



Framtidsrender för luftvärnssystem

FREDRIK BEREFELT, BJÖRN LARSSON OCH OVE STEINVALL

Fredrik Berefelt, Björn Larsson och Ove Steinvall

Framtidstrender för luftvärnssystem

Titel	Framtidstrender för luftvärnssystem
Title	Ground based air defense systems: Future trends
Rapportnr/Report no	FOI-R--4140--SE
Månad/Month	November
Utgivningsår/Year	2015
Antal sidor/Pages	34 p
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	Försvarsmakten
Forskningsområde	11. Vapen, Skydd och säkerhet
FoT-område	Vapen och skydd
Projektnr/Project no	E36506
Godkänd av/Approved by	Lars Höstbeck
Ansvarig avdelning	Informations- och aerosystem

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

Sammanfattning

Hotbilden för luftvärnssystem diversifieras. Hoten spänner från många små enheter, t.ex. UAV och styrda granater, till hypersoniska kryssningsmissiler och semi-ballistiska robotsystem med aerodynamisk manöverförmåga. En ökad globalisering medför snabbare spridning och omsättning av både kunskap och möjligheter. Hotsystem kan baseras i större utsträckning på allmänt tillgängliga komponenter.

Traditionella komplexa plattformscentrerade luftvärnssystem kan komma att spela en minskad roll i framtiden på grund av höga kostnader och lång utvecklingstid som resulterar i ett fåtal dyra system. En viktig trend är nätverksbaserade, distribuerade och modulära integrerade LV-system som kan möta olika typer av hot. Det möjliggör ett mer optimalt utnyttjande av den information som i princip ”finns” i systemet. Detta ger ökad robusthet och kostnadseffektivitet men kräver utveckling av arkitekturer, gränssnitt och systemintegrationsmetoder. Plattformar görs mobila, rörligheten ökar med elledning och vapen på samma plattform. Systemen kommer att automatiseras i högre grad för att korta reaktionstiderna och ge högre eldgivningstakt.

Teknikutvecklingen kan komma att möjliggöra rälskanoner, HPM och högeffektlaser. Vissa hävdar att genombrott är nära, andra betonar allvarliga kvarstående tekniska problem. Informationen är delvis otillförlitlig och svårbedömd. Tänka tillämpningar har ändrats från ”domedagsvapen” till korträckviddigt komplement till traditionella vapensystem. Israel och USA resonerar tydligt i termer av integrerade luftförsvssystem med laser, HPM, rälskanoner, C-RAM, SAM och antibalistiska robotar ordnade i ”lager”.

Utvecklingen går fort framåt. Inte bara den tekniska, utan stora förändringar sker även politiskt och ekonomisk, vilket gör att trender och utvecklingsspår är svåra att förutsäga på längre sikt.

Nyckelord: Luftvärn, Trender

Summary

The threat landscape for air defense systems becomes more diversified and future threats range from many small devices, such as UAS and guided munition, to hypersonic cruise missiles and long range gliding ballistic missiles. Increasing globalization also means faster proliferation of both knowledge and opportunities and threat systems can be expected to greater extent based on commonly available components.

Traditional complex platform-centric air defense systems may play a reduced role in the future because of high costs and long development, resulting in a small number of expensive systems. An important trend is network-based, distributed and modular integrated air defense systems that can meet different kinds of threats. It enables a more optimal utilization of the information available in the system and provides improved robustness and cost efficiency, but requires development of architectures, interfaces and methods for systems integration beyond what is available today. Increased mobility and automation to short reaction times and provide rapid fire are other expected developments.

Technological developments may enable rail guns, HPM and high energy laser. Some argue that a breakthrough is near, others emphasize serious remaining technical problems. The information is partly unreliable and difficult to predict. Prospective applications have changed from "doomsday weapon" to short range complement to traditional weapons. Israel and the US reason clearly in terms of an integrated air defense system with lasers, HPM, rail guns, C-RAM, SAM and anti-ballistic missiles arranged in "layers".

There is a rapid ongoing development. Not only in technology, but political and economic changes make it difficult to predict the long term future of air defense system development.

Keywords: Air defense, Trends

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
2	Trender hotsystem	9
2.1	Hypersoniska robotar	10
2.1.1	HBG-robotar	10
2.1.2	Hypersoniska kryssningsrobotar	10
2.1.3	Iskander	11
3	Trender system-av-system	12
4	Trender vapensystem	14
4.1	Konventionella LV-kanoner	14
4.1.1	Ammunition	14
4.2	Rälskanoner	14
4.3	Riktad energi-vapen DE	15
4.3.1	Högeffektpulsad mikrovågsstrålning HPM	15
4.3.2	Högeffektlaser HEL	16
4.4	SAM-robotar	17
5	Det elektroniska slagfältet	18
5.1	Adaptiva system	18
6	Radarsensorer	19
6.1	AESA-radar	19
6.2	Passiv radar	20
6.3	Frekvensval för radarsensorer	20
7	Lasersensorer	22
8	Nätverksbaserad luftvärnstridsledning	26
8.1	Multisensorintegration	26
8.2	Snabba beslutskedjor och nätverk	26
9	Sammanfattning och fortsatt arbete	28
10	Referenser	30

1 Inledning

Syftet med denna rapport är att ge en kortfattad översikt av några trender rörande luftvärnssystem som framträder vid en genomgång av ett antal aktuella öppna källor. Avsikten är inte att ge en ingående teknisk beskrivning av pågående forskning och utveckling, det får anstå till ett senare tillfälle. Rapporten ska istället ses som en påminnelse om vad som är ”på gång”.

Huvuddelarna i ett luftvärnssystem (LV-system) utgörs av: eldenheter, eldledningssensorer, spaningssensorer (underrättelseenheter) och stridsledningssystem.

Ett luftvärnssystem kan även ses som ett system för att bearbeta information. Information ska samlas in (sensorer), sammanställas (hotvärdering), presenteras (luftlägesbild) och beslut ska fattas (insatsplanering). Problemet att på ett optimalt sätt hantera detta informationsflöde genom ett komplext sammansatt system är en mycket stor utmaning.

Ett LV-system är sammansatt av ett stort antal delsystem som bygger på vitt skilda teknologier. Inom flera av dessa områden pågår intensiv forskning och utveckling. En diskussion kring forskningstrender för LV-system kommer därför lätt att handla om olika specifika delsystem. Historiskt sett verkar forskning om LV-system i sig inte ha varit särskilt prioriterat, möjligtvis med undantag för försvar mot ballistiska robotar.

Att peka ut en mer generisk aspekt för LV-system skulle kunna vara det som faller under rubriken ”samverkande system” (”system-av-system”). Alltså frågan hur man utnyttjar nätverksbaserade principer och algoritmer för att få vapen, sensorer, ledning och olika förband att samverka för att uppnå exempelvis: ”flerfunktionsförmåga”, ökad robusthet, längre räckvidder, kortare reaktionstider, högre operativ effekt, snabbare och mer korrekta beslut.

Man kan notera att det hos ryska luftförsvårssystem finns en klar ansats till nätverkstänkande: olika system (lång-, medel-, korträckvidd) i flera lager som skyddar varandra, flera system på en och samma plattform (spaning + eldledning + lavett, typiskt på mobila fordon) etc.

Några av dessa frågor har redan behandlats i rapporterna ”Strid med system i samverkan” (FOI-R--4055--SE) [1] och ”Forskningstrender för styrda vapen del 1” (FOI-R--3652--SE) [2]. En diskussion av elektromagnetiska vapen finns i ”Slutrapport från förstudien MARK 141402FS, Elektromagnetiska vapen mot luftmål” (Lv 6, 21 120:70415) [3].

Allmänt kan man förvänta en fortsatt teknologiskt kapplöpning mellan lufthot och luftförsvår på flera olika plan. Förbättrade störmeter, telemotmedel (EA), signalsökande robotar (SSRB) och förbättrad signaturanpassning (*stealth*) ställs mot signalskyddstörskydd (EP), förmåga att skjuta ner SSRB, metoder för ”*anti-stealth*” etc. Komplexiteten hos systemen ökar p.g.a. ”okonventionell” krigföring och en diversifiering av hoten.

Ökad globalisering gör att teknologiska framsteg och nya produkter sprids snabbare. Vapensystem kan i allt större utsträckning baseras på allmänt tillgängliga komponenter och delsystem. Omsättningen av kunskap och möjligheter går allt fortare.

Det kan därför bli svårare att behålla ett givet teknologiskt övertag över tid än det var förr. Dyrbara investeringar byggda på fixa förutsättningar kan snabbt bli inadekvata. Det blir svårare att planera och fatta beslut. Tillämpning av modulära principer och nätverkssystem ställer också större krav på utvecklingsprocesser och organisationer för att inte bli ”stuprörsmässig”.

I kapitel 2 anges några trender för hotssystem, med betoning på hypersoniska robotar. Kapitel 3 pekar ut vikten av nätverksbaserade principer. I kapitel 4 beskrivs trender för några vapentechnologier som är av intresse för LV-tillämpningen: konventionella kanoner, rälskanoner, högeffektpulsad mikro vågsstrålning (HPM), högeffekt laser (HEL) och lite kort om SAM-robotar. Kapitel 5 försöker antyda betydelsen av bättre elektronik och moderna beräkningsalgoritmer för utvecklingen av adaptiva EW- och radarsystem. Mer om

radarsensorer ges i kapitel 6, särskilt AESA-radar och passiv radar. Tillämpning av lasersensorer beskrivs i kapitel 7. I kapitel 8 diskuteras nätverksprinciper för ett integrerat luftförvarssystem. En sammanfattning ges i kapitel 9.

2 Trender hotsystem

Utvecklingen går mot en ökad spridning av olika typer av hot. Inte bara nya sofistikerade hotsystem utan även enklare okonventionella vapen som kan avfyras från oväntade platser. Även okonventionella och oväntade strategier/beteenden ökar "hotrymden" på ett sätt som kan vara svårt att förutse eller möta.

En bredare mix av vapen kan användas samtidigt för att snabbare mätta försvarsförmågan. Enklare och billigare hot som kan anfalla i större mängd ökar kravet på mer kostnads-effektiva metoder för bekämpning. Hotet från RAM (*Rocket, Artillery and Mortar*) anses förbli en svår teknisk utmaning p.g.a. korta tidsrymder och stort antal.

Detta kommer i allt högre utsträckning kräva *integrerade* och *automatiserade* LV-system med olika typer av vapen och sensorer som kan komplettera varandra. Det främsta exemplet är kanske Israels integrerade luftförsvarssystem som tydligt organiserats i flera "lager" med olika räckvidder och olika uppgifter (*Iron Beam, Iron Dome, David's Sling, Arrow*). För att få systemen att samverka behöver de ingå i ett nätverk tillsammans med funktioner för stridsledning, datafusion etc., vilket ger upphov till nya tekniska utmaningar.

Mycket bekymmersamma och näst intill omöjliga att bekämpa utan ansejliga tekniska och ekonomiska resurser är de nya hypersoniska robotsystem som är på väg att bli en ny arena för kaprustning [4, 5]. Dessa beskrivs i följande avsnitt.

Några viktiga punkter i korthet:

- Minskande målsignaturer och högre grad av signaturanpassning medför senare upptäckt och kortare tidsrymder för beslut.
- Bättre BVR-förmåga hos flygplan (bättre avionik).
- Ökad användning av UAV (stridstekniska, mikro-/mini-). Dessa kommer att bli mer sofistikerade, klara högre höjder, få större uthållighet och kunna bära mer last. Är svåra och kostbara att bekämpa med konventionella vapen på grund av att de är små och kan komma i stort antal.
- Ökad användning av distribuerade vapensystem med många och billiga enheter. Modulära system kan snabbt uppdateras med nya komponenter och få förändrade egenskaper som är svåra att förutse (jämfört med traditionella, monolitiska plattformar).
- Ökad spridning av kryssningsrobotar. De är lätta att komma över, kan förses med olika typer av stridsdelar, lätta att transportera och dölja (Ryssland säljer en variant av kryssningsroboten 3M-54 under beteckningen *Club-K* som kan gömmas i containrar på tåg eller transportfartyg).
- Mobila plattformar som snabbt kan omgrupperas blir svårare att bekämpa. Med långa räckvidder kan vapnen avfyras långt bakom fientliga försvarslinjer, exempelvis det ryska systemet *Iskander* [6].
- Ökad spridning av PGM (*precision guided munition*), billiga och lätt överkomliga RAM-system förblir ett svårbekämpat hot.
- Fortsatt utveckling av mikroelektronik, sensorer och algoritmer ger fler *sensor fused weapons* (SFW) och mer avancerade *terminally homing submunitions*.
- Elektronikutvecklingen ger också upphov till nya möjligheter att störa LV-system (adaptiv EW, se nedan). Adaptiva och självlärande hotsystem ger en diversifiering av beteenden som är svåra att prediktera.

2.1 Hypersoniska robotar

En svaghet med ballistiska robotar är deras predikterbara banor. I takt med att försvarssystemen mot ballistiska robotar blivit bättre har man börjat utveckla hypersoniska robotar (hastigheter över Mach 5) som inte följer helt ballistiska banor utan flyger på ett mindre förutsägbart sätt.

Hypersoniska glidraketer, *hypersonic glide vehicles* (HGV), är i princip inget nytt. De har studerats ända sedan andra världskriget [7, 8]. Ett konventionellt raketsteg tar upp farkosten på hög höjd utmed en ballistisk bana. Efter separation återinträder farkosten mot jorden under hög fartökning, banan planar ut horisontellt och farkosten manövrerar sedan aerodynamiskt utan motor hypersoniskt mot målet.

Att på detta sätt utnyttja glidflykt ger en bättre hushållning med energi än en helt ballistisk bana. Givet samma totalvikt och samma nyttolast når en HGV en faktor 3 längre räckvidd. En del av den tillgängliga energin kan användas för att manövrera, priset är en lägre kinetisk energi i banans slut.

2.1.1 HBG-robotar

Som vapen brukar man tala om *hypersonic boost-glide missiles* (HBG). De kombinerar i viss mån kryssningsrobotens manöverförmåga med den ballistiska robotens höga hastighet: lägre anflygningsprofiler, mycket snabba förlopp och oförutsägbara trajektorier. Ett verkningsfullt luftvärnssystem kan inte längre förutsätta att hotet uppvisar ett visst givet beteende. Huvudaktörer i denna utveckling är Ryssland, Kina, Indien och USA [9, 10, 11, 12].

Storleken på raketsteget som transporterar glidroboten under boostfasen bestämmer räckvidden och därmed tillämpningen. Monterad t.ex. i en interkontinental ballistisk robot kan alla platser på jorden nås [10].

Kina genomförde i december 2014 ett tredje prov med sin HGB *WU-14*. Den förefaller ha nått en höjd på över 100 km och en fart på Mach 10 [10]. Ett femte lyckat prov har precis genomförts (augusti 2015), vilket tycks öka pressen på USA [13]. USA har genomfört två prov med sin motsvarighet *Advanced Hypersonic Weapon* (AHW), varav det senaste i augusti 2014 misslyckades [14, 15].

2.1.2 Hypersoniska kryssningsrobotar

En annan typ av HGV som är under utveckling är hypersoniska kryssningsrobotar. De avfyras med ett mindre raketsteg, efter separation tar en ramjet- eller scramjetmotor vid och accelererar roboten till Mach 5 eller mer. De är långsammare än ballistiska robotar men farliga p.g.a. hög fart i kombination med möjlighet att flyga på mycket låg höjd utan att följa en predikterbar bana. Många fruktar att de kommer att ge upphov till en ny önskad kapprustning.

Medan USA och Kina verkar ha fokus på HBG satsar Ryssland och Indien tydligt på hypersoniska kryssningsrobotar [12]. En viktig faktor bakom Rysslands program är utvecklingen av ett nytt bränsle som ska ge möjlighet att nå farter över Mach 5 [16]. *BrahMos-2* är en fortsättning på det rysk-indiska samarbetsprojektet *BrahMos* med syfte att ta fram en hypersonisk scramjetdriven kryssningsrobot till 2023 [17]. Abdul Kalam, indisk överbefälhavare och ex-president, har även spekulerat över möjligheten att utveckla återanvändbara hypersoniska robotar [9].

Allmänt kan man säga att gränsen mellan ballistiska robotar och kryssningsrobotar minskar. De förstnämnda får flackare anflygningsprofiler och ökad manöverförmåga. Ännu ett steg i denna riktning redovisas i en nyligen publicerad kinesisk artikel [18]. Här undersöks ett koncept, *hypersonic gliding-cruising ballistic flight*, för att kombinera glidflykt och motordrift i hypersoniska hastigheter [19].

2.1.3 Iskander

Ryska *Iskander* är ett exempel på ett system som kombinerar HGB-robotar och ordinära kryssningsrobotar. Båda typerna kan avfyra samordnat och tillsammans utgör de ett mycket svårbekämpat hot [6, 20].

System 9K720 Iskander, *Комплекс Искандер*, består av mobila enheter som kan verka helt självständigt om nödvändigt. Varje enhet utgörs av ett transportfordon (TEL) med avfyrningsramper för två robotar, ett extra transportfordon (TLV) samt fyra mindre fordon för hantering av eldledning, måldata, service och underhåll [21]. Systemet är fullt operativt sedan några år tillbaka.

Reaktionstiden är mellan 5 och 16 minuter, robotarna fälls upp i 85 graders vinkel på 20 sekunder och kan avfyra med 60 sekunders intervall. TEL-fordonet kan vara gömd under förberedelserna och behöver bara vistas öppet under den korta tid robotarna avfyra.

Standardversionen av systemet avsedd för ryska armén kallas *Iskander-M*. Själva roboten (9M723) är i princip en korträckviddig ballistisk robot som försetts med manöverförmåga. Den har både aerodynamiska roder och strålder (TVC). En motor med fast bränsle tar i ett steg upp roboten på 50 km höjd i Mach 6, den kan sedan flyga på en flack bana och utföra manövrar på 20-30 g. Roboten kan flyga i Mach 4 på 6 km höjd. Enligt uppgift kan den även manövrera i banans inledande fas för att försvåra lokalisering av avfyringsenheten [6].

Måldata kan uppdateras under färden och roboten kan användas mot rörliga mål. Flera olika typer av stridspetsar är möjliga. Räckvidd upp till 500 km, last upp till 700 kg, har låg radarmålyta och kan dessutom fälla skenmål.

Två andra systemversioner finns:

Iskander-E är exportversionen med en robot (9M720-E) som har något reducerad prestanda, räckvidd upp till 280 km och last upp till 480 kg.

Iskander-K är en variant med kryssningsrobot R-500 (3M14), en konventionell subsonisk långräckviddig (officiellt max 500 km, i praktiken över 2000 km) kryssningsrobot, sex stycken kanistrar kan monteras på TEL-fordonet.

3 Trender system-av-system

En mycket viktig trend som redan berörts är nätverksbaserade och modulära lösningar – ”system-av-system”, ”distribuerade system” – där olika sensorer, vapen och stridsledningsfunktioner binds samman i ett nätverk.

Detta kan göras på olika sätt och av olika skäl. I ett integrerat LV-system (som nämndes i början av förra kapitlet) kan varje lager i princip ha sina egna plattformar, sensorer och ledning, och nätverksaspekten består av en samordnande funktion (*fusion center*).

En allt mer viktig drivkraft är kravet att minska kostnaderna. Detta kan uppnås genom att driva modul- och nätverksprinciperna längre än att bara ”koppla ihop” befintliga system. I ett system som är modulärt uppbyggt med en öppen arkitektur där alla tillgängliga resurser delas, distribueras och samverkar erhålls flera fördelar.

Ökad flexibilitet: möjlighet att ansluta och ta bort delsystem efter behov, att använda rätt resurser mot ett visst mål.

Ökad interoperabilitet: kunna utbyta data med sensorer och vapen som inte primärt tillhör samma system, att samverka med andra parter.

Ökad kostnadseffektivitet: lägre utvecklingskostnader, kunna byta ut enskilda enheter utan att behöva byta kringliggande delsystem, att kunna modernisera genom en inkrementell uppgradering, mindre bemanning (personal).

Ökad redundans och robusthet om någon del eller enhet skulle falla bort.

Ökad eldkraft och reaktionsförmåga tack vare ett bättre utnyttjande av resurser och information.

En nödvändig förutsättning för detta är utvecklingen mot öppna standardiserade gränssnitt och protokoll, samt en ökad användning av öppen och allmänt tillgänglig mjukvara.

Amerikanska armén driver ett program, *Integrated Air and Missile Defense Battle Command System (IBCS)*, som ska knyta samman olika sensorer, vapenplattformar och mänskliga beslutsfattare i ett gemensamt nätverksbaserat ledningssystem. Ledorden är ”*any sensor, any shooter, any time*”. Det ska vara det första luftvärnssystemet i USA som byggs som ett integrerat system från början. Tester har utförts under 2015 och ett beslut om produktion ska fattas av Pentagon i augusti 2016.

Systemet är tänkt att även kunna kopplas samman med det amerikanska ballistiska robotförsvaret *C2BMC (Missile Defense Agency's integrated command and control system)*.

Enligt ledande amerikanska militärer har IBCS högsta prioritet av rena kostnadsskäl. Målet är en möjlighet att fritt sätta samman olika delsystem, både befintliga och framtida, ett slags ”*plug-and-play*”. Man ska kunna:

- sammanställa måldata från olika sensorer (radar på olika frekvensband) till en enda integrerad luftlägesbild
- i varje ögonblick välja den best lämpade plattformen för att bekämpa inkommande hot
- ha möjlighet till en distribuerad och kollaborativ planering av uppdrag
- bättre utnyttja tillgänglig data för att nå snabbare och säkrare beslut
- öka flexibiliteten och minska plattformscentreringen

Samarbetsprojektet *MAEDS (Medium Extended Air Defense System)*, mellan USA, Tyskland och Italien, har under två veckors test i juli 2014 demonstrerat avancerad nätverksförmåga, något man kallar ”*plug-and-fight*”. Enskilda enheter ska dynamiskt kunna läggas till och tas bort för olika stridssituationer. Även hela MAEDS-system ska kunna

kopplas samman (utbyta data) med andra system (från olika NATO-länder) som delar i en större arkitektur.

Målet är högre flexibilitet och robusthet, att den mest lämpliga vapenplattformen automatiskt ska väljas för ett givet mål och att en ledningsenhet ska kunna lämna över kontrollen till en annan utan avbrott om så behövs. En mycket viktig aspekt är interoperabiliteten inom NATO, något som ska vara inbyggt från grunden.

Ett annat aktuellt exempel på tillämpning av nätverksprinciper är DARPA-programmet SoSITE. Vi hänvisar till [22, 23] för mer information.

Några övriga trender:

- Kraven att uppnå kortare reaktionstider, högre verkan och lägre kostnader har absolut högsta prioritet
- Ökad lokal beräkningskraft, automatisk lokalisering och orientering, automatisk rörelseplanering
- Förbättrade mobila plattformar och kringutrustning
- Fortsatt utveckling av helt automatiserade och snabba C-RAM system (*Counter Rocket, Artillery and Mortar*)
- Autonoma, adaptiva system som kan hantera komplexa händelser och beslut
- ”Soft kill defence”: är mer kostnadseffektivt, har ett brett tillämpningsspektrum, men det kan vara svårt att bedöma om tillräcklig verkan har erhållits

4 Trender vapensystem

4.1 Konventionella LV-kanoner

Utvecklingen rör huvudsakligen eldledning och ammunition för att förbättra räckvidd, vapenverkan och precision. Kortare reaktionstider kan erhållas genom eldledning och vapen på samma plattform, eller med helt automatiserade system. Högre rörlighet med mobila system, högre eldgivningstakt med flerpipiga kanoner. Bättre verkan och längre räckvidder genom ökad noggrannhet och ökad kaliber. Ökad noggrannhet medför också behov av mönsterskjutning för att till viss mån kompensera för målrörelser och inmättningsfel.

4.1.1 Ammunition

Mycket utveckling görs för att få en mer effektiv och kontrollerad verkan, man strävar efter hög penetrationsförmåga och optimal fragmentering. Däremot är det svårt att få plats med zornör eller aktuatorer (för styrbarhet) i ammunition för luftvärnskanoner av medelkaliber (upp till 40 mm).

En trend är icke-explosiv ammunition. Ett exempel är PELE från tyska Rheinmetall, en ny typ av ammunition utan krutladdning för automatkanoner [24]. Enbart kinetisk sprängverkan men penetration och fragmenteringsegenskaper är optimerade genom en smart kombination av metaller och plast med olika densitet. Lagring och hantering blir både säkrare och enklare.

Från Rheinmetall kommer också AHEAD, en ammunition med ett tidskontrollerat tändrör för automatiserade integrerade luftförsvarssystem [24]. Efter inmätning överförs måldata till automatkanonens dator som programmerar projektilens tändrör att explodera precis framför målet. Projektilen innehåller 150 små spinnstabiliserade cylindrar av tungsten som slungas ut framför målet.

Ett exempel på styrbar ammunition är 76 mm DART från italienska OTO Melara som ingår i deras STRALES-system [25]. Projektilen är fenstabiliserad och styrbar med nosroder, tillverkaren uppger manöverförmåga upp till 40 g. Projektilen är ledstrålestyrd (radiovåg) och har ett zornör baserat på mikrovågor.

4.2 Rälskanoner

Rälskanoner (*railguns*) är principiellt mycket lovande men fortfarande på experimentstadiet trots lång tid av forskning. De når hypersoniska hastigheter (> 3 km/s), har kortare flygtider, längre räckvidder och hög kinetisk verkan. Inga drivmedel eller sprängämnen krävs vilket gör att logistiken blir enklare, själva projektilen kan dessutom vara mindre, lättare och billigare. Med tillräcklig tillgång på energi är en räckvidd på upp till 200-300 km möjlig.

Mynningshastigheten för en 5 tum projektil avfyrad från en konventionell kanon är ca 800 m/s medan projektilen från en rälskanon kommer upp i 2-3 km/s med en slutenergi som är två gånger större än hos en konventionell projektil.

När väl fungerande system finns på plats kommer kostnaden för projektilerna att vara betydligt lägre än att bekämpa hot med exempelvis kryssningsrobotar, dvs. anfall blir dyrare än försvar.

Rälskanoner är användbara både för direkt eld, avstånd upp till 40 km, och indirekt eld på avstånd över 100 km. Den senare tillämpningen kräver antagligen någon form av styrning. Utrustad med styrförmåga skulle man även kunna skjuta ner manövrerande mål.

System för navigering, styrning och aktivering kommer dock att utsättas för enorma påfrestningar [26]. Under utskjutningen kan accelerationen uppgå till 60 000 g samtidigt som temperaturer (> 800 °C) och elektromagnetiska fältstyrkor ($E > 5\,000$ V/m, $B > 2$ T)

blir mycket höga. Det är kombinationen av dessa omständigheter som går utöver vad normal styrd ammunition för konventionella vapen (PMG) är konstruerad för. Att utveckla elektronik som överlever denna miljö kräver betydande forskning och utveckling, vilket gör att det antagligen dröjer ganska länge innan fungerande styrsystem blir verklighet.

Mycket teknisk utveckling återstår för att minska storleken på systemet och att få tillräckligt kompakta och effektiva metoder för produktion och lagring av de enorma energier som behövs, särskilt för långräckviddig indirekt eld.

Dessutom ger den höga accelerationen och det enorma trycket ett mycket kraftigt slitage på rälisen. För närvarande måste kanonpipan bytas efter < 10 skott. Det kommer att krävas mycket materialutveckling innan man kan få räls som tål 1000-tals avfyrningar och en energimatning som medger ihållande eldgivning (> 6 skott/minut).

Fullskaliga försök har utförts och planer finns att i närtid (2016) testa installationer på fartyg [27]. U.S. Navy föreställer sig ett framtida system ordnat i olika lager: laservapen för kort räckvidd, rälskanoner för medeldistans, kryssningsrobotar för lång räckvidd [28].

4.3 Riktad energi-vapen DE

Riktad energi-vapen (DE) är samlingsnamnet för vapen som emitterar en mer eller mindre fokuserad stråle av energi med förstörande eller inhiberande verkan, vanligtvis elektromagnetisk strålning. De två viktigaste typerna är högeffektlaser (HEL) och högeffektpulsad mikrovågsstrålning (HPM).

Två aktuella rapporter som diskuterar DE är [3] och [29]. Enligt den senare är det få vapentechnologier som det har det satsats så mycket på under så lång tid utan att adekvata resultat har uppnåtts som just DE-vapen. Ändå hävdar författaren att både HPM och HEL nu står inför ett genombrott att komma till verklig användning i vissa tillämpningar. I rapporten framförs kritik mot U.S. Department of Defense för att man inte snabbt nog tillvaratar möjligheterna, bl.a. pekats organisatoriska problem ut, se även [30].

4.3.1 Högeffektpulsad mikrovågsstrålning HPM

Det är ont om öppen information kring HPM-vapen. Vi hänvisar till [3] och [29] för några slutsatser från svensk respektive amerikansk synvinkel. Teknologiska framsteg görs kontinuerligt både vad gäller mikrovågskällor och antenndesign [31, 32]. Storlek, vikt och effektkonsumtion blir mer anpassade till operativ användning.

Ett amerikanskt projekt är *Counter-electronics High-powered Microwave Advanced Missile Project* (CHAMP), ett samarbete mellan bl.a. U.S. Air Force Research Laboratory och Boeing Phantom Works [33, 34]. Ett flygburet HPM-vapen utvecklat av Raytheon Ktech testflögs i oktober 2012 [35]. Lockheed Martins *Joint Air-to-Surface Standoff Missile* (JASSM-ER) har nyligen pekats ut som en möjlig plattform [33]. Kritik har dock förts fram att det tar för lång tid att få systemet operativt [36, 34].

Både Kina och Ryssland antas utveckla olika typer av HPM-vapen [37, 38]. Även Sydkorea har deklarerat att man ämnar skaffa HPM [39]. Att det pågår stor FoU-aktivitet kring HPM i Sydostasien framgår av mängden forskningsartiklar och konferensbidrag som produceras, särskilt av Kina.

Ryssland har nyligen (juni 2015) tillkännagivit vad som förefaller vara två olika HPM-system (oklart om så verkligen är fallet). Enligt nyhetsbyrån TASS [40] utvecklar den ryska försvarskoncernen Radio-Electronic Technologies (KRET) ett system som enligt uppgift kommer att kunna slå ut radiokommunikation, navigering och mållokalisering funktioner. Det är avsett att användas inom luftförsvaret. Det andra systemet är, enligt Sputnik International (som drivs av nyhetsbyrån Rossiya Segodnya), en ”mikrovågskanon” som monteras i en luftvärnsrobot av typen BUK [41]. Systemet har utvecklats av ryska United

Instrument Manufacturing Corporation (UIMC) och ska ha presenterats på en sluten del av den ryska militäutställningen Army-2015 i juni.

Informationen kring HPM-vapen är otillförlitlig, en del av det som rapporteras kan mycket väl ha karaktären av informationskrigföring. HPM-vapen har presenterats förut utan att några operativa system har blivit verklighet, men det är möjligt att man nu har börjat att testa tekniken i skarpa situationer.

Det finns rapporter om att Ryssland använt HPM-liknande system under konflikten i Ukraina mot kommunikations- och spaningssystem, samt mot OSCE:s spanings-UAV:er [42].

4.3.2 Högeffektlaser HEL

Laser har länge varit aktuellt som vapen. Många tekniska problem har stått i vägen och förhoppningarna har inte infriats i tillräcklig utsträckning, trots enorma utvecklingsresurser. Två översikter av laservapensystem ges i [43] och [44]. I den tidigare refererade rapporten [29] finns också en mycket intressant diskussion kring lasersystem (från ett amerikanskt perspektiv).

Under 1980- och 90-talet fanns långtgående planer i USA på mycket stora kemiska lasrar med effekter på flera megawatt som försvar mot ballistiska robotar. Det kemiska bränslet var både extremt utrymmeskrävande och avgav mycket giftiga restprodukter. Bara bränslekostnaden per ”skott” kunde uppgå till 1 000 dollar [45].

Dessa stora laserprojekt är numera nerlagda utan att ha blivit operativa. Andra tillämpningsområden är istället aktuella för nya moderna fasta tillståndslasrar (FTL) [46]. Effekterna är visserligen betydligt lägre, i dagsläget några tiotals kilowatt, men fördelarna är många: betydligt mindre och lättare system som kan göras portabla, drivs med billig och lätthanterlig elektrisk energi, kostnaden per skott är försumbar, ingen logistik eller lagring av ammunition behövs.

Många system är nu under utveckling i flera länder. Det handlar framförallt om fiberoptiska pumpdiod-lasrar, en välkänd teknik som redan används i civila tillämpningar. Effektiviteten i energiomvandlingen är ca 30 %, resten blir värme som måste ledas bort. De kan göras kompakta men ändå med relativt goda kylenskaper.

Det användningsområde som oftast nämns är som ett korräckerviddigt komplement till konventionella vapensystem (kanoner och robotar) mot lågt flygande mål: drönare, artillerigranater, raketer eller mindre sjömål. Med nuvarande effekter är räckvidden max 2-3 km, beroende på måltyp, atmosfär m.m. Framtida system ska klara även sjömålsrobotar och mindre flygplan.

Det låga priset gör laser kostnadseffektivt att använda mot mindre och enklare hot. Laser är tyst, osynligt (infrarött ljus), fungerar natt och dag. Laser kan avfyras så länge det finns elektrisk energi och är lätt att rikta om. Eftersom gångtiden är försumbar kan rörliga mål bekämpas utan framförhållning, vilket är en stor fördel om målets bana inte går att prediktera. Laser är lämplig i automatiserade system för bekämpning av mängdhot. Tekniken anses ha god skalbarhet, energikällor och kylsystem kommer att kunna göras allt mer kompakta och effektiva.

Det är dock viktigt att komma ihåg att närvaron av moln, regn och dimma ofrånkomligt begränsar räckvidden. Detta är en avgörande svaghet och påverkar var och när ett laservapen kan användas. Ett annat problem är den turbulens som kan uppstå när laserstrålen värmer upp luften utmed sin utsträckning (*thermal blooming*).

En betydelsefull faktor för en ökad användning av laservapen är nya och bättre elektro-optiska sensorer med åtföljande signalbehandlingssystem för detektion och utpekning av rörliga mål. Den höga värmeutvecklingen begränsar också möjligheten att öka effekterna med bibehållen fiberoptisk teknik.

Ett sätt att komma runt detta problem är att använda flera laserkällor som belyser samma mål. Att göra detta koherent (att få ljuset från källorna att ”svänga i takt”) har visat sig mycket svårt. I nuläget kombineras ljuskällorna inkoherent. Forskning pågår hur man bäst superponerar ljuset, inte bara för ökad effekt utan också för bättre precision i laserstrålen [46]. Med längre räckvidder blir det dessutom nödvändigt att ta hänsyn till och kompensera för atmosfärisk turbulens.

Ett av de första laserbaserade systemen för luftförsvaret att tas i bruk (under 2015) blir Israels *Iron beam* [47]. Syftet är att ingå som det innersta lagret i Israels integrerade luftförsvårssystem, med förmåga att bekämpa små och korträckviddiga RAM-mål (*Rockets, Artillery and Mortars*). Systemet levereras av Rafael Advanced Defense Systems.

Flera projekt pågår i USA [48]. Ett exempel är Boeings *High Energy Laser Mobile Demonstrator* (HEL MD) på uppdrag av U.S. Army, där en 10 kW FTL och en kontrollenhet är monterad på ett rörligt fordon. Ett annat exempel är systemet LAWS som U.S. Navy installerat för utvärdering under 2014 på USS Ponce [49]. Systemet består av sex lasrar som tillsammans ger 30 kW. Om försöken faller väl ut planeras ett operativt system med högre effekt under 2017-2021.

En intressant reflektion över försöken på USS Ponce och en kritisk tillbakablick över utvecklingen av laservapen i stort ges i [50].

Raytheon erhöll 2014 ett kontrakt från US Navy Office of Naval Research för att utveckla ett mobilt 25-30 kW laservapen med tillhörande system för detektion, följning och verkansvärdering [51]. Systemet bygger på Raytheons egen s.k. PWG-teknik (*planar waveguide technology*) som är mycket kompakt med hög effekt, systemet ska dessutom inkludera en kompakt radar med fasstyrd gruppantenn för detektion och följning.

På IDEX mässan i februari 2015 visade tyska Rheinmetall en 30 kW laser monterad på sin luftvärnsplattform *Oerlikon Skyshield*, en konfiguration som tidigare använts under ett prov 2013 då man lyckades skjuta ner ett antal 82 mm granater på 1 km avstånd samt några jetdrivna drönare på 3 km avstånd. På mässan visade man även ett mobilt lasersystem monterat på ett pansarfordon.

Genom att fokusera två lasrar samtidigt har Rheinmetall i försök demonstrerat en effekt på 50 kW. Man säger att 100 kW är möjlig med denna teknik, även med laserkällor som sitter på olika fordon. Rheinmetall hävdar också att man har system med 3 km räckvidd mot rörliga mål [52].

Utvecklingen går nu mycket snabbt framåt. Effekterna blir allt högre vilket ger längre räckvidder och ökad användbarhet vid sämre väderförhållanden. Nya framsteg görs med adaptiv optik och supersnabba algoritmer som kompenserar för distorsionen av vågfronten från atmosfärens turbulens. I DARPA:s projekt *Excalibur* har man demonstrerat en koherent kombination av 21 stycken fiberlasrar som gav nära 7 km räckvidd [48, 53]. De 21 elementen superponeras och kontrolleras koherent med optisk fasstyrning (*optical phased array*, OPA) vilket ger både högre effekt (35 %) och en fokuseringsprecision nära diffraktionsgränsen. Man väntas kunna nå 100 kW om ett par år.

4.4 SAM-robotar

Utvecklingen av SAM-robotar (*surface-to-air*) kretsar kring hypersoniska hastigheter, stridsdelar och aktiva målsökare. Man vill nå kortare reaktionstider, systemen ska vara mobila och snabbt omgrupperbara, klara alla väder, samt en och samma robot ska klara flera olika hot (korträckviddiga ballistiska robotar, attackhelikoptrar, kryssningsrobotar och UAV). Flera robotar ska kunna monteras på en gemensam lavett.

En tydlig trend för moderna LV-system är också vertikalstartande robotar med TVC-styrning: *Aster 30*, *Evolved Sea Sparrow*, *Stunner* och *IRIS-T SL*.

5 Det elektroniska slagfältet

Två områden, utöver hypersoniska robotar, som kan komma att spela en mycket avgörande roll tack vara en allt snabbare teknikutveckling är telekrig (EW) och ”autonoma funktioner och system” [54].

Konflikten i östra Ukraina har givit USA en brysk påminnelse om den ryska EW-förmågan, förmedlad i samband med USA:s kontakter med den ukrainska armén (träning och utbildning), mer information finns i [55].

5.1 Adaptiva system

Nya generationer av mycket snabba A/D omvandlare, programmerbara integrerade kretsar (*field-programmable gate array*, FPGA) och processorer för krävande digital signalbehandling (DSP) avlöser varandra i snabb takt [56, 57, 58]. Beräkningskraften ökar samtidigt som kostnad, storlek och effektförbrukning blir allt lägre. Fördröjningar i elektronik och signalöverföring kan göras allt mindre. Kraftfulla men beräkningstunga algoritmer för mönsterigenkänning, maskininlärning och dynamisk programmering blir allt mer möjliga att använda i praktiska tillämpningar.

Detta möjliggör adaptiva ”smarta” system för elektronisk spaning, kommunikation och telekrig [59]. System som har förmåga att detektera och analysera främmande signaler för att automatiskt anpassa sitt beteende, även till nya och oväntade förhållanden.

Radar får allt mer sofistikerat signalskydd-störskydd (EP): frekvenshopp, pulskompression och programmerbara digitala signalprocessorer. Det talas även om ”adaptiv radar” med förmåga att detektera den elektromagnetiska omgivningen och på ett betydligt mer avancerat sätt anpassa pulsform och signalbehandling automatiskt för att undgå störning (EA) [59, 60].

Inom området radiokommunikation har olika former av adaptivitet diskuterats länge under paradig som ”mjukvaruradio” och ”kognitiv radio” [61, 62].

Dagens EW-system måste först identifiera en hotradar för att kunna välja en lämplig förutbestämd motmedelsteknik vilket kräver en databas (ELINT) över kända radarkällor. Att uppdatera databasen med nya signaler kan vara omständligt och tidskrävande. Detta blir mindre meningsfullt mot en adaptiv radar med okänt beteende och snabbt föränderliga vågformer.

Vad som krävs är motmedel som i realtid automatiskt kan generera effektiva störformer mot adaptiv radar. DARPA har ett program, *Adaptive Radar Countermeasures* (ARC), som syftar till att utveckla ett sådant luftburet adaptivt EW-system [60]. Systemet ska kunna isolera en okänd radarsignal från andra närvarande signaler, avgöra dess grad av hot, kunna syntetisera en lämplig motmedelssignal och bedöma dess verkan. Systemet ska ha en öppen arkitektur, vara modulärt uppbyggt och vara lätt att uppgradera.

BAE Systems är för närvarande engagerade i fas 2 av ARC-programmet [63, 64]. DARPA har även kontrakterat de amerikanska företagen Exelis och Leidos i detta arbete [65]. Resultaten ska demonstreras i flygtest 2018.

Georgia Tech Research Institute (GTRI) i USA är också involverad i denna utveckling. Man driver ett projekt kallat *Angry Kitten* som syftar till algoritm- och mjukvaruutveckling för ”självlärande” motmedelssystem, något man kallar ”kognitiv EW” [66, 67].

6 Radarsensorer

Den tekniska utvecklingen på radarområdet hänger samman med den snabba utvecklingen inom tele-, dator- och informationsområdet i stort. Utvecklingen präglas av miniaturisering av komponenter och system, tillgång till stor beräkningskraft för avancerad signalbehandling och en mogenhetsgrad hos ny teknik som möjliggör nya systemkoncept och lösningar i kommersiella produkter. Trenden är att gå från dagens teknik med en central sändare och analog lobstyrning (ESA) mot distribuerade sändare över antennenytan och digital lobstyrning (AESAs - Aktiv Elektroniskt Styr Antenn).

I princip alla nya kvalificerade radarsystem har någon form av gruppantenn och producerar målinformation i tre dimensioner - avstånd, sida och höjd relativt radarstationens position. Systemen utnyttjar halvledarteknik i sändarslutstegen och trenden går mot AESA-teknik i någon form. AESA-radar av idag är ofta en kompromiss för att hålla ner kostnaderna. Kompromissen består i att antalet digitala kanaler i systemet är begränsat vilket ger begränsningar i dess flexibilitet och det antal oberoende antennlobar som kan skapas samtidigt. I framtiden kommer dessa begränsningar att minska kraftigt.

Framtida radarsystem kommer att karaktäriseras av bl.a. följande:

- C-bandet (ca 5 GHz) är hotat som radarband p.g.a. krav från andra användningsområden (trådlös kommunikation m.m.)
- Multifunktionssystem
- Aktiva gruppantennar AESA
- Nätverk i monostatiska eller multistatiska konfigurationer
- Större systembandbredd
- Mer komplexa vågformer
- Avancerad signalbehandling
- Adaptiv styrning

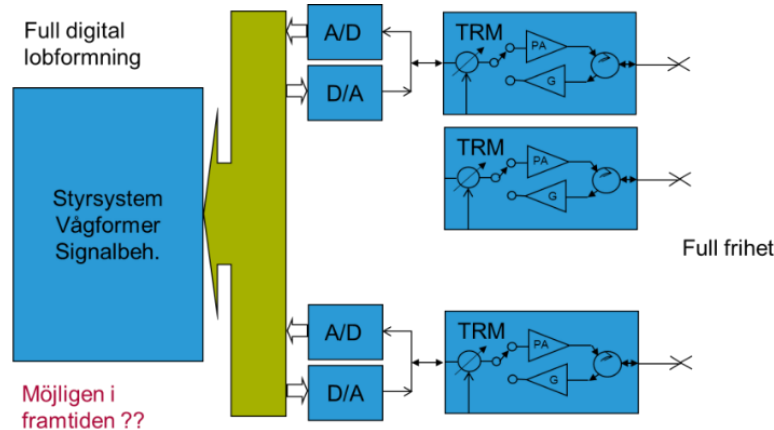
6.1 AESA-radar

Dagens AESA-radar för långräckviddig spaning har en mekaniskt roterande antenn med upp till flera tusen antennelement organiserade i ett varierat antal delantennar, främst i höjddled. Bakom varje delantenn finns en komplett sändar- och mottagarkanal. Lobformning sker analogt inom varje delantenn och digitalt mellan delantennerna. Trenden är att antalet digitala kanaler i de system som erbjuds på marknaden ökar relativt snabbt. Idag erbjuds system med allt från 4 till 64 digitala kanaler och i varje ny produkt ökar antalet. Detta ger goda prestanda, men begränsad flexibilitet jämfört med en fullständigt digital AESA.

Dagens modernaste AESA-system för spaning och målinmätning för vapeninsats har ofta en arkitektur som medger att antennen antingen kan rotera eller stå stilla och loberna styrs digitalt vilket ger mycket stor flexibilitet. I störrande mod är omställningstiden mycket kort mellan olika loblågen, upptäcktsfördröjningen blir mycket kort, integrationstider m.m. kan varieras och prestandan är generellt bra. De har dock fortfarande ett relativt begränsat antal oberoende digitala kanaler.

I framtiden kommer dessa system att uppdateras och ersättas med liknande system som kommer att innehålla allt flera digitala kanaler i varje yta (delantenn) för att så småningom bli fullständigt digital, dvs. ha en komplett sändar- och mottagarmodul (TRM) bakom varje enskilt antennelement. Detta ger mindre begränsningar och fler frihetsgrader vilket leder till bättre toppprestanda och störtålighet. Hur snabbt utvecklingen går är svårbedömt. Tekniken bygger på tillgången till effektiva integrerade kretsar till rimliga priser. Tillgången och priserna är starkt beroende av industrins produktionsförmåga och i just den här typen av

teknik så går utvecklingen ofta mycket snabbt när väl ett antal fundamentala produktionsproblem är lösta och det finns en växande marknad. Antalet digitala kanaler och därmed frihetsgrader kommer att öka snabbt men den fullständigt digitala antenntyten (för stora antenner) är troligen inte aktuell förrän närmare eller kanske efter 2040. Möjligheten att mäta passivt multistatiskt med yttre belysare ökar också vilket ökar den taktiska friheten. Samtidigt får man större krav på att styrningen av antenntyterna fungerar integrerat och optimalt i varje ögonblick, vilket är en stor utmaning då komplexiteten är stor. Att förvirra denna funktion kan vara en ny störmetod.



Figur 1. I ett system med fullständig digital lobformning finns en oberoende digital kanal med A/D och D/A omvandlare bakom varje strålningselement vilket ger fullständig frihet att bestämma loblägen, vågformer m.m. i den digitala signalbehandlingen.

6.2 Passiv radar

Passiv radar (*Passive Coherent Localization, PCL*) är en teknik under utveckling hos flera leverantörer och är också i drift på vissa platser. Sensorerna parasiterar på andra (främst icke kooperativa) signalkällor för att upptäcka mål och mäta in läge. Det är en helt passiv teknik som förutom en flerkanalsmottagare med tillhörande antensystem bara behöver en beräkningsenhet för att mäta in mål. Systemet kan sålunda bli relativt billigt.

Lämpliga signaler att parasitera på bör ha relativt hög uteffekt och så stor bandbredd som möjligt. Exempel på sådana är FM-radio, DVB och DAB, men man kan också tänka sig t.ex. motsidans brusstörare. PCL fungerar därför bäst kustnära när man vill ha lägesbild utan att själv sända.

6.3 Frekvensval för radarsensorer

Det elektromagnetiska spektrumet är allt hårdare utnyttjat och det civila samhället ställer allt högre krav på utnyttjande av frekvensutrymme för olika trådlösa tillämpningar som bygger på kommersiell verksamhet med många aktörer över hela världen. Det innebär att frekvensutrymmet för exklusiv militär användning kommer att minska eller så måste systemen samexistera med civila produkter och tjänster. I en krigssituation kan militär användning ha prioritet och man kan i princip komma att strunta i den här typen av problem, men konsekvensen blir ändå en störproblematik eftersom de civila systemen kommer att finnas kvar. Då det innebär avsevärda svårigheter att använda system i krig som inte övats i fredstid så minskas värdet av denna möjlighet. Speciellt militär radaranvändning av C-bandet är starkt hotat.

Framtida luftmål kommer att uppvisa en mycket liten målsignatur mot spanande sensorer. Generellt kan sägas att i många fall sker ingen större förändring av radarmålarean hos ett objekt om radarfrekvensen ändras mellan de olika traditionella radarbanden på mikrovågsområdet men frekvensval är ändå relevant att tänka på.

Höga frekvenser ger smala antennlobber och därmed bättre antennvinst för en given antennstorlek men det ger ökad känslighet för väderfenomen som regn och brytningsgradienter (skiktning på låg höjd). En ofta använd radarfrekvens i flygplan och siktesradar är X-band (10 GHz) och den frekvensen har också bra egenskaper mot små mål på eller nära vattenytan medan S-band (3 GHz) och L-band (1 GHz) är ofta använda frekvenser för övervakningsradar då de är mera väderoberoende. Speciellt L-band ger dock relativt stora antenner.

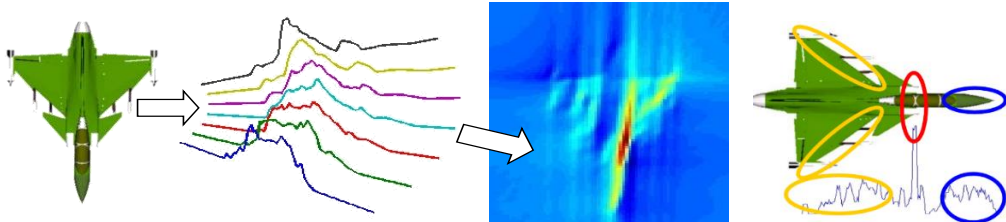
Låga frekvenser som arbetar vid t.ex. 450 MHz ger ett klart väderoberoende och här kan även smyganpassningsåtgärder hos olika militära mål förlora sina egenskaper. Olika delar på målet som vingar, fenor eller hela flygkroppen kan också skapa rena resonanseffekter med stor målarea som följd. Den låga frekvensen medför att antenner med god riktverkan för UHF blir stora och klumpiga och kan kräva speciella installationer.

Går man ner ytterligare i frekvens ända ner till HF-området (3-100 MHz) får systemen helt andra egenskaper. Dessa våglängder påverkas starkt av jonosfärens förmåga att reflektera eller böja av en inkommande elektromagnetisk våg vilket möjliggör radarsystem som kan se bortom den normala radarhorisonten.

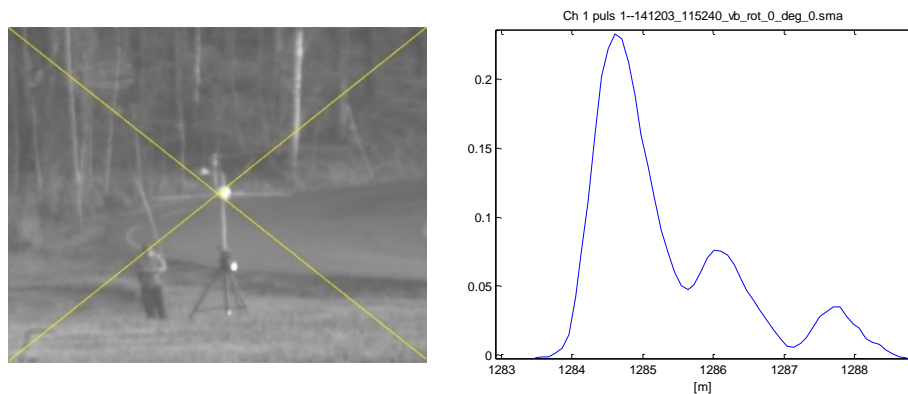
7 Lasersensorer

En lasersensor kan användas för detektion, klassificering och identifiering grundat på högupplöst 1D-2D eller 3D information. Dessutom kan laser användas för att sondera atmosfärstransmission till målet något som bär vara speciellt värdefullt i mörker eller ute till havs när visuella referenser i scenen saknas. Man brukar använda begreppen laser radar, lidar eller ladar någorlunda synonymt även om lidar företrädesvis används i civila fjärranalystillämpningar.

1D profilering kan användas för igenkänning på långa avstånd. Antag t.ex. att ett potentiellt mål har detekterats med radar men på ett sådant avstånd att de avbildande elektro-optiska sensorerna (TV och eller IR) inte förmår vinkelupplösa målet. I ett sådant fall kan en högupplösande laseravståndsmätare generera en eller flera avståndprofiler som underlättar klassificering eller identifiering. Dagens avståndsmätare har inte dimensionerats för denna uppgift med det är idag fullt möjligt att generera avståndsprofiler från cm- till dm-nivå på många km avstånd. Figur 2 ger ett exempel på detta. Räckvidden för en ”vässad avståndsmätare” uppgår ungefär till det visuella siktavståndet, eller maximalt till 20-30 km. Figur 3 ger ett exempel på avståndsprofilering av en UAV-mockup.

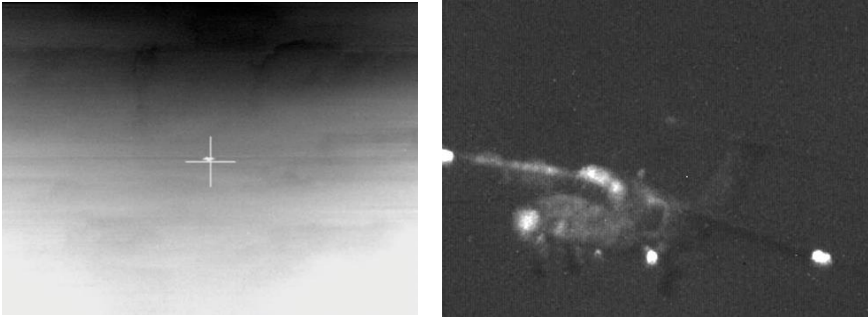


Figur 2. Simulering av laserkon från ett flygplan. Om dessa profiler kan samlas in för ett antal aspektvinklar stödjer de en tomografisk rekonstruktion av målet, något som underlättar igenkänning. Om aspekten är känd kan en enskild avståndsvågform även denna underlätta eller möjliggöra identifiering (bilden t.h.).



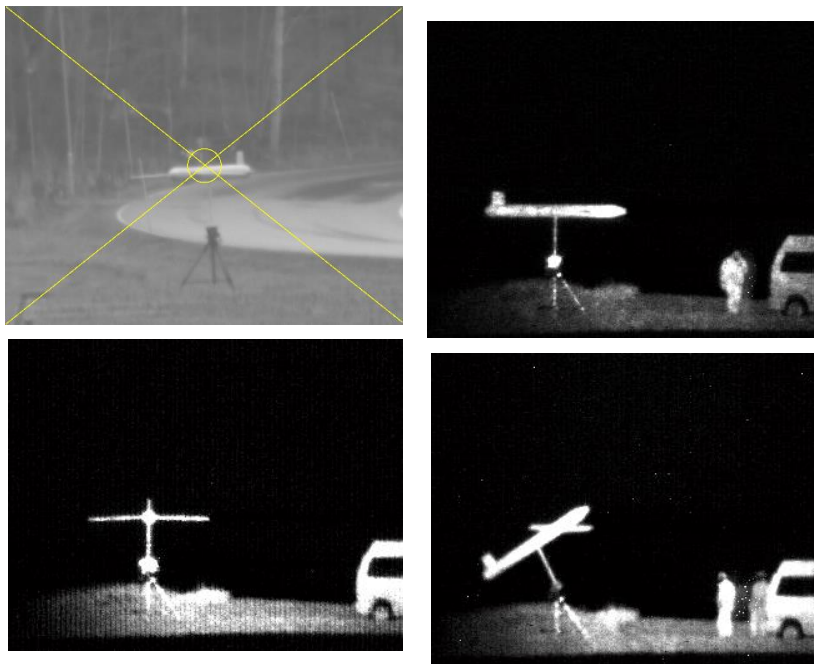
Figur 3. Exempel på avståndsprofilering av en UAV-mockup (bredd 2 m, längd 3 m) på 2 km avstånd. Avståndet mellan nos, vingar och stjärtparti kan enkelt mätas.

Samma laserkälla som används för inmätning och profilering kan även användas för direktutbildning i två eller tre dimensioner. Med tidsgrindad avbildning (*gated viewing*) kan föremål inom en vald tidslucka avbildas. Härigenom elimineras bakgrund t.ex. i form av terräng eller solbelysta moln.



Figur 4. Illustration av hur en IR sensor (t.v.) kan användas för detektion och följning inom ett större vinkelformade och en laser med grindad avbildning kan utnyttjas för inmätning och målidentifiering.

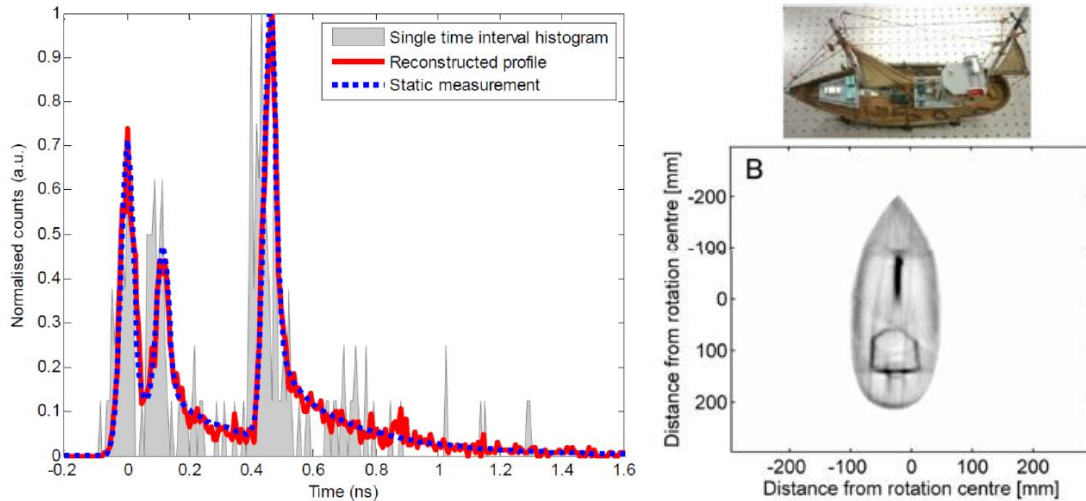
Även en högupplöst IR sensor med rimlig aperturdiameter (säg 15-20 cm) har svårt att vinkelupplösa flyg på längre avstånd. Aktiv avbildning vid kortare våglängd t.ex. vid 1.5 μm har bättre transversell upplösning och kan därmed medge identifiering, se exemplet i figur 4. Den grindade avbildningens förmåga att isolera målet från bakgrunden illustreras i figur 5.



Figur 5. Samma UAV-mockup som i figur 4 sedd ur olika aspektvinklar med ett avståndsgrindat lasersystem, överst t.v. en TV-bild.

Medan ovanstående exempel illustrerar avståndsprofilering eller avbildning med i princip en enda laserpuls så finns en annan princip för mycket högupplöst profilering eller avbildning som baseras på fotonräkning. I detta fall detekteras en enda foton per laserpuls och ett avståndshistogram bildas med hjälp av många sådana "klick". Med hög pulsrepetitionsfrekvens (flera kHz upp till MHz) bildas så ett histogram efter en insamlingstid på 1-100 ms. För ett snabbt mål kommer då målet att hinna röra sig under insamlingstiden men man kan kompensera för detta genom en lämplig signalbehandling och återvinna samma profil som om målet varit stillastående. Detta illustreras i den vänstra delen av figur 6.

I den högra delen av figur 6 visas profilering av en båtmodell (längd 30 cm) som registrerats i ett antal aspektvinklar från 0-180 grader på 60 meters avstånd. Vågformerna från de olika aspektvinklarna tillåter en tomografisk transform till bilden i figuren. Exemplet visa vilken extrem avståndsupplösning som kan erhållas med denna teknik (ner till mm nivå).



Figur 6. T.v. visas en rekonstruerad avståndsprofil (1 ns motsvarar 15 cm i avstånd) från ett rörligt mål som förflyttats avsevärt under insamlingstiden. T.h. Avståndsprofilering av en 30 cm lång båtmodell på 60 meters avstånd från olika aspektvinklar samt den tomografiskt härledda bilden. Notera den höga avståndsupplösningen.

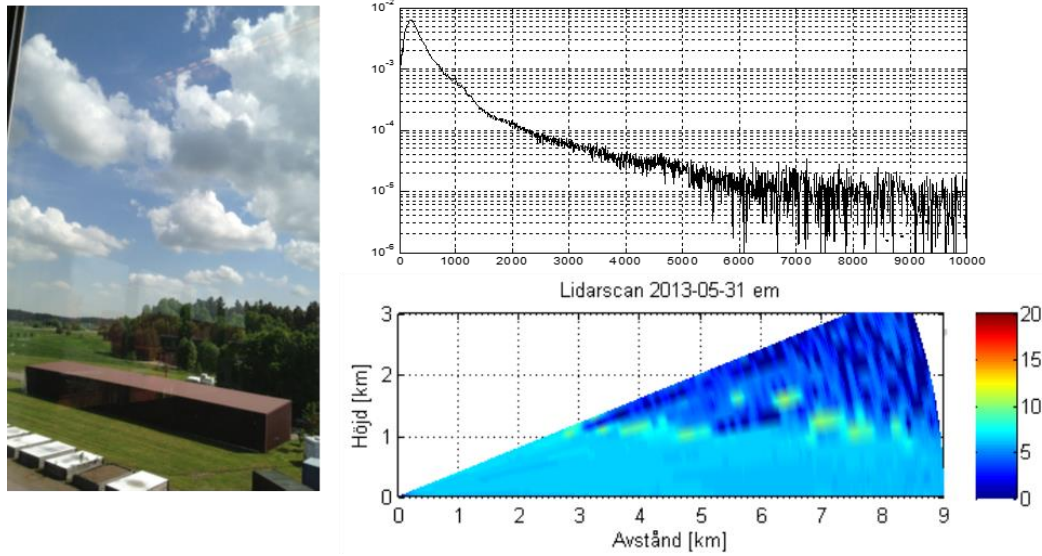
3D bilder av målet kan också genereras med en eller ett fåtal laserpulser. I detta fall avses måttlig avståndsupplösning, 10-20 cm. Detektorer som kan leverera denna typ av 3D data är under utveckling inom ett antal företag både i Europa samt i USA. Hit hör t ex Raytheon och ASC i USA, Selex UK, Sofradir Frankrike och AIM i Tyskland.

Laseravståndsmätare kan även användas för atmosfärssondering genom att mäta transmission längs sneda banor upp till moln samt även klassificera deras täthet. För LV-system är detta en tillgång speciellt vid tillfällen när det är svårt att på annan sätt uppskatta siktförhållanden såsom i mörker eller ute till havs. Samma information kan naturligtvis även användas för aktuell hotbedömning från flygande plattformar med spanings- eller vapensystem som utnyttjar elektrooptiska sensorer. Figur 7 visar ett exempel på atmosfärssondering utnyttjande en vanlig modifierad avståndsmätare.

Sammantaget har vi påvisat hur lasersensorer kan användas för målinmätning, måligenkänning, följning, klassificering och/eller målidentifiering. Profilering av mål och atmosfär kan baseras på en vidareutveckling av existerande avståndsmätare främst i form av kortare laserpulser och högre mottagarbandbredd. Därigenom erhålls bättre avståndsupplösning. Fotonräknande teknik medger mycket hög avståndsupplösning i klassen cm vilken ger möjlighet till igenkänning av små mål t.ex. robotar och små UAV:er.

Utveckling av avbildande detektormatriser med tidsstyrda eller tidsavkännande pixlar ger möjlighet till grindad avbildning vilket eliminerar besvärande bakgrund eller full 3D avbildning som medger automatisk måligenkänning via anpassning till ett 3D hotbibliotek.

Beskriven teknik är speciellt viktig för precisionsbekämpning t.ex. med optiskt styrda LV-vapen. Den utnyttjas i försök med laservapen där hög målupplösning krävs bl.a. för val av lämplig träffpunkt i målet.



Figur 7. Exempel på lidarsondering av atmosfären utnyttjande en modifierad laseravståndsmätare. T.v. ett foto av scenen och överst t.h. ett exempel på ett medelvärdesbildat lasereko från atmosfären ut till ca 7 km i relativt klar luft. Under t.h. visas ett elevations-scan med aerosolernas täthet i steg om 2 grader. Detta underlag kan användas för att uppskatta atmosfärstransmissionen i sneda banor.

8 Nätverksbaserad luftvärnstridsledning

8.1 Multisensorintegration

I framtiden krävs en tätare integration mellan samtliga sensorer, speciellt samtliga radarsystem och taktiska ESM-system. Detta gör att systemet blir svårare att vilseleda och störa eftersom det är mycket svårt att störa alla system samtidigt, speciellt om systemet som helhet består av en blandning av aktiva och passiva sensorer i samverkan. I och med den ökade systemintegrationen mellan olika delsystem och olika sensortyper så måste man uppmärksamma ett nytt hot för vilseledning på systemnivå som kan komma att inrikta sig på att skapa förvirring på högre systemnivåer.

I ett integrerat luftförsvarssystem kan det vara ett stort värde om luftvärnsrobotar (speciellt med medellång- eller lång räckvidd) kan avfyra direkt på måldata från STRIL-systemets sensorer. Genom ett sådant förfarande behöver inte skjutande LV-enheter använda någon egen spaningsradar och de kan uppträda helt passivt.

Om man har kravet att ge skjutdata från STRIL till luftvärnets eldenheter, som inte står i direkt anslutning till radarstationerna, så ställer detta speciella krav på både de ingående sensorerna, målföljningen och kommunikationssystemet. Dessa krav kommer i vissa fall att bli direkt dimensionerande.

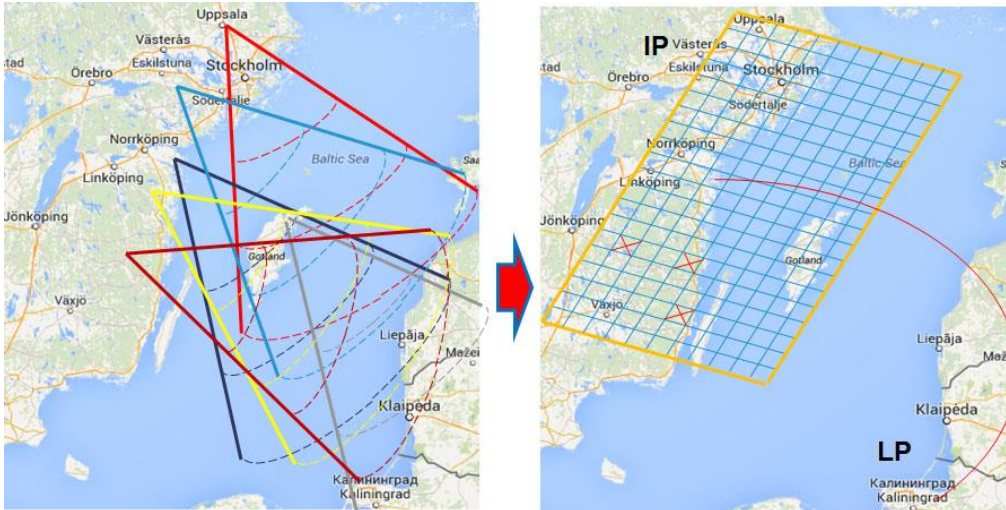
8.2 Snabba beslutskedjor och nätverk

Många inkommande hot kommer med stor sannolikhet att upptäckas före träff, men om upptäckten kommer i ett sent skede så hinner kanske inte vapensystemen reagera. Ett sätt att försvara sig mot t.ex. små robotar på låg höjd är därför att ha ett mycket effektivt luftvärn som kan reagera extremt snabbt vid upptäckt. Detta ställer då krav på att beslutskedjan också är snabb samt att besluten är korrekta. För att upptäcka de mest kvalificerade anfallande vapnen som t.ex. Taktiska Ballistiska Robotar (TBM) så kan det ställas alldeles speciella krav på sensor och beslutskedjan.

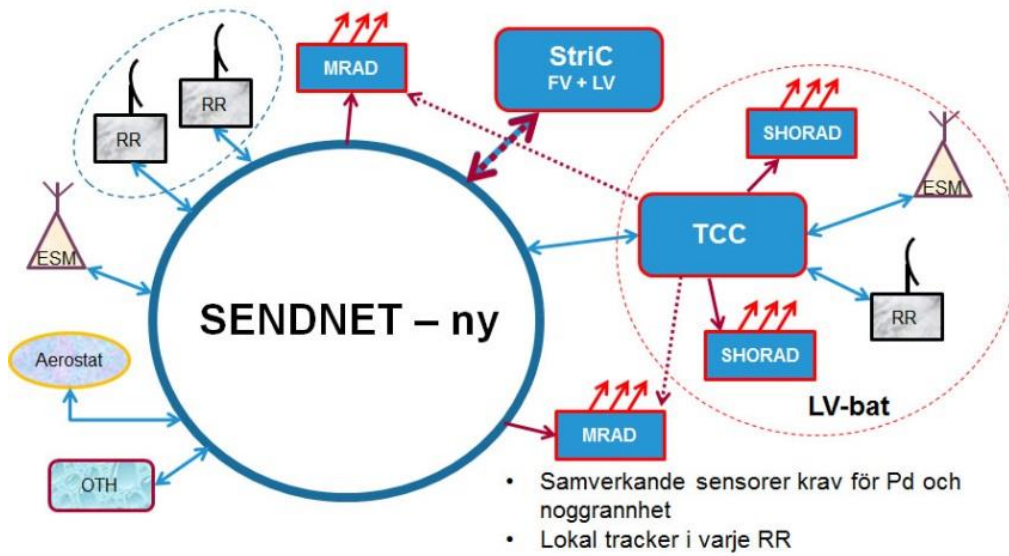
I framtida radarnät med avancerade AESA-system kan man uppnå de krav som ställs för att uppnå tillräckligt hög inmätningnoggrannhet, upptäcktssannolikhet och data-uppdateringstakt för insats av egna LV-robotar med förmåga mot TBM (se illustration i figur 8). Den generation av AESA som utvecklas just nu kommer förutom att arbeta med roterande antenner också att kunna använda en stirrande mod där antennen står stilla och avsöker en ca 60 grader vid sektor. Genom att dessutom samordna data från ett antal samverkande radarstationer som stirrar i samma sektor uppnås de prestanda som krävs för uppgiften.

I framtiden krävs även uppgradering av dagens stridledningsnät om man vill uppnå förmåga till samordning och samverkande strid mellan olika delsystem. I figur 9 visas en konceptskiss för ett system där olika delar ur dagens STRIL- och LV-system samverkar i ett nät av nya sensorer och verkanssystem. Den exakta utformningen av nätets olika delar skall inte tas för given utan skissen antyder bara vad som kan komma att krävas och hur ett systemkoncept skulle kunna se ut rent principiellt.

Många tekniska lösningar finns redan idag och i tidsperspektivet 2020-2040 kommer vi att få se alla de tekniska lösningar som krävs för att uppnå de korta ledtider som krävs från inmätning till insats i en snabb och effektiv beslutskedja.



Figur 8. Ett system av samverkande moderna AESA-radarstationer får de prestanda som krävs i upptäcktsannolikhet, inmättningsprestanda och datauppdatering för insats av LV-robot mot anfallande TBM.



Figur 9. Konceptskiss på ett system av samverkande system.

9 Sammanfattning och fortsatt arbete

Ökad globalisering medför snabbare spridning och omsättning av både kunskap och möjligheter. System baseras i större utsträckning på allmänt tillgängliga komponenter.

Man kan vänta en ökad diversifiering av hoten. Inte bara olika typer av system utan även nya oväntade strategier och beteenden.

Traditionella komplexa platformscentrerade lösningar kan komma att spela en minskad roll: höga kostnader och lång utvecklingstid som resulterar i endast ett fåtal system, kan vara sårbara för specifika motmedel eller oväntade omvärldsförändringar.

Ökad användning av distribuerade och modulära vapensystem. Komponenter kan lätt uppdateras och systemen får förändrade egenskaper som är svåra att förutse. Hotbibliotek kan snabbt bli inaktuella.

Användningen av UAV:er förväntas öka, likaså spridningen av kryssningsrobotar.

Nya hypersoniska robotsystem är under utveckling. Banan är inledningsvis ballistisk, efter återinträde planar den ut och roboten glidflyger mot målet. Roboten manövrerar aerodynamiskt, hög fart i kombination med oförutsägbara trajektorier gör dem mycket svåra att bekämpa. Även hypersoniska kryssningsrobotar är på gång: scramjetdrivna, kan flyga på mycket låg höjd och har mycket hög manövrerbarhet.

Nya snabba A/D omvandlare, programmerbara integrerade kretsar (FPGA) och digitala signalprocessorer (DSP) ger ökad beräkningskraft. Kraftfulla algoritmer blir nu tillämpbara för att realisera adaptiva och autonoma system som kan hantera komplexa händelser och beslut, exempelvis ”smarta” system för spaning, kommunikation och telekrig.

Plattformar görs mobila, rörligheten ökar. Eldledning och vapen på samma plattform. Automatiserade system med kortare reaktionstider och högre eldgivningstakt. Viktigt är också integrerade LV-system som kan möta olika typer av hot.

En mycket viktig trend är nätverksbaserade och distribuerade systemlösningar: ger öppna arkitekturer, bättre robusthet och kostnadseffektivitet. Möjliggör också ett mer optimalt utnyttjande av den information som i princip ”finns” i systemet.

Stora förhoppningar har länge knutits till rälskanoner, HPM och högeffektlaser. Vissa hävdar att genombrott är nära, andra betonar allvarliga kvarstående tekniska problem. Informationen är delvis otillförlitlig och svårbedömd.

Tänkta tillämpningar har ändrats från ”domedagsvapen” till kortsräckviddigt komplement till traditionella vapensystem. Israel och USA resonerar tydligt i termer av integrerade luftförvarssystem med laser, HPM, rälskanoner, C-RAM, SAM och antibalistiska robotar ordnade i olika lager.

Rälskanoner är i princip lovande men många tekniska problem kvarstår. Fullskaligt försök på fartyg planeras av U.S. Navy under 2016.

Det är ont om tillförlitlig öppen information kring HPM-vapen. FoU har pågått mycket länge utan riktigt genombrott. Mycket forskningsaktivitet pågår i Sydostasien. Ryssland har troligtvis redan provat något slags HPM-system i Ukraina.

Nya generationer av fasta tillståndslasrar har funnit nya tillämpningar som kortsräckviddigt komplement till konventionella vapen mot lågt flygande mål. Flera system är operativa, även mobila. Snabb utveckling pågår mot högre effekter och ökad precision i fokuseringen av laserstrålen.

Miniaturisering av komponenter och ökad beräkningskraft för avancerad signalbehandling driver också den tekniska utvecklingen på radarområdet. Trenden går mot AESA-radar med ett ökande antal digitala kanaler. En fullständigt digital antenntyta väntas inte bli möjlig förrän mot 2040 (för stora antenner). Passiv radar är också något som blir allt mer aktuellt.

Ett nätverk av samverkande framtida AESA-system skulle kunna uppnå tillräcklig prestanda för insats av LV-robot mot anfallande TBM.

För lasersensorer går utvecklingen mot kortare laserpulser och högre mottagarbandbredd vilket ger allt bättre avståndsupplösning. Högupplösande laser kan underlätta klassificering och identifiering av mål när avbildande elektro-optiska sensorer inte klarar att vinkelupplösa. Fotonräknande teknik kan ge en upplösning ända ner till mm nivå. Utveckling av 3D-avbildande laserdetektorer är på gång hos flera företag i Europa och USA, kan användas för automatisk måligenkänning via ett 3D-hotbibliotek.

Utvecklingen går fort framåt. Inte bara den tekniska utan stora förändringar sker även politiskt och ekonomiskt. Vi föreslår att en översiktlig sammanställning i form av en rapport som denna kan återkomma var tredje år.

10 Referenser

Alla sidor besökta augusti 2015.

- [1] E. Berglund m.fl. Strid med system i samverkan. Teknisk rapport, FOI-R--4055--SE, 2015.
- [2] Brämning m.fl. Forskningstrender för styrda vapen del 1. Teknisk rapport, FOI-R--3652--SE, 2013.
- [3] Slutrapport från förstudien MARK 141402FS, Elektromagnetiska vapen mot luftmål. Försvarmakten Luftvärnsregementet, Lv 6 beteckning: 21 120:70415, 2014.
- [4] M. Gubrud. "The argument for a hypersonic missile testing ban". Bulletin of the Atomic Scientists, September 2014, <http://thebulletin.org/argument-hypersonic-missile-testing-ban7412>.
- [5] R. Weitz. "Arms Racing in Strategic Technologies: Asia's New Frontier". Hudson Institute, May 2015, <http://www.hudson.org/research/11307-arms-racing-in-strategic-technologies-asia-s-new-frontier>.
- [6] S. Tikhonov. "Неуловимый ракетный мститель". Эксперт Online, januari 2014, <http://expert.ru/2014/01/27/neulovimyij-raketnyij-mstitel/>.
- [7] E. Sänger och I. Bredt. Über einen Raketenantrieb für Fernbomber. Deutsche Luftfahrtforschung UM 3538, Zentrale für wissenschaftliches Berichtswesen der Luftfahrtforschung, August 1944.
- [8] E. P. Williams, et al. Long Range Surface-to-Surface Rocket and Ramjet Missiles-Aerodynamics. The RAND Corp., Rept. R-181, May 1, 1950.
- [9] "PJ-10 BrahMos". GlobalSecurity, February 2015, <http://www.globalsecurity.org/military/world/india/brahmos.htm>.
- [10] J. Lin och P.W. Singer. "Offset This! China's Hypersonic Glider Flies for the Third Time This Year". Popular Science, December 2014, <http://www.popsci.com/offset-chinas-hypersonic-glider-flies-third-time-year>.
- [11] "Raytheon to continue development of hypersonic boost glide systems". Airforce-technology, April 2015, <http://www.airforce-technology.com/news/newsraytheon-to-continue-development-of-hypersonic-boost-glide-systems-4565813>.
- [12] "Race for Hypersonic Missiles intensifies and leading to search for Hypersonic Missile Defense solutions". International Defense Security & Technology, August 2015, <http://myidst.com/index.php/en/military/air/item/267-race-for-hypersonic-missiles-intensifies-and-leading-the-search-for-hypersonic-missile-defense-solutions>.
- [13] B. Gertz. "China Conducts Fifth Test of Hypersonic Glide Vehicle". The Washington Free Beacon, August 2015, <http://freebeacon.com/national-security/china-conducts-fifth-test-of-hypersonic-glide-vehicle/>.

- [14] D. Lamothe. "The Army's experimental hypersonic missile just exploded four seconds after takeoff". The Washington Post, August 2014, <http://www.washingtonpost.com/news/checkpoint/wp/2014/08/25/the-armys-experimental-hypersonic-missile-just-exploded-four-seconds-after-takeoff/>.
- [15] J. Nye. "Pentagon's top-secret hypersonic weapon explodes in mystery Alaska fireball". Mail Online, August 2014, <http://www.dailymail.co.uk/news/article-2734332/Amateur-photographer-captures-moment-experimental-US-weapon-detonates-launchpad-wilds-Alaska.html>.
- [16] "Top Secret Fuel Formula to Accelerate Russia's Hypersonic Missiles". Sputnik International, February 2015, <http://sputniknews.com/military/20150220/1018535730.html>.
- [17] "Russia to Field Hypersonic Cruise Missile by 2023". The Moscow Times, February 2015, <http://www.themoscowtimes.com/business/article/russia-to-field-hypersonic-cruise-missile-by-2023/516170.html>.
- [18] J. Liu, et al. Novel approach for designing a hypersonic gliding–cruising dual waverider vehicle. *Acta Astronautica*, 102:81-88, 2014.
- [19] M.L. Xu, et al. Scheme trajectory design of hypersonic glide-cruise vehicle. *Flight Dyn.*, 28(5):51-54, 2010. (På kinesiska.)
- [20] M. Barabanov. Iskander the Great. *Moscow Defense Brief*, Issue 14, 2008.
- [21] "ОТРК Искандер", <http://lemur59.ru/node/8706>.
- [22] D. Szondy. "DARPA looks at system of systems to maintain US air superiority". Gizmag, April 2015, <http://www.gizmag.com/darpa-systems-sosite/36801/>.
- [23] C. Pellerin. "DARPA Uses Open Systems, 'Plug and Fly' to Boost Air Power". DoD News, March 2015, <http://www.defense.gov/News/Article/604383>.
- [24] "Medium Calibre Weapons and Ammunition". Rheinmetall AG, http://www.rheinmetall-defence.com/en/rheinmetall_defence/systems_and_products/weapons_and_ammunition/direct_fire/medium_calibre/index.php.
- [25] "DART". OTO Melara, <http://www.otomelara.it/products-services/guided-ammunition/dart-1>.
- [26] "Survivable Electronics for Control of Hypersonic Projectiles under Extreme Acceleration". Navy SBIR 2012.1 - Topic N121-102, http://www.navysbir.com/n12_1/N121-102.htm.
- [27] "Electromagnetic Rail Gun". GlobalSecurity, May 2014, <http://www.globalsecurity.org/military/systems/ship/systems/emrg.htm>.
- [28] S.J. Freedberg. "Navy's Magnetic Super Gun To Make Mach 7 Shots At Sea In 2016". Breaking Defense, April 2014, <http://breakingdefense.com/2014/04/navys-magnetic-super-gun-to-make-mach-7-shots-at-sea-in-2016-adm-greenert/>.
- [29] J. D. Ellis. Directed energy weapons: Promise and prospects. 20YY SERIES, Center for a New American Security, Washington DC, April 2015.

- [30] A. Robinson. "Directed Energy Weapons: Will They Ever Be Ready?" National Defense Magazine, July 2015, <http://www.nationaldefensemagazine.org/archive/2015/july/pages/directedenergyweaponswilltheyeverbeready.aspx>.
- [31] M. G. Saber et al. Numerical study of the dispersion characteristics of a semi-circular corrugated slow wave structure. *The European Physical Journal D*, 69(2), 2015.
- [32] "High-power Microwave (HPM) Antennas". SARA Inc., http://www.sara.com/EM/antenna_design/HPM.html.
- [33] J. Drew. "USAF nominates JASSM missile to host new computer-killing weapon". Flightglobal, May 2015, <http://www.flightglobal.com/news/articles/usaf-nominates-jassm-missile-to-host-new-computer-killing-412348/>.
- [34] "Electronic Weapons: The CHAMP Cannot Compete". StrategyPage, April 2015, <https://www.strategypage.com/htmw/htecm/20150414.aspx>.
- [35] "CHAMP - Lights Out". Boeing, October 2012, <http://www.boeing.com/features/2012/10/bds-champ-10-22-12.page>.
- [36] J. Drew. "The U.S. Air Force Has a Computer-Killing Cruise Missile". March 2015, <https://medium.com/war-is-boring/the-u-s-air-force-has-a-computer-killing-cruise-missile-6a0bcf481ce1>.
- [37] B. Gertz. "Report: China building electromagnetic pulse weapons for use against U.S. carriers". The Washington Times, July 2011, <http://www.washingtontimes.com/news/2011/jul/21/beijing-develops-radiation-weapons/?page=all>.
- [38] R.J. Woolsey och P.V. Pry. "The Growing Threat From an EMP Attack". The Wall Street Journal, August 2014, <http://www.wsj.com/articles/james-woolsey-and-peter-vincent-pry-the-growing-threat-from-an-emp-attack-1407885281>.
- [39] "S.Korea Plans Electromagnetic Pulse, Laser And High-Power Microwave Weapons". Defenseworld, January 2015, http://www.defenseworld.net/news/11960/S_Korea_Plans_Electromagnetic_Pulse_Laser_And_High_Power_Microwave_Weapons#.VdowEJenzph.
- [40] "Russia developing system capable of 'switching off' foreign military satellites". TASS, June 2015, <http://tass.ru/en/russia/803788>.
- [41] "Russia Develops 'Microwave Gun' Able to Deactivate Drones, Warheads". Sputnik International, June 2015, <http://sputniknews.com/russia/20150615/1023369522.html>.
- [42] R.F. Johnson. "UPDATE: Russia's hybrid war in Ukraine is working". IHS Jane's Defence Weekly, February 2015, <http://www.janes.com/article/49469/update-russia-s-hybrid-war-in-ukraine-is-working>.
- [43] J. Ohlson. Taktisk högenergilaser i luftvärnssammanhang. Självständigt arbete ChP 08-10T, Försvarshögskolan, 2009.
- [44] L. Sjöqvist och O. Steinvall. Taktiska laservapen – system och teknik under utveckling. Teknisk rapport, FOI-R--2657--SE, 2008.

- [45] "Skyguard". Defense Update Magazine, 2006 Issue 2, <http://defense-update.com/products/s/skyguard-laser.htm>.
- [46] A. Extance. "Military technology: Laser weapons get real". Nature, May 2015, <http://www.nature.com/news/military-technology-laser-weapons-get-real-1.17613>.
- [47] J. Didymus. "Israel to deploy Iron Beam, world's first laser-based air defense system". The Inquisitr, January 2015, <http://www.inquisitr.com/1745217/israel-to-deploy-iron-beam-worlds-first-laser-air-defense-system-in-2015/>.
- [48] V.C. Coffey. "High-Energy Lasers: New Advances in Defense Applications". Optics & Photonics News, October 2014, http://www.osa-opn.org/home/articles/volume_25/october_2014/features/high-energy_lasers_new_advances_in_defense_applica/#.VXsIN0anzpg.
- [49] "USS Ponce Laser Weapon System Goes to Sea". Second Line of Defense, January 2015, <http://www.sldinfo.com/uss-ponce-laser-weapon-system-goes-to-sea/>.
- [50] S. Ghoshroy. "Navy's new laser weapon: Hype or reality?" The Bulletin of the Atomic Scientists, May 2015, <http://thebulletin.org/navys-new-laser-weapon-hype-or-reality8326>.
- [51] T. Eshel. "US Navy to test powerful, mobile laser weapon against drones". Defense Update Magazine, August 2014, http://defense-update.com/20140813_laser-gbad.html#.VYA3rEanzpg.
- [52] "The high-energy laser: Weapon of the future already a reality at Rheinmetall". Rheinmetall AG, http://www.rheinmetall.com/en/rheinmetall_ag/press/themen_im_fokus/zukunftswaFFE_hel/index.php.
- [53] "DARPA extends laser weapon range". Optics.org, March 2014, <http://optics.org/news/5/3/13>.
- [54] K. Osborn. "Pentagon: Hypersonic Needed to Defeat Russian Air Defense Systems". Defense Tech, March 2014, <http://defensetech.org/2014/03/21/pentagon-hypersonic-needed-to-defeat-russian-air-defense-systems/>.
- [55] J. Gould. "Electronic Warfare: What US Army Can Learn From Ukraine". Defense News, August 2015, <http://www.defensenews.com/story/defense/policy-budget/warfare/2015/08/02/us-army-ukraine-russia-electronic-warfare/30913397/>.
- [56] J. Keller. "Intel to boost integrated microprocessor and FPGA offerings with acquisition of Altera". Military & Aerospace Electronics, June 2015, <http://www.militaryaerospace.com/articles/2015/06/microprocessor-and-fpga.html>.
- [57] J. Keller. "Embedded computing leaps forward with Intel Xeon D processor". Military & Aerospace Electronics, June 2015, <http://www.militaryaerospace.com/articles/print/volume-26/issue-6/news/trends/embedded-computing-leaps-forward-with-intel-xeon-d-processor.html>.
- [58] S. Aridhi och S. Narnakaje. "Optimizing Synthetic Aperture Radar design with TI's integrated 66AK2L06 SoC". Texas Instruments, April 2015, <http://www.ti.com/lit/wp/spry284/spry284.pdf?DCMP=ep-pro-mat-66ak2l06-150421&HQS=ep-pro-mat-66ak2l06-20150505-problog-wp-en>.

- [59] J. Keller. "Programmable radar and adaptive electronic warfare take center stage". *Military & Aerospace Electronics*, April 2013, <http://www.militaryaerospace.com/articles/print/volume-24/issue-4/special-report/programmable-radar-and-adaptive-electronic-warfare-take-center-s.html>.
- [60] P. Tilghman. "Adaptive Radar Countermeasures". DARPA, <http://www.darpa.mil/program/adaptive-radar-countermeasures>.
- [61] R. Singh et al. Cognitive Radio New Dimension in Wireless Communication – State of Art. *International Journal of Computer Applications*, 74(10):10-19, 2013.
- [62] K. Kotobi et al. Data-Throughput Enhancement Using Data Mining-Informed Cognitive Radio. *Electronics*, 4(2):221-238, 2015.
- [63] "New Intelligent EW System to Counter Evolving Radar Threats". BAE Systems, December 2014, http://www.baesystems.com/article/BAES_178349/new-intelligent-ew-system-to-counter-evolving-radar-threats.
- [64] "Adaptive radar countermeasures ARC". BAE Systems, http://www.baesystems.com/product/BAES_163394/adaptive-radar-countermeasures-arc.
- [65] "Exelis, Leidos continue work to counter future radar threats". Business Wire, May 2015, <http://www.businesswire.com/news/home/20150520006095/en/#.VdRTXkantzph>.
- [66] "Next-Generation Electronic Warfare Development Targets Fully Adaptive Threat Response Technology". Georgia Institute of Technology, <http://www.gtri.gatech.edu/casestudy/GTRI-next-generation-electronic-warfare-angry-kitten>.
- [67] "Next generation Electronic warfare Systems for Spectrum Dominance". *International Defense Security & Technology*, August 2015, <http://myidst.com/index.php/en/technology/electronics/item/275-next-generation-electronic-warfare-systems-for-spectrum-dominance>.

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