet med kvalitet" i bekämpningen och därigenom, i fallet Europa, undvika användandet av kärnvapen.

I och med introduktionen av precisionsvapen¹ i större skala under 1970-talet kom fasta mål att bli speciellt sårbara, och förmågan hos mål, fasta såväl som rörliga, att dölja sin signatur bli lika viktig som (eller t.o.m. viktigare än) ett gott skydd. I princip kan man säga att om ett mål med begränsat skydd, till exempel en stridsvagn, kan lokaliseras, då kan den även bekämpas med ett precisionsvapen. Med andra ord, noggrannhet är *inte starkt beroende av avståndet* för precisionsvapen. Omvänt, precisionsvapen är till ingen nytta mot (mindre) mål vars position inte är exakt känt. Detta leder till att striden med precisionsvapen innehåller en delikat balans mellan möjlighet till noggrannhet i målangivelse och målidentifiering, navigering, banplanering-styrning och verkansdel (även kinetisk) för att vapnen skall få avsedd effekt. Balansen mellan dessa faktorer måste upprätthållas, då varje steg i teknikutvecklingen görs för att framtagning av ett nytt precisionsvapen skall kunna göras ekonomiskt försvarbar. Dessutom måste *totalkostnaden för vapnet hållas nere*, så att utsättning och användning av vapnet i större omfattning blir genomförbar. Några uppenbara implikationer av dessa två förutsättningar (förutom signaturaspekterna som redan nämnts) ges och diskuteras i [4].

I retrospectiv kan sägas att den teknologiska utvecklingen inte främst varit den begränsande faktorn för precisionsvapnets införande utan snarare problemen med att hålla kostnaderna nere för de vapen som har utvecklats. Detta har ytterligare betonat den delikata balansen mellan de olika faktorer som ger ett precisionsvapens effekt och har lett

¹ Med precisionsvapen brukar man ofta avse ([1], [4]) vapen som med stor sannolikhet (t.ex. högre än 0.5) kan träffa och förstöra ett mål med ett skott.

till en strävan att finna "kompromisslösningar", där olika egenskaper vägs mot varandra för att ge vapen med "nära" (eller "tillräckligt goda") precisionsegenskaper [5].

3 Trender hos vapensystem

I detta kapitel sammanfattas de generella trender som kan ses inom arenorna luft, mark och sjö. Informationen i detta kapitel är baserad på en litteraturstudie av militära tidskrifter² från 2012 och 2013.

3.1 Luft

Det pågår en omfattande utveckling av teknik, system och system av system inom främst ballistiskt missilförsvar och andra luftvärnsrobotsystem, såväl land- som sjöbaserade, GBAD (Ground Based Air Defence) respektive NSAM (Naval Surface-to-Air Missile). Det som driver utvecklingen här är de ballistiska missilhoten från länder som Iran och Syrien, och som hotar länder i västra Europa och Israel.

Inom området luftvärnssystem för fartyg med luftvärnsrobotar och luftvärnsartilleri samt "Close-in-weapon-systems"³ (CIWS) sker en fortsatt omfattande utveckling. Detta för att kunna möta hotutvecklingen från sjömålsrobotar. En utväxling av gemensamma teknologier mellan jakt- och luftvärnsrobotar sker också både med markbaserade och sjöbaserade luftvärnsrobotar. Som exempel kan jaktroboten IRIS-T som markbaserad luftvärnsrobot nämnas tillsammans med jaktroboten ASRAAM (Advanced Short Range Air-to-Air Missile) som luftvärnsrobot på fartyg.

För skydd av anläggningar som "Camper" fortsätter också utvecklingen av system för skydd mot raketer, artilleri och granatkastarammunition, C-RAM (Counter Rocket, Artillery, and Mortar). Olika system, som Israels Iron Dome, har också börjat bli operativa. Efterhand som insatserna i Afghanistan minskar kan man tänka sig att satsningarna inom detta område också kommer att minska inom de länder som lämnar landet. Dock kommer troligen systemen fortsätta att utvecklas hos, och för, länder som Israel, som fortsatt kommer att ha denna form av hot mot sig under överskådlig framtid.

Utvecklingen inom attackrobotområdet präglas av fortsatt utveckling av precision genom att flera vapen kompletteras med denna funktion, längre räckvidder för vapen med bättre stand-off samt förmåga att även slå mot rörliga mål som olika typer av fordon med hjälp av tillförda funktioner som uppdateringar i banan, man-in-the-loop, "retargeting" och olika typer av målsökare och tekniker för slutfasstyrningen.

En fortsatt utveckling sker inom områdena för obemannade beväpnade flyg-farkoster. Beväpnade UAVer är operativa sedan flera år och används i en allt större omfattning, främst för bekämpning av och insatser mot specifika punktmål. Demonstratorer av UCAV testas nu i såväl USA som i Europa. I USA har t.ex. X-47B från Northrop Grumman testats från hangarfartyg. I Europa finns två UCAV-demonstratorer, NEURON med deltagande från flera Europeiska fastlandsnationer och Taranis som drivs av England.

3.2 Mark

Raketartilleri-, artillerisystem och andra indirekta eldsystem har fört en tynande tillvaro sedan "murens fall". Inom många länders arméer, som till exempel Kanadas, har till och med artilleriet i stort avvecklats. I och med behovet av indirekt eld inom insatserna i Irak och Afghanistan fick systemen sin renässans genom införandet av precisionsammunition som utnyttjar tröghetsnavigering (TN) och GPS-tekniker för navigering och semi-aktiv laser för slutfasstyrning. Här fortsätter utvecklingen bland annat inom tekniker som bankorrigerande tändrör för olika typer av artilleri- och granatkastarammunition, till exempel 105 mm i Storbritannien, 120 mm grantkastarammunition i USA och med semi-

² Materialet är inhämtat från IHS Jane's Defence Weekly, IHS Jane's International Defence Review och IHS Jane's Navy International.

³ Close-in-weapon-system är ett fartygsbaserat försvarssystem mot inkommande robotar.

aktiv laserteknik slutfasstyrda artillerigranater. I Storbritannien har också en ny typ av ammunition, så kallad "Loitering Munitions" utvecklats inom ramen för artilleriets program och genomgår nu utprovning.

3.3 Sjö

Utvecklingen inom sjömåls- och jaktrobotområdet pågår fortfarande, men är inte lika omfattande som inom luftvärnsområdet. Dock arbetar flera länder som Taiwan och Ryssland med utveckling av super- och hypersoniska sjömålsrobotar.

4 Styrning och banplanering

4.1 Traditionella tekniker

För att få ett perspektiv på styrningens roll i användningen av precisionsvapen kommer vi först att kort rekapitulera de traditionella scenarier där precisionsvapen har använts och de tekniker för styrning som har utnyttjats av dessa. Med "traditionella" menas här sådant som har förekommit fram till mitten på 1980-talet (ca.), eftersom man kan säga att den "moderna" utvecklingen, driven av mikrodatorernas införande i vapensystemen, då tog fart. Från och med denna tidsperiod blev det tekniskt (och ekonomiskt) möjligt att genomföra avancerad signalbehandling för målsökning, måligenkänning, navigering, banplanering och styrning i en eller flera omborddatorer på ett vapen, något som endast i begränsad omfattning har varit genomförbart tidigare. Detta öppnade upp möjligheten för högre grad av adaptivitet hos vapnen. En översikt över förutsättningar och tillgängliga tekniker inom området styrning av precisionsvapen ges i [6].

4.1.1 Missiler

Vi kommer här huvudsakligen att behandla olika former av *missiler*, d.v.s. ett "avlångt vapen som kan flyga långt och som exploderar (eller levererar annan verkan) i målet" [7]. Detta inkluderar, men är inte begränsat till, flygande robotar, projektiler och granater, med eller utan drivning, med eller utan ballistisk bana, med eller utan styrning, etc. Alla dessa kommer kollektivt att kallas missiler.

Vi kommer här endast att betrakta taktiska missiler⁴ mot mark eller luftmål.⁵ Dessutom kommer vi bara att betrakta *korträckviddiga* vapen med räckvidd upp till ca 100 km eftersom det är den mest relevanta klassen för våra svenska förhållanden. En bra översikt och diskussion av missilvapen (och klassindelningar) finns i [7].

4.1.2 Metoder och principer för styrning och aktivering

Vi kommer liksom i [7] att skilja på princip och metod för styrning. *Styrprincipen* är den underliggande matematiska formulering som används för att beskriva problemet med att få missilen att nå fram till målet (och de associerade beräkningar som utförs) och *styrmetoden* är de sensor-, navigations-, kommunikations- och aktiveringsfunktioner som utförs så att missilen kan fås att följa styrprincipen.

Styrprinciperna kan vidare delas in i två klasser, målrelaterad och icke-målrelaterad [7]. För styrning mot stationära mål krävs ingen målsensor, och styrningen (dvs. styrprincipen) kan då baseras på navigationsinformation från GPS eller tröghetsnavigering (TN). I detta fallet, som kallas *icke-målrelaterad styrning*, blir styrningen antingen prediktiv eller banföljande. I prediktiv styrning räknas (korrigering) styrkommandon ut så att missilen kan fås att träffa målet även om den kommit iväg ifrån sin nominella bana. I banföljande styrning räknas styrkommandon ut så att missilen kan fås att återgå till sin nominella bana redan innan den nått fram till målet. Om det viktiga för det styrda vapnet är att träffa målet

⁴ Ofta delar man in missiler i tre klasser; taktiska, strategiska och kryssningsmissiler [12]. Denna indelning kan motiveras av olika användningsområden men också av de olika typer av flygbana som missilerna följer. Taktiska missiler använder en bana helt eller huvudsakligen innanför atmosfären med räckvidder typiskt mindre än 300 km, strategiska använder en ballistisk bana huvudsakligen utanför atmosfären som kan vara interkontinental och kryssningsmissiler använder en bana (ofta låg) innanför atmosfären där användandet av lyftkraft är signifikant och manövrering ofta förekommer. Definitionen av strategisk missil varierar dock i litteraturen; för en diskussion av detta se [8].

⁵ Principiellt skulle vi även här kunna betrakta fallet med sjömålsmissiler. Ytmålsbekämpning erbjuder dock en mycket speciell bekämpningssituation eftersom målen ofta har ett starkt försvar och motmedel som ställer särskilda, unika, krav på missilens sensor och uppträdande.

kan en prediktiv styrning vara att föredra, då banföljande styrning förbrukar energi för att följa banan vilket kan resultera i att målet inte träffas. Då målet är rörligt måste en sensor användas för inmätning av målet, och detta kan ske med en extern eller en i missilen intern sensor. Detta fall kallas *målrelaterad styrning*. Fallet med extern sensor resulterar i styrmetoden kommandostyrning (se nedan). I fallet med intern sensor kan någon av de styrmetoder som realiserar principen för målföljande styrning (se nedan) användas. En överblick av olika former av missilstyrning ges i [8].

Kollimationsstyrning

Kollimationsstyrning, även kallat trepunktstyrning ([8], sid 166) och siktlinjestyrning, kallas den styrprincip (i klassen målrelaterad styrning) där missilen styrs mot målet med hjälp av någon form av ideal bana i rummet, oftast representerad av siktlinjen mellan en marksensor (eller avskjutningspunkt) och målet (ibland med framförhållningspunkt). Detta innebär att mätningar av läget på mål och missil generellt måste göras av en sensor utanför missilen. Styrkommandona länkas sedan upp till missilen med tråd, radar, radio eller optisk länk. Trådlänk används huvudsakligen i missiler mot mark eller ytmål, t.ex. i pansarvärnsmissiler. Denna metod att realisera en styrprincip (t.ex. kollimationsstyrning) med länkad information kallas *kommandostyrning* (*command guidance*). Då principen för siktlinjestyrning kombineras med någon variant av kommandostyrning, vilket är mycket vanligt, kallas detta *command to line of sight (CLOS)*. Alternativt kan missilen ha en inbyggd mottagare, av typ radar/radio eller laser, som känner av hur missilen ligger i förhållande till siktlinjen, och korrigeringar styrkommandon kan räknas ut ombord på missilen. Kommandostyrning där missilen följer en utsänd radar/radio eller laserstråle kallas *ledstrålestyrning* (beam rider guidance).⁶ Kommandostyrning används således i fall då det är praktiskt eller nödvändigt att placera sensorerna utanför missilen.

Målföljande styrning

I de fall (av målrelaterad styrning) då missilen själv mäter in målet med egen sensor, vanligtvis med radar, IR-sensor, eller laserpunktsföljande (ofta elektro-optisk) sensor, sker alla uträkningar av styrkommandona med omborddatorn.⁷ Beroende på hastighet och manöverförmåga hos målet relativt missilen är olika styrprinciper möjliga (och lämpliga).

I *hundkurvestyrning* (*pursuit guidance*) styrs missilen hela tiden mot målet. Hundkurvestyrning leder generellt till en "tail-chase" situation och till höga kommenderade accelerationer för missilen om målet manövrerar. Denna typ av styrning är därför endast lämplig mot mål som har låg hastighet relativt missilen och endast manövrerar måttligt.

I *syftbäringsstyrning* (*proportional navigation*)⁸ är den grundläggande idén att styra missilen så att en kollisionstriangel uppstår: För seglare är det bekant att om två fartyg med konstant hastighet närmar sig varandra och det ena förefaller ligga i konstant bäring relativt det andra kommer kollision att ske och, omvänt, om bäringen är föränderlig så undviks kollision. Denna princip var känd och under betraktande för missilstyrning redan under andra världskriget i Tyskland, men kom inte att användas i stor skala förrän i och med utvecklingen av luftvärnsmissiler under 1950-talet [10]. De styrkommandon som räknas ut för syftbäringsstyrning syftar till att driva rotationshastigheten till noll för siktlinjen mot målet. Det är lätt att se att detta är ekvivalent med att en kollisionstriangel uppstår.⁹

⁶ Egentligen är det, i alla fall i laserfallet, mera riktigt att tala om flera strålar, där varje enskild stråle ger ett mått på hur mycket missilen ligger fel i sida och höjd i förhållande till siktlinjen.

⁷ Sensorsystemet kan vara passivt, som i fallet med signalsökande missiler och missiler med TV eller IR-sökare, eller aktivt där belysningen sker med radar eller laser. I det aktiva fallet kan vidare konfigurationen vara i statisk (extern källa), också kallat semi-aktivt, eller monostatiskt (intern källa) också kallat aktivt.

⁸ Amerikanen Yuan upptäckte syftbäringsstyrning 1943 och publicerade detta 1948. Lars-Erik Zachariasson (tidigare anställd på FOA) upptäckte, oberoende av Yuan, syftbäringsstyrning 1946 [11].

⁹ En detaljerad analys av egenskaperna hos de enkla former av målföljande styrning som nämnts här ges i [12].

Syftbäringsstyrning ger (idealt) perfekt träff om målet inte manövrerar men måste utvidgas med information om målets acceleration i de fall då målet manövrerar. Många varianter av syftbäringsstyrning och dess utvidgade varianter för manövrerande mål existerar [8].

Metoder för aktivering

För realisation av den acceleration som kommenderas av styrsystemet används, för aerodynamiska missiler, huvudsakligen nos-, mittkropps- eller stjärtroder och ibland även dragkraftsstyrning (och kombinationer av dessa).

Nosroder (canards) har den fördelen att ett roderutslag hela tiden ger en rörelse i "rätt" riktning för missilen, och de undviker problemen med att packa in roderservon tillsammans med motorkomponenter i aktern (där motorkomponenter normalt sitter). Nackdelen är främst att de kan ge avlösning i strömningen över rodren redan vid ganska små anfallsvinklar för missilen (och av bl.a. denna anledning har de flesta moderna missiler med nosroder en s.k. split canard konfiguration ([13] sid. 64).

Stjärtroder har inte denna nackdel men ger i stället momentant en rörelse i "fel" riktning för missilen vid roderutslag innan missilen hunnit rotera så mycket att den kommenderade acceleration realiserar genom lyftkraftsbidrag från kropp och vingar.

Mittkroppsroder, d.v.s. rörliga vingar på mitten av skrovet, är mera ovanliga eftersom de, trots att de kombinerar fördelar hos nos- och stjärtroder, ger problem med aerodynamisk "skuggning" av de stjärtvingar som då normalt måste finnas för stabiliteten. Skuggningen ger en negativ inverkan på rollstyrbarheten ([13],[10]). För ytterligare aspekter på olika typer av roder, se [12] avsnitt 3.2.1 och [13] avsnitt 2.15.

Dragkraftsstyrning används ibland för att ge extra manövrerbarhet utan att behöva öka roderytan, och därmed inducerat motstånd då missilen manövrerar. Nackdelen är den ökande komplexitet detta ger p.g.a. de ytterligare styrdon som måste införas (för att avlänsa raketstrålen eller vrida dysan). Dragkraftsstyrning kan implementeras på en mängd olika sätt; vridbar dysa, "paddlar" i raketstrålen, sidostrålar, etc., se [13] (sid. 66-67). *Impulsraketer* kan också ibland användas för att ge små korrekationer av kursen i de allra sista delarna av slutfasen. Mer ickekonventionella former av aktivering är också tänkbara, såsom morfning av delar av skrovet (t.ex. nosen för hypersoniska missiler) ([14], [15]), jet-styrning (exempelvis för subsoniska spinnande 40mm granater [16]) eller plasmaformande aktuatorer (t.ex. för små projektiler) ([17],[18],[19]). Eftersom dessa typer av aktuatorer ej ännu funnit någon nämnvärd användning (även om detta kan komma att ändras) kommer vi bara att betrakta de "konventionella" metoder för aktivering som beskrivits ovan (samt några till, baserade på olika former av roderverkan med roder av ickekonventionell form). En mängd exempel på icke-konventionella aktiveringstekniker ges i [20].

4.1.3 Jakt-, luftvärns- och markmålsmissiler

Jakt- och luftvärnsmissiler

Jakt- och luftvärnsmissiler är i stort sett riktade mot samma typ av mål och skiljer sig främst i framdrivningen, där ett första "boostersteg" som accelererar missilen ofta finns för luftvärnsmissiler eftersom dessa startar från marken (med hastigheten noll). Rent principiellt blir problemen med banplanering och styrning därför likartade efter boostfasen och blir identiska (matematiskt sett) i slutfasen vilket är den fas där precisionen avgörs. Dock gör det faktum att olika former av målinmätning finns att tillgå i olika fall att några olika styrprinciper kan urskiljas, vilka delvis skiljer luftvärnsfallet från jaktfallet. Missilskrovet (storlek, vikt och utformning) skiljer sig också avsevärt mellan en missil som skjuts från axeln mot t.ex. helikoptrar och andra långsamt flygande mål på låg höjd jämfört med en missil som skall kunna bekämpa mål som flyger flera gånger ljudhastigheten på höjder över 20 km. De möjliga aktiveringsmetoderna (nos, mittkropps eller stjärtroder, dragkraftsstyrning, impulsraketer eller kombinationer av dessa) är dock likartade.

Markmålsmissiler

En stor klass av markmålsmissiler är de som är avsedda för bepansrade fordon, speciellt stridsvagnar. Markmålsmissiler skjuts ofta från marken, markfordon eller helikopter/UAV och i en direkt eldsituation med fri sikt. Ett undantag är artilleriraketer som vi dock inte kommer att betrakta här, eftersom det finns bättre exempel på det vi vill illustrera inom de andra typerna av missiler.

Styrprinciper och metoder

Styrprincipen och metoden som används för en missil från någon av ovan nämnda tre huvudfamiljer beror på sensorns placering och på målets typ (hastighet, manöverförmåga) såsom beskrivits ovan. Ofta styrs missiler mot markmål på korta avstånd (några km) med kommandostyrning via tråd baserat på kollimationsstyrning, och luftvärnsmissiler och jaktmissiler styrs med någon form av syftbäringsstyrning (i slutfasen, engelska end game). Några viktiga undantag är luftvärnsmissilerna RBS-70 (Sverige), Starstreak (Storbritannien) som båda styrs med ledstrålestyrning via laser, och den tidiga SA-2 Guideline (Sovjetunionen) som var (och är) kommandostyrd via radio (varianter av kollimationsstyrning).

Exempel

Data till exemplen nedan är ungefärliga, eftersom de varierar mellan versioner på vapnen, och är hämtade ur öppna källor såsom Jane's och Wikipedia.

Exempel på luftvärnsmissiler. En av de första, och världens mest tillverkade luftvärnsmissil (i varianter) var den Sovjetiska SA-2 Guideline (NATO-beteckning) som togs i bruk 1957. *SA-2 Guideline* är en tvåstegsmissil med raketdrift (fastbränsle/flytande bränsle) som kan nå avstånd på 45 km, höjder över 25 km och hastigheter över Mach 3. (Styrningen har beskrivits ovan.) Det andra steget har vingar på mellersta delen av kroppen och både stjärtroder (större) och nosroder (mindre), se figur 1.

Den första amerikanska luftvärnsmissilen som kom att tillverkas i större serier var MIM-23 HAWK, vilken togs i bruk 1959. *MIM-23 HAWK* har en tvåfas (boost/sustain) raketmotor med fast bränsle. Missilen kan nå avstånd på 50km, höjder på 14km och hastigheter på Mach 2.4. Den har målföljande¹⁰ (semi-aktiv) styrning (syftbäringsstyrning) med radarsensor och aktivering via stjärtroder monterade på vingarna som sitter på bakre delen av missilskrovet, se figur 1. I Storbritannien utvecklades under 1950-talet Bristol Bloodhound som togs i bruk 1958 och kom att tillverkas i stora serier. *Bristol Bloodhound*, se figur 1, är en tvåstegsmissil med fyra sidomonterade boosterraketer som släpps, varefter två ramjetmotorer tar vid. Ramjetdriften ger en räckvidd på upp till 185 km (MK II). Missilen kan nå höjder på 20 km och hastigheter på Mach 2.7. Styrningen är av målföljande typ baserat på en (semi-aktiv) radarsensor (syftbäringsstyrning). Aktivering sker genom att vingarna, som också är roder, först vrids ut i motsatt riktning så att missilen rollar, varefter de vrids ut åt samma håll för att ge önskad lyftkraft. (Detta kallas twist-to-steer och kan ses som en variant till bank-to-turn där normalt vingarna är fasta och rollningen ges av utställning av stjärtroder.)

Det Svenska systemet *RBS-70*, som togs i bruk 1977, består av en missil som skjuts från en bärbar lavett vilken opereras av en skytt. Missilen har i senare versioner (BOLIDE) en räckvidd på 8 km, kan nå höjder på 5 km och hastigheter på Mach 2. Motorn är en tvåstegs raketmotor med fast bränsle och styrningen är av ledstråletyp med laser, där skytten pekar en laserstråle på målet. Aktivering sker med stjärtroder, och mottagarens placering i aktern gör att motorns utblås (fyra st.) är placerade mellan vingarna, som sitter på den mellersta delen av kroppen, se figur 1.

¹⁰ En intressant redogörelse för de problem som fanns initialt med att integrera en radarmålsökare i en luftvärnsmissil återfinns i [10].

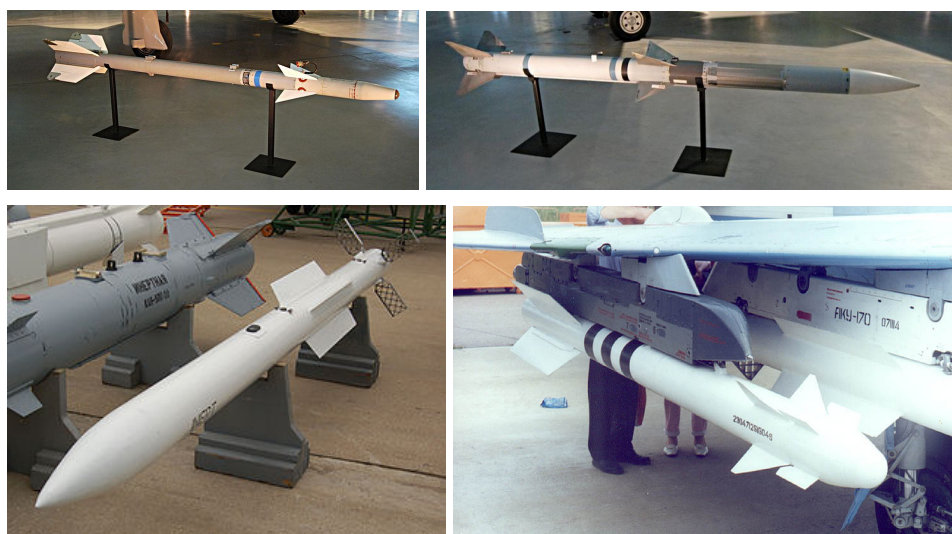


Figur 1. SA-2 Guideline (överst, vänster), MIM-23 Hawk (överst, höger), Bristol Bloodhound (nederst, vänster) och RBS-70 (nederst, höger). (Källa: Wikimedia Commons.)

Exempel på jaktmissiler. Den troligtvis mest kända (och i flest exemplar tillverkade) jaktmissilen är *AIM-9 Sidewinder*¹¹ som utvecklades i USA under 1950-talet och togs i bruk 1958. Missilen har en raketmotor med fast-bränsle och en räckvidd på upp till 35 km. Styrningen är målföljande (syftbäringsstyrning) med IR-sensor i nosen. Missilen har nosroder för tippgirstyrning och fyra st. gyrohjul för passiv rollstabilisering ("rollerons") som sitter längst ut på vingarna (i aktern). Gyrohjulen sätts i rotation av luftströmmen över vingarna. En relativt modern jaktmissil för medellånga avstånd är *AIM-120 AMRAAM* som togs i bruk 1994. Missilen har tvåfas (boost/sustain) raketmotor med fast bränsle. Räckvidden är över 100 km (AIM-120C) och hastigheten över Mach 4. Styrningen (i slutfasen) är målföljande (syftbäringsstyrning) baserad på data från en nosmonterad radar och aktueringen sker med stjärtfenor, se figur 2. En missil med liknande användningsområde är den Ryska *AA-12 Adder* (NATO-beteckning) som togs i bruk 1994. Den har raketmotordrift med fast bränsle och relativt lång räckvidd, uppemot 160 km enligt vissa källor. Kännetecknande är de fyra "gallerrodren" (grid fins, lattice fins) som sitter vid stjärten, se figur 2, som bl.a. har fördelarna¹² gentemot konventionella roderytor att de kan klara högre lokal anfallsvinkel utan att ge avlösning och att de generellt ger lägre roderaxelmoment. Styrningen (i slutfasen) är målföljande (syftbäringsstyrning) baserad på data från en nosmonterad radar (även IR-versioner finns). En annan Rysk (Sovjetisk) jaktmissil för korta avstånd är *AA-11 Archer* (NATO-beteckning), som togs i bruk 1982. AA-12 Archer har raketdrift med fast bränsle och målföljande styrning baserad på en störtlåg bildalstrande målsökare med brett synfält. Aktivering sker med nosroder (split canards) och dragkraftsstyrning. Missilen kan nå en hastighet av Mach 2.5 och har ett användbart avstånd på mellan 300 m och 30 km (M1).

¹¹ Vid tiden för Sidewinderns driftsättande hade Sovjetunionen inte utvecklat någonting liknande men lyckades senare kopiera Sidewindern vilket resulterade i AA-2 Atoll (NATO-beteckning).

¹² Olika för- och nackdelar med denna teknologi belyses i [21] och andra artiklar i samma volym.



Figur 2. AIM-9 Sidewinder (överst, vänster), AIM-120 AMRAAM (överst, höger), AA-12 Adder (nederst, vänster) och AA-11 Archer (nederst, höger). (Källa: Wikimedia Commons.)

Ett par Europeiska jaktmissiler är *IRIS-T* som togs i bruk 2009 och *Meteor* som ännu ej har tagits i bruk. IRIS-T är en jaktmissil för korta avstånd med målföljande styrning baserad på bildalstrande IR-sensor. Den har raketmotordrift med fast bränsle och hög manöverförmåga genom dragkraftstyrning. Missilskrovet har långsmala vingar och stjärtröder, se figur 3.



Figur 3. IRIS-T (vänster) och Meteor (höger). (Källa: Wikimedia Commons.)

Hastigheten uppges till Mach 3 och användbart avstånd uppges till 25 km. Meteor är en jaktmissil för långa avstånd med målföljande styrning (i slutfasen) baserat på data från en (aktiv) radarsensor. Motorn är av tvåstegstyp med en booster som utnyttjar fast bränsle och ett andra steg i form av en ramjetmotor, som också utnyttjar fast bränsle men har variabel dragkraft. Detta ger missilen lång räckvidd (troligtvis långt över 100 km) och hög hastighet ända in i slutjakten (troligtvis över Mach 3). Missilen har inga vingar utan får sin lyftkraft från kroppen och luftintagen till motorn, se figur 3. Aktuering sker via stjärtröder.

Exempel på markmålsmissiler. Vi kommer här att inskränka oss till pansarvärnsmissiler. Pansarvärnsmissiler började utvecklas redan under andra världskriget i Tyskland men fick inte större spridning förrän från mitten på 1950-talet. Den första generationen pansarvärnsmissiler hade manuell kommandostyrning, där skytten styr missilen mot målet via en joystick eller liknande, vilket dock generellt är mycket svårt. Den andra generationen hade semi-automatisk kommandostyrning, där skytten siktar på målet och missilen är kollimationsstyrd, vilket ökar effektiviteten av vapnet signifikant. Missiler av denna typ började förekomma i större antal i början av 1970-talet och ett tidigt exempel är MILAN, som togs fram av Frankrike-Västtyskland och togs i bruk 1972.



Figur 4. MILAN (överst, vänster), AT-5 Spandrel (överst, höger), BGM-71 TOW (mitten, vänster), AGM-65 Maverick (mitten, höger) och AGM-114 Hellfire (nederst, vänster) och Spike (nederst, höger). (Källa: Wikimedia Commons.)

MILAN, se figur 4, drivs av en fastbränslemotor och har fasta vingar och dragkraftsstyrning för aktivering. Styrkommandon genereras semi-automatiskt baserat på en siktlinje till målet från skytten, som definieras via ett optiskt sikte (även mörkerseende och IR-varianter finns). Kommandona överförs via tråd. *MILAN* kan bekämpa mål på upp till 2 km (3 km för *MILAN 2*) avstånd. En Sovjetisk motsvarighet är *AT-5 Spandrel* (NATO-beteckning) som togs i bruk 1974. Missilen är utformad för att skjutas från fordon, har fasta vingar och fastbränslemotor med dragkraftsstyrning, se figur 4. Styrkommandon genereras semi-automatiskt baserat på en siktlinje till målet från skytten som definieras via ett optiskt sikte (även mörkerseende och IR). Kommandona överförs via tråd. *AT-5 Spandrel* kan bekämpa mål på upp till 4km avstånd. Amerikanska *BGM-71 TOW* är även den en trådstyrd missil med semi-automatisk kommandostyrning där styrkommandona tas fram baserat på ett optiskt sikte. *BGM-71 TOW*, som togs i bruk redan 1970, väger ungefär lika mycket som *AT-5 Spandrel* och är därför betydligt tyngre än *MILAN*. *BGM-71 TOW* kan bekämpa mål på ungefär samma avstånd som *AT-5 Spandrel*. Framdrivning sker med fastbränsle, motorn har fyra dysor mellan de vingarna på mittkroppen och aktivering sker med stjärtroder, se figur 4. *AGM-65 Maverick* är en amerikansk markmålsmissil som togs i bruk 1972. Den togs fram för att främst avfyras från flygplan mot bepansrade mål på marken. Missilen har tillverkats i över 70000 exemplar och alla varianter av missilen har haft målföljande styrning, men sensortypen varierar, såsom TV, bildalstrande IR och sensor för målutpekning med laser. Missilen har en enstegs fastbränslemotor och den kan nå en hastighet över Mach 3 och en räckvidd på 22 km i vissa varianter. Missilskrovet är konventionellt med långa deltagningar och stjärtroder, se figur 4. En annan markmålsmissil som ursprungligen togs fram för bekämpning av bepansrade markmål men för avfyrning från helikopter är *AGM-114 Hellfire* (betecknas

som RBS 17 i Sverige), vilken togs i bruk 1984. Den kom senare att användas även på UAvér och med stridsdel med splitterverkan. Missilen har (semi-aktiv) målföljande styrning med laserutpekning, där pekaren kan sitta antingen vid skyttens position eller på marken. Även (semi-aktiv) radarmålsökare finns. Räckvidden är upp till 8 km. Missilskrovet är konventionellt med fasta nosvingar och aktivering med stjärtroder, se figur 4. En modern missil mot bepansrade mål är Israeliska *Spike* som togs i bruk 1997. Den har ett konventionellt missilskrov, se figur 4, med mittkroppsvingar och stjärtroder, samt en elektro-optisk och/eller bildalstrande IR-sökare i nosen. Flera varianter av missilen är utrustade med kommunikationslänk med optisk fiber, som spolas ut från aktern efter avfyrning. Det som gör *Spike* unik är att den har äkta "fire-and-forget"-förmåga där missilen efter en målanvisning från skytt via laserutpekning själv kan låsa på målet och använda målsökande styrning fram till träff. Målanvisningen kan ändras under färd via den optiska länken för de varianter som har en sådan. Missilen har även en förmåga till "lobbande" banor (lofted trajectory) där missilen styr mot ett laserutpekat mål, men följer en krökt bana för att slå målen ovanifrån. *Spike* finns i ett flertal varianter med olika sensorer, stridsdelar och räckvidder, allt ifrån 800 m till 25 km, och har köpts av ett stort antal nationer.

4.1.4 Styrda bomber

Bomber flyger normalt väsentligen ballistiskt (d.v.s. med liten anfallsvinkel) och har då stjärtvingar för stabiliteten, men förekommer även utförda för glidflykt med fasta eller utfällbara vingar, som ger signifikant lyftkraftsbidrag. Styrda bomber användes av både Tyskland och de allierade under andra världskriget (vissa med manuell kommandostyrning via tråd, andra med målföljande styrning med radarsensor), men de fick inte större användning förrän under 1960-talet av USA i Vietnamkriget. De styrda bomber som användes i Vietnamkriget hade målföljande styrning baserad på TV-sensor eller en sensor som följer en laserpunkt, som målet belyses med av en sändare monterad på flygplanet (semi-aktiv utpekning).

Exempel på styrda bomber. Den första styrda bomben med målföljande sensor för laserutpekat mål var *GBU-1/B* som stridsprovades 1968. Även om denna bomb bara tillverkades i en mindre serie var det *GBU-1/B* som introducerade "kit-konceptet" som genom en tillsats förvandlar en ordinär ostyrd bomb till en styrd dito. Efterföljaren *Paveway*, med nosroder (i stället för stjärtroder som på *GBU-1/B*) och målföljande styrning baserad på laserutpekning, kom att ge upphov till en hel familj styrda bomber baserade på kit-konceptet. Karakteristiskt för medlemmar i denna familj är målföljande styrning baserad på semi-aktiv målföljning av laserutpekat mål, utfällbara förlängningar till stjärtvingarna och nosroder för aktivering. Nosrodren sitter monterade tillsammans med målsökaren och styrelektroniken på tändrörets plats i nosen, se figur 5.

Eftersom huvudtypen av mål för bomber är stationära, och deras läge ofta är väl kända i förväg, duger god navigationsinformation ofta för att styra bomben mot målet. Detta utnyttjas i GPS/TN-styrda bomber. Även för denna typ av styrda bomber är kit-konceptet det dominerande. En modern sådan tillsats är *JDAM*, se figur 5. Eftersom ingen utrustning nödvändigt måste sitta i nosen vid denna typ av styrning består *JDAM* av ett nytt "paket" för bakkroppen med styrbara stjärtvingar och navigationsutrustning. Även styrda bomber för glidflykt har använts i större omfattning, och ett exempel är *AGM-62 Walleye*. Denna bomb togs i bruk 1967 under Vietnamkriget och hade målföljande styrning baserat på information från en TV-sökare. Den har deltaformade vingar uteslagna bakom kroppen och stjärtroder för aktivering, se figur 5. En modernare glidbomb är *GBU-44/B Viper Strike* som varit i bruk sedan (åtminstone) 2007.¹³ Denna bomb har liten formfaktor och är avsedd att kunna bäras och släppas från UAvér för bekämpning av bl.a. (oskyddade)

¹³ *GBU-44/B Viper Strike* har samma skrov och vingar som den tidigare ATACMS Block II/Brilliant Anti-armor Technology (BAT) submunition som dock aldrig togs i bruk.

fordon, som rör sig fort på marken (upp till 50 km/h) och mål i urban miljö. GBU-44/B Viper Strike har utfällbara och styrbara vingar (med högt sidoförhållande) som ger den ett högt glidtal (9:1) och god manövrerbarhet, vilket i stort sett eliminerar felet vid nedslag för stationära mål. Styrningen är målföljande baserad på laserutpekade mål (semi-aktivt) som kan stöttas med GPS/TN-data vid långa avstånd till målet (upp till 10 km, och kan släppas från upp till 10 km höjd) [22].



Figur 5. Paveway II (bomben i mitten, överst), GBU-31 JDAM på Mk84 bomb (mitten) och AGM-62 Walleye (nederst). (Källa: Wikimedia Commons.)

4.2 Nya Tekniker

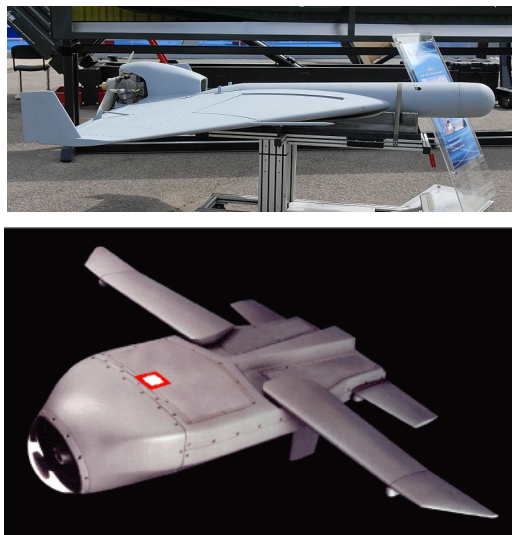
Såsom antytts ovan är en viktig utveckling inom området styrda vapen under de senaste decennierna det allt ökande införandet av avancerade styrfunktioner i vapnen som möjliggjorts av datorutvecklingen efter ca. 1980-talets mitt (t.ex. val av mål och siktpunkt baserad på bildalstrande målsökare och mönsterigenkänning). Det innebär att många av styrprinciperna (t.ex. syftbäringsstyrning) och metoderna som beskrivits ovan fortfarande är huvudkomponenter i de "lägre nivåerna" av styrningen, dock med vissa modifikationer och förfiningar som möjliggjorts av datorutvecklingen.

4.2.1 Autonoma Missiler

En viktig utvecklingslinje för missiler med avancerade styrfunktioner är kringflackande (loitering munition) missiler/UCAV som söker efter mål på marken inom ett given område. Målen kan vara t.ex. bepansrade fordon, trupp eller radaranläggningar, och identifiering sker med hjälp av en bildalstrande sensor (TV eller IR) eller på basis av en elektromagnetisk signatur (emissionsmönster).

Exempel på kringflackande missiler. *Harpy* är en Israelisk kringflackande missil för bekämpning av radarstationer, som togs i drift någon gång under senare delen av 1980-talet. Missilen har en kropp i form av en deltavinge med drivning från en Wankelmotor på 28kW (38hp) och en tvåbladig propeller, se figur 6. Aktuering sker med konventionella höjd-, sido- och skevroder. Vingspannet är 2.7 m, hastigheten är ca 50 m/s och missilen kan färdas 500 km. Detta ger en uthållighet på ca 2.7 h (en källa anger 6h vid hastigheten 55 m/s). Vikten är 135 kg varav stridsdelen är 32 kg.

Harpy programmeras före avskjutning (från box monterad på lastbil) till att avsöka ett viss geografiskt område. *Taifun* var en missil av liknande typ och med liknande prestanda och förmåga [23], som utvecklades av Rheinmetall fram till ca. 2005 för Tyska armén, men som aldrig togs i bruk (man valde i stället Israeliska Harop). Taifun hade dock ett konventionellt skrov med vingar och hade lågsignaturegenskaper. Harpy och Taifun var båda helt autonoma, men deras respektive efterföljare (Harop och TARES) fick båda möjligheten att ha även manuell styrning och övervakning av missilen under del av flykten, vilket antyder att det fortfarande finns problem med full autonomitet hos vapensystem i dessa tillämpningar.



Figur 6. Harpy (överst) och LOCAAS (nederst). (Källa: Wikimedia Commons.)

I USA togs PLOCAAS-konceptet (powered LOCAAS, senare omdöpt till enbart LOCAAS) fram under 1990-talet i form av en demonstrator av en kringflackande missil med förmåga att autonomt avsöka ett område, detektera/klassificera och angripa olika typ av mål på marken [24]. Framdrivningen var i form av en turbojetmotor med en dragkraft på 130 N, vilket gav den 45 kg tunga farkosten, se figur 6, en uthållighet på ca. 30 min då den avsökte ett område på 750 m höjd. Marschfarten var 100 m/s och räckvidden var mer än 190 km. Farkosten hade en relativt konventionell konfiguration med utfällbara vingar och stabilisator/fena, de senare vridbara för aktivering. Stridsdelen (7,7 kg) var av multimodtyp¹⁴ och navigering skedde med GPS/TN. Sensorn var av laserradartyp. Även LOCAAS utrustades med en möjlighet till manuell styrning/övervakning. Efter LOCAAS togs ett annat koncept fram i USA, kallat *XM501 Non-Line-of-Sight Launch System (NLOS-LS)*, baserat på två typer av missiler, en kringflackande (med stridsdel och målsökare) och en för endast attack av i förväg identifierade mål ([25], [26]). De två missilerna kallades *Loitering Attack Munition (LAM)* och *Precision Attack Munition (PAM)*.

4.2.2 Styrda granater och projektiler

Idén att tillföra förmåga till styrning för artillerigranater är inte ny. Den realiserades redan under tidigt 1980-tal i USA i form av artillerigranaten M-172 Copperhead, kaliber 155mm [3]. Denna granat var fenstabiliserad och kan sägas vara förebild för senare precisionsvapen av typen M982 Excalibur och Krasnopol (se nedan). Gemensamt för dessa är hög precision (spridning i storleksordningen 10 meter eller mindre, oberoende av skjutavstånd)

¹⁴ En multimodstridsdel kan ha flera stridsdelsfunktioner, t.ex. kombination av riktad sprängverkan för hårda mål och splitter för mjukamål.

och ett specialdesignat missilskrov. Ungefär samtidigt som M-172 började utvecklas började även en parallell utvecklingslinje baserat på "guidance-kit"-idén, där det ordinarie tändröret på en standardgranat ersätts med ett tändrör med ungefär samma formfaktor, som har förmåga till navigering och styrning [27].

Förutom dessa två utvecklingslinjer för spinnande granater av större kaliber har även på allra senaste tiden en utvecklingslinje uppstått med styrda spinnande projektiler för direkt eld med mindre kalibrer, ner till finkalibrig ammunition. De första stegen i denna utveckling kan sägas¹⁵ ha tagits i början på 1980-talet, då den Sovjetiska AT-10 Stabbergranaten (NATO-beteckning) av kaliber 100 mm togs i bruk. Denna granat kan skjutas ur eldröret på en stridsvagn, använder raketdrift och har ett konventionellt fenstabiliserat skrov med nosroder. Den styrs med ledstråle (laser) och har en räckvidd på 4-km.

När det gäller styrda projektiler som skjuts med granatkastare började en utvecklingslinje (för granater av större kaliber) i mitten på 1980-talet, som har lett till ett mindre antal system, där åtminstone ett par är i bruk idag.

I stort sett all utveckling inom området styrda granater och projektiler har skett från 1980-talet och framåt, och därför kommer allt som beskrivs i mer detalj nedan att referera till denna tidsepok.

4.2.3 Styrdd granatkastarammunition

Granatkastarammunition med förmåga till styrning började utvecklas under 1970-talet i dåvarande Västtyskland av Diehl AG [28], och framgångsrika skjutförsök gjordes med Bussardmissilen i början av 1980-talet. Utvecklingen lades ned p.g.a. brist på finansiering strax därefter men återupptogs ungefär ett decennium senare, då i samarbete med Lockheed Martin. Diehls Bussard var en glidflygande missil med utfällbara vingar och lasermålsökare.¹⁶ I Sverige började en motsvarighet i form av STRIX-granaten att utvecklas av FFV/Bofors i mitten på 1980-talet, vilken togs i bruk 1994. STRIX flyger väsentligen ballistiskt och använder impulsraketer för korrektion av banan i slutfasen. Samarbetet mellan Diehl och Lockheed Martin fortsatte fram till ca. 2005 med målet att leverera lösningen till US Army's Precision Guided Mortar Munition (PGMM). Emellertid valdes i stället Alliant Tech systems koncept baserat på ett relativt konventionellt missilskrov (granat) med impulsraketer och lasermålsökare till att bli PGMM [29]. I Israel tog Israeli Aircraft Industries (IAI) ungefär samtidigt fram en missil, kallad Fireball, för skjutning från granatkastare. Missilen, som presenterades 2005, har ett skrov som påminner om en konventionell granatkastargranat, men med ett flertal stora utfällbara stjärtvingar och nosroder för styrning, samt lasermålsökare. IAI Fireball är den enda missilen för glidflykt och skjutning från granatkastare som är i bruk idag. Detta trots att denna typ av koncept kan ge mycket hög precision (jfr. GBU-44/B Viper Strike), lång räckvidd och direkt kompatibilitet med existerande utskjutningssystem.

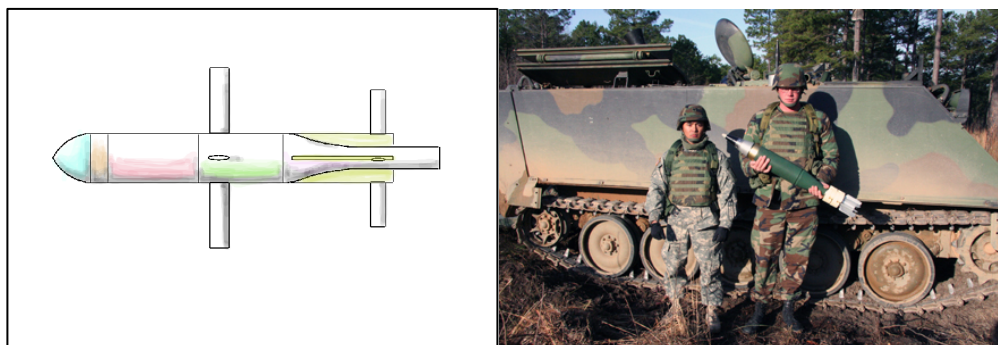
Exempel på granatkastarammunition

Diehls *Bussard* var en granat med missilkropp av kaliber 120 mm med utfällbara vingar och stjärtroder, se figur 7. Den hade ett glidtal i storleksordningen 4.5, jfr. [30], vilket gjorde att den kunde nå mål på upp till ca. 12 km avstånd (bantoppen var då på 2.5 km och missilen dök mot målet då den nått höjden 1000 m) ([30], [31], [32]). Missilens utformning gav möjlighet till manövrering i slutjakten på i storleksordningen 3 g [30], vilket är tillräckligt för att följa en bana in genom ett fönster på borte sidan av en byggnad

¹⁵ Missiler som skjuts ur eldröret på stridsvagnar mot bepansrade fordon började utvecklas i Sovjetunionen redan på 1950-talet, men dessa utvecklingsinsatser blev inte framgångsrika förrän betydligt senare. I väst var MGM-51 Shillelagh, som utvecklades på 1960-talet, ett exempel på en mindre framgångsrik utveckling av en sådan typ av vapen.

¹⁶ Vid FOI har en relativt detaljerad studie gjorts av detta koncept vad avser flygdynamiska egenskaper och banplanering, se ([30], [33]).

på ett avstånd av ca. 10 km [33]. De tänkta målen var mindre skydd/fortifikationer och lätta bepansrade fordon [34]. Styrningen var valbar mellan målsökande med laser, där målangivelse ges via laserutpekning av operatör på marken, eller autonom passiv IR, där missilen själv söker och finner mål inom ett angivet område (sökområdet kunde vara upp till $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$). Navigationen var baserad på ett tröghetsnavigeringssystem. *STRIX* är en granat med en konventionell missilkropp med stjärtfenor och möjlighet till raketdrift för extra räckvidd. Den har en målföljande styrning baserad på en passiv IR-sensor och aktivering sker med styrraketer (verkande tvärs längdriktningen) i slutfasen. Maximalt skjutavstånd är 7 km (4 km utan raketmotor) och sökområdet är $150 \text{ m} \times 150 \text{ m}$. Målen är bepansrade fordon som slås nära vertikalt för maximal verkan [35]. *Fireball* har en missilkropp som påminner om en standard 120 mm granat, men med sex stycken stjärtfenor och fyra nosroder som fälls ut då den lämnat eldröret. Detta ger den ett högt glidtal och den uppges kunna nå mål på avstånd upp till 15 km [32].



Figur 7. Principskiss av Diehls Bussard (vänster) och prototyp av M395 PGMM (höger). (Den verkliga Bussard hade större vingar och inga (lyftgivande) "bakkroppslådor" för stjärtroden, men i övrigt var utformningen snarlik.) (Källor: [30] och Wikimedia Commons.)

Navigering sker med GPS, och styrningen i slutfasen är semi-aktiv baserad på en målsökande sensor för laserutpekade mål. Ett flertal olika stridsdelar finns att tillgå. *M395 PGMM* har en missilkropp som påminner mycket om en standardgranat av kaliber 120 mm sånär som på tändröret som är av typen "guidance-kit" som beskrivits ovan, och ett antal små impulsraketer, som sitter monterade i en ring runt midjan på kroppen. Den flyger därför väsentligen ballistiskt med en räckvidd på 7 km och använder endast styrraketerna för korrektion i slutfasen. Tändröret rymmer en GPS-sensor för navigering och en semi-aktiv målsökare för laserutpekade mål [36]. Den togs i drift 2011. *MGK* (Mortar Guidance Kit) (också kallat *APMI XM395*) är ett "guidance-kit" (som ersätter det konventionella tändröret) för konventionella 120 mm granater. Detta "guidance-kit" använder GPS-navigering och en aktivering med en kombination av fasta och rörliga nosfenor och roder. *MGK* bygger mycket på *PGK* för artillerigranater (se nedan) och är framtagen för att uppfylla ett krav på en spridning på 5 m (CEP) på skjutavstånd upp till 6.5 km. En Rysk motsvarighet till *STRIX* är *GRAN* som har ett konventionellt missilskrov med stjärtfenor som fälls ut efter utskjutning då en raketmotor startar vilket ger lång räckvidd. Räckvidden vid utskjutning från slätborrat eldrör är 7 km och vid utskjutning med räfflat rör är den 9 km. Under slutfasen fälls även nosroder ut, vilket ger tillräcklig manövrerbarhet för att slå ovanifrån mot rörliga mål, och stridsdelen har verkan mot bepansrade såväl som mot mjuka mål. Styrningen under slutfasen är målsökande med semi-aktiv laserutpekning, där sökområdet är 800 m brett relativt nominell målposition. *GRAN* togs i bruk år 2000 [32].

4.2.4 Styrda artillerigranater

Som nämnts ovan finns huvudsakligen två typer av styrda artillerigranater. Den första typen har ett fenstabiliserat missilskrov vilket tillåter viss manövrering och banformning samt mycket hög precision (jfr. Bussard och GBU-44/B Viper Strike ovan). Den andra typen består av ett "guidance-kit" som ersätter det ordinarie tändröret på en spinnande

missil, vilket är en lösning som endast ger förmåga till *bankorrektion* (och generellt inte förmåga att slå rörliga mål). (Även hybridlösningar har studerats, bl.a. vid FOA [37], där missilen först flyger spinnstabiliserat för att i slutskedet fälla ut vingar/roder som gör att spinnets upphör och styrningen blir av samma typ som för en konventionell fenstabiliserad missil.)

De tekniska (och ekonomiska) möjligheterna att fullt ut genomföra idén med bankorrigerande tändrör uppkom dock inte förrän under 1990-talet i och med miniatyriseringen av GPS och tröghetsnavigeringssensorer. I slutet av 1990-talet föreslog USAs representanthus [38] att Armén och Marinen skulle slå ihop sina utvecklingsinsatser inom området "smart ammunition" och försöka ta fram en "*guidance integrated fuze*" (GIF), som skulle uppfylla Nato-standarder för ostyrd artilleriammunition. Utvecklingen kom att bygga på Marinens koncept (framtaget vid Naval Surface Warfare Center Dahlgren). Flera olika konfigurationer för GIF studerades ([39], [40]) med olika former av navigering och aktivering (bl.a. nosroder av gallertyp), dock alla med två-dimensionell (2D) styrning; i horisontal och vertikalplanen för att kunna hantera fel i både längd och sida. Till slut valde U.S. Army 2007, efter test av bl.a. kandidatlösningar med 2D styrning från BAE Systems Bofors, att köpa in ATKs lösning, som fick namnet *precision guidance kit* (PGK). PGK togs i bruk i 2012. (GIF har fortsatt att utvecklas fram till åtminstone 2009, dock med betydligt mindre anslag [40].)

Exempel på styrda artillerigranater

M-172 Copperhead var en 155 mm granat för bekämpning av bepansrade mål som togs i bruk 1982. Den var utrustad med semi-aktiv målföljande sensor baserad på laserutpekning av mål. M-172 hade ett fenstabiliserat missilskrov och mittkroppsvingar (rörliga), som fälls ut under senare delen av flykten, se figur 8. Detta gav den en viss manövrerbarhet och därmed förmåga att slå även mot rörliga mål [3]. Räckvidden var 16 km. En annan 155 mm granat med fenstabiliserat skrov är M982 Exalibur som har GPS/TN navigering för användning mot fasta mål. Aktiveringen sker här med nosroder, som fälls ut efter utskjutning och som kan användas till att ge glidflykt långa sträckor (över 40km) samt möjlighet att slå mål ovanifrån, nära vertikalt. Räckvidden nås genom basflödesteknik (base bleed). M982 togs i bruk 2007. En Rysk (Sovjetisk) 155mm granat med semi-aktiv målsökare för laserutpekade mål är Kransopol som togs i bruk 1987 [41]. Den har en konfiguration som påminner om M982, se figur 8, och kan glidflyga på ett liknande sätt men över kortare avstånd, trots användning av basflödesteknik. Räckvidden är upp till 20 km. Målsökarens avsökningssområde är emellertid relativt stort, 1.6 km brett och 2 km djupt, och granaten kan slå mot rörliga mål. Den kan skjutas utan noggranna meteorologiska data på avstånd upp till 12 km.

När det gäller "guidance-kits" för standardgranater är den enda i aktivt bruk idag den ovan nämnda PGK [42]. Detta kit bygger på ett koncept med ett par motställda nosfenor med fix vinkel mot vinden och ett par likställda nosfenor. De två motställda nosfenorna ger ett rotationsmoment för tändröret relativt kroppen, och de två likställda nosfenorna ger en lyftkraft. Med hjälp av den strömmande luften kan tändröret sålunda rotera och lyftkraften riktas [43]. PGK ger en avståndsoberoende spridning i storleksordningen 50 m (CEP) (okorrigerat är den i storleksordningen 150 m på skjutavstånd 25 km). Israeliska *TopGun*, som presenterades 2010 och testskjöts framgångsrikt 2012, är ett 2D-korrigerande tändrör för 155 mm granater som använder nosroder för aktivering och GPS för navigering mot fasta mål. Spridningen uppges¹⁷ vara bättre än 10 m (CEP) oavsett skjutavstånd [44]. (Inga uppgifter finns ännu om att TopGun tagits i bruk.)

¹⁷ Dessa siffror är (väsentligen) konsistenta med siffror framtagna vid FOI för ett generiskt 2D-korrigerande tändrör med nosroder [45].



Figur 8. M-172 Copperhead (överst, vänster), M982 Excalibur (överst, höger) och Krasnopol (nederst). (Källa: Wikimedia Commons.)

Eftersom spridningen av artillerigranater oftast är betydligt större i längd än i sida har flera koncept för guidance-kits studerats som bygger helt eller huvudsakligen på en luftbroms. *European Correcting Fuze (ECF)* och *SPACIDO* är två exempel på detta [46]. Båda dessa bygger på idén att sikta lite längre än målet, och låta tändröret fälla ut en luftbroms i form av metallskivor när målet närmas, och på så sätt korta banan på lämpligt sätt så att målet träffas. En nackdel med detta gentemot full 2D-aktivering, som generellt verkar kontinuerligt utefter banan, är att eftersom bromsens verkan är begränsad (för att kunna garantera bibehållen stabilitet hos granaten) måste den ofta slås på innan granaten har kommit nära målet. Efter det att bromsen fällts ut kan (med de existerande koncepten) inga ytterligare korrekationer göras för de banfel som upptäcks eller tillkommer (t.ex. vind) under den återstående delen av banan.

En speciell typ av artillerigranater som är ostyrda men har förmåga till precisions-bekämpning (genom riktad sprängverkan) är de som har substridsdelar för bekämpning av bepansrade mål och som, efter utfällning, autonomt söker och bekämpar mål på marken. Ett exempel på detta är den svenska *Bonus* 155 mm som började utvecklas vid dåvarande Bofors AB i början av 1980-talet ([35] sid. 661) och började levereras 2003. Delstridsdelarna (två st.) som skjuts ut från en Bonus identifierar och väljer autonomt mål av given typ inom målområdet på sin väg mot marken på basis av termisk signatur och höjdprofil. Sensorerna för detta är en kombination av bildalstrande IR och laseravståndsmätare, och stridsdelen är av typen riktad sprängverkan (av typen projektilbildande; sådana kan ha verkan över tiotals meter). Den tyska *SMArt 155*, som togs i bruk år 2000, är snarlik Bonus.

4.2.5 Styrda luftvärnsprojektiler

Under slutet av 1990-talet blev det uppenbart att dels uppkomsten av nya hot, såsom små UAVer, och dels de ofta "assymetriska" hotsituationer som modernt luftvärn kom att verka i, såsom försvar av camper mot raketer, artilleri och granatkastare (rockets, artillery and mortars, RAM [47], ställde nya krav på luftförsvaret. Några sådana krav var förmåga att

hantera små mål, god motståndskraft mot mättnadsattacker, lätt att förflytta och korta ställtider [48]. Det var vidare klart att dessa krav potentiellt kunde mötas med de förmågor som ett missilbaserat försvar kunde ge, men att detta kanske skulle leda till alltför kostsamma lösningar.¹⁸ En alternativ väg¹⁹ att möta dessa typer av hot (Counter-RAM, C-RAM) som då började undersökas²⁰ var att tillföra det klassiska luftförsvaret baserat på luftvärnskanoner med projektiler nya förmågor, såsom ammunition med anpassad verkan (t.ex. Skyshields AHEAD projektil ([49] sid. 244-246) samt styrd ammunition för direktträff (t.ex. EAPS-projektilen [50] och ISLs projektil [51]). Ett sådant försvar kan även potentiellt hantera klassiska hot som helikoptrar (se EAPS-projektet [52]).

Exempel på styrda luftvärnsprojektiler

Det finns inga kända system i drift med styrda luftvärnsprojektiler för direktträff, men ett flertal studier av denna typ av koncept har gjorts (jfr. EAPS och ISLs projektiler ovan). (EAPS-projektilen har nyligen framgångsrikt flygprovats [53].) En sådan studie, där ett flertal olika koncept bedömdes, var ECAP studien ([54], [55], [56]).

Gemensamt för koncepten i EAPS studien var att de skulle vara realiserbara med en 40 mm projektil skjuten från en standard luftvärnskanon (möjligtvis slätborrad), att projektilen skulle vara kommandostyrd från marken och att direktträff var verkansmetoden. Olika varianter av aerodynamisk utformning och aktueringsmetod undersöktes, bl.a. impulsraketer och stjärtröder. Impulsraketer var också den valda aktueringsmetoden för ISLs projektil ([57], [51]). Även gallerfenor/roder har undersökts för projektiler av denna storlek [58] och olika former av "styrpinnar" ([59],[60]).

4.2.6 Styrda finkalibriga projektiler

Under det senaste decenniet har ett flertal studier gjorts (bl.a. DARPA:s EXACTO-program) om realiserbarheten av styrda finkalibriga projektiler ([61], [14]) där det har visats varit möjligt och lösningar har patenterats ([62],[63],[64]). En av dessa, Sandia Labs 12.5 mm projektil [14], har dessutom demonstrerats i ett verkligt skjutprov 2011 [65]. Projektilen skjuts från ett slätborrat eldrör. Den har vingar och stjärtkon (flare) för stabilitet, och mikromekaniska aktuatorer monterade i stjärten [64]. Styrningen är målföljande baserat på en nosmonterad optisk sensor för laserbelysta mål.

4.2.7 Moderna tekniker för banplanering och målföljning

Med den ökade förmågan att utföra beräkningar i vapensystem som följt av datorutvecklingen från ca. 1980-talet och framåt har möjligheter givits att införa mer sofistikerade styrprinciper och styrmetoder än de som diskuterats ovan. När det gäller styrprinciper är det frågan om formuleringar för banplanering och målföljning, och när det gäller styrmetoder är det formuleringar för hantering av missilens interna dynamik. För banplanering är det naturligt att försöka ta hänsyn till olika former av optimalitetskriterier, såsom energi eller tidsåtgång, eller bivillkor såsom anslagsvinkel i målet. För målföljning är det naturligt att försöka ta hänsyn till olika former av manövrering hos målet. Båda dessa typer av aspekter, och de som relaterar till missilens interna dynamik, kan effektivt (åtminstone konceptuellt) hanteras med *optimal styrteori* (*optimal control theory*) (och, i sin utvidgade form, dynamisk spelteori (differential games) ([66], [67]). Styrprinciper baserade på optimal styrteori (och dynamisk spelteori) är i sort sett synonymt med det som kallas "moderna styrprinciper" ([12], sid. 181) och vi kommer att använda förkortningen

¹⁸ Nyligen har dock det Israeliska Iron-Dome systemet, som enligt Israels flygvapen (operation Pillar of Defense) framgångsrikt bekämpat över 400 artilleriraketer under 2012, visat att sådana lösningar nu är möjliga, åtminstone vid C-RAM skydd av tätbefolkade civila områden mot terrorattacker [68].

¹⁹ Ytterligare en väg är laservapen [69].

²⁰ Hotet från lågtflygande artilleriraketer har undersökts av FOI [70].

OCG (optimal control guidance) för denna klass av styrprinciper. Översikter av OCG finns i [12] (kap. 8) och [71] (kap. 8), och många referenser till litteraturen på området finns i referenslistorna i [12] och [71].

Banplanering

Principer för OCG kan användas till att garantera att (hårda) terminalvillkor uppfylls eller göra det lättare att uppfylla önskade (mjuka) terminalvillkor, om en målföljande styrprincip används i slutfasen. I det senare fallet kan OCG användas till att garantera att en slutfas med målföljande styrning inleds med maximal energi ([72], [73], [71] avsnitt 8.6.3), eller efter minimal tid, eller med villkor som är fördelaktiga för sensorn, eller blandningar av dessa kriterier ([74], [75], [71] avsnitt 8.6). Principer för styrning som specifikt syftar till att möta terminalvillkor i form av anslagsvinkel eller liknande (eller andra villkor på trajektorians form) brukar kallas för *trajektorieformande styrning* (trajectory shaping guidance).

Målföljning

Det är väl känt (se t.ex. [12] sid. 184) att syftbäringsstyrning i standardvarianten är optimal i den meningen att den minimerar bomavståndet (med ideal missilmodell och linjäriserad slutfaskinematik, utan straff på styrenergi) då målet inte manövrerar. På samma sätt är s.k. utvidgad syftbäringsstyrning, som korregerar även för målets acceleration tvärs siktlinjen, optimal i den meningen att minimera bomavståndet (utan straff på styrenergi) om målet har konstant acceleration ([12], sid. 185). Man kan därför misstänka att OCG-tekniker inte generellt kan ge stora förbättringar över syftbäringsstyrning, respektive utvidgad syftbäringsstyrning. Detta har också visat sig vara sant men OCG kan ändå i många fall tillföra ett missilsystem värdefulla egenskaper till ett, idag, överkomligt pris. Ett par sådana egenskaper är större skjutområden och fångstzoner (eng. capture zone). En nackdel med OGC är att styrprinciper i denna familj tenderar att vara mer känsliga för modellerings- och sensorfel, och de kräver generellt att tiden till intercept är känd (d.v.s. kan uppskattas noggrant) ([12], avsnitt 8.7.1).

4.2.8 Nya reglernetoder

En aspekt på styrproblemet för en missil som vi hittills bara nämnt i förbigående är det faktum, att det är ett icke trivialt problem att få en missil att följa kommandon genererade av en styrprincip. Missilens dynamik från styrvariabel, t.ex. roderutslag, till normalacceleration (acceleration vinkelrätt mot hastighetsvektorn), vilket normalt är den variabel man vill styra, är ofta komplicerad. Dessutom varierar denna dynamik vanligen mycket med flygtillståndet, d.v.s. flyghöjd, Machtal och anfallsvinkel, och missilen kan till och med vara instabil vid vissa flygtillstånd. För att "jämna ut" denna variation (och för att garantera stabilitet) har generellt *styrautomaten*, d.v.s. den del av missilens styrsystem som sitter i missilen självt, en funktion för att matematiskt förändra missilens dynamik. Denna funktion kallas på engelska *autopilot* och i brist på svensk beteckning²¹ använder vi den engelska även här. Den del av styrautomaten som beräknar styrkommandon (d.v.s. önskade värden på den styrda variabeln, oftast normalaccelerationen) baserat på styrprincipen kallas på engelska *guidance* och vi kommer även fortsättningsvis att använda detta namn.

I fallet med aerodynamisk aktivering (roder av olika former) är missilens interna dynamik ("bare airframe dynamics") olinjär, men en linjär modell är ofta en god approximation (även om den starkt varierar med flygtillståndet) då den uttrycks i lämpliga variabler, och detta kan till viss del förklara den stora dominansen av linjära analys- och syntesmetoder för autopiloter. Under 1960-talet till början på 2000-talet (ca.) gjordes stora framsteg inom vad som kommit att kallas modern reglerteori, och kraftfulla verktyg för både linjära och

²¹ På svenska brukar både guidance- och autopilot-funktionerna med gemensamt namn kallas styrautomat.

olinjära system utvecklades.²² De linjära tekniker som utvecklades gav nya verktyg för bl.a. multivariabel styrning, optimal styrning med kvadratisk kriterium (LQ-styrning) och metoder för s.k. loop shaping ([77], [78]).

Olinjära reglermetoder

Den olinjära teorin tillfördes effektiva syntesverktyg för design, såsom feedback linearization, dess förenklade variant nonlinear dynamic inversion (via time-scale separation, NDI) och backstepping (bra svenska namn saknas) [79], som alla är tillämpliga för autopilotdesign ([80], [81], [82]). Det har dock visat sig att den främsta fördelen med olinjära metoder är att de kan korta designcykeln ([83], sid. 339), eftersom en regulatordesign ofta kan användas för att täcka en stor del av flygenveloppen (mängden flygtillstånd). Detta till skillnad från de linjära designmetoderna, som visserligen kan ge mycket bra resultat för varje givet flygtillstånd, men som kräver att designproceduren repeteras för en stor mängd punkter i flygenveloppen. (De så erhållna regulatorerna "klistras" sedan ihop genom att mjukt interpolera i de parametervärden som karakteriserar regulatorerna, en process som på engelska kallas gain scheduling.) Ett undantag där olinjära metoder kan ge stora fördelar för autopilotdesign är fall då olika former av begränsningar i systemet (t.ex. roderutslag och utslagshastigheter) är aktiva. För dessa situationer kan metoder från optimal styrteori med fördel användas [84].

Integrerad styrning

I en styrautomat för målsökande missiler är traditionellt de två funktionerna guidance och autopilot ordnade i två nivåer med en "yttre, långsam" slinga (loop) given av guidance och en "inre, snabb" slinga given av autopiloten. Motivet till detta är att förutom i de allra sista ögonblicken av slutfasen arbetar guidance på en betydligt långsammare tidsskala än autopiloten. Därför blir detaljerna i autopilotens beteende inte viktiga då man utformar guidance (bara autopilotens syntetiserade dynamik är snabb nog, och stabil), och man kan designa de två slingorna i stort sett oberoende av varandra. I takt med att missilers prestanda har ökat, kanske främst betingat av utveckling på målsökarområdet som gör identifiering av orientering på mål möjlig, blir de allra sista ögonblicken av slutfasen allt viktigare, och paradigmen med tidsskaleseparation mellan autopilot och guidance har blivit ifrågasatt.²³

En möjlig väg att möta detta potentiella hinder för utvecklingen är att försöka utforma funktionerna guidance och autopilot samtidigt, tillsammans. Den generella varianten av detta angreppssätt kallas *integrated guidance* (IG) [85], och har studerats i litteraturen i större omfattning sedan ungefär i mitten på 1990-talet (något om historiken för IG finns nämnt i [86]). Ett något mindre ambitiöst alternativ är att utforma guidance och autopilot separat, men att med någon form av optimering, parametersätta de två gemensamt och ta hänsyn till varandras begränsningar [87]. (Detta var också tillvägagångssättet i de tidiga varianterna med integrated guidance.)

Integrated guidance kan realiserars med olika reglerteoretiska formuleringar, t.ex. feedback linearization och linear-quadratic control (LQ) ([88], [89]), sliding mode control [90] och olika former av s.k. state dependent equation formuleringar (såsom SDRE, θ -D) [91]. Integrated guidance har kommit att bli ett viktigt forskningsområde inom missilstyrning.

4.3 Trender

De trender som kan urskiljas i de senaste decenniernas utveckling inom områdena banplanering och styrning kan sammanfattas i några punkter.

- Införande av styrförmåga till tidigare ostyrda vapen.
- Tillförande av autonom eller semi-autonom förmåga till styrda vapen.

²² En utmärkt introduktion till s.k. klassiska tekniker (och en del nyare) ges i [76].

²³ En figur som kanske kan bidra till förståelsen av detta finns i [85], figur 3.

- Ökad användning av modulariserade system (t.ex. kit-koncept) för att sprida utvecklingskostnaderna och kunna återanvända delar från existerande vapensystem.
- Ökad miniaturisering av hårdvara och integrering av funktioner (mjukvara såväl som hårdvara).

Den viktigaste trenden som går att urskilja är att styrförmåga snart finns införd hos alla typer vapen. Denna trend är tydlig inom de projektilbaserade vapnen som från början varit ostyrda, men där styrförmåga gradvis har tillförts. Detta startade med projektiler/granater av grövre kalibrer, skjutna från såväl slätborrade som räfflade eldrör (med artilleri, stridsvagnar och granatkastare), och har nu nått ner till sådana som är skjutna från bärbara vapen av mindre kaliber.

Den andra trenden är att de vapen som har haft styrförmåga nu även får utökad styrförmåga. Ett bra exempel på detta är alla fire-and-forget-vapen där målval sker manuellt, men vapnet sedan styr sig självt mot målet. För luftvärnsmissiler började denna utveckling nästan omedelbart, jaktmissiler (som kom något senare) hade semi-autonom förmåga redan från början, och för markmålsmissiler har den utvecklingen nu tagit fart. Fullt ut autonoma system har även under de senaste decennierna börjat dyka upp, t.ex. i form av kringfläckande missiler som både kan välja ut mål och styra mot dessa helt autonomt.

Som nämnts ovan är kostnaden normalt det stora hindret att tillföra vapen ökad styrförmåga och autonomitet, inte tekniska hinder (med undantag för de allra minsta vapnen). Därför är det naturligt att kit-koncept, som framgångsrikt använts för styrda bomber under lång tid, även kommer att etablera sig för styrda granater (artilleri och granatkastare) så att förmåga till styrning tillförs genom utbyte av en komponent av vapnet, tändröret.

Slutligen, den ökande miniaturiseringen av komponenter och möjlighet att mekaniskt, elektrisk och optiskt integrera olika funktioner har gjort det möjligt att nu realisera sådant som för några decennier sedan endast kunde ses på film, såsom styrd finkalibrig ammunition. Denna integration ger synergieffekter som kan hålla kostanden för ett vapensystem nere, såsom GPS-stöttning av ett TN-system så att det senare kan göras billigare. Detta gör att förmåga till precisionsstyrning kan tillföras ett vapen till en begränsad kostnad.

Värt att notera är att även om utvecklingen inom vissa områden av reglerteori har varit dramatisk inom de senaste tre-fyra decennierna så har detta endast fått begränsat genomslag vad beträffar förmågor hos styrda vapen. Som nämnts ovan har det främst gett gradvisa förbättringar, och generellt en snabbare designcykel med mera generellt tillämpbara metoder. Den viktiga utvecklingen inom området styrprinciper/metoder är att många tekniker som tidigare endast ansågs vara av akademiskt intresse, såsom realtidsberäkning med hjälp av metoder från optimal styrteori,²⁴ nu även är av praktiskt intresse i och med den dramatiskt ökande beräkningskapaciteten hos datorer.

²⁴ Trots detta kommer även i en nära framtid de flesta sådana lösningar att innehålla ett stort mått av tabellerade funktioner, där endast interpolation i dessa görs i realtid.

5 Navigering

Med navigering avses förmågan att bestämma position, hastighet och orientering på en plattform. I styrda vapen används sedan många år tillbaka GPS och tröghetssensorer. Från en GPS-mottagare fås position och hastighetsangivelse med ett begränsat fel (långtidsstabilitet) medan ett tröghetsnavigeringssystem (TN) ger position och hastighet som driver med tiden. Tröghetsnavigeringssystem har ofta en hög uppdateringstakt, och ger under korta tidshorisonter god noggrannhet. Dessutom erhålls orientering, vinkelhastighet och acceleration från tröghetsnavigeringssystem. GPS-mottagare är känsliga för störning medan tröghetssystem är störfasta. Dessa komplementära egenskaper hos de två systemen är anledningen till att man ofta kombinerar dem i styrda vapen.

I detta kapitel beskrivs kortfattat den utveckling som skett under de senaste åren, samt en sammanfattning av trender.

5.1 GPS

Den militära användningen av GPS är idag mycket omfattande, och ett stort antal vapensystem baseras på GPS för navigering, som de styrda bomberna GBU-49, GBU-39 (SDB 1) och den styrda artillerigranaten Excalibur. Under normala förhållanden och förutsättningar erhålls mycket hög prestanda och precision. Kan GPS-signalerna blockeras/störas ut kan vapensystemets prestanda och noggrannhet försämrats, beroende på om det finns andra system för navigering (t.ex. tröghetsnavigering), eller om precisionsvapnet har en målsökare som t.ex. GBU-49. Ett flertal precisionsvapen saknar målsökare som t.ex. GBU-39 och JDAM och styrs av ett integrerat GPS/TN system. Denna typ av precisionsvapen benämns *Bomb On Coordinates* och kräver korrekta och noggranna koordinater för målet (latitud, longitud och höjd). Syftet med att använda ett integrerat GPS/TN-system är att tillföra och erhålla en allvädersförmåga för att kunna verka med vapnet, givet att man har målets koordinater.

Utveckling inom GNSS²⁵-området är mycket omfattande både när det gäller de militära delarna och de civila (öppna) delarna. GPS är det satellitbaserade navigeringssystem som förekommer i västerländska vapensystem, och GLONASS återfinns i ett antal ryska styrda vapen (t.ex. nyare versioner av Krasnopol).

5.1.1 Skillnad mellan militär och civil GPS

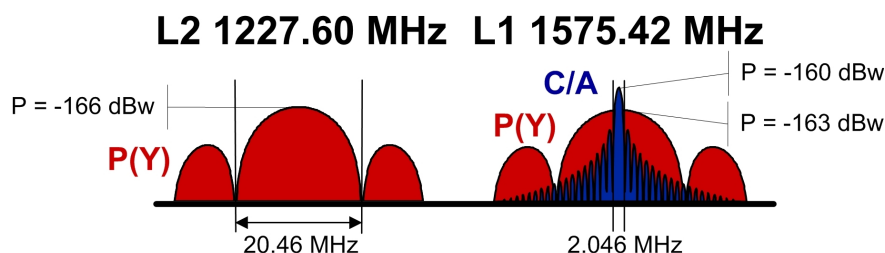
GPS-mottagare kan delas upp i två kategorier med avseende på vilken typ av signal som mottagaren använder, militära mottagare och civila mottagare. Med militär mottagare (militär GPS) avses en mottagare som använder den militärt krypterade signalen P(Y) och i framtiden även M-koden. Med civila GPS-mottagare avses mottagare som endast använder de öppna civila signalerna från GPS.

Skillnaden mellan militära och civila mottagare när det gäller noggrannhet är i princip försumbar. Den stora skillnaden är att militära GPS-mottagare är designade för att hantera störning och så kallade telekrigsscenarion, och har möjlighet att utnyttja de krypterade militära signalerna. Jämfört med en civil GPS-mottagare är militära GPS-mottagare robustare mot störning och bättre skyddade mot vilseledning. Den högre robustheten mot störning kommer dels genom kryptering, större bandspridning av den militära signalen och funktioner i själva mottagaren. Militära GPS-mottagare har inbyggda funktioner för störundertryckning och detektion.

²⁵ GNSS - Global Navigation Satellite System är ett samlingsnamn för satellitbaserade navigeringssystem såsom Amerikanska GPS, Europeiska Galileo, Ryska GLONASS och Kinesiska BeiDou (Compass).

Militära GPS-mottagare använder i dag den krypterade P(Y)-signalen på frekvensbanden L1 och L2, medan civila GPS-mottagare endast kan använda den okrypterade signalen, som benämns C/A (Coarse Acquisition) och ligger på frekvensbandet L1. Figur 9 visar de fullt operativa GPS-signalerna; på frekvensbandet L1 (1575 MHz), sänds både C/A- och P(Y)-signalerna och på frekvensbandet L2 (1227 MHz) sänds enbart P(Y) signalen.

Militära mottagare har generellt högre kostnad jämfört med civila mottagare, men för mottagare som är anpassade för specifika tillämpningar, t.ex. flyg och precisionsvapen, är skillnaden i kostnad mindre.



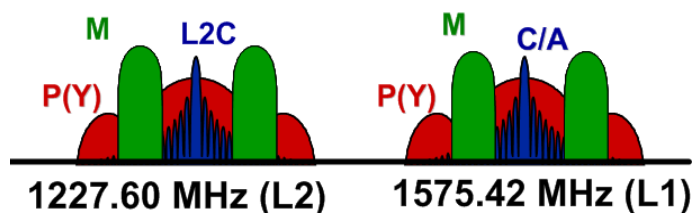
Figur 9. Spektrumplot för militär GPS och civil GPS. Rött är den militära krypterade signalen P(Y) och blått är den civila C/A-signalen. Bandbredden är betydligt större för P(Y)-signalen jämfört med C/A-signalen

5.1.2 Utveckling av militär GPS

Tidigare krävde militära GPS-mottagare C/A-signalen för att låsa på satelliter (acquisition). I och med utvecklingen inom miniaturisering och ökad beräkningskapacitet för signalbehandling kan militära GPS-mottagare idag direkt låsa på P(Y)-koden och är inte längre beroende av den civila C/A-signalen [92].

M-code

För att möta den ökade hotbilden mot GPS införs en ny militär signal som benämns M-code (military-code), som kommer att sändas på både L1 och L2. Signalen är modulerad med en BOC (Binary Offset Carrier) spridningskod, som medför att energin är flyttad från centrumfrekvensen till två sidolober (se figur 10). För att införa m-koden krävs nya GPS-satelliter, och från version GPS IIR-M finns de nya signalerna med. I november 2012 fanns sju stycken fungerande GPS IIR-M-satelliter i omlopp [93].



Figur 10. Utveckling av GPS med M-kod-signalen på L1 och L2 (grönt) och den nya civila signalen L2C.

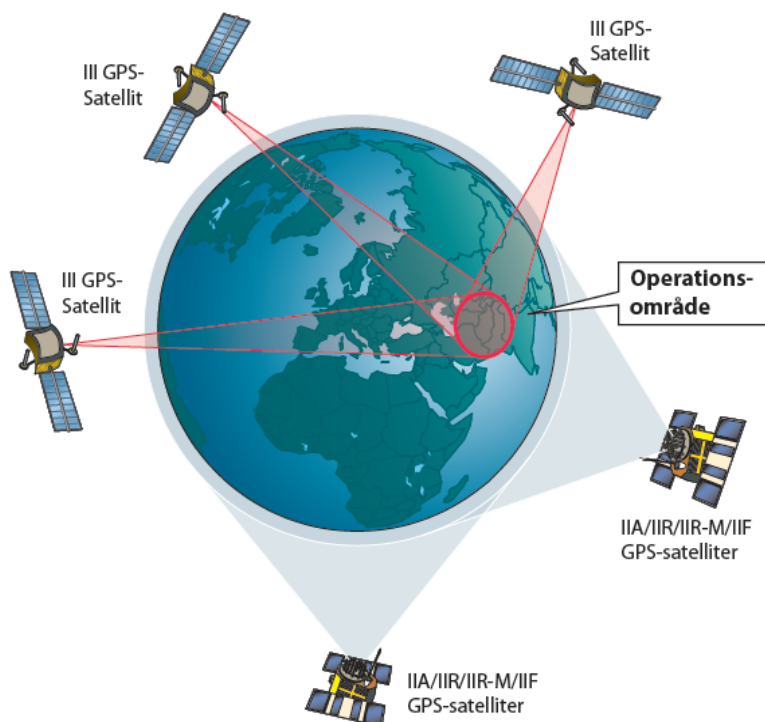
Modernized GPS User Equipment (MGUE)

Dagens militära GPS-mottagare som baseras på *SAASM* (Selective Availability Anti-spoofing Module) kommer inte att kunna använda M-kod, utan nya militära GPS-mottagare krävs. Utveckling pågår av M-kod-kapabla GPS-mottagare inom programmet *Modernized GPS User Equipment (MGUE)*, som ska vara klart runt 2016. Med M-koden och de nya militära GPS-mottagarna kan prestanda förbättras. Utvecklingen fokuserar framförallt på att öka robustheten mot störning och därmed höja förmågan att kunna verka i telekrigsscenarion och inkluderar (se [94])

- tillgång till M-code signalen vilket möjliggör (egen) störning av den civila C/A koden samtidigt som de militära (kontrollerade) mottagarna kan verka oberört
- förbättrade funktionalitet för detektion av falska signaler (Anti-Spoof)
- pålåsning på satellit signaler (acquisition) även under störning

Spot-beam

I nästa generation av GPS-satelliterna (GPS Block IIIC) kommer det att finnas möjlighet att markant öka den mottagna signaleffekten för M-kod genom riktad sändning mot ett operationsområde. Denna teknik benämns *spot beam* (se figur 11). Med M-kod-signalen och spot beam kommer möjligheterna att genomföra NAVWAR- (Navigational Warfare) konceptet att öka markant, då signalen dels är robustare mot störning och dels kan de civila signalerna störas utan att det påverkar militära användare. Den nya *spot beam* förmågan kommer att vara tillgänglig då GPS Block III är fullt operationell. Enligt [95] pågår GPS Block III-programmet mellan 2014 och 2024. De första satelliterna är enligt [96] under utveckling med en planerad uppskjutning under 2014 och 2015.



Figur 11. Illustration av spot beams, vilket innebär att den mottagna effekten för M-kod-signalen ökas med 20 dB i ett operationsområde. Detta ökar robustheten mot störning i motsvarande grad. (Illustration: FOI/Eken produktion 2012 ©.)

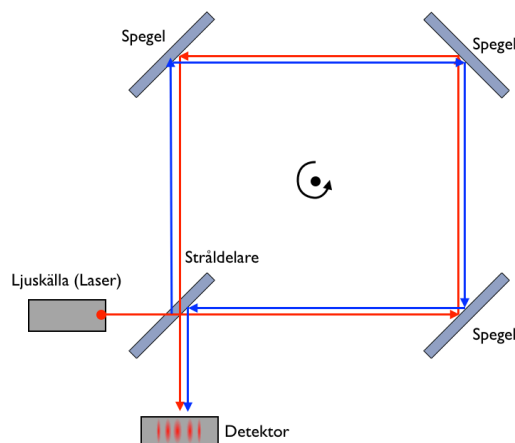
En civil GPS-mottagare kan utsättas för vilseledning (*spoofing*), vilket innebär att en falsk GPS-signal genereras lokalt. Om GPS-mottagaren accepterar den falska signalen kommer GPS-mottagaren att visa den position som antagonisten har genererat. De militära GPS-signalerna är krypterade, vilket ger skydd mot vilseledning. Att genomföra en vilseledningsattack är relativt svårt, jämfört med störning, och stor sakkunskap och dyr teknisk utrustning krävs.

5.2 Atominterferometri

Interferometri är samlingsnamn för ett antal tekniker där vågor (för det mesta elektromagnetiska) överlagras och bildar ett mönster på en skärm eller i någon form av

detektor. Ur mönstret kan skillnaden i de olika vågornas fas utläsas. Detta möjliggör mycket noggranna mätningar av t.ex. sträcka.

Interferometri är i dag en vanlig tillämpning inom navigering då tekniken används i ringlasergyron och fiberoptiska gyron. I både ringlasergyron och fiberoptiska gyron utnyttjas den så kallade Sagnac-effekten för att mäta rotation alternativt vinkelhastighet. Sagnac-effekten baseras på en laserstråle, som delas upp i två strålar och via speglar eller optisk fiber leds i varsin riktning i en sluten ring. Då ringkonstruktionen roterar färdas de två strålarna olika långt, och då strålarna sammanförs uppstår ett interferensmönster ur vilken fasskillnaden kan mätas (se figur 12). Fasskillnaden är proportionell mot den vinkel som gyrot har vridits under ett kort tidsintervall.



Figur 12. Illustration av hur traditionella ringlasergyron och fiberoptiska gyron är uppbyggda. Då plattformen roterar färdas de två strålarna olika långt och ger upphov till ett frekvensskift som kan mätas i detektorn.

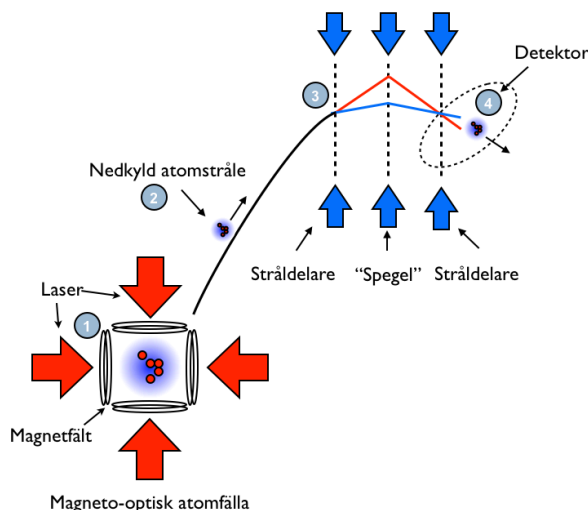
Atominterferometri utnyttjar det faktum att materia kan ha vågliknande egenskaper.²⁶ Detta innebär att strålar av atomer kommer att ha en fas som påverkas på av rotation enligt Sagnac-effekten som beskrevs ovan.

I atominterferometri skapas ett moln av nedkylda atomer (ofta rubidium eller cesium) med hjälp av magnetfält och lasrar (se figur 13). Då magnetfältet stängs av släpps eller skjuts det nedkylda atommolnet iväg fritt fallande i en bana. Istället för speglar, som i traditionella ringlasergyron, används pulserande lasrar för att splittra och sammanfoga strålar av atommoln. Lasrarna är fast monterade i farkosten, och en acceleration eller rotation av farkosten (och därmed lasrarna) kommer att inducera ett frekvensskift i atommolnet, som ger upphov till ett interferensmönster i detektorn.

Med atominterferometri kan ytterligare noggrannhet av fasmätning erhållas jämfört med traditionell interferometri baserat på ljus från en laser. Detta beror på att atomerna färdas långsammare än ljusets hastighet och att våglängden hos atomerna (de Broglie våglängden) är mindre än våglängden hos laser [97].

De första lyckade försöken med atominterferometri gjordes i början av 1990-talet [98], och man lyckades i början av 90-talet också genomföra ett antal experiment med att mäta acceleration och vinkelhastighet [99]. I början av 2000-talet har gravitationsmätningar baserat på atominterferometri genomförts med hög precision [98], och 2006 visades en komplett 6-axlig tröghetssensor upp [100].

²⁶ Detta upptäcktes redan 1924 av Louis de Broglie.



Figur 13. Konceptuell bild en atominterferometer. 1) Cesium eller rubidium atomer kyls med hjälp av lasrar ned nästan till absoluta nollpunkten och hålls på plats av ett magnetfält. 2) En nedkyld atomstråle skjuts iväg i ett vakuumrör. 3) En serie av optiska Raman-lasrar utgör interferometern och agerar motsvarande som speglar och stråldelare i traditionella interferometrar. 4) Om plattformen har roterat eller accelererat kommer skillnaden i atomstrålens frekvens att kunna detekteras, och acceleration eller vinkelhastighet kan beräknas.

De sensorer som togs fram under 90-talet och början av 2000-talet krävde laboratorieutrustning och var därmed stora och otympliga. Under denna period var de tilltänkta användningsområden främst ubåtar, där noggrann uppmätning av gravitationen skulle stötta existerande tröghetsnavigeringssystem. AOSense lanserade i slutet av 2010 en kommersiell gravimeter (för noggrann mätning av jordens gravitation) baserad på atominterferometri.

2005 gjordes en analys av förväntade navigeringsfel då tröghetssensorer baserade på atominterferometri används [101]. I denna analys uppvisades förvisso hög noggrannhet med sensorerna men man påpekar också att det tar lång tid att kyla ner atomer, och att uppdateringstakten på en tröghetssensor kommer att vara mycket låg, varpå sensorn inte kan mäta hela plattformens rörelse. Under början av 2000-talet hittades ett antal nya tekniker för att splittra strålarna med nedkylda atomer som ersätter laser (bland annat med magnetfält) och har potential att förminska sensorerna [102].

Atominterferometri är idag inte tillämpligt i styrda vapen på grund av storleken på sensorerna samt deras känslighet för vibrationer. Dock pågår det arbeten för att utveckla mindre och robustare system. DARPA har ett pågående program för att förbättra tekniken för tröghetssensorer baserade på atominterferometri. Detta program går under namnet PINS HiDRA²⁷ och ska enligt plan genomföra flygtester på ett system som har en volym under 20 liter [103] redan under 2013.

5.3 Integration av GPS och tröghetssensorer

För styrda vapen är frågan om tillförlitlighet, precision och integritet hos navigeringssystem ytterst viktig. Flertalet metoder för att undertrycka störning och komplettera olika sensorer med varandra finns. I styrda vapen som robotar och artillerigranater är utrymmet begränsat och utesluter (oftast) metoder som styrbara antenner (eng. antenna arrays). Integration mellan GPS och tröghetsnavigeringssystem är däremot vanligt. Traditionellt kombineras GPS och tröghetsnavigeringssystem med så kallad lös eller tät koppling (eng. loose/tight integration). Dessa skiljer sig åt med avseende på vilken information som

²⁷ Precision Inertial Navigation System High Dynamic Range Atom Sensors and Systems

hämtas från GPS-mottagaren. Position och hastighet används i en lös koppling och pseudoavstånd²⁸ respektive dopplerhastigheter används i en tät koppling.

En störtlågare metod är ultratät integration, som på engelska kallas Ultra Tight Integration eller Deep Integration. I denna metod återkopplas information tillbaka till GPS-mottagaren för att stötta dess följning av satellitsignalerna. Återkopplingen gör att GPS-mottagaren blir mindre känslig för störning. Produkter riktade mot militära tillämpningar finns sedan kring 2005. I FOI rapporten *Robust Navigering - Slutrapport* ([104]) beskrivs ultratät integration och ett antal produkter som var aktuella 2006.

Forskningen på ultratät integration har sedan 2006 fortskridit, och flertalet universitet tittar på prestanda hos metoden, speciellt med fokus på miljöer där GPS inte fungerar så bra. Exempel på sådana miljöer är tät skog, stadsmiljö och inomhus. Den främsta utvecklingen på området är att fler forskargrupper öppet analyserar prestanda hos ultratät integration, och även lyfter upp de potentiella problem som finns med metoden.

GPS-mottagare har en gräns när den mottagna signalen är så svag att de inte längre kan följa GPS-signalerna. För traditionella GPS-mottagare ligger denna gräns runt 32 dBHz då man tittar på signal-till-brus-förhållandet (carrier to noise ratio C/N). Under gynnsamma förhållanden, t.ex. på ett öppet fält, är signal-till-brus-förhållande för GPS runt 45 dBHz. Detta ger alltså en marginal på 13 dBHz för traditionella GPS mottagare. I skogsmiljö med ett lager av grenar och löv kan man förvänta sig att signalen försvagas med ca 10 dBHz [105] och inomhus avsevärt mycket mer. I [105] uppvisar man förmågan att med en ultratät integration följa satellitsignalerna ända ner till 15 dBHz inomhus (gränsen för traditionell GPS var 32 dBHz). Även i [106] påvisas god följeförmåga inomhus med signal brus-nivåer ner mot 20 dBHz.

5.4 Trender

En trend som pågått de senast åren är utvecklingen av smarta projektiler. Man kan i vetenskapliga artiklar från de senaste åren se en ökning av antalet studier kring positionering och orienteringsskattning specifikt för smarta projektiler såsom bankorrigerande tändrör, granatkastammunition och fenstabiliserade projektiler för luftförsvar. En anledning till denna trend är att GPS, accelerometrar, gyron, magnetometrar, styrdatorer med mera kan göras avsevärt mycket mindre idag än för bara några år sedan. Rogers och Costello påpekar i [107] att estimatorer för orientering har varit speciellt svårt att anpassa från de traditionella användningsområdena som flyg- och robottillämpningar. En anledning till detta är de stora påfrestningar som kanonutskjutna projektiler tvingas utstå. En annan anledning är kostnad och kompakthet. Detta är av större vikt för projektiler (som artillerigranater och luftvärnskanoner) än på robotsystem, då ett större antal projektiler avverkas. Därför tittar man mycket på hur enskilda sensorer (snarare än traditionella kompletta orienteringssystem) kan användas. Som exempel kan nämnas "Thermopiles" och magnetometrar för uppmätning av rollvinkel och rollvinkelhastighet. Thermopiles är en sensor som kan känna av utsänd IR-energi och används i [107] för att mäta vinkel mellan jordens horisont och zenit på himlen. Pekar sensorn rakt upp mot himlens zenit uppmäts endast en mycket liten IR-energi, medan pekar sensorn ned mot jorden uppmäts en hög IR-energi. Däremellan avtar den på ett välkänt vis, och ur detta kan en rollvinkel/rollvinkelhastighet beräknas.

I [108] beskrivs ett projekt från ISL²⁹, där man tittar på hur man med magnetometrar kan skatta rollvinkel hos en styrd supersonisk projektil avsedd för luftförsvar. Likaså demonstreras ett magnetometerbaserat system för smarta projektiler i [109] och [110]. Här trycker man också på behovet av att korrigera för den distorsion av uppmätt magnetfält som uppstår då en spinnande projektil färdas genom jordens magnetfält.

²⁸ GPS-mottagare mäter den tid det tar för en signal att färdas mellan satellit och mottagare. Då signalen går med ljusets hastighet kan tiden omvandlas till ett avstånd som då kallas pseudoavstånd.

²⁹ The French-German Research Institute of Saint-Louis

Man bör också nämna att den utveckling av kompakta MEMS-IMU:er (Micro-Electro-Mechanical-Sensors Inertial Measurement Unit), som startade i början av 2000-talet under namnet *Common Guidance Common Sense*, har resulterat i stabila produkter med hög prestanda. Två av dessa produktserier är HG1700 och HG1900 från Honeywell. Båda är idag mycket vanliga i styrda vapen som taktiska missiler och artillerigranater. Prestandan hos dessa sensorer har förbättrats kontinuerligt, och ser ut att fortsätta göra det några år framöver. Detta beror främst på förbättrade kalibreringsförfaranden och fabrikationsförmåga snarare än något skifte i teknologi.

Trenderna inom navigeringsområdet, med fokus på styrda vapen, kan sammanfattas i följande punkter:

- kontinuerlig utveckling av GNSS genom införandet av nya (både militära och civila) GPS-signaler och utvecklingen av Galileo
- införandet av navigeringsförmåga i allt mindre plattformar
- ökad öppen information kring ultratät integration
- på sikt kan införandet av atominterferometri ge ny navigeringsförmåga i svåra miljöer (t.ex. störning eller undervatten)
- ökad prestanda hos små MEMS-IMU:er

6 Bildalstrande IR-målsökare

De första målsökarna konstruerades för att bekämpa mål i relativt enkel bakgrund såsom luft- och sjömål. Därefter utvecklades målsökande IR-robotar för bekämpning av markmål, då det generellt sett är svårare att detektera markmål än luft- och sjömål. Detta beror på att markmålen befinner sig i en mer variationsrik miljö, har lättare att gömma sig i terrängen eller kamouflera sig som en del av bakgrunden. Med moderna bildalstrande³⁰ IR-målsökare och signalbehandling har detektionsmöjligheten och målföljningen förbättrats, vilket har lett till minskad känslighet för motmedel och förbättrad förmåga att urskilja mål i utmanande terräng.

Den korträckviddiga jaktroboten IRIS-T³¹ från Diehl BGT Defence är ett exempel på ett styrt vapen utrustat med en bildalstrande IR-målsökare. Det finns dessutom indikationer på att Joint Air-to-Ground Missile (JAGM) från Boeing/Raytheon och Small Diameter Bomb II (SDB II/GBU 53) kommer att ha bildalstrande IR-målsökare. Dessa system beskrivs kortfattat nedan.

6.1 IRIS-T, JAGM och SDB II

IRIS-T är en korträckviddig jaktrobot som har utvecklats för att i många fall ersätta AIM-9 Sidewinder [111]. I Sverige har roboten beteckningen Rb 98 och används som beväpning på JAS 39 Gripen [112]. Målsökaren är av bildalstrande typ och arbetar i det infraröda området. IRIS-T är utrustad med Thrust Vector Control (TVC), vilket gör att motorns dragkraft kan riktas åt olika håll för att på så vis förbättra robotens svängprestanda. Detta utnyttjas bäst vid låga farter och ger då roboten en mycket liten svängradie.

För närvarande utvecklas två markavfyrate versioner av IRIS-T: IRIS-T SLS och IRIS-T SL. IRIS-T SLS använder en oförändrad IRIS-T som en luftvärnsrobot medan IRIS-T SL är en uppgraderad version som har utrustats med booster, noskon för minskat luftmotstånd, datalänk och navigeringssystem baserat på GPS och TN. Denna uppgradering möjliggör bekämpning på medellång räckvidd. (För mer information om uppgraderingarna se tillverkarens hemsida [113].)

JAGM (Joint Air-to-Ground Missile) [114] är en attackrobot under utveckling av Raytheon och Boeing. Robotkroppen och stridsdelen till JAGM kommer från Boeing, och Raytheon står för målsökaren. Enligt [115] är JAGM, på samma sätt som Hellfire, utrustad med två målsökarmoder, semi-aktiv laser och radar med millimetervåglängd, men kan vid behov komma att utökas med en tredje mod. Den tredje moden är troligen en bildalstrande-IR, då Small Diameter Bomb II (SDB II) enligt [116] ska använda samma målsökare från Raytheon och [117] rapporterar om en eventuell bildalstrande IR förmåga i SDB II.

6.2 IR-sensorer

6.2.1 Bakgrund

De flesta militära IR-sensorer ligger inom de band som man kallar "Mid wavelength infrared" (MWIR, 3-5 μm) eller "Long wave length infrared" (LWIR, 8-12 μm). LWIR är anpassad för objekt kring rumstemperatur, medan MWIR är mer anpassad för hetare objekt (motorer, utblås, osv.). Vill man fånga en stor temperaturdynamik (både låg- och högtemperaturobjekt) i en scen är LWIR att föredra. I miljöer med hög luftfuktighet, t.ex. tropiska eller maritima scenarier, är MWIR bättre lämpat, då luftfuktigheten har en större

³⁰ Med bildalstrande avses en sensor som likt en digital kamera kan ta en bild av omgivningen (här inom det infrarödaområdet).

³¹ IRIS-T står för Infra-Red Imaging System - Tail/Thrust Vector Controlled

dämpningseffekt i LWIR. I torra, kalla klimat har dock LWIR en fördel i och med den högre atmosfärstransmissionen för detta band.

För MWIR är de vanligaste detektormaterialen Indiumantimonide (InSb) och Kvicksilver-cadmium-tellurid (HgCdTe) (eng. Mercury-Cadmium-Telluride, MCT). Dessa detektor-material behöver kylas för att god känslighet ska erhållas. I LWIR finns både kylda MCT-baserade kameror och okylda mikrobolometer-kameror som främsta alternativ. P.g.a. högre känslighet hos kylda sensorer har dessa bättre avståndsprestanda jämfört med okylda alternativ, men här måste även sådana egenskaper som kostnad, storlek, vikt och effektkrav vägas in. För kylning av IR-sensorer i robotar används vanligen komprimerad gas.

Tidiga IR-målsökare var ofta bara känsliga för ett våglängdsområde, t.ex. MWIR, och dessa kallas nu enfärgade. Moderna IR-målsökare konstrueras idag ofta för att vara känsliga inom både MWIR och LWIR, och sådana sensorer kallas tvåfärgssystem. Tvåfärgssystem är svårare att lura med motmedel som facklor [118].

6.2.2 Forskningstrender

Hyperspektralsensorer

Mycket forskning och utveckling finns idag inom hyperspektrala sensorer för framtagning av detektorer med styrbar spektral känslighet. Styrbar känslighet för varje pixel gör det möjligt att göra en avvägning mellan spektral och spatiell upplösning.

Det stora våglängdsområdet (från ultraviolett till infrarött) som kan användas ger hyperspektral teknik en stor potential för att öka möjligheten att detektera och känna igen olika mål. Med hyperspektral teknik kan man mycket bra känna igen t.ex. klorofyll, så även om ett kamouflagenät är bra kamouflage för vanliga våglängdsband kan hyperspektrala sensorer upptäcka det. Färg på militära fordon skiljer sig från vanlig färg på civila fordon, och med en hyperspektral sensor kan man tydligt se skillnad mellan militära och civila mål, vilket är bra för robotar. En stor nackdel med hyperspektrala sensorer idag är kostnaden.

Nanoteknik

Det pågår en utveckling av nya sensorer baserade på kombinationer av traditionell etablerad teknik och nya innovativa nanotekniker. Kostnaden för högpresterande sensorer väntas därför minska. Ett exempel där nanoteknik kan användas är för att öka känsligheten i sensorerna, där till och med enskilda fotoner kan detekteras. Nanotekniker som kan komma att användas är t.ex. nanorör, nanotrådar, nanostavar, kvantpunkter och organiska molekyler. De här teknikerna möjliggör att pixelstorleken minskar under diffraktionsgränsen, vilket kan reducera sensorstorleken ytterligare.

Okylid IR

Mycket av arbetet med okylda IR-sensorer går ut på att öka känsligheten, förenkla tillverkningsprocessen och minska tillverkningskostnaderna. Ökad känslighet innebär ökad temperaturupplösning och bildhastighet, alternativt minskad pixelstorlek och ökat antal pixlar. Framsteg inom detta område har gjort det möjligt att använda okylda IR-sensorer i tillämpningar där bara kylda system kunde användas tidigare. Kylda sensorer kan idag göras med fler pixlar. Nya strukturer (t.ex. II-lattice) för IR-detektorer kommer att ge förbättrade prestanda till en lägre kostnad.

Metamaterial

Optiken hos IR-sensorer är fortfarande en dyr komponent. Idag är den ofta av germanium, vilket bidrar till att IR-kameror fortfarande är ungefär 20 gånger dyrare än vanliga videokameror. Ett forskningsområde är därför att göra billigare optik baserad på alternativa material. Metamaterial [119] kan ge intressanta optiska egenskaper, t.ex. negativa refraktionsindex. Detta är material som inte finns i naturen, utan som på

konstgjord väg tas fram för specifika ändamål. Det gör det möjligt att producera ett antal nya komponenter som inte finns i dag, t.ex. superlinser och maskering.

6.3 Signalbehandling

Signalbehandlingen i bildalstrande IR-sensorer kan delas in i tre viktiga delar, måldetektion, målföljning och målassociation.

6.3.1 Bakgrund

Måldetektion

För detektion av fordon och fartyg i bildalstrande IR-målsökare finns det robusta algoritmer som fungerar i realtid (t.ex. boosting och supportvektormaskiner).

Målföljning

Målföljningsalgoritmer används för att skapa målsår från givna observationer (detektioner). Detta ger möjlighet att följa måls position, hastighet och orientering, och i förekommande fall andra viktiga målegenskaper. Målföljningsalgoritmer kan genom att använda en modell för hur målet rör sig över tiden överbrygga begränsade perioder utan observationer och undertrycka både det brus som alltid finns i riktiga observationer och falsklarm, som inte beter sig som mål.

Målassociation

Ett viktigt steg i målföljning är associeringen av målobservationer till målsår som algoritmen följer. För att göra detta jämförs varje observation med de observationer varje mål förväntas ge upphov till. De bästa associationerna väljs ut för att uppdatera nuvarande målsår och i förekommande fall skapa nya.

Två mycket vanliga associationsmetoder är Global Nearest Neighbour ([120], [121]), där de totalt sett mest sannolika associationerna väljs ut, och Joint Probabilistic Data Association ([122], [123]), där flera observationer ger bidrag till samma målsår baserat på hur sannolika de är. När väl observationer och mål har parats ihop används sedan följefilter (eng. Tracking Filter) för att bestämma önskade målegenskaper baserat på bayesiansk statistik. Detta görs vanligen med Kalman Filter [124] eller, när olinjäriteter förekommer, Extended Kalman Filter [125].

6.3.2 Forskningstrender

Måldetektion

Fortsatt forskning behövs för att öka robusthet vid detektion av delvis skylda mål på långa avstånd, i dåligt väder, vid olika årstider etc. Detektion av små UAS och smygpassade kryssningsrobotar behöver studeras i framtiden.

Målföljning

Målföljning är ett förhållandevis moget forskningsområde som har varit aktivt sedan mitten av 1900-talet. Forskningsområdet är fortsatt aktivt än idag, vilket kan ses t.ex. från ett stort antal publikationer i internationella konferenser³². Forskning inom området är idag inriktat främst mot metoder för att hantera olinjära problem, vilket är viktigt för att få ut mer information ur sensordata. I sammanhanget bör nämnas olika varianter på Kalman Filter, såsom Unscented Kalman Filter [126] och sekventiella Monte Carlo-metoder, som också benämns partikelfilter ([127], [128]). Arbetet här går till stor del ut på att anpassa

³² T.ex. International Conference on Information Fusion och IEEE Conference on Aerospace Conference, och journaler såsom IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems.

dessa metoder till olika nya problemställningar, samt att anpassa metoderna till att effektivt utnyttja parallell hårdvara.

Målassociation

Även associationssteget utvecklas i takt med att allt mer beräkningskapacitet blir tillgänglig. Ett exempel på detta är att multihypotestesting (MHT) ([129], [130]) och variationer därav, där inte bara en, utan flera olika associationshypoteser behandlas samtidigt, blir allt vanligare. Ett alternativt angreppssätt representeras av teorin kring Finite Set Statistics (FISST) [131], där ingen association behöver göras, utan istället hanteras implicit i den matematiska problemformuleringen. Under senare år har särskilt stort intresse riktats mot forskning om olika former av Probability Hypothesis Density (PHD) filter [131] som approximerar FISST.

Att välja rätt mål i en grupp och att diskriminera bort skenmål kan vara viktigt i flera fall. Forskning pågår för att robust klassificering av mål ska erhållas.

6.4 Trender

En viktig trend hos flera fordon, fartyg och flygplan idag är att de signaturanpassas för att bli svåra att upptäcka. Sådana exempel är Visby-korvetten och det kamouflagesystem med termiska plattor som BAE Systems utvecklar. De termiska plattorna används för att förändra farkostens signatur genom att efterlikna bakgrunden som den befinner sig i [132].

Förbättrade sensorer och bättre signalbehandling (såsom beskrivits ovan) kommer succesivt att öka förmågan att detektera och identifiera olika måltyper oavsett väder. Förutom förbättringar av de enskilda sensorerna utvecklas målsökare med två eller flera typer av sensorer, s.k. multisensorsystem.

En viktig trend för missiler är att precisionen ökar, vilket medför att sidoskador (eng. collateral damage) kan minskas genom att mindre verkansdelar kan användas. Målsökare bidrar starkt till ökad precision hos robotar.

De identifierade forskningstrenderna inom området bildalstrande IR-målsökare kan sammanfattas i följande punkter:

- kombination av flera olika sensortyper (så som i JAGM och SDB II)
- utnyttjande av hyperspektralsensorer för förbättrad måligenkänning och klassificering
- nya material för ökad känslighet och minska kostnad

7 Referenser

- [1] E.B. Atkeson. Precision guided munitions: Implications for detente. Parameters, Journal of the US Army War College, Volume V, Number 2, 1976.
- [2] S.J. Dudzinsky and J.F. Digby. The strategic and tactical implications of new weapons technologies. Technical Report P-5765, RAND Corporation, Santa Monica, CA, december 1976.
- [3] B.D. Watts. Six decades of guided munitions and battle networks: Progress and prospects. Technical report, Center for Strategic and Budgetary Assessments, Washington, DC, Mars 2007.
- [4] J.F. Digby. Precision-guided munitions: Capabilities and consequences. Technical Report P-5257, RAND Corporation, Santa Monica, CA, juni 1974.
- [5] F. Fresconi, T. Brown, I. Celmins, J. DeSpirito, M. Ilg, and J. Maley. Very affordable precision projectile system and flight experiments. In Proc. 27:th Army Science Conference, Orlando, FL, Paper DO- 04, 2010.
- [6] AGARD Advisory report. Precision terminal guidance for munitions. Teknisk-rapport AGARD-AR-342, NATO, Neuilly-Sur-Seine, France, februari 1997.
- [7] K. Andersson, S. Axberg, P. Eliasson, S. Harling, L. Holmberg, E. Lidén, M. Reberg, S. Silfverskiöld, U. Sundberg, L. Tornérhielm, B. Vretblad, and L. Westerling. Lärobok i Militärteknik, vol. 4: Verkan och Skydd. Försvarshögskolan, Stockholm, 2009.
- [8] G.M. Siouris. Missile Guidance and Control Systems. Springer, New York, NY, 2004.
- [9] I. Daalder. A tactical defense initiative for Western Europe? Bull. Atomic Scientists, 4(7):34–39, Maj 1987.
- [10] M.W. Fossier. The development of radar homing missiles. J. Guidance, 7(6):641–651, 1984.
- [11] J. Gribbe (red.) T. Kaiserfeld, I. Petterson, Tidig flygradar - Transskript av ett vittnesseminarium vid Tekniska museet i Stockholm den 15 april 2008. ISBN 978-91-7415-042-1. 2008.
- [12] N.A. Shneydor. Guidance and Pursuit: Kinematics, Dynamics and Control. Horwood, Chichester, UK, 1998.
- [13] Eugene L. Fleeman. Tactical Missile Design. Education Series. AIAA, Reston, VA, 2nd edition, 2006.
- [14] R. Barrett, R. Barnhart, and R. Bramlette. Steerable adaptive bullet (StAB) piezoelectric flight control system. In H.A. Sodano, editor, Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems, Proc. of SPIE, volume 8341, San Diego, CA, 2012.
- [15] H. Edefur, Ola Hamnér, U. Nilsson, and J.W.C. Robinson. Two novel control methods for aerodynamic missiles. Technical Report FOI-R– 2035–SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), Stockholm, december 2006.

- [16] J. Sahu. Time-accurate computations of free-flight aerodynamics of a spinning projectile with and without flow control. Technical Report ARL-TR-3919, U.S. Army Research Laboratories, september 2006.
- [17] T. Hurtig, A. Larsson, and M. Liefvendahl. Electrohydrodynamic flow control – a literature survey. Technical Report FOI-R–2417–SE, Swedish Defence Research Agency (FOI), november 2007.
- [18] P. Appelgren, T. Hurtig, M. Skoglund, and S. Wallin. Electrohydro- dynamic flow: Status report 2009. Technical Report FOI-R–2799–SE, Swedish Defence Research Agency (FOI), august 2009.
- [19] P. Gnemmi, R. Charon, J.-P. Dupérourx, and A. George. Feasibility study for steering a supersonic projectile by a plasma actuator. *AIAA Journal*, 46(6):1308–1317, juni 2008.
- [20] NATO. Proc. NATO RTO Applied Vehicle Technology Panel Symposium: Missile Aerodynamics, Sorrento, Italy, maj 1998.
- [21] W.D. Washington and M.S. Miller. Experimental investigations of grid fin aerodynamics: A synopsis of nine wind tunnel and three flight tests. In Proc. NATO RTO Applied Vehicle Technology Panel Symposium: Missile Aerodynamics, Sorrento, Italy, maj 1998.
- [22] S.L. Borden. Small guided munitions – path ahead. In Proc. Precision Strike Annual Review, Fort Waldon Beach, FL, mars 2009.
- [23] H.D. Lerche and F. Tumbrägel. Radar seeker based autonomous navigation update system using topography feature matching techniques. In Proc. NATO AGARD Conference 524, Advances in Guidance and Control of Precision Guided Weapons, pages 22–1–22–13, Ottawa, Canada, maj 2002.
- [24] J.C. Savage, J.K. O’Neal, R.A. Brown, and J.E. Keeler. Powered Low Cost Autonomous Attack System: cooperative, autonomous, wide-area- search munitions with capability to serve as non-traditional ISR assets 36 in a network-centric environment. In G.W. Kamerman, editor, *Laser Radar Technology and Applications X*, Proc. of SPIE Vol. 5791, pages 61–69. SPIE, Bellingham, WA, 2005.
- [25] G. Haynes and E. Hyman. Non-line-of-sight launch system – a lethal combination. In Proceedings 24th Army Science Conference, Orlando, FL, 2004.
- [26] R. Summers. Non-line of sight launch system program up- date. [http://www.dtic.mil/ndia/2004precision_strike/ Summerspresentation.pdf](http://www.dtic.mil/ndia/2004precision_strike/Summerspresentation.pdf) (besökt 2013-03-01). Presentation given at Precision Strike Summer PEO Forum, juli 2004.
- [27] F.J. Regan and J. Smith. Aeroballistics of a terminally corrected spinning projectile (tcsp). *Journal of Spacecraft*, 12(12):733–738, december 1975.
- [28] C.Q. Cutshaw and L. Ness, editors. *Jane’s Ammunition Handbook 2007-2008*. Jane’s Information Group, Coulsdon, Surrey, UK, 13:th edition, december 2004.
- [29] K. Brannen. ATK wins U.S. Army precision mortar contract. *Defense News* (Digital Edition), (besökt 2013-02-27), april 2010.

- [30] J.W.C. Robinson. Flight mechanical modeling of a precision guided mortar munition. Technical Report FOI-R-2618-SE, Swedish Defence Research Agency (FOI), july 2010.
- [31] G. Bischer. Precision guided mortar munition, June 1999. Presentation available at <http://www.dtic.mil/ndia/infantry> (besökt okt. 2008).
- [32] J. Bonomo, G. Bergamo, D.R. Freilinger, J. Gordin IV, and B.A. Jackson. Stealing the sword – limiting terrorist use of advanced conventional weapons. Technical Report MG510, The RAND Corporation, Santa Monica, CA, 2007.
- [33] U. Nilsson, J.W.C. Robinson, P. Ögren, and B. Boberg. Performance analysis methods applicable to precision guided mortar munitions. Technical Report FOI-R-2617-SE, Swedish Defence Research Agency (FOI), december 2008.
- [34] L. Hollingsworth. PGMM XM395 precision guided mortar munition. In Proc. 7:th Intl. Artillery and Indirect Fire Symposium & Exhibition, June 2002. Presentation available at <http://www.dtic.mil/ndia/2002artillery> (besökt okt. 2008).
- [35] L. Ness and A.G. Williams, editors. Jane's Ammunition Handbook 2007-2008. Jane's Information Group, Coulsdon, Surrey, UK, 16:th edition, december 2007.
- [36] A. Pezzano. XM395 Precision Guided Mortar Munition: Responsive, standoff precision lethality for highly deployable mobile forces. <http://www.dtic.mil/ndia/2005smallarms/tuesday/pezzano.pdf>, Maj 2005. Presentation given at Intl. Infantry and Joint Services Small Arms Systems Annual Symposium (besökt 2013-02-27).
- [37] K. Andersson, N. Bartelson, and S. Bondesson. Common geometry smart projectiles, early studies and tests of a concept. In Proc. Eighth Intl. Symposium on Ballistics, pages IV 57–68, Orlando, FL, oktober 1984.
- [38] Report of the Committee of the Armed Services on H.R. 1401, Report no. 106-162, U.S. Government Printing Office, Washington, maj 1999.
- [39] M. Engel, K. Lewis, and H. Wendt. GIF Guidance Integrated Fuze. In Proc. 45th Annual Fuze Conference, Long Beach, CA, april 2001.
- [40] W. Worrell. GIF Guidance Integrated Fuze demonstration program. In Proc. 53rd Annual Fuze Conference, Lake Buena Vista, FL, maj 2009.
- [41] W.L. Williams and M.D. Holtus. Krasnopol: A laser-guided projectile. Field Artillery, pages 30–33, sep-okt 2002.
- [42] P.J. Burke and A. Pergolizzi. XM1156 Precision Guidance Kit (PGK) overview. In Proc. 54th Annual Fuze Conference, Kansas City, MO, maj 2010.
- [43] J.A. Clancy, T.D. Bybee, and W.A. Friedrich. Fixed canard 2-d guidance of artillery projectiles. U.S. Patent No. 6,981,672 B2, januari 2006.
- [44] TopGun, course correcting fuze for 155mm artillery. Produktblad. <http://www.iai.co.il> (besökt 2013-03-01), 2012.
- [45] J.W.C. Robinson and P. Strömbäck. Perturbation based guidance for a generic 2D course correcting fuze, 2013. Paper submitted to AIAA Guidance, Control

and Navigation Conference 2013, Boston, MA, aug. 19-22, 2013.

- [46] M. Perrin. Course correction fuze - integration technologies. In Proc. 55th Annual Fuze Conference, Salt Lake City, UT, maj 2011.
- [47] R. Pengelley. Defending the stockade: C-RAM solutions come forward to reinforce the ramparts. Jane's Intl. Defence Review, pages 58–64, juli 2007.
- [48] F. Ochser. The renaissance of gun-based defence. Military Technology (MILTECH), (4):42–49, 2007.
- [49] T. Cullen and C.F. Foss, editors. Jane's Land-Based Air Defence. Jane's Information Group, Coulsdon, Surrey, UK, 14:th edition, april 2001.
- [50] K. Heavey and J. Sabu. Application of computational fluid dynamics to a preliminary extended area protection system (EAPS) projectile. Technical Report ARL-MR-649, U.S. Army Research Laboratories, Huntsville, AL, september 2006.
- [51] P. Wey. Performance analysis of ISL's guided supersonic projectile. In Proc. 23rd Intl. Symposium on Ballistics, pages 655–663, Tarragona, Spain, april 2007.
- [52] B. Smith, R.W. Nourse, J.L. Baumann, and G. Sanders. Extended area protection system (EAPS) program overview. In Proc. 2006 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, March 2006. IEEEAC Paper 1069 (version 4, dec. 12, 2005).
- [53] T. Eschel. Missile mini-interceptor (EAPS) completes test flight. Defence Update, June 2012. http://defense-update.com/20120607_eaps-i.html (besökt 2013-03-04).
- [54] B. Hartlage, M. Owen, H. Dimeler, and Jr. R.A. Frederick. Enhanced counter air projectile. In Proc. AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Fort Lauderdale, FL, AIAA paper 2004-4086, juli 2004.
- [55] J. Williams, K. Brekke, S. Patrick, R. Crosswy, P. Hahn, and R.A. Frederick. Conceptual design of a guided interceptor. In Proc. AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Tucson, AZ. AIAA paper 2005-3847, juli 2005.
- [56] C.H. Tournes, R. Frederick, T. Carroll, J. Hester, and M. Farbman. Miniature interceptor guidance and control using second order sliding mode adaptive control. In Proc. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, San Francisco, CA. AIAA paper 2005-6158, augusti 2005.
- [57] P. Wey, C. Berner, E. Sommer, V. Fleck, and H. Moulard. Theoretical design for a guided supersonic projectile. In Proc. 22nd Intl. Symposium on Ballistics, Vancouver, BC, Canada, november 2005.
- [58] A. Dupuis, C. Berner, and A. Bernier. Aerodynamic characteristic of the A3 DRDC-ISL reference projectile: Missile with lattice fins. Technical Report TR 2005-216, Defence R&D Canada - Valcartier, augusti 2005.
- [59] K.C. Massey, J. McMichael, T. Warnock, and f. Hay. Mechanical actuators for guidance of a supersonic projectile. In Proc. 23rd AIAA Applied Aerodynamics

- Conference, Toronto, Ontario, Canada. AIAA paper 2005-4970, juni 2005
- [60] K.C. Massey, J. McMichael, T. Warnock, and f. Hay. Design and wind tunnel testing of guidance pins for supersonic projectiles. In Proc. 24th Army Science Conference, Orlando, FL, december 2005.
 - [61] W.J. Marx, B.R. Peters F.C. Wessling III, A. Thies, B. Strickland, and D. Lianos. Miniature smart munitions/guided projectiles for the objective force. In Proc. 23rd Army Science Conference, Orlando, FL, december 2002.
 - [62] J. Lipeles. Smart bullet. U.S. Patent No. 6,422,507 B1, juli 2002.
 - [63] J. Lipeles and R.G. Brosch. Guided bullet. U.S. Patent No. 6,474,593 B1, november 2002.
 - [64] J.F. Jones, B.A. Kast, M.W. Kniskern, S.E. Rose, B.R. Rohrer, j.W. Woods, and R.W. Greene. Small caliber guided projectile. U.S. Patent No. 7,781,709 B1, augusti 2010.
 - [65] H. Clark. Riding the bullet: Self-guided bullet prototype developed at Sandia can hit target a mile away. Sandia Lab News, 63(24):1–7, december 2011.
 - [66] J. Karelähti, K. Virtanen, and T. Raivio. Game optimal support time of a medium range air-to-air missile. J. Guidance, Control, and Dynamics, 29(5):1061–1069, september-oktober 2006.
 - [67] Y. Yavin and R. De Villiers. Application of stochastic differential games to medium-range air-to-air missiles. J. Optimimization Theory, Appl, 67(2):355–367, november 1990.
 - [68] I. Kerschner. Israeli Iron Dome stops a rocket with a rocket. The New York Times, page A9, november 2012.
 - [69] N. Brown. Beam on: Directed energy weapons get charged up for use on the battlefield. Jane's Intl. Defence Review, pages 7–80, september 2008.
 - [70] J.W.C. Robinson, M.-B. Hansson, and C. Hildings. Luftvärn med styrda projektiler mot artilleriraketer: En systemstudie. Technical Report FOI-RH-0809-SE, Swedish Defence Research Agency (FOI), november 2008.
 - [71] C.-F. Lin. Modern Navigation, Guidance and Control Processing, volume 2 of Advanced Navigation, Guidance and Control, and Their Applications. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1991.
 - [72] Q. Wang, C.-F. Lin, and C.N. D'Souza. Optimality-based midcourse guidance. In Proc. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, August 1993. AIAA-paper AIAA-93-3893-CP. 37
 - [73] S.-M. Yang. Analysis of optimal midcourse guidance law. IEEE Trans. Aerospace and Electronic Sys., 32(1):419–425, january 1996.
 - [74] P.K.A. Menon and M.M. Briggs. Near-optimal midcourse guidance for air-to-air missiles. J. Guidance, 13(4):596–602, 1990.
 - [75] F. Imado, T. Kuroda, and S. Miwa. Optimal midcourse guidance for medium-range air-to-air missiles. J. Guidance, 13(4):603–608, 1990.

- [76] K.J. Åström and R.M. Murray. Feedback Systems – An Introduction for Scientists and Engineers. Princeton University Press, Princeton, NJ and Oxford, UK, 2.10e edition, 2011. Available on the Internet at <http://www.cds.caltech.edu/~murray/amwiki>.
- [77] T.J. Urban, P. Iwaskiw, and P.A. Iglesias. Understanding missile autopilot design using the H_∞ loop-shaping technique. In Proc. IEEE Intl. Conference on Control Applications, pages 226–242, Hawaii, HI, augusti 1999.
- [78] P.A. Iglesias and T.J. Urban. Loop shaping design for missile autopilots: Controller configurations and weighting filter selection. J. Guidance, Control, and Dynamics, 23(3):516–525, maj-juni 2000.
- [79] S. Sastry. Nonlinear Systems: Analysis, Stability and Control, volume 10 of Interdisciplinary Applied Mathematics. Springer, New York, NY, 1999.
- [80] A. Tsourdos, A.L. Blumel, and B.A. White. Flight control design for a missile: An approximate feedback linearization approach. In Proc. 7th Mediterranean Conf. on Control And Automation (MED99), pages 593–602, Haifa, Israel, june 1999.
- [81] C. Schumacher and P.P. Khargonekar. Stability analysis of a missile with a dynamic inversion controller. J. Guidance, Control, and Dynamics, 21(3):508–515, maj-juni 1998.
- [82] J. Dahlgren. Robust nonlinear control design for a missile using back- stepping. Master's thesis, Linköping Technical University, Linköping, Sverige, 2002.
- [83] D.G. Bates and M. Hagström, editors. Nonlinear Analysis and Synthesis Techniques for Aircraft Control, volume 365 of Lecture Notes in Control and Information Sciences. Springer-Verlag, Berlin, Tyskland, 2007.
- [84] W.-H. Chen, D.J. Ballande, and P.J. Gawthrop. Optimal control of nonlinear systems: A predictive control approach. Automatica, 39:633– 641, 2003.
- [85] N.F. Palumbo, B.E. Reardon, and R.A. Blauwkamp. Integrated guidance and control for homing missiles. Johns Hopkins APL Technical Digest, 25(2):121–139, 2004.
- [86] D. Li and E.K. Poh. Nonlinear integrated steering and control of flight vehicles. In Proc. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference And Exhibit, Boston, MA, August 1998. AIAA-paper AIAA-98-4210.
- [87] F. Berefelt, J.W.C. Robinson, and D. Skoogh. Integrated guidance and control for missiles. Technical Report FOI-R–2132–SE, Swedish Defence Research Agency (FOI), november 2006.
- [88] P.K. Menon and E.J. Ohlmeyer. Integrated design of agile missile guidance and autopilot systems. IFAC - Control Engineering Practice, 9:1095–1106, 2001.
- [89] T.L. Hughes and M.B. McFarland. Integrated missile guidance law and autopilot design using linear optimal control. In Proc. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Denver, CO. AIAA-paper AIAA-2000-4163, augusti 2000.
- [90] M. Idan, T. Shima, and O.M. Golan. Integrated sliding mode autopilot- guidance

- for dual control missiles. In Proc. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, San Francisco, CA. AIAA paper 2005-6455, augusti 2005.
- [91] M.W. Dancer, S.N. Balakrishnan, and E.J. Ohlmeyer. Discussion and analysis of missile IGC design. In Proc. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Honolulu, HI. AIAA- paper AIAA-2008-7002, augusti 2008
 - [92] S. Callaghan, H. Fruehauf, SAASM and Direct P(Y) Signal Acquisition, CROSSTalk: The journal of Defence Software Engineering, 12-16, juni 2003
 - [93] GPS space segment, <http://www.gps.gov/systems/gps/space/#IIRM>, besökt 2013-03-06
 - [94] Col. J. Anderson, MGUE Briefing to Southern CA ION Chapter, http://www.ion.org/sections/southcalifornia/Briefing_June_2011_Col_Anderson.pptx, besökt 2013-03-06
 - [95] M. Shaw, GPS Modernization: On the Road to the Future GPS IIR/IIR-M and GPS III, <http://www.oosa.unvienna.org/pdf/sap/2011/UAE/Presentations/03.pdf>, 2011-01-16, besökt 2013-03-06.
 - [96] Pressrelease Lockheed Martin, U.S. Air Force Awards Lockheed Martin GPS II Flight Operations Contract, 2012-05-31, <http://www.lockheedmartin.com/us/news/press-releases/2012/may/0531-ss-gpsIII.html>, besökt 2013-03-06
 - [97] A. Canciani, Integration of Cold Atom Interferometry INS with Other Sensors, Master thesis, Air Force Institute of Technology, AFIT/GE/ENG/12-07, mars 2012
 - [98] A. Peters, K.Y. Chung, S. Chu, High-Precision Gravity Measurements Using Atom Interferometry, Metrologia, 38, 25-61, 2001.
 - [99] F. Riehle, Th Kisters, A. Witte, J. Helmcke, Ch. J. Boré, Optical Ramsey Spectroscopy in a Rotating Frame: Sagnac Effect in a Matter-Wave Interferometer, Physical Review Letters, Volume 67, Number 2, juli 1991.
 - [100] B. Canuel, et al., 6-axis Inertial Sensor Using Cold-Atom Interferometry, Phys. Rev. Lett., Volume 97, Number 4, 2006.
 - [101] C. Jekeli, Navigation Error Analysis of Atom Interferometer Inertial Sensor, NAVIGATION: Journal of The Institute of Navigation, Vol. 52, No. 1, 2005.
 - [102] A. Zatezalo, V. Vuletic, P. Baker, T.C. Poling, Bose-Einstein Interferometry and its Application to Precision Undersea Navigation, Position, Location and Navigation Symposium, IEEE/ION, 2008
 - [103] Precision Inertial Navigation System, [http://www.darpa.mil/Our_Work/DSO/Programs/Precision_Inertial_Navigation_Systems_\(PINS\).aspx](http://www.darpa.mil/Our_Work/DSO/Programs/Precision_Inertial_Navigation_Systems_(PINS).aspx) (besökt 2013-02-27)
 - [104] B. Boberg et al., Robust Navigering - Slutrapport, FOI-R--2081--SE, December 2006.
 - [105] A. Soloviev, J. Dickman, Extending GPS Carrier Phase Availability Indoors with Deep Integrated Receive Architecture, IEEE Wireless Communications, s 36-44, april 2011.
 - [106] M. Langer, et al., Deeply Coupled GPS/INS Integration in Pedestrian Navigation Systems in Weak Signal Conditions, International Conference on indoor Positioning and Indoor Navigation, november 2012.

- [107] J. Rogers, M. Costello, D. Hepner, Roll Orientation Estimator for Smart Projectiles Using Thermopile Sensors, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 34, No. 3, may-juni 2011.
- [108] S. Changey, E. Pecheur, L. Bernard, E. Sommer, P. Wey, C. Berner, Real time Estimation of Projectile Roll Angle using Magnetometers: In-flight Experimental Validation, *IEEE/ION PLANS 2012*, april 2012.
- [109] J. Rogers, et al. Effective Use of Magnetometer Feedback for Smart Projectile Applications, *NAVIGATION: Journal of The Institute of Navigation*, Vol 58, No 3, Fall 2011.
- [110] T. E. Harkins, On the Viability of Magnetometer-Based Projectile Orientation Measurements, *ARL-TR-4310*, november 2007.
- [111] Beskrivning IRIS-T, <http://sv.wikipedia.org/wiki/IRIS-T>, besökt 2013-02-06.
- [112] Beskrivning IRIS-T, <http://www.fmv.se/sv/Projekt/Jaktrobot-RB-98-IRIS-T/Beskrivning/>, besökt 2013-02-06.
- [113] IRIS-T produkthemsida, <http://www.diehl.com/en/diehl-defence/products/guided-missiles/iris-t-guided-missile-family.html>, 2013-03-07
- [114] Beskrivning JAGM, <http://www.raytheon.com/capabilities/products/jagm/>, besökt 2013-02-20.
- [115] Pressrelease JAGM, <http://www.lockheedmartin.com/us/news/press-releases/2012/october/mfc-102312-lm-demonstratesJAGM.html>, besökt 2013-03-07
- [116] Raytheon JAGM kontrakt förslag, <http://www.flightglobal.com/news/articles/ausa-raytheon-submits-jagm-contact-proposal-377945/>, besökt 2013-03-07
- [117] SDB II, <http://www.defenseindustrydaily.com/Raytheon-Wins-USAs-GBU-53-Small-Diameter-Bomb-Competition-06510/>, besökt 2013-03-07
- [118] IR-målsökning, http://en.wikipedia.org/wiki/Infrared_homing, besökt 2013-02-20.
- [119] Metamaterial, <http://en.wikipedia.org/wiki/Metamaterial>, besökt 2013-03-07.
- [120] S. S. Blackman, R. Popoli, *Design and Analysis of Modern Tracking Systems*, Artech House, 1999.
- [121] Y. Bar-Shalom, X.R. Li, *Estimation and Tracking: Principles, Techniques, and Software*, Artech House, 1993.
- [122] Y. Bar-Shalom, T.E. Fortmann, *Tracking and Data Association*, Orlando, FL: Academic Press, 1988.
- [123] T.E. Fortmann, et al, Sonar Tracking of Multiple Targets Using Joint Probabilistic Data Association, *IEEE J. of Oceanic Engineering*, Vol. OE-8, juli 1983, pp. 173-184.
- [124] R.E. Kalman, A new approach to linear filtering and prediction problems, *Transactions of the American Society of Mechanical Engineering – Journal Basic Enigneering*, Series D, 82:35-45, mars, 1960.
- [125] A. Jazwinski, *Statistic Processes and Filtering Theory*, Academic Press Inc, 1970.
- [126] S. Julier, J. Uhlmann, Unscented filtering and nonlinear estimation, *Proceedings of the IEEE*, 92(3), mars 2004.

- [127] N.J. Gordon, D.J. Salmond, A.F.M. Smith, A novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation, In IEE Proceedings on Radar and Signal Processing, volume 140, pages 107-113, 1993.
- [128] A. Doucet, N. de Freitas , N. Gordon, Sequential Monte Carlo Methods in Practice. Springer Verlag, 2001.
- [129] D.B. Reid, A multiple Hypothesis Filter for Tracking Multiple Targets in a Cluttered Environment, Lockheed Missiles and Space Company Report No. LMSC, D-560254, sept. 1977.
- [130] T. Kurien, Issues in the Design of Practical Multitarget Tracking Algorithms, Multitarget-Multisensor Tracking: Advanced Applications, Y. Bar-Shalom (Ed.), Norwood, MA: Artech House, 1990.
- [131] R. Mahler, Statistical Multisource-Multitarget Information Fusion. Artech House, 2007.
- [132] Termiska plattor, <http://www.fmv.se/sv/Nyheter-och-press/Nyheter-fran-FMV/FMV-teknik-forvandlar-stridsfordon-till-varldens-tyngsta-termiska-kameleont/>, besökt 2013-02-20.

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00
Fax: 08-55 50 31 00

www.foi.se