

Värdering avvägning TK/SAT en förstudie

Peter Klum, Patrik Carlsson, Gustaf Olsson, Claes
Nelsson, Peter Johansson, Staffan Gadd, Patrik
Hermansson, Carl-Lennart Westerlund, Pär Svensson,
Jonas Rahm, Göran Pettersson, Hans Habberstad



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1350 anställda varav ungefär 950 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, bedömningen av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
Ledningssystem
Box 1165
581 11 Linköping

Tel: 013-37 80 00
Fax: 013-37 81 00

www.foi.se

Peter Klum, Patrik Carlsson, Gustaf Olsson, Claes Nelsson, Peter Johansson,
Staffan Gadd, Patrik Hermansson, Carl-Lennart Westerlund, Pär Svensson,
Jonas Rahm, Göran Pettersson, Hans Habberstad

Värdering avvägning TK/SAT

en förstudie

Utgivare FOI - Totalförsvarets forskningsinstitut Ledningssystem Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1817--SE	Klassificering Metodrapport
	Forskningsområde 6. Telekrig och vilseledning	
	Månad, år December 2005	Projektnummer E7102
	Delområde 61 Telekrigföring med EM-vapen och skydd	
	Delområde 2	
Författare/redaktör Peter Klum Patrik Carlsson Gustaf Olsson Claes Nelsson Peter Johansson Staffan Gadd Patrik Hermansson Carl-Lennart Westerlund Pär Svensson Jonas Rahm Göran Pettersson Hans Habberstad	Projektledare Peter Klum	
	Godkänd av Mikael Sjöman	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning Försvarsmakten	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Peter Klum	
Rapportens titel Värdering avvägning TK/SAT en förstudie		
Sammanfattning Signaturanpassningsteknik (SAT) och telekrigsteknik (TK-teknik) är två viktiga komponenter för att öka överlevnaden för en plattform eller ett förband så att ett uppdragsmål kan nås. Denna rapport beskriver det arbete som har bedrivits inom förstudien ”Värdering avvägning TK/SAT, en förstudie”. I förstudien har operativa system, metoder och verktyg för balanserad TK/SAT avvägning studerats. Utöver detta har en demonstration som visar ett avvägningskoncept utvecklats. Syftet med förstudien har varit att lägga grunden till fortsatt arbete kring TK/SAT stödsystem som kan erbjuda en ökad överlevnad och verkan hos plattformar och förband. Förstudien har avgränsats till att studera de användarnära behoven av TK/SAT stöd vid planering inför och under uppdrag. I denna rapport har funna system, metoder och verktyg sammanställts tillsammans med egna resonemang och erfarenheter inom området. En av slutsatserna är att en balanserad TK/SAT-avvägning är en ytterst komplex uppgift och ytterligare arbete krävs. I ett fortsatt arbete bör bland annat: ▪ en avgränsning göras till TK/SAT stöd under uppdrag ▪ en avgränsning göras till markstrid ▪ ett fåtal lovande metoder väljs ut och värderas genom tester i funktionsmodeller ▪ samverkan utvecklas med områdesexperter inom SAT, TK, värdering, beslutsstöd och resursallokering I ett fortsatt arbete är det också viktigt att identifiera användarnas behov av TK/SAT stöd.		
Nyckelord telekrig, signaturanpassningsteknik, taktik, värdering, avvägning		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 84 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Ledningssystem Box 1165 581 11 Linköping	Report number, ISRN FOI-R--1817--SE	Report type Methodology report
	Programme Areas 6. Electronic Warfare and deceptive measures	
	Month year December 2005	Project no. E7102
	Subcategories 61 Electronic Warfare including Electromagnetic Weapons and Protection	
	Subcategories 2	
Author/s (editor/s) Peter Klum Patrik Hermansson Patrik Carlsson Carl-Lennart Westerlund Gustaf Olsson Pär Svensson Claes Nelsson Jonas Rahm Peter Johansson Göran Pettersson Staffan Gadd Hans Habberstad	Project manager Peter Klum	
	Approved by Mikael Sjöman	
	Sponsoring agency Swedish armed forces	
	Scientifically and technically responsible Peter Klum	
Report title (In translation) Balanced assessment of Electronic Warfare and Signature Management technologies, a pre-study		
Abstract Signature Management Technologies (SMT) and Electronic Warfare (EW) are two important assets in order to increase survivability of platforms and combat units and be able to fulfill a mission objective. This report describes the effort that has been conducted in the pre-study “Värdering avvägning TK/SAT, en förstudie”. In the pre-study, operational systems, methods and tools for balancing SMT and EW have been studied. In addition software has been developed to demonstrate a balancing method. The purpose of the pre-study has been to lay the foundation for further work in the field of combined and balanced SMT/EW support systems. Balancing these assets may improve survivability and efficiency for platforms and combat units. A restriction has been made in that only SMT/EW support systems applicable to planning, prior to and during combat missions have been studied. System, methods and tools have been compiled in the report, together with acquired experience. One conclusion is that balancing SMT/EW is an exceedingly complex task and that further work has to be conducted. Further work should, for example: ▪ be restricted to SMT/EW support during combat missions ▪ be restricted to ground combat operations ▪ select a few promising methods for assessment ▪ develop co-operation with domain experts in the field of SMT, EW, decision support and resource allocation In a future work the operational needs for SMT/EW support has to be identified.		
Keywords electronic warfare, signature management technology, tactics, assessment, balancing		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 84 p.	
	Price acc. to pricelist	

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	7
1.1	Nyttan för Forsvarsmakten.....	8
1.2	Förstudien.....	8
1.2.1	Mål	8
1.2.2	Avgränsningar	9
1.2.3	Arbetsmetod	9
1.2.4	Referensgrupp	10
1.2.5	TAAKII	10
2	Avvägning under uppdrag.....	12
2.1	Ambition hos ett stödsystem	14
2.2	Avvägning under uppdrag - vid planering inför uppdrag - vid systemutveckling ...	14
2.3	Vad styr avvägningen under ett uppdrag.....	16
2.3.1	Uppdragets karaktär	17
2.3.2	Den aktuella stridsfasen	18
2.3.3	Begränsningsfaktorer	19
2.3.4	Hur väl jag kan bilda mig en uppfattning om läget (lägesanalys).....	19
2.3.5	Hur väl jag kan ta fram handlingsalternativ (alternativanalys).....	19
2.3.6	Hur handlingsalternativ påverkar övriga förmågor	20
2.3.7	Förbandskoordinering	21
2.3.8	Tid till beslut	21
2.4	Tilltro och MSI-aspekter	22
2.4.1	Kontextuella styrmodeller (COCOM).....	23
2.5	Sammanfattning	24
3	System i omvärlden.....	25
3.1	Flyg.....	25
3.2	Marin	26
3.3	Armé.....	26
3.4	Sammanfattning	27
4	Metoder för avvägning	28
4.1	Agenter och omvärldsrepresentation.....	28
4.2	Optimering	31
4.2.1	Matematisk programmering	31
4.2.2	Lokalsökningsmetoder	32
4.2.3	Grafsökning.....	33
4.2.4	Genetiska algoritmer	37
4.2.5	Simulated annealing	40
4.3	Hantera vaghet.....	41
4.3.1	Fuzzy Logic.....	41
4.4	Hantera osäkerheter.....	44
4.4.1	Baysiansk teknik	45
4.4.2	Dempster-Shafer.....	46
4.4.3	Jämförelse mellan Baysiansk teknik och Dempster-Shafer	47
4.5	Planering.....	47
4.6	Spelteori	47
4.6.1	Nashjämvikt	48
4.6.2	Spel med ren strategi	48

4.6.3	Spel med blandad strategi	48
4.6.4	Svårigheter	48
4.7	Sammanfattning	49
5	Verktyg och teknik för avvägning.....	50
5.1	Förutsättningar	50
5.1.1	Hotkännedom	50
5.1.2	Miljö- och geografiska data.....	52
5.1.3	Atmosfärs- och väderinformation	53
5.1.4	Signatur inom optiska området	55
5.1.5	Signatur inom radarområdet.....	57
5.1.6	Akustisk signatur.....	58
5.1.7	Mått för signatur.....	59
5.1.8	Att känna sin signatur.....	60
5.2	Åtgärder.....	61
5.2.1	Signaturstyrning	61
5.2.2	Telekrig	62
5.2.3	Andra åtgärder.....	64
5.3	Sammanfattning	64
6	Systemtillförlitlighet.....	65
6.1	Indata.....	65
6.2	Tid till förfogande	67
6.3	Dynamisk detaljeringsgrad.....	68
6.4	Sammanfattning	70
7	Demoarbetet	71
7.1	Erfarenheter från demoarbetet.....	77
8	Diskussion och slutsatser	78
8.1	Slutsatser	79
9	Referenser.....	80

1 Inledning

Signaturanpassningsteknik (SAT) och telekrigsteknik (TK-teknik) är två viktiga komponenter för att öka överlevnaden för en plattform eller ett förband så att ett uppdragsmål kan nås.

Traditionellt utvecklas SAT och TK-teknik var för sig, där förhållandevis liten samordning sker mellan områdena. Avsaknaden av samordning kan lätt leda till att fördyrande och motverkande optimeringar görs inom de olika teknikområdena. Genom att samordna och kombinerat avväga SAT och TK-teknik utifrån dess användning kan en helhetssyn fås där snäva suboptimeringar kan undvikas.

Den frågeställning som förstudien jobbat efter är: *Hur balanseras signaturanpassning och telekrig för att ge bästa effekt?*

Med balanserad avses - hur kombineras TK och SAT för maximal "nytta"? Frågeställningen är alltså inte TK eller SAT, utan snarare TK och SAT, fast i lämpliga portioner för bästa effekt!

Förstudien "Värdering avvägning TK/SAT, en förstudie" (förstudieår 2005) har beaktat tre nivåer där SAT och TK avvägningar är aktuella¹:

- Systemutveckling
- Planering inför ett uppdrag
- Under ett uppdrag

För att kombinerat avväga SAT och TK på ovanstående nivåer behövs stödsystem som hjälper beslutsfattaren (systemdesignern, planeraren, operatören) att göra det bästa TK/SAT valet. För de olika nivåerna finns ett flertal faktorer som måste beaktas då stödsystemet utformas. Sådana faktorer är *beslutshorisonten* (för vilken tidsrymd ska beslutet gälla?) samt *beslutsbudgeten* (hur lång tid får det ta att komma till beslut?). Andra faktorer är det scenario och den information som ligger till grund för beslutet. Faktorer som påverkar beslut på de olika avvägningsnivåerna visas i Tabell 1.

	Systemutveckling	Inför uppdrag	Under uppdrag
Beslutshorisont	Överblickbar hotbild	Dag - vecka	Sekund - timme
Beslutsbudget	Månad - år	Timme - dag	Sekund - timme
Scenario	Trovärdiga typsituationer	Förmodat statisk-dynamisk scenario	Aktuellt dynamiskt föränderligt scenario
Information	Trovärdig information	Planeringsaktuell information	Aktuell osäker - bekräftad information
Stödja TK/SAT vid	Systemval	Användning	Användning

Tabell 1 Översiktliga skillnader mellan de olika nivåerna.

För planering inför och under uppdrag är det TK/SAT användningen av befintlig utrustning i det faktiska scenariot som ska stödjas, medan vid systemutveckling syftar stödet till att välja den lämpligaste TK/SAT kostymen för en plattform eller ett förband i trovärdiga framtida typsituationer.

¹ En balanserad TK/SAT syn bör också finnas vid inventering av behovsområden, operativ anpassning, taktikutveckling, utbildning och vid förtroendeförankring.

1.1 Nyttan för Försvarsmakten

Att vid systemutveckling kunna avväga balansen mellan tekniska signatur- och telekrigåtgärder är viktig för att kostnadseffektivt kunna upphandla eller utveckla stridsplattformar där signaturegenskaper och telekrigresurser på ett optimalt sätt kompletterar varandra.

Att kunna avväga balansen mellan tekniska signatur- och telekrigåtgärder är viktigt vid stridsplanering för att kunna välja rätt taktik under uppdraget.

Att kunna avväga balansen mellan tekniska signatur- och telekrigåtgärder under ett stridsuppdrag är viktigt för att kunna hantera oförutsedda händelser. Risken för detta har ökat genom det planerade deltagandet i EU Battlegroup [1], där svensk trupp kan konfronteras med irreguljära förband och fiender, vars beteende svårigen kan planeras i förväg. För att kunna hantera oförutsedda händelser måste en dynamisk och snabb avvägning mellan signatur- och telekrigåtgärder göras för skyddsobjektets överlevnad [2]². För att i en framtid, även kunna nyttja styrbara signaturmaterial i kombination med telekrigåtgärder på ett effektivt sätt, måste en dynamisk avvägning mellan signaturegenskaper och telekrigresurser kunna göras.

Med en bra avvägningsmetodik kommer prestanda och stridsvärde att kunna ökas då en plattform planeras eller utvecklas med avseende på signaturanpassning och telekrig. Genom att, på ett optimalt sätt, kunna avväga användning och hantering av egen signatur och egna telekrigresurser inför och under ett stridsskede, kan överlevnadsförmågan avsevärt förbättras.

1.2 Förstudien

Förstudien bygger på en tidigare förstudie [3]. I denna tidigare förstudie (finansierad från FoT 8) föreslogs bland annat att studera ”Avvägning SAT-TK” samt ”Taktisk och situationsanpassad användning av SAT”. Dessa två förslag ligger till grund för denna förstudie som samfinansierats till lika delar av FoT 8 och FoT 16.

1.2.1 Mål

Förstudiens mål har varit att lägga grunden för fortsatt arbete för avvägning mellan SAT och TK, genom att:

- inventera nationell och internationell forskning kring avvägning TK/SAT samt i system nyttjade avvägningsmetoder och metoder under utveckling.
- identifiera forskningsbehov samt utverka en plan hur fortsatt arbete bör genomföras.
- skapa kontakter med nationella och internationella³ företag och forskningsorganisationer för att identifiera samarbetsmöjligheter.
- demonstrera en avvägningsmetodik

² Från FoT-strategi 2002: ”Rörligheten och tempot i striden ökar. Kraven på kortare tid från upptäckt till insats kommer därmed att öka. Vi måste därför ha förmågan att snabbare än motståndaren kunna upptäcka hot, identifiera möjligheter och besluta om eventuella insatser i den framtida striden.”

³ På grund av budgetåstramningar hösten 2005 fick det internationella kontaktskapandet nedprioriteras.

1.2.2 Avgränsningar

En förstudie bör vara ganska bred, dock insågs snart under förstudiearbetet att avgränsningar måste göras. Frågeställning, *Hur balanseras signaturanpassning och telekrig för att ge bästa effekt?*, som förstudien haft att arbeta efter är oerhört komplex och svårbesvarad. ”Hur” och ”bästa effekt” i frågeställningen öppnar dörrar till ett flertal forskningsområden, varför en avgränsning var nödvändig.

Förstudien har därför fokuserat på stödfunktioner för nivåerna planering inför och under uppdrag, dvs. de användarnära och situationsanpassade behoven av TK/SAT-stöd. Denna fokusering är gjord med tanke på att användarbehoven måste ha inverkan på vilka avvägningar som bör göras vid systemutveckling (bottom-up), se kapitel 2.2.

Med tanke på EU Battlegroup har förstudien fokuserat på TK/SAT-stöd vid markstrid. Metoder och verktyg som presenteras i detta dokument är dock mer generella och kan användas för alla vapenslag. Markfokuseringen har snarare varit för att ensa förstudiegruppen i dess tankearbete samt som en förberedelse inför utvecklingsarbetet i det kommande arbetet, se kapitel 8, där markstrid kommer att vara i fokus.

En avgränsning har också gjorts till telekrig- och signaturanpassningsåtgärder för det optiska-, radar- och akustiska området.

1.2.3 Arbetsmetod

För att effektivisera arbetet delades förstudiegruppen upp i fyra arbetsgrupper: system, forskning, verktyg och demo. Deltagare kunde finnas i flera grupper och fungerade då som kommunicerande kärl mellan grupperna.

Systemgruppen hade som uppgift att identifiera och dokumentera operativa och i närtid operativa plattform-, förbands- och stödsystem med implementerad TK/SAT avvägningssystematik. Gruppens arbete finns samlat under kapitel 3.

Forskningsgruppen hade att identifiera och dokumentera beslutsstödsfunktioner, optimeringsfunktioner, algoritmer, etc. som kan stödja TK/SAT avvägningar. Gruppens arbete finns samlat under kapitel 4.

Verktysgruppen hade att besvara vilka komponenter som ska/kan avvägas och vilka verktyg krävs för att bedöma SAT och TK effekt? Gruppens arbete finns samlat under kapitel 5.

Demogruppen hade att sammanställa en demo. En sammanfattning av detta arbete finns beskrivet i kapitel 7.

Under arbetet inbjöds följande föreläsare för att berika projektet.

- Martin Norsell (FHS) presenterade sin avhandling [4] kring flygbaneoptimering med taktiska begränsningar.
- Karin Mossberg (FOI avdelningen för Förvarsanalys) presenterade verksamheter och metoder som används och studeras inom projektet ”Operationsanalytiska Metoder” (OAM) [5].
- Ulf Berggrund (FOI avdelningen för Ledningssystem) presenterade det arbete som skett inom projektet ”Kognitiv Stridsflygkabin”.

Under våren 2005 inbjöd förstudien ett antal representanter från Försvarmakten och FMV till en workshop kring TK/SAT-stöd. Vid denna workshop initierades en referensgrupp, se kapitel 1.2.4

1.2.4 Referensgrupp

Att skapa tilltro till taktikförändrande teknik är viktig för att den ska bli rätt använd eller överhuvudtaget använd. Det är därför viktigt att användarna får en inblick och kan påverka.

I samband med den workshop som hölls under våren 2005 initierades därför en referensgrupp. Referensgruppen består av medverkande från FMV, Provturekommando Visby, Markstridsskolan Skövde (MSS), Helikopterflottiljen och Försvarmaktens Telekrigstödenhet (FM TKSE). Förhoppningen är att denna grupp fortsättningsvis kan existera som stöd för det kommande projektet, se kapitel 8.

1.2.5 TAAKII

En förhållandevis stor del av förstudien har avsatts åt en delstudie kallad TAAKII (TelekrigAspekter vid Asymmetrisk Krigföring vid Internationella Insatser). Denna delstudie har gjorts i samverkan med FoT 16 projekten ”Duellsimulering telekrig”⁴ och ”Teknisk Hotsystemvärdering”⁵.

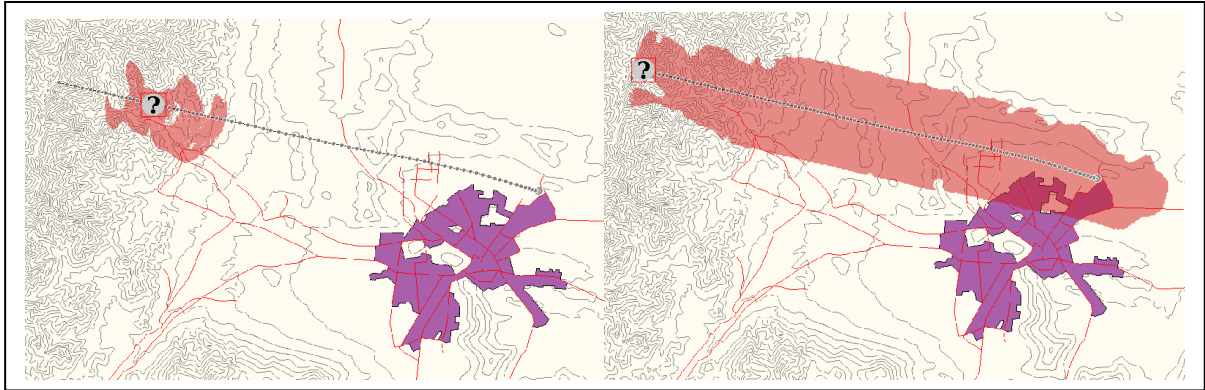
I delstudien har hot av asymmetrisk karaktär som kan uppstå vid internationella insatser studerats, med huvudsyftet att utveckla en metodik för analys och värdering av dylika situationer. Delstudien har avgränsats till asymmetriska vapen och asymmetriska slagfält med fokus på telekrigaspekter. För att konkretisera problemen har ett par tänkbara hotscenarier diskuterats. Diskussioner har i huvudsak skett kring två scenarion: ett markbaserat, ”skydd av transport”, vilket utspelar sig i urban miljö, samt ett luftbaserat, ”start landning vid flygplats”, med flygplatsen i Kabul som konkret exempel. Även markscenariot ”insats mot folkmassa” har diskuterats kort. En sammanställning av problem och föreslagna åtgärdsförslag har presenterats utifrån ett antal givna mikrosituationer i de behandlade scenarierna.

Vid FOI institutionen för Telekrigvärdering utvecklas simuleringsmodeller i olika simuleringsmiljöer. För att stötta värderingen av asymmetriska scenarion har ett antal modifieringar gjorts i de befintliga verktygen. En interface har utvecklats för att knyta det kommersiella verktyget ACSL, som huvudsakligen används i projekt ”Teknisk Hotsystemvärdering”, mot verktyget EWSim/NetScene [6], som utvecklas i projekt ”Duellsimulering Telekrig”. Interfacet har använts för att knyta en robotmodell av ett MANPADS⁶ i ACSL till simuleringsmiljön i EWSim med dess omvärldsbeskrivning och möjligheter till planering i NetScene. Kartdata över Kabul har införts i EWSim/NetScene, genererade flygbanor från F7s flygsimulator har konverterats och lästs in och beräkningar av möjliga påläsningsavstånd för ett LvRb-system med IR-målsökare har tagits fram och införts i simuleringsmiljön. Figur 1 visar hur NetScene presenterar ett fotavtryck, i terrängen omgivande Kabul, av den möjliga påläsningssektorn för ett specifikt markbaserat hotrobotsystem. Fotavtryck kan antingen visas för den aktuella flygplanspositionen eller som en sammanlagd yta (union) av fotavtryck längs flygbanan.

⁴ From 2006 heter projektet ”Duellsimulering framtida telekriginsatser”.

⁵ From 2006 heter projektet ”Teknisk hotsystemanalys”

⁶ MANPADS, MAN-Portable Air Defence System



Figur 1 Bilden till vänster visar en ögonblicksbild av fotavtrycket (det ljusröda området) då flygplanet befinner sig vid frågetecknet i bilden. Den högra bilden visar det sammanlagda fotavtrycket för hela startsträckan.

2 Avvägning under uppdrag

Ett militärt företag som innefattar ett uppdrag att lösa en specifik uppgift kan från utbildnings- och erfarenhetsunderlag formuleras i ett "normaluppträdande" för lösningen. Händelser som förändrar förutsättningarna för genomförande av uppdraget kan inträffa under företagets förlopp. Detta kan då kräva att "normaluppträdandet" förändras för att bibehålla eller förbättra sannolikheten för uppdragets genomförande och minska risken för egna förluster.

Om man tar sin utgångspunkt i "normaluppträdandet" så kommer förändrade förutsättningar att kräva någon åtgärd från den enhet som utför uppdraget. Enheten kan bestå av en eller flera plattformar. Scenariot kan ha sin hemvist i en duell till lands, till sjöss eller i luften. Den eller de plattformar som deltar har oftast ett mer eller mindre direkt beroende av en eller flera operatörer, förare, navigatörer, spanare, kommunikatörer etc. Var och en agerar efter sin förmåga på de signaler och den omvärldsbild/hotbild som systemet producerar. Vid en förändring av omvärldsbilden förväntas operatören agera på ett sätt som bibehåller eller ökar sannolikheten för att lösa uppdraget och samtidigt minimerar risken för egna förluster. Vägen från operatörens signalsystem till förändringar hos plattformen som förbättrar dess möjligheter omfattar alltså en intelligent tolkning av indata omsatt till en förnuftig handling.

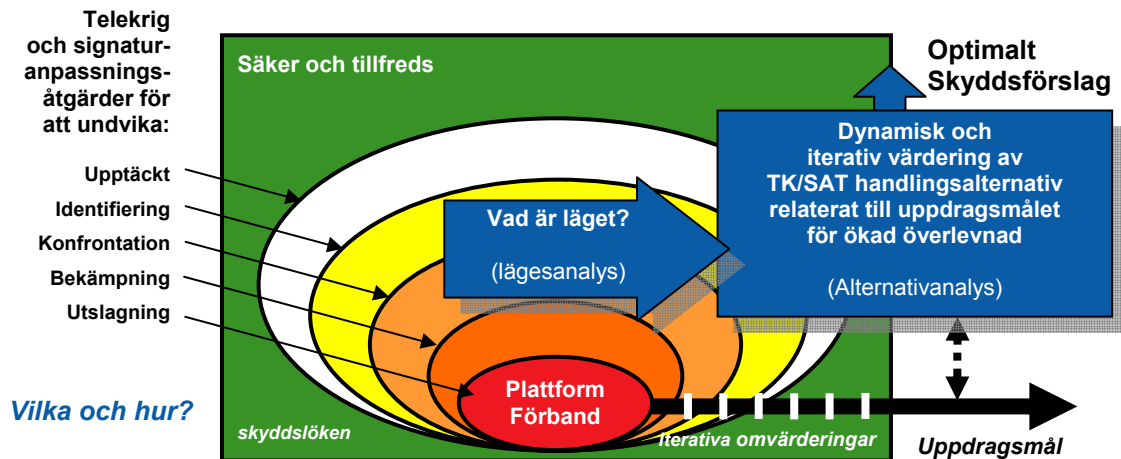
Genom det planerade deltagandet i EU Battlegroup [1] kommer ett "normaluppträdande" bli svårare att specificera, både på grund av att snabbinsatsstyrkan ska kunna sättas in 10 dagar efter beslut samt att den ska kunna verka inom en radie på 600 mil från Bryssel. Mindre tid kommer att finnas till att bygga upp utbildnings- och erfarenhetsunderlag. I en varierande och komplex omvärld med ett myller av olika nya hot kommer det att vara en krävande uppgift för en operatör att vidta optimala SAT/TK åtgärder för den aktuella situationen utan stöd.



Figur 2 Aktionsområdet för EU Battlegroup, möjligen med olika krav på avvägning TK/SAT i olika delar av området.

Frågeställningar som en operatör kan formulera är t ex ”är jag upptäckt?” och ”vad händer om jag...?”. Dessa frågeställningar kräver stödfunktioner som kan värdera det aktuella läget (*lägesanalys*) och föreslå SAT/TK åtgärder ur ett antal värderade handlingsalternativ (*alternativanalys*) som totalt sett ökar plattformens eller förbandets överlevnad.

Alternativanalysen är verktyget för att steget före fienden planera hur signaturer ska styras och lämpliga TK åtgärder ska koordineras. Alternativanalysen finner det optimala ur en mängd av ”vad händer om jag...?” frågor. Se Figur 3.



Figur 3 Läges- och alternativanalys stödjer operatören att välja optimala TK/SAT åtgärder för skydd av plattformen eller förbandet så att uppdragsmålet kan nås. Ett exempel på en "skyddslök", se Figur 6.

För lägesanalysen krävs underlag från omvärldssensorer, modeller och databaser för att beräkna och presentera det aktuella läget ur ett hotperspektiv. Alternativanalysen (Course-Of-Actions analysis, COA) kräver verktyg som i hotperspektivet kan prediktera och lägesanalysera en mängd handlingsalternativ (signatur efter eventuella signaturåtgärder och/eller verkan av störning) samt metoder som effektivt och robust kan väga samman dessa alternativ till ett bästa beslut.

Ett handlingsalternativ kan innebära en blandning av olika åtgärder. T ex för att undgå upptäckt kan följande åtgärder behövas:

- Signaturanpassat vägval - nyttjande av terrängmask och terrängbeklädning som försvårar upptäckt.
- Signaturanpassad orientering - orientering av plattformen för att anpassa signaturen mot hotet.
- Signaturanpassad hastighet - för att minimera signaturer mot hotet orsakad av plattformens hastighet och motorpådrag.
- Styrbara signaturer - styrning av signaturmaterial anpassat mot hotet.
- Signaturlinsande plattformsåtgärder - avskärmning av aperturer, etc.
- Hantering av emissioner - styrning av aktiva signaturer (radio, radar)
- Bakgrundsstörning - öka "bakgrundsbruset" för att dölja uppdraget
- Skenmålsanvändning - för att mätta hotens sensorer med falska mål

Alternativanalysen prognostiserar och lägesanalyserar framtida handlingar. För detta krävs att omvärlden kan prognostiseras och i vissa fall även motståndarens reaktioner på våra

handlingar, vilket är speciellt viktigt om beslutshorisonten är lång eller då en intelligent motståndare möts. I alternativanalysen måste konsekvenserna av en handling värderas, om t ex en sensorapertur avskärmas för att undgå upptäckt kan detta innebära en nedsatt omvärldsuppfattning, se kapitel 2.3.6. I avvägningen bör även fiendens möjligheter att genomskåda den taktik som används avvägas, varför stödet i vissa fall bör generera svårpredikterbara handlingar som totalt sett är optimala.

Ett avvägt och balanserat utnyttjande av SAT och Telekrig är inte enbart en fråga om teknik, det är lika mycket en fråga om taktik och stridsteknik. Forskare och tekniker måste samverka med användare och taktiker inom Försvarsmakten för att rätt kunna utnyttja samt förstå nya teknikers möjligheter. Se även kapitel 2.4.

2.1 Ambition hos ett stödsystem

Stödsystem kan ha olika ambitionsnivåer i att hjälpa operatören under ett uppdrag.

Ett stödsystem som enbart gör en lägesanalys, ger operatören kunskap om det aktuella läget, men inget stöd till de handlingar han behöver utföra för att förbättra läget. Utifrån det analyserade läget får operatören lita till sin kunskap och erfarenhet för att förbättra läget. Är den aktuella situationen okänd får operatören improvisera eller använda ett ”ryggmärgsbeteende”.

Ett stödsystem som kan visa operatören läget samt de handlingar som förbättrar läget, ger operatören mer stöd att ta nästa eller de närmaste stegen. Överlevnaden kan tillfälligt öka men åtgärden kan försätta plattformen/förbandet i ett sämre läge efteråt. Den rekommenderade åtgärden motsvarar en lokalt optimal strategi. Se kapitel 4.2.1 och relationen till lokalt optimum.

Ett stödsystem som kan visa operatören läget samt de handlingar som förbättrar läget och i detta värderat alla konsekutiva handlingar som leder till att uppdragsmålet uppfylls, ger operatören ett bättre stöd att genomföra uppdraget. Den rekommenderade åtgärden motsvarar en åtgärd i en globalt optimal strategi. Se kapitel 4.2.1 och relationen till globalt optimum. Att i tid och rum ordna de åtgärder som bäst uppfyller en målsättning, kallas planering. Detta är en komplex process, speciellt om många handlingsalternativ finns och om planeringen ska sträcka sig över en lång tidsrymd. Genom att, inför uppdraget, i en grovplanering dela upp uppdragsmålet i delmål (brytpunkter), kan en approximativt optimal lösning fås med en mer detaljerad planering mellan brytpunkterna under uppdraget. Bland annat [7] diskuteras detta för sensorplanering.

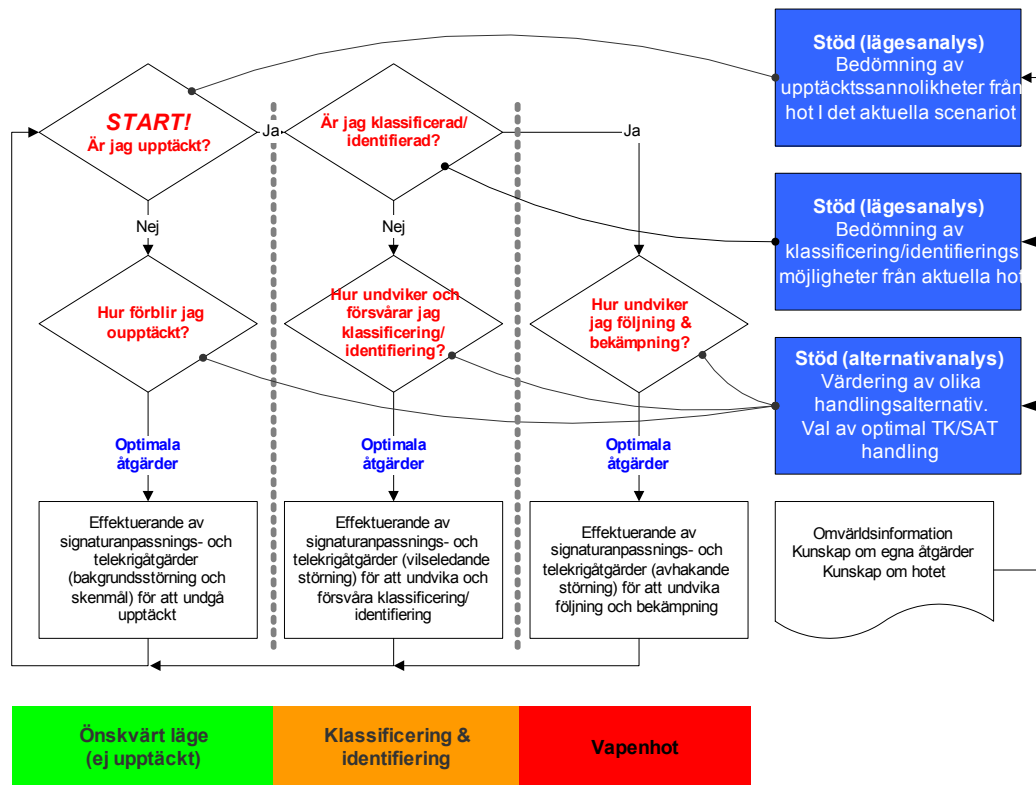
Ett långsiktigt mål bör vara att ett stödsystem kan hantera den sistnämnda ambitionsnivån både inför uppdrag och under uppdrag.

2.2 Avvägning under uppdrag - vid planering inför uppdrag - vid systemutveckling

I förstudien har en ”bottom-up” ansats gjorts och fokus i förstudien har därför lagts på avvägning under uppdraget. Utifrån operatörsstödsbehov under ett uppdrag bör även planeringsverktyg inför uppdraget kunna definieras. Dessa stödfunktioner ingår i ledningssystemet och bör därför också värderas när ett system eller en plattform utvecklas.

Stödfunktionen kan mycket väl resultera i att ny taktik utarbetas som också bör värderas vid systemutveckling.

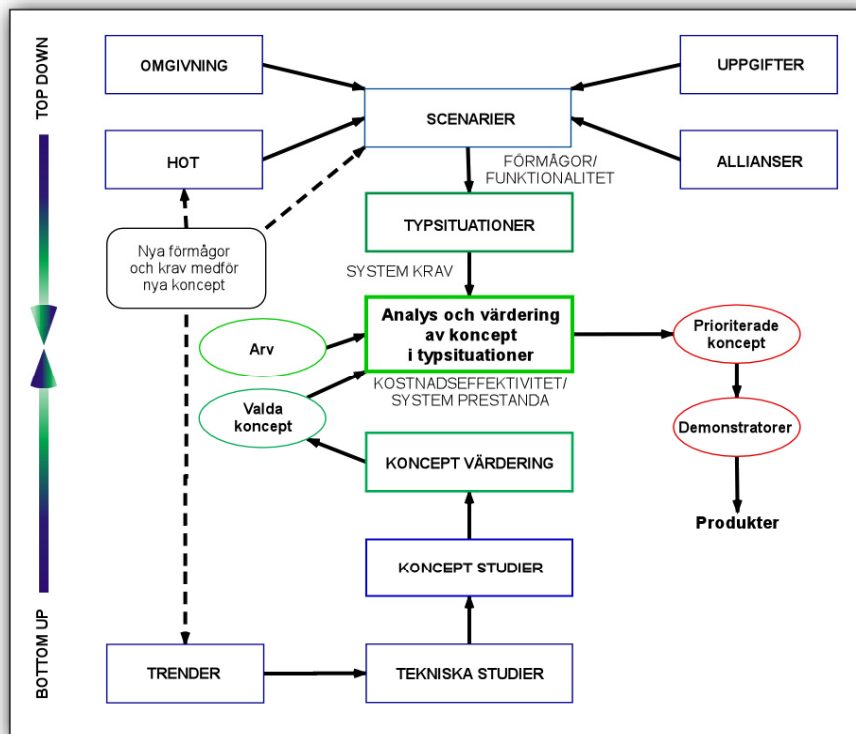
Diskussionen, i kapitel 2, kring läges- och alternativanalys under ett uppdrag kan sammanfattas med Figur 4 som visar en iterativ process där stöd ges till operatören under olika stridsfaser.



Figur 4 Iterativ process med frågeställningar och stöd för besvarande av frågeställningarna under olika stridsfaser.

För planering av ett uppdrag bör samma iterativa process som visas i Figur 4 kunna användas genom att iterera sekvensen med en lämplig steglängd från uppdragets start till slut. Utdata efter att ha itererat sekvensen från start till mål blir en handlingsplan för att genomföra uppdraget. Läges- och alternativanalysen blir dock mer komplicerad vid planering inför uppdraget då fler osäkerheter kring hotet och dess reaktioner förekommer (längre beslutshorisont), speciellt om planeringen innefattar händelser efter upptäckt. I dessa fall kan spelteori, se kapitel 4.6, vara en metod för att prediktera motståndarens handlande. För planering finns vanligtvis en större beslutsbudget varför fler handlingsalternativ kan värderas innan uppdraget startar.

En inom FOI och industrin, vedertagen process för att värdera olika systemkoncept, visas i Figur 5.



Figur 5 Metodik för avvägning mellan olika systemkoncept (källa: FOI, Saab)⁷

Ur ett scenario väljs ett antal typsituationer som beskriver operationsmiljön för det systemkoncept (system med olika design, utrustningar, etc.) som ska värderas (top-down). Från det andra hållet (bottom-up) väljs genom olika studier ett antal systemkoncept fram som värderingskandidater. Genom att med simuleringar värdera systemkoncepten i typsituationerna väljs det eller de koncept som ger bäst systemprestanda och/eller kostnadseffektivitet.

Stödsystem med läges- och alternativanalys bör ses som en integrerad del av ett systemkoncept (en vital del i dess ledningssystem) och bör därför också värderas i typsituationerna. Ett sådant stödsystem kan vara den funktion som då den får verka fritt i värderingen, gör ett systemkoncept till vinnare med överlägsna pris- och prestandaegenskaper både för verkan och för skydd i de flesta typsituationerna.

2.3 Vad styr avvägningen under ett uppdrag

Ett verktyg som i varje godtyckligt tidsläge kan producera en ”bild” av rådande situation, en hotbild, baserad på kunskaper, inmätningar, tolkningar, historik etc. med viss grad av (anta- gen) tillförlitlighet, kan ge en operatör på en plattform påtagligt bättre överlevnadsförmåga än om operatören tvingas analysera all information manuellt för sammanställning till läge och åtgärd. Anledningen är bl.a. att en manuell hantering inte kan hantera samma mängd underlag på begränsad tid som ett helt eller delvis automatiserat system.

I en hotfull situation är i allmänhet tid en bristvara och åtgärder måste i förväg vara vidtagna och tillgängliga för att nå egna resultat och ev. egen verkan innan man blir offer för andras. Förutsägelser med bästa möjliga konfidens är då av stort värde. Inmätning, tolkning, värde-

⁷ Utformad inom IPT Överlevnad

ring och slutsatsdragning bör förberedas och genomföras på ett så heltäckande och välprioriterat vis att processen sätter motståndaren i tidsnöd vilket gör att vi kan få informations- och handlingsöverblick. Oavsett om avsikten är att uppträda passivt eller aktivt är tidsfaktorn av vital betydelse. Motsatsen kan naturligtvis gälla i lägen som karaktäriseras av andra bristsituationer: vila, föda, vätska, energi etc., ex. i belägrings- eller gisslansituationer, där mer tid kan innebära ökad brist. I de flesta taktiska situationer är dock problemet att inte hinna med tillräckligt djup analys, tillräckligt många åtgärder, ett handikapp.

Många faktorer är mättekniskt och matematiskt komplicerade, t.ex. att beräkna sannolika transmissionsförhållanden för signaler genom terrängen exempelvis möjliga optiska siktsträckor eller förutsättningar för tillräcklig kontrast inom ett visst våglängdsområde. Med kännedom om terrängstruktur och växtlighetsmodell, årstid, tid på dygnet m.m. och t.ex. hotets sannolika sensorbestyckning kan denna typ av beräkningar utföras med hjälp av kända modeller och tillgänglig apparatur. Inmätta data om motståndarens existens och visibilitet kan med viss sannolikhet också besvara frågan om min egen existens och position kan vara avslöjad hos motståndaren vilket kan vara betydelsefullt för mitt fortsatta agerande.

Nedan görs en genomgång av parametrar som är betydelsefulla då en TK/SAT avvägning görs under ett uppdrag.

2.3.1 Uppdragets karaktär

Uppdragets karaktär sätts ofta initialt och kan innebära t ex att: visa flagg, spana, försvara, ta, fördröja, etc. Beroende på uppdragets karaktär kommer olika vikt att direkt och indirekt sättas till vilka åtgärder som är lämpliga.

Att *visa flagg* innebär t ex att ”brassa” på med stora signaturer och maskerande- och vilseledande störning för att synas och blåsa upp sig, kanske för att avskräcka eller skapa förtroende. Den SAT åtgärd man kan tänka sig här är att vara väl synlig i de frekvensområden där man vill synas (t ex optiskt mot en uppretad civil folkmassa) och ”osynlig” mot de frekvenser där vapensystemen arbetar (t ex en IR-robot). TK åtgärder kan användas för att göra förbandet större än vad det är genom skenmålsanvändning (elektroniska och fysiska).

Att *spana* innebär däremot att gå med låg signatur och att undvika störning från egen plattform (eller det mindre förbandet). De SAT åtgärder man kan tänka sig är att nyttja terräng, markbeklädning, framryckningshastighet, etc. för att minimera signaturer mot hoten under framryckning. Här gäller även att kunna hantera⁸ sina sensorer och kommunikationsutrustning för att minimera deras aktiva signaturer (sändningar). TK åtgärder bör åtminstone initialt undvikas och speciellt från den egna spanande plattformen då det lätt visar hoten. TK åtgärder⁹ som höjer bakgrundsbruset kan dock hjälpa den spanande plattformen att genomföra uppdraget vid ställen där det finns risk att plattformen upptäcks. Detta kräver att TK/SAT åtgärder på spaningsplattformen och störplattformen kan koordineras väl.

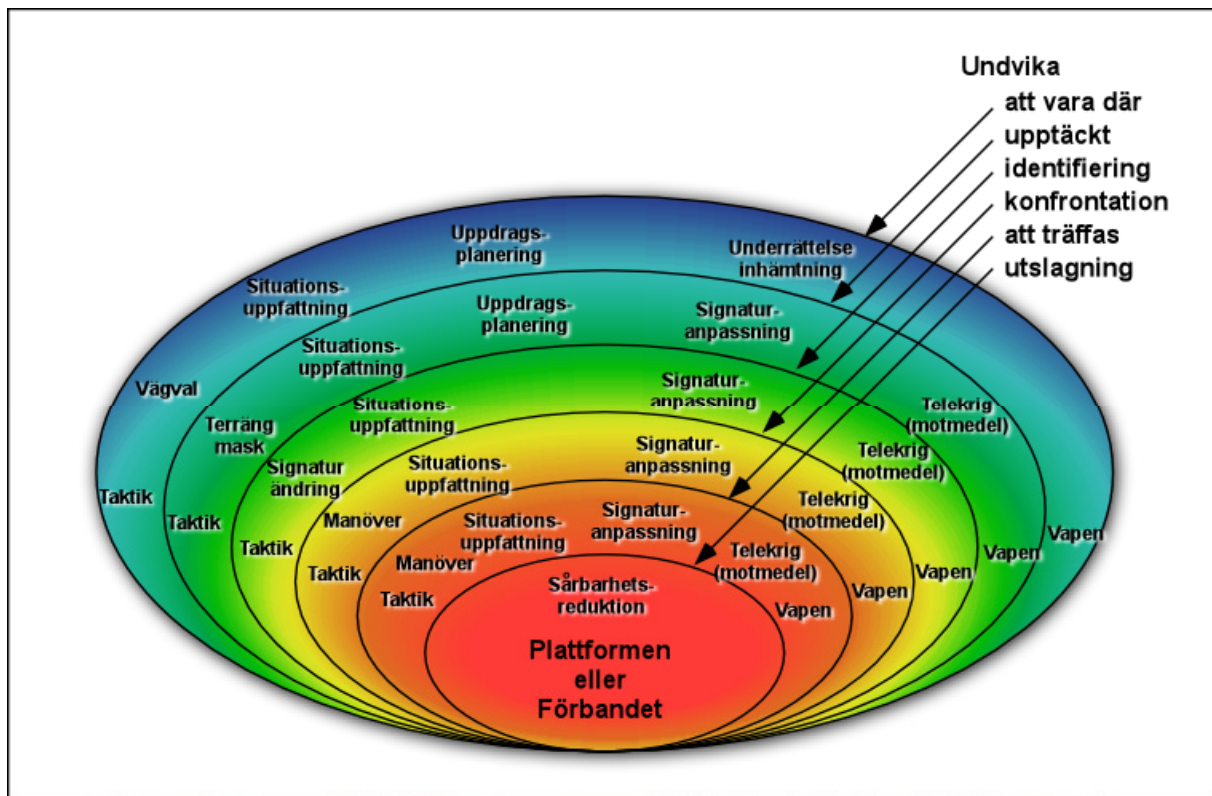
⁸ EMCON, Emission Control

⁹ Skenmål och/eller bakgrundsstörning från annat förband

2.3.2 Den aktuella stridsfasen

Under uppdraget kommer en plattform eller ett förband att från t ex icke upptäckt bli upptäckt. I det läget kommer uppdragets karaktär (se föregående kapitel) och den vikt som läggs till TK- respektive SAT åtgärder att förändras. I exemplet, om plattformen blir upptäckt kommer åtgärder som gör att plattformen åter kan dölja sig bli aktuella. Kan inga sådana åtgärder utverkas, blir åtgärder som kan förhindra klassificering aktuella, se Figur 4.

Inom SAT området är den så kallade ”skyddslöken” vanlig¹⁰ då man vill beskriva de skyddsskal som omsluter en plattform eller ett förband. De skal som brukar finnas är skal för att: undvika att vara där, undvika upptäckt, undvika identifiering, undvika konfrontation, undvika att träffas samt undvika utslagning. Figur 6 visar en¹¹ version av ”skyddslöken”.



Figur 6 ”Skyddslöken”. Figuren visar inte hur effektiv en åtgärd är relativt en annan i ett lökskal.

I mångt och mycket handlar det om att dynamiskt välja den bästa mixen av åtgärder som förhindrar att de inre skalerna penetreras.

Idag är stödet till operatören dåligt i att föreslå åtgärder som förhindrar att de yttre skalerna penetreras. Det mest utvecklade dynamiska skyddet vid uppdrag är i dagsläget varnar- och motverkanssystemen (VMS) på plattformar. Ett VMS bidrar förutom med detektion av existerande hot till ett skydd i form av motåtgärder som t ex facklor, rök, remsor, avhakande störning. I detta läge är avsikten främst att förhindra att det inre skalet, ”att träffas”, penetreras. Att striden har hamnat i den faser, är dock inget en operatör vill uppleva.

¹⁰ Inom TK området är ”skyddslöken” mindre använd och känd.

¹¹ Ingen vedertagen ”skyddslök” finns.

2.3.3 Begränsningsfaktorer

Vid internationella operationer kan "Rules of Engagement" (ROE) vara en begränsande faktor av mina handlingsalternativ. De regler som gäller för striden sätter begränsningar för vilka åtgärder som kan eller får användas. Internationell rätt förhindrar t ex att en stridande part uppträder som civil (t ex maskera plattformen som en sjuktransport). Att däremot skydda plattformen mot klassificering och identifiering med vilseledande signalering, t ex genom att nyttja civila system som navigeringsradar, civila kommunikationsanrop, etc. i syfte att framstå som ofarlig, kan däremot vara tillåtet. En vilseledande åtgärd kan lätt hamna i en gråzon över vad som är tillåtet och vad som inte är det.

En annan viktig begränsning är hur mycket skyddsmateriel jag och mina samverkande enheter har tillgång till och hur jag väljer att förbruka dessa. Speciellt gäller det maskeringsmateriel, skenmål, remsor, facklor, etc.

2.3.4 Hur väl jag kan bilda mig en uppfattning om läget (lägesanalys)

Kännedom om och förmåga att förstå och agera i den miljö man befinner sig i är grundläggande för taktisk framgång. Att känna till sannolikheten för hur olika hot kommer att uppträda innebär att jag kan agera tidsmässigt, geometriskt, signatur- och telekrigsmässigt så att hotet har svårare att verka. Att förvägra en motståndare att använda sina medel är primärt för att jag själv på ett ostört och effektivt vis ska kunna nyttja mina egna.

Jag har kontinuerligt anledning att fråga mig hur min omvärld gestaltar sig samt vilka osäkerheten som finns i den:

- "Var finns min motståndare?"
- "Vad vet min motståndare om mig?"

Andra frågor kan vara:

- "Vem är min motståndare?"
- "Vilka resurser och svagheter har han?"
- "Vilka avsikter har han?"
- "Vilken utbildning och förmåga har han?"
- "Vilka risker är han beredd att ta?"

Svaren på alla dessa och flera frågor har betydelse för hur jag själv ska agera för att säkra min överlevnad och framgång i mitt uppdrag. Däri ligger att veta min egen "budget", dvs. hur långt kan jag gå?, hur länge räcker mina resurser?, vad har jag att spela med?, vad är mina styrkor/svagheter?, etc.

Lägesanalysen fusioneras från underrättelseinformation, sensorer och modeller, se kapitel 5. Ur lägesanalysen fås en lägesbild (Situation Awareness).

2.3.5 Hur väl jag kan ta fram handlingsalternativ (alternativanalys)

Att kunna veta hur omvärlden kommer att förändras är viktigt för att kunna planera åtgärder som förändrar omvärlden i en riktning som gör att uppdragsmålet kan nås. Alternativanalysen har att värdera de olika handlingsalternativen och föreslå det alternativ (eller den kedja av

alternativ) som på bästa sätt leder till att uppdraget lyckas. Värderings- och simuleringsmodeller är kraftiga verktyg i att kunna prediktera hur omvärlden förändras och vilken effekt handlingsalternativ får. Det handlar alltså om att kunna göra framtida lägesanalyser utgående från de handlingsalternativ vi gör. Vilka, när, hur och i vilken ordning vi genomför våra åtgärder är betydelsefulla för hur framtiden utvecklas. Att kunna hantera osäkerheter och tidseffektivt plocka fram ”bästa” alternativ är viktigt i alternativanalysen. Planeringsmetoder och resursallokering kommer här att bli aktuella, se kapitel 4 till 6.

2.3.6 Hur handlingsalternativ påverkar övriga förmågor

Behovet av omvärldsuppfattning, signaturanpassning och telekrigåtgärder står ofta i konflikt med varandra.

För att kunna bilda sig en omvärldsuppfattning måste plattformen/förbandet kunna kommunicera samt nyttja sina sensorer. Genom att nyttja kommunikation (sändning) och egna sensorer (aktiva signaturer) kan plattformen/förbandet avslöjas med signalspaning. Med t ex frekvensspridd och riktad kommunikation, nyttjande av andras sensorer och terrängen (terrängmask) kan plattformen/förbandet uppträda ”tystare”. Att känna och hantera sina passiva som aktiva signaturer, emissionskontroll (Emission Control, EMCON), är viktigt för att kunna verka oupptäckt.

Egna telekrigåtgärder kan påverka egna sensorer genom telekonflikter. T ex en rökläggning från en plattform kan lätt förblinda dess möjligheter till en god omvärldsuppfattning och till att ge verkanseld. Se Figur 7.



Figur 7 Rökkastning från ett stridsfordon (Strf 9040C).

Att kunna avväga behovet av skydd från förblindande telekrigåtgärder med behovet av omvärldsuppfattning är viktigt. I ett nätverksbaserat försvar ökar möjligheterna till en god omvärldsbild på en plattform, även om den genomför förblindande telekrigåtgärder.

Telekrigåtgärder i form av egenskydd från en plattform som vill verka oupptäckt kan lätt avslöja den. Att nyttja telekrigåtgärder som bakgrundsstörning från andra plattformar eller vilseledande skenmål (ökar bakgrundsbruset) kan däremot öka plattformens möjligheter att verka oupptäckt med signaturanpassningsåtgärder.

Detta är kärnan i förstudien – hur avväger man TK/SAT åtgärder för bästa effekt? Av ovanstående resonemang framgår att behovet av omvärldsuppfattning också måste vägas in för en fullständig bild.

2.3.7 Förbandskoordinering

Både signaturanpassning och telekrig är åtgärder som vid utnyttjande påverkar signaturen inte enbart för enskilda plattformar utan även för hela förbandet. Genom att inordna och utnyttja signaturanpassning och telekrig i ett NBF-perspektiv skulle det vara möjligt till samordning av dynamiska insatser över tiden både vad gäller signaturanpassning som telekrig.

Ett balanserat utnyttjande av signaturanpassning och telekrig kräver ett väl fungerande ledningssystem med kännedom om samtliga enheters position inom förbandet. Därtill är kännedom om egen plattformens signatur av central betydelse. Detta kan vara ett problem speciellt inom våglängdsområde där det gäller att anta plattformens signatur mot bakgrunden. Då måste i många fall signaturen observeras med en sensor placerad utanför plattformen och på lämpligt avstånd. Disponeras t ex en UAV med lämplig sensor inom förbandet kan denna utnyttjas för signaturkontroll. Genom att i samverkan mellan plattformarna kunna observera och mäta varandras signaturer och via nätverket överföra uppmätt signaturdata, torde en lämplig och i bästa fall optimal signaturanpassning kunna göras inom förbandet.

Via nätverk skulle en optimering kunna ske inom förbandet av signaturanpassnings- och telekrigåtgärder, fördelat på respektive plattform som gör att förbandet kan lösa sitt uppdrag. T ex optimalt kunna utnyttja SAT för en del av förbandet i syfte att ta sig till en position, för att oupptäckt kunna placera en varnare/sensorer för att åstadkomma informationsöverläge. samtidigt som jag med en annan del av förbandet utnyttjar VMS för t ex rökläggning eller störsändning.

Ett samordnat utnyttjande av signaturanpassningsteknik och telekrig skulle starkt kunna bidra till framgångsrik vilseledning med syfte att dölja mitt förbands grupperingar och avsikter.

2.3.8 Tid till beslut

I de flesta reella taktiska hotsituationer är tiden den kritiska faktorn. Om operatören får sina omvärldssignaler i en rimlig takt och dessa består i enkla händelser som möts med bestämda åtgärder kan detta system fungera med ett mycket begränsat beslutsstöd. Om däremot operatören belastas med signaler och omvärldsförändringar som kommer i en takt där den mänskliga analysförmågan inte räcker till i tidshänseende, där flera signaler inkommer som kräver motstridiga åtgärder eller där tidigare åtgärd inte har hunnit få effekt då följande åtgärd måste beordras, då kommer ett utvidgat analys- och slutsatsstöd att krävas för att bibehålla sannolikheten för uppdragets genomförande och risken för egna förluster på godtagbara nivåer.

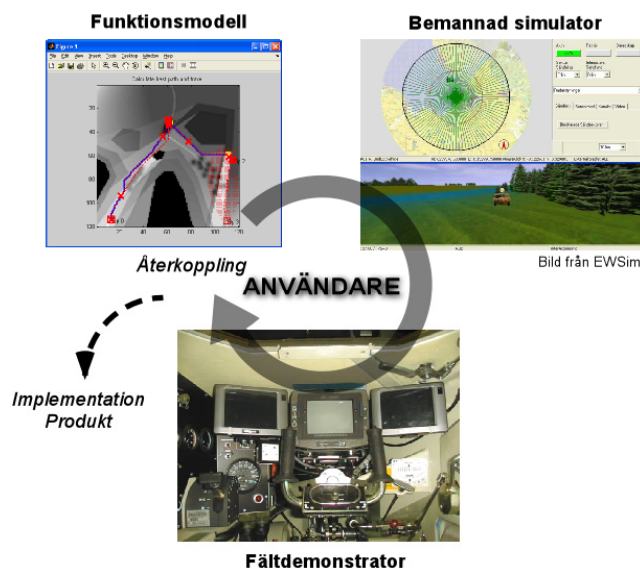
Om multipla hot uppträder med olika funktionalitet, olika dynamik och olika geometrier samtidigt som operatören har en åtgärdsarsenal bestående av vapen, rörelsedynamik, skyddsåtgärder etc. krävs omedelbart en mycket stor kapacitet för att optimalt möta situationen. Operatören har en bild baserad på observationer via egna eller andras sensorer och som med viss tilltro avspeglar en omvärlden. Hoten kan, om man antar att sannolikheten för deras existens på observerad plats är hög, vara av den karaktären att de aktivt måste avvärjas för att inte tillta och bli dödliga.

På den grund som etableras av hotobservationerna och eget tillstånd ska alltså operatören fatta beslut och utföra optimala åtgärder. Kunskaper om de utmålade hoten liksom om den egna plattformens egenskaper, dess vapen och skyddsåtgärder är vitala i denna process. Komplexiteten i även ett begränsat multipelhotsscenario kommer snabbt att ställa höga krav på beräkningsstöd avseende rörelsegeometrier, signaturanpassning och aktiva motåtgärder inom olika riskfaser, vågutbredningssamband, störverkan, träffsannolikheter, ”säkert” bomavstånd etc. inklusive trovärdighet eller sannolikhet för respektive faktor.

2.4 Tilltro och MSI-aspekter

Vid den workshop som genomfördes, se kapitel 1.2.3, framkom synpunkter på att operatören måste kunna förstå varför systemet rekommenderar en viss åtgärd. Att förstå varför en viss åtgärd rekommenderas ökar tilltron till systemet. Samtidigt kan behovet av förståelse ge upphov till belastning på beslutsfattaren (stress). Med ökad tilltro kan mer och mer automatik införas, speciellt i riskabla situationer där snabba beslut måste tas. För autonoma och förarlösa farkoster kommer automatiserade stödfunktioner att vara nödvändiga för dessa plattformars utnyttjande och överlevnad.

För att skapa tilltro till taktikstödjande verktyg måste användaren tidigt involveras i arbetet [2]¹². Genom att delta i utvecklingsarbetet samt träna och öva med sådana stödsystem kan en systemtilltro byggas upp hos användarna. En tillgång till detaljerade och realistiska simuleringsmiljöer samt till praktiska fältförsök med demonstratorer kommer därför att vara nödvändig. Utifrån användarkrav kan funktionsmodeller utvecklas som testas i bemannade simulatorer (t ex EWSim [6]) och slutligen värderas i fältdemonstratorer. I processen tillvaratas användarkrav och återkopplas till de olika stegen i ”snurran”. I slutändan kan verktyget produktifieras och implementeras i plattformen eller hos förbandet, se Figur 8.



Figur 8 Användare – Funktionsmodell – Bemannad simulator – Fältdemonstrator – Produkt

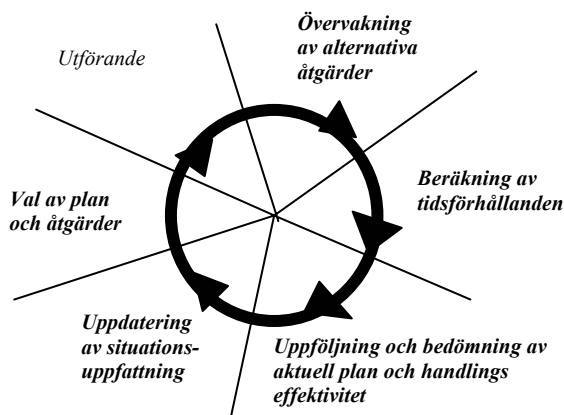
¹² Från FoT strategi 02: ”Interaktionen mellan människa och system blir allt mer accentuerad och förmåga till överblick, analys och beslutsfattande av operatörer, systemutnyttjare och beslutsfattare är avgörande parametrar som tidigt måste tas med i olika faser av forskning och teknikutveckling, i systemutveckling och – framtagning samt i personalförsörjning, utbildning och träning.”

I de flesta fall ska stödsystemet arbeta i symbios med människan, aspekter kring MSI (Människa System Interaktion) är därför viktigt i dessa fall [2]¹³. Tillsammans ska systemet och människan optimera sina respektive förmågor så att uppdragsmålet kan nås. Människan har förmågor till problemlösande och att kunna se sammanhang medan en dator snabbt och objektivt kan hantera och bearbeta stora datamängder utan att besväras av stress. Att optimalt fördela arbetet mellan människan och systemet är en utmaning.

Kognitiv systemvetenskap (Cognitive Systems Engineering)¹⁴ är en vetenskap som bland annat behandlar den dynamiska interaktionen mellan människa och maskin. En metod från detta forskningsområde beskrivs nedan. För ytterligare information se [8, 9, 10].

2.4.1 Kontextuella styrmodeller (COCOM¹⁵)

I dynamiska tillämpningar med sammansatta systemsituationer och sammansatta system, människa – tekniskt system, finns behov av att kunna konstruera och visualisera modeller av de processer och aktiviteter som det sammansatta systemet utför. Genom att visualisera den cykliska modellen med olika faser och tillstånd så skapas det en god utgångspunkt för design och implementering av programvara i den tekniska delen av det sammansatta systemet så att de olika delarnas egenskaper på bästa sätt utnyttjas. Detta medverkar också till att skapa en högre förståelse för hur systemet är uppbyggt, hur det fungerar och för att skapa insikt i att varje fas i den cykliska processen tar en varierande tid i anspråk att genomföra under varje cykel. Modellen tar hänsyn till att saker eller åtgärder tar tid att utföra, oavsett om det handlar om att agera, förstå eller tänka, (TTT = Things Take Time). Modellen kan också användas för att underlätta förståelsen för att människan och tekniska system arbetar med olika hastigheter/(klockfrekvenser) och innehar olika karakteristiska förmågor.



Figur 9 COCOM: Tiden för varje fas tar olika lång tid i anspråk beroende på den aktuella arbetsbelastningen.

Effektiviteten i det sammansatta systemet kan förbättras genom att fördela uppgifterna mellan operatören och det tekniska systemet utifrån en kognitiv bedömningsmall. Därmed utgör modellen också en grund för hur den tekniska delen av systemet implementeras så att hänsyn tas till människans förmåga och brister.

¹³ Från FoT strategi 02: ”Ökade krav kommer att ställas på våra system för beslutstöd. Det är viktigt att dessa system har ett väl anpassat gränssnitt mot operatören. Operatörens förståelse av händelser och skeenden ska underlättas.”

¹⁴ Se t ex <http://www.ida.liu.se/labs/cselab/>

¹⁵ Contextual Control Model, se även http://www.ida.liu.se/~eriho/COCOM_M.htm

Genom att beskriva åtgärder som planer och aktioner så kan en modell konstrueras som relativt enkelt kan översättas till programvara. Förslagsvis så kan en fördelning av uppgifterna göras genom att utgå från följande lista:

- | | |
|---|---------------------------------|
| • Prioritering av planer | Operatör/ |
| • Innehåll (Åtgärders/aktioners relevans) | Definieras av operatör |
| • Övervakning av alternativa handlingar | Definieras av operatör |
| • Beräkning av tidsförhållanden | Utförs av datorsystem |
| • Bedömning | Sammansatta systemet |
| • Val av plan och åtgärd | Operatör |
| • Utförande | Samordnas av operatör och dator |

2.5 Sammanfattning

TK/SAT avvägning under ett uppdrag är ett komplext problem. Med tanke på Sveriges engagemang i EU Battlegroup ser vi ett ökat behov av stöd under uppdrag. Den fokusering mot användarens behov av TK/SAT-stöd inför och under uppdrag som gjorts i förstudien, beskriver en ledningssystemfunktion som måste ingå som en komponent då systemkoncept jämförs och värderas vid systemutveckling.

Många aspekter som: uppdragets karaktär, stridsfasen, ROE, möjlighet till lägesbild, möjlighet att ta fram och värdera handlingsalternativ, förbandskoordinering samt tillgänglig beslutstid styr hur telekrig och signaturanpassning avvägs. Att skapa tilltro för taktikstödjande verktyg, är viktigt för att verktygen ska bli använda, därför måste användaren redan i tidiga utvecklingsskeden involveras. Att skapa en lämplig symbios mellan verktyget och människan är en annan utmaning.

3 System i omvärlden

I förstudien har efterforskningar gjorts för att få en uppfattning om förekomsten av operativa system som hanterar avvägning mellan SAT och telekrig eller där någon dynamisk hantering av TK eller SAT sker, för enskilda plattformar eller förband. Uppgiften har genomförts på tre tåter med inriktning på flyg, marin och markbaserade system. Efterforskningarna har skett med hjälp av öppna källor som Internet, tidsskrifter och genomgång av tidigare inhämtat material från försvarsutställningar och mässor.

3.1 Flyg

Metodikerna att överleva och kunna genomföra sitt uppdrag med signaturanpassning och telekrigåtgärder utvecklades i väsentliga delar under andra världskriget. Dels använde man de tillgängliga teknikerna under riktiga militära operationer då utfallet analyserades och jämfördes med icke åtgärdade situationer. Klassiskt är bombningarna över Hamburg då remsor användes i stora mängder, varvid det tyska luftförsvaret kollapsade. I en del fall kom man även över hotsensorer i form av tyska och japanska radarstationer med vilka fullskaleprov genomfördes. Fullskaleprov genomförs regelbundet även idag, där modeller av eller riktiga hotsensorer används. Exempel på sådana övningar med många hotsystem involverade är "Red Flag", "Green Flag" och "ELITE" där egna erfarenheter utgör en bra grund att stå på.

Vid artikelsökning på operativa s.k "Mission Planning Systems" för att hantera överlevnad genom att operera med LO (Low Observable) och telekrig finns ej mycket att hämta. Enligt [11] arbetar man på ADP (Lockeed Martin Advanced Development Programs) med ett Mission Battle Management Systems (MBMS). Systemet är tänkt att länka ihop B-2, F/A-22 och F-35 med UAvs och satelliter. Systemet skall kunna omplanera uppdraget om plattformar upptäckts samt om nya hot dyker upp. Grunddata i ett sådant verktyg bör behandla signatur och telekrigförmåga hos de ingående enheterna. En intressant komponent i ett framtida scenario ärUCAV med supportstörförmåga. Studier på X-45 med denna förmåga har genomförts enligt [12]. X-45 har med sin skrovform en Stealthegenskap i klass med B-2 och skulle med störsändare ombord få intressanta egenskaper. Att genomföra uppdrag medUCAV mixade med mer konventionella plattformar kräver någon form av planeringsverktyg. Det har dock genomförts försök med X-45 delsystem flygande i ett konventionellt flygplan där automatisk ruttplanering fungerat [13]. Exempelvis nämns att om ett nytt okänt radarhot upptäcks planeras flygbanan om så attUCAV-en undviker upptäckt. I en artikel [14] beskrivs F-22s förmåga att med sitt inbyggda stödsystem kunna undvika farliga zoner från LV-system. Förutom låg signatur har F-22 hög fart samt en mycket avancerad radarvarnare vilka tillsammans bidrar till en hög överlevnadsförmåga.

Dagens SAT-åtgärder på helikopter innebär bl.a. att reducera IR-signaturen. För flera helikoptertyper finns speciella IR-dämpare tillgängliga att anbringa över motorens avgasutsläpp. Denna reduktion av IR-signaturen sker dock på bekostnad av motoreffekt. Andra åtgärder för ökad plattformsoverlevnad är att vid konstruktionen skapa redundans i kritiska delsystem med syfte att minimera verkan vid en eventuell träff. Ett sätt att öka överlevnaden för helikopter är att utnyttja VMS. Många helikoptrar som utnyttjas i stridssituationer, i vår omvärld, är försedda med t.ex. robotskottvarnare och fackelfällare.

Svenska helikoptrar är i dagsläget ej försedda med någon typ av VMS. HKP 14 blir den första svenska helikoptern med VMS bestående av robotskott-, laser- och radarvarnare samt fackel- och remsfällare.

3.2 Marin

Studerade marina system hanterar inte avvägning mellan SAT och telekrigfunktioner utan används uteslutande för att optimera egen avhakande motverkansinsats. Insatsoptimeringen kan hanteras centralt i ledningssystemet eller lokalt av motverkanssystemet. Ett exempel på central insatsoptimering är det svensk ledningssystemet CETRIS som med hjälp av ADC (Air Defence Coordinator) koordinerar fartygets motverkansfunktioner. I CETRIS beskrivs egen radar och IR-signatur med hjälp av statiska aspektvinkelberoende tabeller som bygger på underlag från tidigare genomförda signaturmätningar. Signaturtabellerna används av ledningssystemet för att optimera egen motverkansinsats genom att föreslå lämplig fartygsmanöver som ger låg signatur i hotriktningen. Fartyg som saknar central insatsoptimering kan utnyttja beslutstödsfunktioner som finns lokalt i motmedelssystemet. Exempel på sådana system är NDS (Naval Decoy Systems) från Wallop systems [15], SKWS (Soft Kill Weapon System) från Terma A/S [16] och MASS från BUCK [17]. I dessa system beskrivs och används fartygets signatur på samma sätt som beskrivits tidigare. I vissa fall kan signaturtabellerna även användas för att styra antalet motmedelsgranater i en motmedelsinsats.

Aktuella system tar inte hänsyn till att plattformarnas optiska signatur varierar under dygnet eller omgivningens signatur. Vidare tas ingen hänsyn till hur motverkansinsatsen påverkar egen signatur.

3.3 Armé

För markbundna plattformar såsom stridsfordon utförs SAT-åtgärder i form av att statistiskt reducera signaturen inom framför allt de visuella och infraröda våglängdsområdena, med främsta syfte att reducera upptäckts- och klassificeringavstånd. Svenska stridsfordon är i grunden maskeringsmålade men kan vid behov utrustas med enklare och robustare typ av tilläggsmaskering, som finns framtagna för både stridsfordon 90 och stridsvagn 122 [18]. Här finns olika typer maskeringssatser för uppträdande under olika årstider i form av sommar och vinter ”kostym”. Liknande system finns även hos andra länders stridsfordon. För framtida uppdrag i andra miljöer torde motsvarande anpassade satser med tilläggsmaskering vid behov kunna utvecklas, t.ex. vid uppträdande i urban eller öken miljö. Tillgång till olika maskeringskostymer som snabbt kan appliceras, beroende på terräng och årstid etc. inför en insats kan ses som ett första steg till dynamisk anpassning av SAT som en del i uppdragsplaneringen.

Försök pågår inom SAT-området med att dynamiskt försöka anpassa värmesignaturen mot bakgrunden genom att via sensorer styra uppvärmning eller avkylning av plåtar på stridsfordonet [73]. Annan försöksverksamhet är att blåsa upp ballonger med syfte att bryta upp den kantiga kontur som bildas av vagnens former [19]. Vilselledning i olika former och på olika nivåer kommer att utnyttjas i en eller annan form. Denna typ av åtgärd måste planeras och samordnas med SAT. Försök med olika typer av skenmål (stationära och mobila) pågår.

Stridsfordon har under många år förlitat sig på sitt ballistiska skydd. Utvecklingen av framför allt ”pil-ammunition” har medfört ökat behov av ballistiskt skydd och därmed ökad vikt på dagens stridsvagnar. För att bryta denna viktsspiral försöker man öka överlevnaden hos stridsfordon med hjälp av telekrig och VMS. Här är det främst utländska stridsfordon som är utrustade med någon typ av VMS för ökat egenskydd och som komplement till det ballistiska skyddet. VMS kan t.ex. bestå av en laservarnare i kombination med rökkastare, som vid upptäckt av ett lasersystem skjuter ut rök och döljer stridsfordonet. Det ryska Arena-systemet [20] är ett annat exempel på VMS med syfte att förstöra inkommande stridsdelar (riktad sprängverkan) i form av pvrobot. En radar på stridsfordonet upptäcker och mäter in roboten varefter fragmenterade plåtar som sitter på stridsfordonet skjuts eller sprängs ut i riktning mot den inkommande roboten och därmed slits stridsdelen fysiskt i bitar.

På svenska stridsfordon, stridsfordon 90 och stridsvagn 122, förekommer VMS idag enbart i form av multispektral närskyddsrok [21]. Denna utnyttjas för att i skyl kunna dra sig ur och inta skyddsställning när det finns risk att hamna i en ogynnsam situation.

Omfattande forskning, studier och försök pågår världen över med syfte att förbättra VMS-funktionen och att göra den till en integrerad del av plattformen och förbandet.

INVEST¹⁶ är ett program inom FCS¹⁷ (Future Combat Systems) är ett program som har studerat i stridsfordon inbyggda simuleringar (Embedded simulation) för träningsändamål. Under arbetet har erfarenheter dragits att de inbyggda simuleringarna kan användas som stöd till operatören/förbandet under uppdraget [22].

3.4 Sammanfattning

Efterforskningarna har inte identifierat något operativt system som hanterar avvägning mellan SAT och telekrig på stridstaktisk nivå. Däremot finns ett antal system som dynamiskt avväger telekrig- respektive signaturanpassningsåtgärder enskilt. Utvecklingsarbeten inom Mission Battle Management Systems (MBMS) och FCS kan dock innehålla komponenter för ett balanserat TK/SAT skydd. En anledning till att vi inte hittar några uppgifter om operativa system som kombinerat avväger TK/SAT kan vara att området är omgärdat av hög sekretess.

¹⁶ INVEST, INter-Vehicle Embedded Simulation Technology

¹⁷ FCS är ett utvecklingsprogram för US Armys nästa generation av stridsfordon och ledningssystem.

4 Metoder för avvägning

Detta kapitel handlar om metoder som kan användas i olika sammanhang vid en TK/SAT avvägning. De metoder som avhandlas i kapitlet täcker långt ifrån alla metoder som kan användas för TK/SAT avvägning. Som komplement, se gärna [7] där ett flertal andra metoder beskrivs för sensorplanering.

Presentationerna av metoderna är översiktliga. Grafsökning är däremot utförligare beskrivet, bland annat för att en grafsökningsmetod har använts i demoarbetet, se kapitel 7. Fuzzy Logic är också utförligare beskrivet, på grund av att förhållandevis mycket material där denna metod används i telekrigsammanhang har hittats.

4.1 Agenter och omvärldsrepresentation

Agentteknik är ett begrepp som har blivit populärt på senare år. I mångt och mycket är agentteknik eller intelligenta agenter nya namn för *artificiell intelligens* (AI) [23]. AI är ett ämnesområde som har haft både ljusa och mörka perioder sedan 50-talet [24]. Mycket teknik som används idag bygger dock på landvinningar som gjorts inom AI-området, t ex industriella planeringssystem, sökmotorer på Internet, motståndare i datorspel, styrning av mikrovågsugnar.

En definition [24] på agent är: något som med sensorer känner av sin omgivning och utifrån detta utför handlingar i omgivningen med effektorer. En *rationell agent* är en agent som maximerar eller minimerar något mått¹⁸ utifrån de händelser i omgivningen som agenten upplever och har upplevt.

Beskrivningen passar bra in på levande varelser som med sina sinnen känner av omgivningen, beslutar och handlar utifrån det, t ex genom att fly. ”Något” i ovanstående stycke syftar dock vanligtvis på en algoritm (*agent program*) som tillsammans med sensorer och effektorer verkar i sin omgivning, t ex en autonom robot.

I [24] definieras fyra typer av agenter: *enkel reflexstyrd agent*, *modellbaserad reflexstyrd agent*, *målstyrd agent* samt *nyttobaserad agent*, se Figur 10.

En *enkel reflexstyrd agent* reagerar direkt på händelser i omgivningen. En sådan agent saknar minne av omvärlden utan reagerar direkt genom en regel på den aktuella världsbilden. Anta att vi som reflexstyrd agent cyklar och ser en framförvarande cykel. Utan minne kan vi inte avgöra om den framförvarande cykeln bromsar eller accelererar utan kan endast reagera utifrån denna enskilda ögonblicksbild. Med en regel **IF** framförvarande cykel nära **THEN** bromsa, så skulle vi bromsa vare sig vi behövde det eller inte. Vi skulle fortsätta och bromsa så länge ”nära” gällde.

En *modellbaserad reflexstyrd agent* reagerar utgående från tidigare erfarenheter av omvärlden (tillstånd) samt en modell av hur världen utvecklas samt vilken påverkan egna handlingar får på omvärlden. Som modellbaserad reflexstyrd agent skulle vi kunna cykla bakom den framförvarande och ha ett internt tillstånd som säger att framförvarande cykel ej bromsar

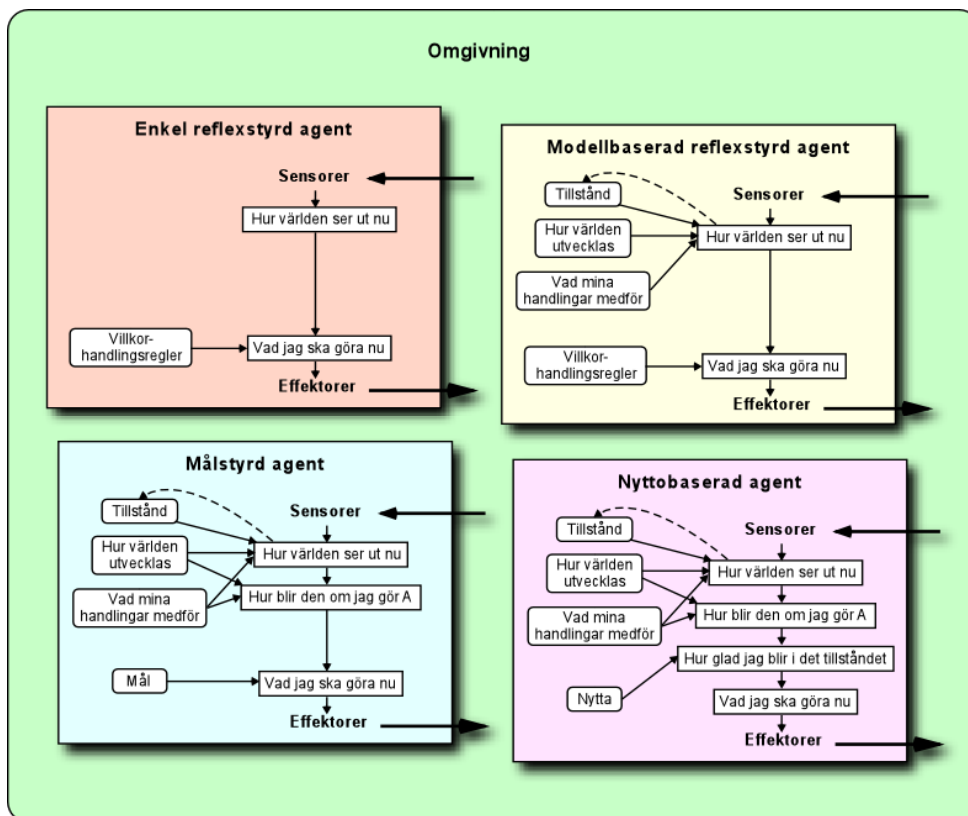
¹⁸ t ex minimal lagerhållning, maximalt antal sökträffar, maximal överlevnad eller minimalt effekttuttag för genomvarm mat, se första stycket i kapitel 4.1.

(avståndet minskar inte mellan oss). I nästa sekvenssteg då framförvarande cykel bromsar (vi ser att avståndet krymper) uppdateras tillståndet till att framförvarande cykel bromsar. En modell av omvärlden resonerar att avståndet mellan cyklarna kommer att krympa om jag fortsätter med konstant hastighet. En modell av handlingen "bromsa" säger att avståndet mellan cyklarna kommer att öka (om den framförvarande cykeln fortsätter med konstant hastighet). Villkoret utformas som **IF** framförvarande cykel bromsar **THEN** bromsa.

Se exemplet i kapitel 4.3.1 där Fuzzy Logic används som modell för fartreglering för ett stridsfordon i terräng. Fuzzy Logic används här för att "mjuka" upp det reflexmässiga beteendet hos agenten.

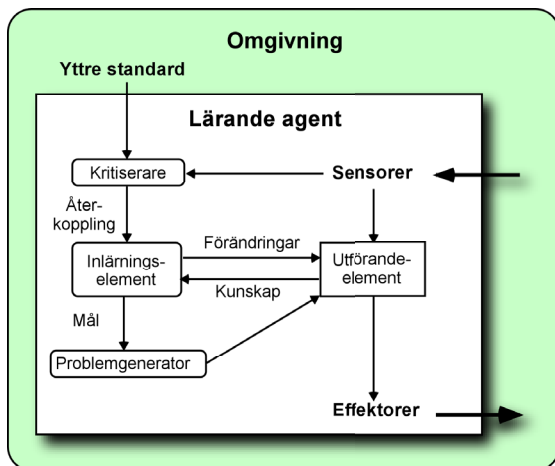
En *målstyrd agent* agerar så att ett mål kan uppnås. På samma sätt som för den modellbaserade reflexstyrda agenten har en målstyrd agent interna tillstånd som uppdateras utifrån händelser i omgivningen samt modeller av hur omvärlden utvecklas och vad dess handlingar medför. Som en målstyrd agent skulle vi i cykelfallet kunna ha som mål att komma till en geografisk plats. De handlingar vi har att utföra skulle kunna vara trampa på, bromsa, svänga åt höger och åt vänster. De handlingar som bäst resulterar i att målet kan nå utförs sekventiellt.

En *nyttobaserad agent* har snarare att maximera den "Utility" - "lycka" eller "nytta" den känner under vägen. Jämfört med den målstyrda agenten i föregående kapitel, utgör de tillstånd och den "lycka" som agenten känner i dessa tillstånd, det som styr dess handlingar. Vägen till den geografiska platsen kan bli en annan då den nyttobaserade agenten kanske undviker att bromsa, vilket ju tar kraft vid cykling.



Figur 10 Fyra typer av agenter i en omgivning

Genom att lära sig kan alla typer av agenter göra prestandaförbättringar, se Figur 11 .



Figur 11 En lärande agent i sin omgivning

Utförandeelementet är den tidigare beskrivna agenten. Inlärningselementet är den del som har som uppgift att förbättra agenten. Mot en yttre prestandastandard kritiseras utförandeelementets prestanda och återkopplas till inlärningselementet. Utgående från kritiken föreslår inlärningselementet förändringar. Problemgeneratören har till uppgift att föreslå nya, oprövade och förmodat bättre sätt att lösa uppgiften. Visar det sig att det inte är fallet, blir kritiken från kritiseraren svidande i senare skede.

Vilken agenttyp som lämpar sig bäst beror till stor del på omgivningen. Omgivningen kan [24] kategoriseras enligt:

- *Fullt-* respektive *partiellt observerbar* omgivning – en omgivning där agenten har all information i alla tidpunkter om omgivningen kallas fullt observerbar. En omgivning som agenten endast har partiell information om kallas partiellt observerbar.
- *Stokastisk-* respektive *deterministisk* omgivning – en omgivning vars status i nästa steg endast är bestämd på grundval av det aktuella läget och agentens handlande kallas deterministisk annars stokastisk.
- *Episodisk-* respektive *sekventiell* omgivning – i en episodisk omgivning kan agentens handlande delas upp i episoder, där i en episod agenten känner av omgivningen och handlar. Nästa episod påverkas ej av de åtgärder som skedde i föregående episod. I en sekventiell omgivning påverkar en agents handlande dess framtida beslut.
- *Statisk-* respektive *dynamisk* omgivning – en omgivning som förändras då agenten gör sina övervägningar kallas dynamisk annars kallas den statisk.
- *Diskret-* respektive *kontinuerlig* omgivning – om omgivningens status förändras med diskreta tidssteg kallas omgivningen diskret annars kallas den kontinuerlig.
- *Multiagent* omgivning – om agenten i omgivningen har att ta hänsyn till andra agenter, t ex andra agenter i förbandet.

En agent som efterliknar ett fordon under framryckning skulle i många fall möta en omgivning som är partiellt observerbar, stokastisk, sekventiell, dynamisk, kontinuerlig och multiagent, vilket är det mest komplexa fallet av omgivning.

I demoarbetet som beskrivs i kapitel 7 används en målstyrd agent för att styra stridsfordonet mot sitt mål (nästa brytpunkt). Omgivningen som den verkar i har dock i demon gjorts fullt observerbar, deterministisk, sekventiell, dynamisk, diskret och utan andra agenter.

4.2 Optimering

4.2.1 Matematisk programmering

Ett problem i *matematisk programmering* är ett optimeringsproblem av formen:

Minimera målfunktionen $J(\mathbf{u})$, under förutsättning att

$$\begin{aligned}\psi_i(\mathbf{u}) &= 0, \quad i = 1, \dots, m' \\ g_j(\mathbf{u}) &\leq 0, \quad j = m'+1, \dots, m\end{aligned}$$

Vi önskar alltså minimera en skalär funktion J , av beslutsvariabler $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_n)$ (en vektor), under förutsättning att variablerna uppfyller att antal villkor, eller tvång. Problemet omformuleras lätt till ett maximeringsproblem genom att multiplicera målfunktionen J med -1. Om såväl målfunktion som tvång är (godtyckliga) icke-linjära funktioner har vi ett problem i *icke-linjär programmering*, på engelska "Nonlinear Program (NLP)", [25]. Exempel på problemställningar som inte, åtminstone inte utan omformuleringar, faller under ovanstående definition av matematisk programmering är problem som kräver hantering av vaghet eller osäkerhet och problem inom spelteori. Metoder för hantering av vaghet, osäkerhet och spelteori beskrivs i avsnitt 5.3, 5.4 och 5.5.

Eftersom problem i icke-linjär programmering i allmänhet är svåra att lösa, behandlas i litteraturen ofta ett antal enklare specialfall. Ett ofta studerat problem är optimering under linjära tvång, d.v.s då ψ och g är linjära funktioner. Om dessutom målfunktionen är högst kvadratisk, kallas problemet för ett problem i *kvadratisk programmering*, "Quadratic Programming (QP)" på engelska. Vidare, om både objektfunktion och tvång är linjära, sägs optimeringsproblemet vara av typen *linjär programmering*. Problem i matematisk programmering som helt saknar tvång är också viktiga specialfall.

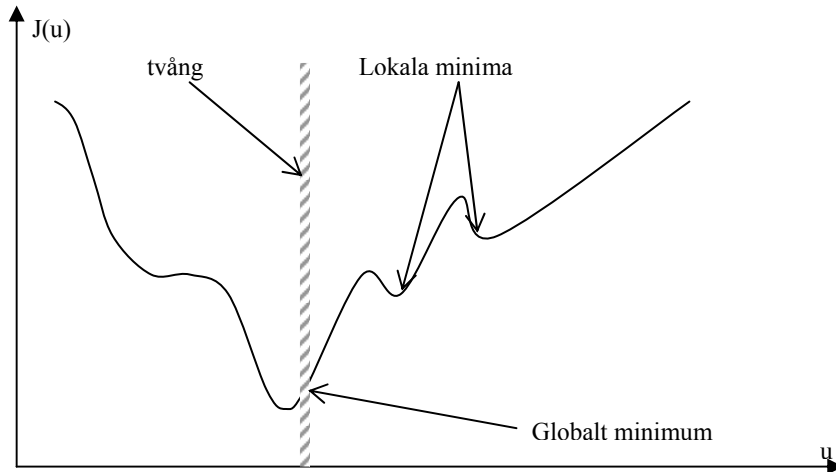
En viktig klass av problem, så också i våra tillämpningar, som i diskretiserad form kan formuleras som matematiska program är optimal styrning av dynamiska system. Ett problem i optimal styrning med diskret tid ges av [26]:

Sök minimum av målfunktionen $J(u_0, \dots, u_{N-1})$ med avseende på en sekvens av styrvariabler

$$(\mathbf{u}_0, \dots, \mathbf{u}_{N-1}), \text{ där } J(\mathbf{u}) = g_N(\mathbf{x}_N) + \sum_{k=0}^{N-1} g_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) \text{ och sekvensen av tillstånd } (\mathbf{x}_0, \dots, \mathbf{x}_{N-1})$$

uppfyller dynamiken $\mathbf{x}_{k+1} = f_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k)$, $k = 0, 1, \dots, N-1$. Vidare är initialtillståndet $\mathbf{x}_0$ givet och vi kan komplettera med tvång på styrvariabler och tillstånd.

En stor utmaning i icke-linjär programmering är att vissa problem har ett flertal *lokala optima*, problemet sägs vara ickekonvext, av vilka endast ett är ett *globalt optimum*, se Figur 12.

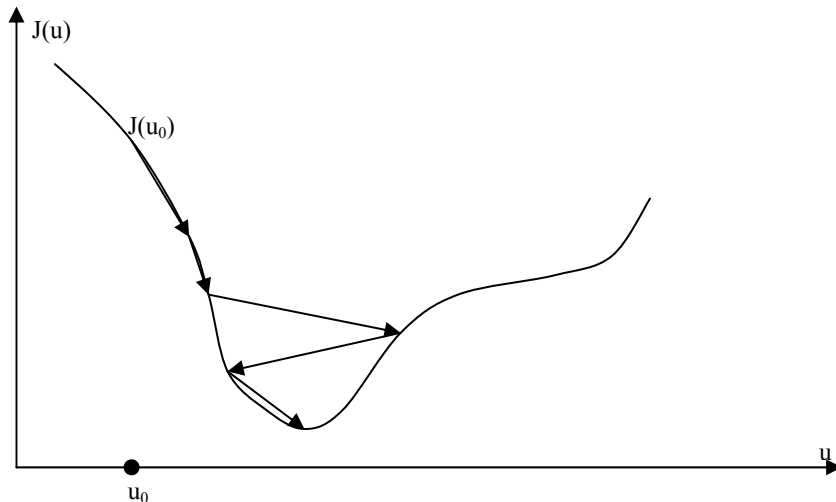


Figur 12 Olika typer av minima i ett optimeringsproblem med tvång.

Många av de metoder som utvecklats för att lösa problem i icke-linjär (matematisk) programmering är så kallade *deterministiska algoritmer*, vilka oftast söker lokala minima som lösning till optimeringsproblemet och kallas därför för lokalsökningsmetoder. I många praktiska tillämpningar ger också lokala metoder tillräckligt bra uppskattningar av globala optima. Nedan beskriver vi kortfattat några deterministiska algoritmer för lokal optimering. När deterministiska sökmetoder inte fungerar för global lösning av icke-linjära program används oftast någon typ av stokastisk sökmetod. Exempel på algoritmer baserade på stokastiska sökmetoder är genetiska algoritmer, se kapitel 4.2.4 och ”Simulated Annealing”, kapitel 4.2.5. En typ av algoritmer som liknar lokalsökningsmetoder är så kallade *giriga algoritmer* som angriper problemet genom att konstruera lösningen i en serie av steg där man i varje steg utför det drag som för tillfället ger bäst lösning. Giriga algoritmer ger inte alltid globalt optimum som lösning. Ett exempel på en girig algoritm är ”Hill Climbing”, se [24].

4.2.2 Lokalsökningsmetoder

Ett stort antal deterministiska algoritmer för sökning av lokala minima kan hittas i litteraturen. Sammanställningar och översikter av deterministiska metoder finns i t.ex. [27]. Vi kommer här bara nämna ett antal metoder vid namn utan att gå närmare in på deras egenskaper. Principen för de flesta iterativ lokalsökningsmetoder är dock ganska enkel. Man väljer ett startvärde och algoritmen anger en riktning i vilken sökning skall ske. Algoritmen väljer sedan ett lämpligt steg. Processen upprepas tills ett lokalt minimum har påträffats. Principen illustreras i Figur 13.



Figur 13 Struktur för iterativ lokalsökningsalgoritm.

Olika metoder karakteriseras bland annat av på vilket sätt sökriktningar väljs. Exempel på klasser av algoritmer är derivatafria metoder [28], gradientbaserade metoder och andraderivatametoder, Newton-metoder [29]. Vi nöjer oss här med att nämna att de ofta använda Newton-metoderna i allmänhet baseras på att approximera målfunktionen lokalt med en kvadratisk modell och sedan minimera denna funktion approximativt.

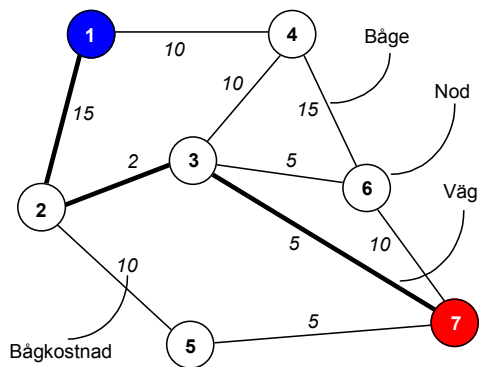
Allmänt sett kan sägas att till fördelarna med deterministiska lokalsökningsmetoder hör att dom är relativt enkla att förstå och att implementera. Metoderna ger vidare relativt snabbt en lösning och metodernas konvergenssegenskaper är ofta väl kända. Till nackdelarna hör naturligtvis först och främst att algoritmerna fastnar i lokala optima och ingen garanti finns att den lokala lösningen ens ligger i närheten av globalt optimum.

4.2.3 Grafsökning

För att lösa ett optimeringsproblem måste i många fall den kontinuerliga världen diskretiseras. Optimeringsproblemet blir här ett diskret optimeringsproblem. Ett vanligt sätt är att formulera problemet som en graf och lösa denna med en grafsökningsalgoritm.

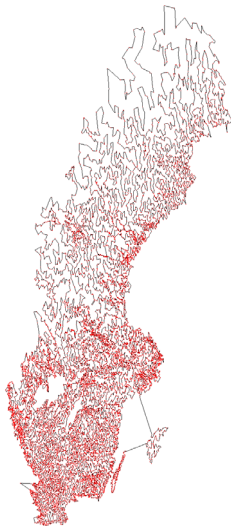
En graf består av *noder* (vertex eller vertices på engelska) och *bågar* (edges)¹⁹. En nod kan t ex representera en geografisk plats, en dator i ett nätverk, ett läge i ett spel eller mer generellt en beslutspunkt. Bågarna kan i ovanstående exempel representera vägar till närliggande platser, anslutningarna mellan datorerna och möjliga drag i spelet. Grafen beskriver hur noderna kopplas samman via bågarna. Se Figur 14.

¹⁹ Namn som länkar och vägar förekommer också



Figur 14 Figuren visar en viktad och oriktad graf med en billigaste väg funnen från nod 1 till nod 7.

Exempel på populära grafsökningsproblem är att finna den kortaste eller billigaste vägen från en startnod till en slutnod, det optimala flödet mellan noderna eller att finna den kortaste vägen för att besöka alla noder i grafen (handelsresandeproblemet). En kortaste väg (72 500 km) för att besöka 24 978 samhällen i Sverige, är det största handelsresandeproblem som hittills har lösts [30].

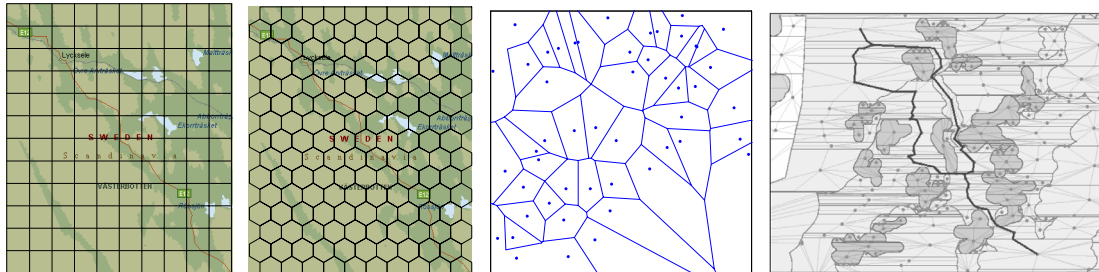


Figur 15 Den kortaste vägen för att besöka 24978 samhällen i Sverige

Grafer finns som *riktade* eller *oriktade*. I en riktad graf pekar bågen från en nod till en annan och en *väg* i grafen kan endast ske i bågens riktning. En *viktad* graf innebär att varje båge är försett med ett tal som t ex beskriver sträckan mellan noderna, kostnaden att ta sig mellan noderna eller det maximala flödet mellan noderna.

Grafer används ofta för att hitta en optimal väg (i någon mening) från en plats till en annan på en karta. För att kunna nyttja en grafsökningsalgoritm måste kartan diskretiseras och en graf definieras. Olika sätt att diskretisera kartan finns, ett vanligt sätt är att applicera en grid (nät) av kvadrater- eller hexagoner (sexhörning) över kartan och definiera grafens noder som centrumpositionerna för kvadraterna eller hexagonerna. Grafen byggs upp av bågar som beskriver vilka grannar respektive nod har (neighbourhood graph). För att finna optimala vägar används viktade grafer där bågvikten representerar kostnaden att ta sig från en nod till en annan. En hexagongrid är mer komplicerad att skapa än en kvadratgrid. Hexagongriden har dock fördelar genom att avståndet från hexagonens centrum till de sex hexagongrannarna är lika långt vilket gör det enklare att beräkna bågarnas vikter i grafen. En kvadratgrid skapar åtta grannar där en nod dock möter fyra av grannarna i endast en punkt. Ovanstående metoder

tar inte hänsyn till kartan eller objekt på kartan (storleken på cellerna måste dock anpassas efter kartans upplösning och objekten på kartan) utan är grova metoder för att diskretisera en karta till en graf. Fördelar med dessa metoder är att grafen enkelt kan skapas och att den medger att friare vägar (fler bågar utgår från varje nod²⁰) kan hittas. En nackdel är dock att en stor graf med många noder och bågar skapas.



Figur 16 Bilderna visar några olika sätt att diskretisera en karta. Från vänster till höger: kvadrat, hexagon, Voronoi, och diskretisering utifrån markegenskaper [32].

Ett annat sätt att diskretisera en karta på är att använda Voronoidiagram [31]. Utgående från punkter på kartan (punktmängd) bildar ett Voronoidiagram noder och bågar där avståndet på en båge till det de närmaste paret av punkter är ekvidistant. Om punktmängden beskriver hotpositioner, så bildar noderna och bågarna ett vägnät genom hotområdet där varje båge befinner sig så långt bort från varje hot som möjligt. En metod som tar hänsyn till markegenskaperna på kartan vid diskretiseringen beskrivs i [32]. Fördelen med dessa metoder är att en kompaktare graf med färre noder och bågar skapas. Nackdelar är att kartan måste bearbetas innan grafen kan skapas samt att de geometriska vägarna mellan noderna lätt blir onaturliga.

Grafer över stadsbebyggelse kan bli kompakta pga. att rörelsemöjligheterna begränsas av husfasader. Varje nod i stadsgrafen symboliserar en korsning och bågarna vägarna mellan korsningarna [33].

För att hitta den optimala vägen från en nod till en annan i den viktade grafen används en grafsökningsalgoritm. Populära algoritmer är Dijkstra och A* (A-star eller A-stjärna), i t ex [24], [34] beskrivs A* och ett antal andra algoritmer. Grafens utseende (riktad/oriktad, positiva/negativa bågkostnader, etc.) avgör vilken algoritm som kan användas. Egenskaper som skiljer algoritmerna åt är huruvida de är garanterade att finna en lösning, en optimal lösning samt hur tid- och minneseffektiva de är. Nedan kommer kortfattat den mycket populära algoritmen A* att beskrivas.

A* har blivit en populär algoritm på grund av att den är garanterad att finna en optimal lösning (under en förutsättning som beskrivs nedan) om en sådan existerar. A* är mycket tidseffektiv men kan ställa stora minneskrav vid stora grafer. A* bygger på att en nod n i grafen bedöms utifrån den verkliga kostnaden $g(n)$ att ta sig till den aktuella noden tillsammans med den uppskattade kostnaden $h(n)$ att ta sig från den aktuella noden till målet. $h(n)$ kallas *heuristic function*. Under förutsättning att $h(n)$ inte överskattar kostnaden²¹ att ta sig från den aktuella noden till målet så, finner A* den optimala lösningen. Den uppskattade

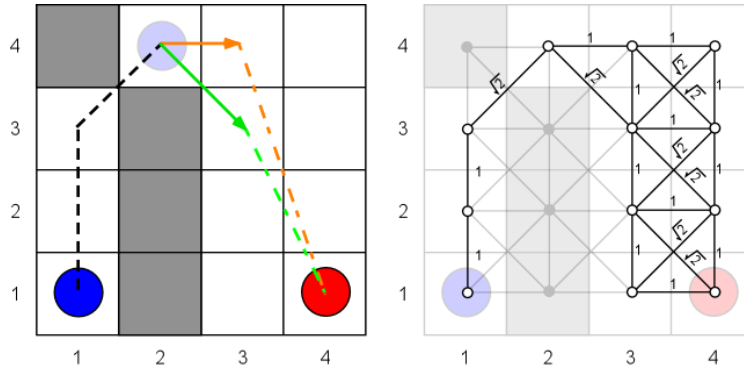
²⁰ Fyrkantsgriden skapar 8 riktningar per nod. Hexagongriden skapar 6 riktningar per nod.

²¹ Kallas även Admissible Heuristic

lägsta kostnaden att ta sig från startpositionen via nod n till målet beskrivs alltså av funktionen $f(n) = g(n) + h(n)$.

I många fall beräknas $h(n)$ som det euklidiska avståndet (fågelvägen) från den aktuella noden till målnoden. Hur $h(n)$ beräknas är viktigt, om $h(n)$ underskattar kostnaden alltför mycket blir algoritmen långsam²² och om den överskattar kostnaden blir den snabb men genererar icke-optimala lösningar. Om $h(n) = 0$ blir A* algoritmen ekvivalent med Dijkstras algoritm. Olika sätt att beräkna $h(n)$ beskrivs bland annat i [24], [35] och [36].

För att förklara A* använder vi en mycket förenklad karta, se Figur 17.



Figur 17 Vänstra figuren: hitta den billigaste vägen från blå punkt till röd punkt. Grå områden kan ej beträddas. Högra figuren: den relaterade grafen med bågkostnader. Noder som ej kan beträddas (svartmarkerade noder i högra figuren) läggs initialt i CLOSED listan. Bågkostnaden är avståndet mellan närliggande noder. Varje kvadrat har sidan 1.

Målsättningen i Figur 17 är att söka den billigaste vägen från den blåmarkerade kvadraten (1,1) till den rödmarkerade (1,4). I det här exemplet är grafen oriktad²³ och bågkostnaden lika med avståndet från en centrum på aktuell kvadrat (aktuell nod) till centrum på grannkvadraten (grannnod). Från nod (1,1) finns endast en väg fram till noden (4,2) där vi har två alternativ, nod (4,3) eller nod (3,3). Hur söker sig A* mot målet från nod (4,2)?

Vi beräknar $g(n)$, $h(n)$ och $f(n)$ för de så kallade *expanderade* noderna (4,3) och (3,3).

$$\begin{aligned} g(4,3) &= 1 + 1 + \sqrt{2} + 1 = 4,414 & h(4,3) &= \sqrt{1^2 + 3^2} = 3,162 & f(4,3) &= 7,575 \\ g(3,3) &= 1 + 1 + \sqrt{2} + \sqrt{2} = 4,828 & h(3,3) &= \sqrt{1^2 + 2^2} = 2,236 & f(3,3) &= 7,064 \end{aligned}$$

Nod (3,3) är billigast, varför A* väljer denna som nästa nod att expandera.

I nod (3,3) har vi nodgrannarna (4,2), (4,3), (4,4), (3,4), (2,4) och (2,3). A* gör en förteckning över vilka noder som har besökts samt de som ej kan beträddas²⁴ i en CLOSED lista. De noder som står på tur att besökas lagras i en OPEN lista. Noden (4,2) finns i CLOSED listan som redan besökt varför $f(n)$ beräknas för noderna (4,4), (3,4), (2,4) och (2,3). Beräknar vi $f(n)$ för dessa noder finner vi att den lägsta $f(n)$ -kostnaden 7,2426 fås i noderna (2,3) och (2,4). Hade denna kostnad överstigit $f(4,3) = 7,575$ som vi beräknade tidigare, så hade även (4,3) noden

²² Expanderar fler noder

²³ I en verklig terräng blir i de flesta fall grafen riktad om kostnaden utgörs av framkomlighet. Kostnaden att gå från ett håll, t ex nedför en backe, har en annan kostnad än om vi går från det andra hållet, uppför backen.

²⁴ De förbjudna noderna läggs initialt i CLOSED listan och expanderas därför aldrig.

expanderats och den av de expanderade noderna med lägst $f(n)$ hade valt för ytterligare expanderings. I exemplet expanderas (2,3) och (2,4) och målnoden (1,4) ingår bland de noder som expanderas - vi har nått målet. Kostnaden att ta sig till målnoden blir 7,2426 oavsett om vi tar vägen via (2,3) eller (2,4).

OPEN listan innehåller föräldranoderna till aktuell nod och använd slutligen i A* för att från målnoden baklänges finna den optimala vägen. I exemplet ovan fann vi två optimala (billiga) vägar $(1,1) \rightarrow (2,1) \rightarrow (3,1) \rightarrow (4,2) \rightarrow (3,3) \rightarrow (2,3)$ eller $(2,4) \rightarrow (1,4)$.

I ovanstående exempel användes det euklidiska avståndet mellan noderna som bågkostnaden. I fall med varierande kostnader som t ex mobilitet (framkomlighet på grund av terrängförhållanden), kostnad för upptäckt, kostnad för bekämpning, etc., kan dessa kostnader adderas viktat till avståndskostnaden då $g(n)$ beräknas. I kapitel 5 beskrivs verktyg som kan ingå i beräkningen av $g(n)$. Om $h(n)$ inte överskattar kostnaden (kanske fortfarande använder det euklidiska avståndet) från den aktuella noden till slutnoden kommer en optimal väg att hittas. Detta innebär dock att $h(n)$ börjar underskatta kostnader, varmed A* expanderar fler noder och blir långsammare i att hitta den optimala vägen. Att beräkna $g(n)$ samt en balanserad approximation av $h(n)$ för varierande kostnader vid framryckning i terräng beskrivs i [36].

I demoarbetet som beskrivs i kapitel 7 har en kvadratgrid använts för att diskretisera en virtuell terräng som ett stridsfordon ska rycka fram genom. Kostnad för framkomlighet viktas mot kostnad för upptäckt mot ett antal hot tillsammans med avståndskostnaden. Med A* söks en billigaste väg mellan brytpunkter på kartan. Förändras omvärlden under framryckningen omräknas kostnaderna och en omplanering av vägen fram till nästa brytpunkt sker. Överstiger kostnaderna en specificerad nivå planeras rökläggning mot de hot som är orsak till den höga kostnaden samt en ny väg beräknas. Demon kan ses som ett embryo av en funktion i ett varnar och motverkanssystem (VMS) som stödjer stridsfordonet att undvika upptäckt och vid eventuell upptäckt kasta rök och manövrera så att uppdragsmålet kan nås (komma till nästa brytpunkt).

4.2.4 Genetiska algoritmer

Evolution sker utifrån ett antal relativt enkla processer. Bland dessa kan nämnas genetisk variation, konkurrens och urval. Begreppet variation, i detta sammanhang, bygger i huvudsak på principen att mekanismen för arv inte är felfri. Under den här processen så uppstår alltid slumpmässiga förändringar, s.k. mutationer, i en arvs massa. Konkurrens och urval är begrepp som har sin grund i det naturliga urvalet, enligt evolutionsteorin. Olika individer i en population har olika förutsättningar för adaptation till miljön, så därför kommer det antal avkomma och adaptationsförmågan hos avkomman, som olika individer får, att variera. Genetiska algoritmer beräknar lösningar på problem enligt motsvarande principer

Begreppet genetiska algoritmer har hämtat inspiration i den evolutionära utveckling som finns inom all biologisk tillväxt. Med evolution avses inom biologin den förändring eller anpassning av egenskaper som sker efter ett antal generationer. Förändringen har sin grund i en successiv genetisk anpassning till miljön och större hastiga förändringar i form av mutationer. Genetiska algoritmer är ett sätt att efterlikna den biologiska evolutionen vid utveckling av en artificiell variant av den biologiska evolutionen. Det som förändras är inte naturliga organismer utan istället konstruerade datastrukturer.

Användningen av genetiska algoritmer medger möjlighet att få fram nya varianter av datastrukturer som har egenskaper som är bättre lämpade att lösa ett problem än de i tidigare generationer. Metoden kan ses som en stokastisk optimeringsstrategi på problem som normalt är svåra att modellera med traditionella optimeringsmetoder

Förenklat så kan genetiska algoritmer beskrivas enligt följande:

Utgångspunkten är en population med individer. Varje individ representeras med en sträng med tecken, där varje tecken kan ha olika värden ur en viss mängd. Detta kan jämföras med kromosomer av DNA, som representeras av en viss uppsättning tillåtna kombinationer. En annan jämförelse är att se populationen som en mängdsimulering, där varje individ är en separat simulering eller en beräkning. Den sträng som representerar individen är då de startvärden man förser simuleringen med.

För att bedöma varje individs duglighet rankas dessa med en bedömningsfunktion, en s.k. *fitness function*. För att återgå till jämförelsen med simuleringar innebär det att simuleringen körs och slutresultatet bedöms. Bedömningsfunktionen skall här värdera om simuleringsresultatet är bra eller dåligt och sedan rangordna resultatet av de simuleringar som har körts inom ramen för denna population. Dessa resultat är då utkomsten av den första generationen.

Därefter tillåts individerna reproducera sig. Det kan innebära att det skapas kopior av befintliga individer, att individer korsas med varandra och att viss slumpmässig förändring, mutation, tillåts ske. Med hjälp av individbedömningen så styrs möjligheten till reproduktion. Ju högre ranking desto högre sannolikhet för reproduktion. För att inte komplexiteten skall växa så begränsas vanligtvis populationen till ett konstant antal individer och endast enkla varianter av korsningar tillåts. För simuleringar skulle detta innebära att en viss del lyckade simuleringsresultat behålls, en viss del nya startparametrar skapas genom att kombinera startparametrar från tillräckligt lyckade simuleringar samt skapa nya startparametrar med hjälp av slumpen.

På detta sätt har en ny population skapats, den andra generationen, och den rankas och tillåts reproducera sig på samma sätt som föregående generation. På detta sätt kan ett antal generationer skapas tills ett avslutningsvillkor är uppfyllt. Det villkoret kan vara att ett visst fördefinierat antal generationer har skapat eller att ett slutresultat, en individ, som är tillräckligt bra har producerats.

För mer information om hur genetiska algoritmer och angränsande discipliner som t ex genetisk programmering, så hänvisas till [37].

4.2.4.1 Exempel där genetiska algoritmer används

För att ge fler beskrivningar av hur genetiska algoritmer fungerar samt visa på aktiviteter inom forskning och utveckling så redovisas ett antal exempel nedan.

Inom luftstridssimuleringar har genetiska algoritmer används vid studier vid Naval Research Laboratory i USA. Genetiska algoritmer har här använts för att utveckla taktik vid ett flygplans undanmanövrering från en robot. Text i [38], där vikten av ingångsvärden, att initiera den genetiska algoritmen med befintlig taktisk kunskap, har studerats för att få snabbare resultat. Dessa luftstridssimuleringar har körts i ett system, SAMUEL, som nyttjar

genetiska algoritmer i regelbaserad inlärning. En beskrivning av en senare version av SAMUEL finns i [39].

Ett annat exempel på luftstridssimuleringar ges i [40] där genetiska algoritmer används för att ta fram nya flygplanmanövrer vid nyutveckling av flygplan. Nya styrtekniker som t ex vektorstyrning och instabilitet ger möjlighet till nya manövrer som t ex Pougachevs kobra. Motivet till att simulera fram dessa är, förutom att mjukvarusimuleringar är billigare och enklare än både Human-In-The-Loop-simuleringar och testflygningar, att genetiska algoritmer kan generera helt nya manövrer som inte tidigare har övervägts.

Ännu ett exempel ges i [41] där genetiska algoritmer används för att prediktera motståndarens framtida agerande. Detta exempel nämns även i kapitlet om Fuzzy Logic, då Fuzzy Logic används för hotprediktion i form av bedömning av motståndarens avsikter, kapacitet och sårbarhet.

Just kombinationen med Fuzzy Logic och genetiska algoritmer har använts i fler studier [42], [43]. De genetiska algoritmerna används för att bedöma utfallet i aktuella simuleringar och därefter generera nya ingångsvärden till nya simuleringar. Exempelen som nämns här gäller stridsfordons gruppering och telektriktaktik vid sjöstrid (se även kapitlet om Fuzzy Logic).

De exempel som nämns ovan är tagna från intressanta områden där genetiska algoritmer har använts och skall inte ses som en inventering av området.

4.2.4.2 Värdering av metodens egenskaper

Som nämnts ovan så kan genetiska algoritmer ses som en stokastisk optimeringsstrategi på problem som normalt är svåra att modellera med traditionella optimeringsmetoder. Vidare kan den också ses som ett sätt att testa komplexa, svåröverskådliga problem som det inte går eller är för tidskrävande att genomföra en komplett testning av.

Det finns inte något speciellt sätt att hantera osäker information med genetiska algoritmer, eftersom den har till uppgift att ge förslag på nya möjliga lösningar. Det är svårt att beskriva konsekvenserna av osäkerhet i indata, eftersom det kan vara svårt att veta hur pass bra metodens lösningar är. Problemets karaktär kommer att inverka på hur mycket osäkerheten påverkar resultatet.

Metoden kan med lämplig arbetsinsats tillämpas på situationer med flera beslutsfattare. Troligen kommer dock komplexiteten att öka dramatiskt om inte genomtänkta avgränsningar och bra kontroll över hur metoden tillåts evolvera och prova olika möjligheter.

Effektivitet i form av kort svarstid kommer förmodligen att vara beroende på den aktuella kontexten och situationen. Det är den som bestämmer egenskaper hos och storleken på problemet, samt hur problemet formuleras. För att metoden ska kunna generera lösningar inom rimlig tid, så är troligen problemformuleringen viktig. Problemets storlek kommer troligen vara avgörande för hur effektiv metoden blir. Metoden kan med stor säkerhet även användas för att skapa handlingsregler i ett "offline" läge, t ex vid uppdragsplanering. Dessa handlingsregler kan sedan användas för beslutsfattande i realtid. Under sådana förhållanden handlar det istället att matcha indata med de framtagna reglerna och få en träff vid matchningen på rätt regel som medför att en önskad åtgärd kan utföras.

Det verkar även rimligt att anta att genetiska algoritmer kan kombineras med andra metoder. Detta kan göras genom att nyttja resultatet från den genetiska algoritmen som grund för beräkning med en annan metod, t ex Fuzzy Logic, som har nämnts bland exemplen.

Metoden kan användas för olika problemställningar i många situationer och sammanhang. Det som förmodligen är mer osäkert, är möjligheten att verifiera de resultat metoden genererar, i någon slags känslighetsanalys. Metoden kan hantera olika tidskonstanter, dvs. 1s, 1min eller 1h fungerar precis lika bra. Det är nog snarare behoven i sammanhanget och begränsningar som systemet verkar, samt operatörens förmåga som sätter begränsningarna.

Principen för genetiska algoritmer är, som sagt, i sig relativt enkel. Metoden bygger på att prova och värdera många olika uppsättningar av möjliga lösningar. Detta gör att komplexiteten kan bli mycket stor allt eftersom evolutionsprincipen genererar flera olika generationer av potentiella lösningsalternativ.

4.2.5 Simulated annealing

Simulated annealing, se t.ex. [44], är en heuristisk teknik som efterliknar ett avkylningsförlopp. Simulated annealing är en stokastisk metod för global optimering. Metoden fungerar på ickeelinjära problem och en stor fördel med simulated annealing är att den ofta kan undvika att ”fastna” i lokala optima. Förenklat bygger principen för simulated annealing på att en grannpunkt till den aktuella punkten (eller startpunkten) dras slumpmässigt. Om den slumpade punkten är bättre än den aktuella så accepteras den men även en sämre punkt accepteras med en viss sannolikhet. Den sannolikhet med vilken en sämre punkt accepteras minskas allt eftersom en viss parameter, temperaturen i den fysikaliska jämförelsen, minskas. Ju långsammare ”temperaturen” minskas desto större sannolikhet är det att algoritmen hittar en optimal lösning. Ett långsammare ”kylschema” medför naturligtvis ökad beräkningstid.

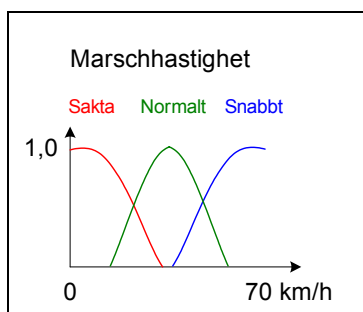
Karaktäristiskt för simulated annealing är att det är en ganska långsam metod. Vidare kan det vara svårt att på ett bra sätt välja parametervärden för metoden. Metoden är dock en derivatafri metod som inte ställer några krav på kontinuitet hos funktioner i modellen. Andra fördelar med metoden är också att den är lämplig att kombinera med andra metoder och att det finns ett teoretiskt resultat som säger att metoden konvergerar asymptotiskt mot den optimala lösningen.

Ett exempel på mjukvara för simulated annealing är ASA som står för Adaptive Simulated Annealing. Denna programvara är skriven av Lester Ingber och kan erhållas från [45]. I [46] har ett antal derivatafria metoder, nämligen simulated annealing, genetiska algoritmer, bayesianska metoder och Nelder-Meads simplexmetod, jämförts genom att tillämpa metoderna på ett antal testproblem. För simulated annealing användes programvaran ASA. Simulated annealing, med ASA som mjukvara, visade tillsammans med genetiska algoritmer bäst resultat för ett problem (flight-clearance problem) med många lokala optima. För andra problem visade dock andra metoder bättre resultat.

4.3 Hantera vaghet

4.3.1 Fuzzy Logic

Grunden i Fuzzy Logic handlar om att tillåta friare logisk indelning än traditionell logik. I traditionell logik tillhör ett värde en mängd eller ej, men i Fuzzy Logic kan ett värde delvis tillhöra en mängd [47]. I klassisk logik är ett värde falskt eller sant, har värdet noll eller ett. I Fuzzy Logic kan det logiska värdet vara 0,18 eller 0,93 vilket kan ses som "ganska falskt" eller "ganska sant". Exempelvis så kan ett stridsfordons marschhastighet bedömas med variabeln "snabbt". I traditionell logik skulle gränsen för "snabbt" kunna sättas tydligt vid t ex 60 km/h. Detta innebär att ett fordon som håller 59 km/h inte är snabbt medan ett fordon som håller 61 km/h är det, trots att det egentligen inte skiljer så mycket i hastighet. I Fuzzy Logic kan man beskriva "snabbt" med en funktion som t ex är 0 upp till 40 km/h och som sedan ökar upp till 1 vid 70 km/h. Detta skulle innebära att ett fordon som håller 60 km/h är "snabbt" till ett värde av ca 0,8, se Figur 18. Dessa så kallade medlemsfunktioner används för att namnge och värdera beteenden som inte alltid går att kvantifiera i tydliga siffervärden.



Figur 18 Medlemsfunktionerna för sakta, normal och snabb marschhastighet.

På medlemsfunktionerna kan logiska operationer utföras. Liksom inom traditionell logik finns även här operatorerna **AND**, **OR** och **NOT**. I Fuzzy logic kan **AND** ersättas med **Min** (den lägsta av de två insignalerna) och **OR** kan ersättas med **Max** (den största av de två insignalerna). Detta för att kunna hantera att värdena ligger mellan 0 och 1. Detta gör att **NOT** för insignalen x kan motsvaras av $1-x$.

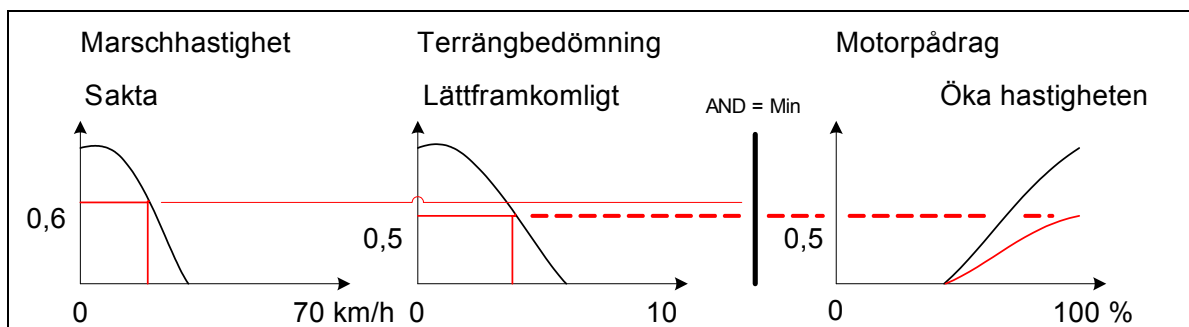
Fuzzy Logic kan ses som en regelbaserad metod för att beskriva ett system med insignaler och tillhörande utsignaler. Om ett kriterium är uppfyllt så skall en händelse utföras alternativt givet vissa insignaler så skall en viss utsignal genereras.

Som exempel kan man tänka sig ett fartregleringssystem för stridsfordon där riktvärdet är 50 % motorpådrag som ger normal fart i normal terräng. Om terrängen blir mer lättframkomlig så ökas farten och om den blir mer svårframkomlig så minskas farten.

En regel kan då formuleras som **IF** ((stridsfordonet åker sakta) **AND** (terrängen är lättframkomlig)) **THEN** (öka hastigheten). Genom att sätta upp ett flertal sådana regler så fås en beskrivning på allt som systemet skall klara av. Reglerna skall alltså ge en bedömning av läget och sedan resultera i åtgärder. Varje regel skall generera en utsignal som har ett värde mellan 0 och 1 i utsignalfunktionen.

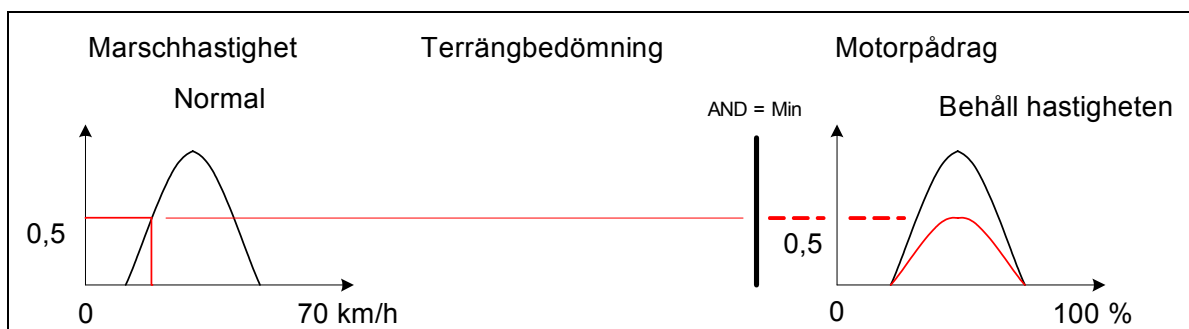
Exemplet i Figur 19 antas ha ett fordon som åker med ca 20 km/h i en terräng som har fått värdet 4 i framkomlighet (terrängen bedöms här med ett värde mellan 0 och 10 där 0 är väldigt lättframkomlig och 10 är i princip oframkomlig). Detta värderas som $(0,6 * sakta)$

AND ($0,5 * \text{lättframkomligt}$) vilket ger resultatet $0,5 * \text{öka hastigheten}$ om **Min** används som **AND**-operator.

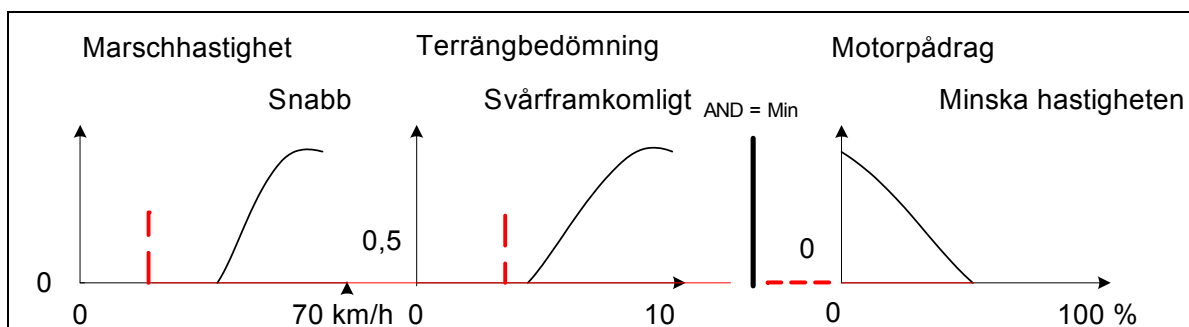


Figur 19 Exempel på värdering av regeln "öka hastighet".

Om man utökar exemplet och även skapar regler för att bibehålla eller minska hastigheten ges följande grafer.

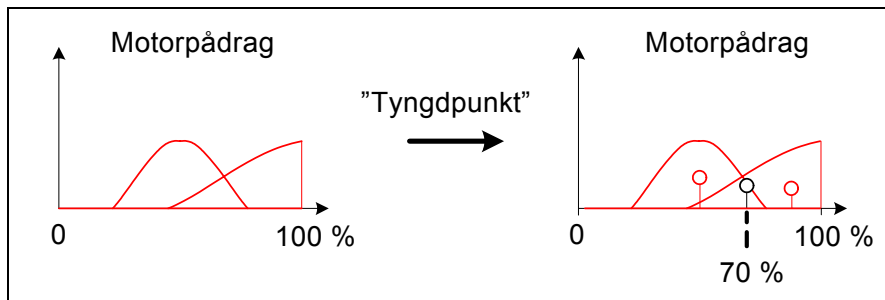


Figur 20 Exempel på värdering av regeln "bibehålla hastighet".



Figur 21 Exempel på värdering av regeln "minska hastighet".

Varje regel utvärderas parallellt och slutresultatet vägs ihop för att ge en "defuzzifierad" utsignal. Utsignalfunktionernas utseende kan på samma sätt som insignalfunktionerna designas tämligen fritt för att efterlikna önskat beteende. Den slutliga sammanvägningen kan också genomföras på ett flertal sätt, men en av de vanligare är att beräkna tyngdpunkten, *Center-of-Mass*, hos en funktion som är summerad som **Max** av alla utsignalfunktioner. I detta exempel leder insignalerna till att motorpådraget ökas till 70 %.



Figur 22 Exempel på slutlig utsignalsberäkning.

Fuzzy Logic är alltså ett sätt att grovt beskriva egenskaper och regler för hur dessa skall förändras. Syftet är att på ett intuitivt sätt beskriva hur ett system skall styras då det inte är önskvärt eller kanske möjligt att beskriva det på ett detaljerat matematiskt sätt. Ett område där Fuzzy Logic har visat sig vara en framgångsrik metod är expertsystem där en experts beteende är svårt att beskriva i matematiska termer utan snarare beskrivs på regelform som styr situationer och händelser. Ett annat användningsområde är reglering av komplicerade icke-linjära system.

4.3.1.1 Exempel där Fuzzy Logic används

För att ytterligare belysa ämnet Fuzzy Logic samt ge exempel på forskning och utveckling så redovisas nedan ett antal områden.

Fuzzy Logic kan användas inom utveckling av flygsimulatorer både för styralgoritmer och för vallogik. Några exempel som kan nämnas är utveckling av flygsimulator för optimal manövrering [48]. Här används Fuzzy Logic i ett logikträd för att bedöma val av lämplig manöver. Vidare så finns även [49] som pekar på möjligheten till snabb utveckling av en flygsimulator. Här används Fuzzy Logic för att utveckla styrsystemet för flygplanet snabbare än med konventionell metodik. Även [50] utvecklar styrsystem, men här är tillämpningen styrsystem för en robot. I detta fall är det flera styrlagar som vägs ihop med Fuzzy Logic för att styra roboten på ett så bra sätt som möjligt.

Ett antal likartade artiklar från NRL [51, 52, 43, 53] visar på möjligheten att använda Fuzzy Logic i beräkningar på hur man skall använda elektronisk attack (EA) i ett sjöstridsscenario. I dessa artiklar används Fuzzy Logic i ett logikträd för situationsanalys, antingen för en plattform eller för flera samverkande plattformar. Beroende på utfall i logikträdet jämfört med en tröskelnivå, så anropas användning av EA. Vilken EA-metod som skall användas väljs också i ett fuzzyträd. Åtgärdens effektivitet värderas sedan också med ett fuzzyträd samt ytterligare ett fuzzyträd används för att skatta motståndarens beteende. Efter varje simulerat scenario kan träden förbättras genom vidareutveckling med hjälp av genetiska algoritmer. Grunden i detta system, som är att betrakta som ett expertsystem, baseras på intervjuer med experter, doktriner och annan relevant litteratur. Nya koncept kan givetvis också införas och testas i denna miljö.

Ett annat exempel är [42] som använder Fuzzy Logic för att värdera stridsfordons gruppering på slagfältet. Grupperingsavstånd, bekämpade fiender och egna förluster är medlemsfunktioner som värderas i varje simulering och det sammanvägda resultatet används som ett kvalitetsmått som matas till en genetisk algoritm. Med den genetiska algoritmen söks sedan optimal gruppering genom ett antal iterationer. Denna algoritm testades sedan genom

att den fick tävla mot en mänsklig expert i simulerad strid och resultatet var till algoritmens fördel.

Som exempel på luftstrid kan [54] nämnas, där Fuzzy Logic används för att värdera ett antal egenskaper i ett stridsscenario för att sedan gruppera dessa i områden med riskbedömningen ”bra”, ”acceptabel” eller ”dålig”. Detta används sedan ihop med neurala nätverk för inlärning i ett beslutsstödssystem.

Ytterligare ett exempel ges i [55] där Fuzzy Logic används för hotprediktion i form av bedömning av motståndarens avsikter, kapacitet och sårbarhet. Detta används tillsammans med genetiska algoritmer som predikterar motståndarens framtida agerande. Syftet är att använda hotprediktionen tillsammans med datafusion för att skapa takiskt beslutsstöd.

Ovan nämnda tillämpningar skall inte ses som en komplett inventering utan mer som exempel på intressanta områden där Fuzzy Logic har använts.

4.3.1.2 Värdering av metodens egenskaper

Sammanfattningsvis kan man konstatera att Fuzzy Logic lämpar sig för områden där man vill imitera mänskligt beteende antingen för att ge en domänexpert möjlighet att designa ett system eller kanske designa ett system efter en domänexpert. Detta gäller även då man önskar prediktera mänskliga handlingsmönster.

Vidare kan det med fördel användas när komplexa och olinjära system skall beskrivas eller regleras där konventionella beskrivningar av systems egenskaper är svåra eller omöjliga att ge eller där det bedöms att ett konventionellt angreppssätt är alldeles för tidskrävande.

Dessa egenskaper gör Fuzzy Logic lämpligt för användning då SAT och telekriginsatser skall optimeras eller vägas mot varandra. Dels ges möjligheten på samma sätt som hos [51, 52, 43, 53] ovan att föra in experterfarenheter i verktygen, dels när man skall bedöma vad som är optimalt och erfarenheter från tester och operativ användning. Vidare så är duellen mellan telekrig och signaturanpassning en komplex process med många med olinjära samband. Så istället för att kunna beskriva allt i detalj, så kan Fuzzy Logic användas för att enklare beskriva beteenden och samband.

Fuzzy Logic är inget optimeringsverktyg i sig själv, men kan vara ett bra verktyg för att angripa den komplexa problemställning som avvägningen mellan SAT och telekrig innebär.

4.4 Hantera osäkerheter

Beslutsfattande kan baseras på kunskap om förutsättningar och förväntningar kring utfallet av vissa åtgärder eller händelser i ett förlopp. Möjligheter att förutsäga eller styra utfallet kan byggas på kunskap om likartade händelser samt åtgärder som tidigare har visat sig påverka förloppet. Förutsägelserna kan vara baserade på statistisk grund eller bestå av indirekt kunskap och erfarenhet om förlopp och utfall i liknande fall. Även analogier inom jämförbara fall kan bilda grund för förutsägelser. Det matematiska begreppet sannolikhet för en händelse definieras i allmänhet som storleksförhållandet mellan den del där händelsen ”vanligen” förekommer och den helhet där den över huvudtaget skulle kunna inträffa. Sättet att bestämma dessa två grundläggande mått (områden) kan variera beroende på vilken kunskap

man besitter om ämnets ”omgivning”. Vetskap kan finnas om att någon annan händelse har inträffat som har en i viss mån känd relation till den studerade. Det kan finnas ett statistiskt material som visar tidigare observationer av likartat fenomen eller man kan ha kännedom om vissa av förloppets inneboende mekanismer. Dessa kunskaper adderade eller kombinerade kan ligga till grund för en mer eller mindre säker förutsägelse.

Exempelvis om jag söker sannolikheten för händelse A som jag av erfarenhet vet brukar inträffa 12 ggr per år utan bestämda tidsavstånd, oberoende av andra observationer. Om jag också vet att händelse B har inträffat och dessutom att händelse A inträffar i två fall av tre inom en dag efter att händelse B inträffat. Då ändras mina förväntningar från att A kommer att inträffa med ett genomsnittlig tidsintervall av 1 gång per månad, alltså en genomsnittlig väntetid på en halv månad till en mera närliggande tidpunkt.

Det existerar många metoder för stöd till slutsatsdragning genom osäkra kunskaper. De tre vanligaste är förmodligen baysiansk teknik (Bayes sats, bayesianska nätverk), Dempster-Shafers metod och Fuzzy Logic. De två tidigare finns ingående beskrivna i bland annat [56, 57, 58, 24, 59, 60, 61, 62] och beskrivs och jämförs därför endast i korthet nedan, medan den tredje behandlas i kapitel 4.3.1.

Bayes sats som förknippas med den engelske prästen Thomas Bayes (1702-1761) fanns i hans efterlämnade papper och presenterades första gången 1763 [57]. Dempster-Shafers metod bygger delvis på de namngivande personerna Arthur Dempster och Glen Shafers enskilda arbeten inom beslutsteorin, dels på samarbetet dem emellan. Metoden presenterades år 1973 och har av naturliga skäl inte utforskats och prövats på det ingående vis som Bayes gjorts. Av denna anledning kan mera exakta jämförelser vara svåra att prestera.

De metoder som redovisas här skiljer sig från exempelvis bibliotekssökning eller mönsterigenkänning genom att de i första hand ger stöd för eller emot ett visst påstående, ex. jag ser föremål A - bekräftas eller dementeras?, medan slagning i bibliotek kan med ett antal parametrar som grund ge förslag på tänkbara kandidater.

4.4.1 Baysiansk teknik

Bayes sats är ett verktyg som ofta används vid analys av sannolikheten för att en händelse ska inträffa. Satsen kan härledas ur en enkel multiplikationsformel för kombinerade sannolikheter och utgör en metod för att behandla betingade sannolikheter [24]. Man kan beräkna sannolikheten $P(b|a)$ för händelsen b betingat att händelsen a har skett om man känner det inversa sambandet, nämligen sannolikheten $P(a|b)$ för händelsen a betingat att b har inträffat samt de två händelsernas diskreta sannolikheter ($P(a)$ respektive $P(b)$) oberoende av varandra.

$$P(b|a) = \frac{P(a|b) \cdot P(b)}{P(a)}$$

Ett exempel på hur Bayes sats kan användas beskrivs nedan [24]:

Statistiken visar $P(s|h)$ att hjärnhinneinflammation (h) leder i 50% av fallen att en patient har stel nacke (s). Sannolikheten $P(h)$ att ha hjärnhinneinflammation är 1/50000 samt sannolikheten $P(s)$ att ha stel nacke är 1/20. Ur Bayes sats kan sannolikheten för hjärnhinneinflammation hos att en patient som klagar på stel nacke beräknas $P(h|s)$.

$$P(s|h) = 0.5$$

$$P(h) = 1/50000$$

$$P(s) = 1/20$$

$$P(h|s) = \frac{P(s|h) \cdot P(h)}{P(s)} = \frac{0.5 \cdot 1/50000}{1/20} = 0.0002$$

Patienten kan vara lugn, då det endast är 0.02% risk att han drabbats av hjärnhinneinflammation.

Om man alltså vet eller rimligt nog kan ange händelsernas sannolikheter samt den betingade sannolikheten för den ena händelsen kan den betingade sannolikheten för den andra händelsen beräknas. Bayes sats ger alltså en rent analytisk metod att behandla samband mellan utfallssannolikheter. Olika sammanhängande händelser eller nivåer av samband som i grupper om två eller flera behandlas med denna algoritm kan länkas samman i nya instanser genom samma algoritm. Ett mera komplext sammanhang, på olika sannolikhetsnivåer relaterade faktorer, kan då sammanvägas till ett av dessa resulterande utfall. Kännedom om de påverkande faktorernas tillstånd och förändringar bland dessa kan efter hand bidra till uppdateringar av det förväntade utfallet.

Bayesianska nätverk (BN) kan vara lämplig teknik för beslutsstöd om man har kännedom (objektiv eller subjektiv) om sannolikheten för olika specificerade samband och tillstånd som anses ligga till grund för ett utfall. Man kan också efter hand föra in ny kunskap, exempelvis om en faktor med viss angiven sannolikhet genom att ny kunskap kan delas upp i flera faktorer med högre konfidens i relaterade utfallssannolikheter. En begränsning med BN är att dynamiska förlopp i praktiska fall inte enkelt kan hanteras med godtycklig tidsupplösning. Beräkning av utfall måste göras i "tidskonstant" tillstånd. Om en förändring sker bland ingående faktorer eller deras tillstånd måste en ny totalberäkning genom hela nätverket företas (åtminstone fr.o.m. den nod som förändrats). Cykliska förlopp eller utfall som genererar en adaptiv reaktion kan medföra höga krav på beräkningskapacitet [60]. Om osäkerheten i subjektiva sannolikhetsantaganden är stor kan detta menligt påverka utfallet speciellt vid tidig slutledning varför denna "andra ordningens" osäkerhet måste ges en tydlig förklaring i beskrivning av modellens relevans.

4.4.2 Dempster-Shafer

En likartad metod för relaterade utfallssannolikheter är utvecklad av Arthur Dempster och Glen Shafer. I D-S-metoden beräknas inte sannolikheten för utfallet av hypoteser utan sannolikheten för att ett visst förhållande är ett bevis för att påståenden har stöd i detta (*belief function*) [57]. D-S använder sannoliksintervall och osäkerhetsintervall för att bestämma trovärdigheten för ett påstående. Det förstnämnda intervallet anger för varje ingående påstående graden av stöd för positivt utfall, medan det senare intervallet för varje påstående anger att det vare sig finns stöd för eller emot hypotesen. I D-S kan alltså förekomma obekanta eller odefinierade nivåer av stöd för eller emot ett viss ingående påstående. Komplementet till osäkerhetsintervallet är den del av det definierade evidensintervallet som inte har stöd för att påståendet är falskt. Hela intervallet består alltså av en del med sannolikt utfall, en del med möjligt utfall och en odefinierad del. Summan av dessa omfattar hela intervallet.

D-S tar alltså på ett kvantitativt vis hänsyn till områden som vi inte har något belägg för utfall åt vare sig ena eller andra hållet. Resterande området delas upp baserat på belägg för positivt respektive negativt utfall.

4.4.3 Jämförelse mellan Baysiansk teknik och Dempster-Shafer

I det allmänna fallet kan sägas som jämförelse mellan baysiansk analys och D-S att Bayes anger graden av sannolikt positivt utfall för en hypotes medan hos D-S anges intervallen för sannolikt positivt utfall, dito negativt samt ett osäkerhetsintervall utan stöd för vare sig det ena eller andra utfallet. Gränserna kan under vissa speciella omständigheter sammanfalla, varvid metoderna Bayes och D-S ger samma resultat. Det finns jämförande simuleringar inom områden som multisensorfusion för klassning eller identifiering av militära objekt som visar att Bayes i allmänhet svänger in mot en acceptabel konfidensgrad i sitt resultat snabbare än D-S. En orsak till detta kan vara att beräkningbördan i den baysianska tekniken är lägre än för D-S. Bayes kräver däremot initiala värden på kända sannolikheter (a priori) för ingående hypoteser vilket ofta kan vara svårt att säkert prestera i sammanhang som saknar statistiskt underlag, ex. ”förstagångshändelser” inbäddade i stor omgivande osäkerhet som vid militära operationer [58].

4.5 Planering

Med planering avses att ordna en sekvens av handlingsalternativ i tid och rum så att ett mål kan uppfyllas. Planering är ett enormt stort forskningsområde och någon djupare studie har inte gjorts inom förstudien. Planering förekommer inom ett flertal discipliner som t ex artificiell intelligens (AI), robotstyrning, reglerteknik, operationsanalys (OA), mfl.

Grafsökning som beskrivs i kapitel 4.2.3 kan t ex användas för enklare planering, då få handlingsalternativ finns. Med ökande antal handlingsalternativ växer grafen kraftigt och problemet blir i princip olösbart. Andra metoder är mer lämpliga då fler handlingsalternativ finns. En översikt över planeringsmetoder återfinns i [7]. [24] kan också rekommenderas för ytterligare studier.

En planeringsmetod som kan vara speciellt intressant för TK/SAT avvägning är *stokastisk dynamisk programering* (SDP). En nyligen utgiven rapport [63] beskriver metoden för resursallokering av sensorer, dvs. att flytta rätt sensor, till rätt plats, vid rätt tid för en optimal lägesbild.

4.6 Spelteori

Spelteori handlar om det teoretiska studiet av väl definierade spel för två eller flera spelare. Varje spelare har en mängd med drag han kan göra, samt en *värdefunktion* han ska försöka maximera. Värdefunktionen är beroende av dels spelarens drag, samt även alla andra spelares drag.

Historiskt sett kommer spelteorin från ekonomin och de flesta exempel är hämtade därifrån. Spelteorin har dessutom med lyckade resultat applicerats på en mängd biologiska system, exempelvis rovdjurs strategier och flockbeteende. Inom krigföringen förklaras kapprustningen, terrorbalansen och andra strategiska spel. Även inom informationskrigföringen har spelteoretisk modellering använts, bland annat i [64].

4.6.1 Nashjämvikt

När alla spelare gör ett val, som givet alla andra spelares val, är ett optimum för denne själv, sägs det råda nashjämvikt. Ingen spelare har någonting att tjäna på att ändra sina val (så länge ingen annan gör det heller). Spelet i sin helhet har uppnått ett slags lokalt maximum.

Mycket av spelteorin består i att finna nashjämvikter i spel. Antagandet är att dessa jämvikter förr eller senare alltid uppnås när man har rationella spelare. Teorin förutsäger även existensen och karaktären av nashjämvikter i olika typer av spel.

4.6.2 Spel med ren strategi

Spel med ren strategi är deterministiska spel där spelarna gör rationella deterministiska val.

Ett klassiskt exempel på spel med ren strategi är fångarnas dilemma. Spelarna är två stycken fångar som är anklagade för ett brott. De har att välja mellan att hålla tyst eller att anklaga den andre för brottet. Ingen kommunikation mellan dem är möjlig. Om de båda väljer att hålla tyst så får dom 1 års fängelse var. Om de anklagar varandra så får de 3 års fängelse var. Ifall bara en anklagar den andre, får den anklagade 4 års fängelse och den som anklagar frisläpps. Nashjämvikt råder vid fallet att båda anklagar varandra. Oavsett hur den andre gör så tjänar den första på att välja att anklaga.

Anledningen till att fångarnas dilemma är intressant, är att det finns många spel med samma struktur och jämviktspunkter.

4.6.3 Spel med blandad strategi

En annan typ av spel, där spelarna istället för att ha en bästa typ av deterministiskt val, har en ur väntevärdessynpunkt bästa fördelning hos en stokastisk variabel över sina möjliga beslut. I den här typen av spel så kan man inte förutsäga vad sin motståndare ska göra, utan bara koppla en sannolikhetsfunktion till hans drag. Om man ska modellera en telekrigsduell är det troligt att man hamnar i den här typen av spel.

Ett intressant resultat är att existensen av en nashjämvikt är garanterad i den här typen av spel om spelarna har ett ändligt antal valmöjligheter.

Spel med endera ren eller blandad strategi kan även vara utökade spel, med eller utan perfekt information. I sådana spel så studerar man en sekvens av val gjorda av olika aktörer. Även här kan man finna olika typer av jämvikter, dock inte i punkter, utan snarare i spår av val som de båda aktörerna gjort.

4.6.4 Svårigheter

Det svåraste med att använda spelteorin som ett verktyg måste vara att definiera spelen, modellerna som man arbetar med. Vilka valmöjligheter har spelarna? Vilken payoff har olika kombinationer av val? Duellsimuleringar kan vara ett sätt för att ta fram lämpliga payoff-funktioner.

Hela spelteorin grundar sig på att alla spelarna är rationella och perfekta egennyttomaximerare. Är det ett antagande man alltid kan lita på?

4.7 Sammanfattning

De metoder som beskrivs i kapitlet handlar bland annat om: hur strukturer för rationella beslut kan formuleras, hur det optimala kan beräknas, Fuzzy Logic för att hantera vaga begrepp, hur osäkerheter kan hanteras, spelteori. De metoder som avhandlas i kapitlet täcker långt ifrån alla metoder som skulle kunna användas för TK/SAT avvägning. Speciellt har planering som forskningsområde ej penetrerats i förstudien. Studien kring sensorplanering [7] kompletterar inom detta område.

5 Verktyg och teknik för avvägning

Metoderna som beskrevs i kapitel 4 behöver underlag för att kunna användas för beslutsfattande. I kapitel 4.1 beskrevs olika agentstrukturer. I de flesta av dessa har agenten en intern representation (bild) av egen status samt hur omgivningen utvecklas och vilken påverkan egna handlingar får. Den bilden kan byggas upp på ett flertal olika sätt som beskrivs nedan. I detta kapitel har en översikt över det optiska-, radar- och akustiska området gjorts.

5.1 Förutsättningar

5.1.1 Hotkännedom

För att värdera och avväga effekter av signaturanpassning och telekrigsåtgärder krävs god kännedom om aktuella hotsystems uppbyggnad, prestanda och taktiska utnyttjande. Vidare krävs kännedom om var hotet befinner sig relativt egna plattformar, dvs. riktning och eventuellt avstånd till hotet.

Både signaturanpassning och telekrigsåtgärder är avsedda att primärt påverka hotsystemens sensorer och därför är kännedom om sensorernas tekniska systemegenskaper av stor vikt. För elektrooptiska sensorer krävs mer detaljerade uppgifter om sensortyp, våglängdsområde, optik- och detektoregenskaper, synfält, upplösning, och känslighet. Även bildfrekvens kan vara av intresse för att bedöma sensors egenskaper i dynamiska förlopp. För radarsensorer tillkommer kännedom om bl.a. bandbredd, uteffekt, antennförstärkning, prf och avståndsupplösning.

För målsökare och målföljare önskas även information om aktiveringsavstånd, d.v.s. då spaningsfas påbörjas, avsökningsmönster, målföljningsprincip samt i tillämpliga fall målsökarlogik och därtill kopplade störskyddsfunktioner. Sensoregenskaperna kan tillsammans med signaturkännedom utnyttjas för att prediktera hotsystemets upptäckts- och klassificeringsavstånd av egen plattform.

Förutom kännedom om sensorernas systemegenskaper är det av stort vikt att ha kännedom om hur sensorerna används och samverkar med andra delar i ett hotsystem. För sensorer som används för invisning av indirekt eld, exempelvis granatkastare eller artillerisystem, krävs kännedom om hur sensorerna kan grupperas relativt eldgivande enheter, hur invisning sker samt uppskattade fördröjningstider från målupptäckt till avfyring. I VMS-sammanhang krävs kännedom om vapensystemets framdrivning, räckvidd, hastighet och banprofil för att bedöma egna systems förmåga att upptäcka och motverka hotet.

Detsamma gäller om sensorerna används i slutfasstyrda system som utnyttjar kommandostyrning eller belysarsystem. I kommandostyrda system siktar skytten mot mål med hjälp av visuella eller termiska sikten. Efter avfyring följer skytten målet med siktet som även mäter robotens position relativt siktlinjen. Robotens flygbana korrigeras med hjälp av styrkommandon som skickas genom tråd eller med radiosignaler. Exempel på kommandostyrda system är pv-robot AT-4 SPIGOT och MILAN.

Belysarsystem kan vara separerad från avfyrande plattform och utnyttjar vanligtvis sensorer inom det visuella, termiska IR eller mikrovågsområdet för att upptäcka och följa målet. Till spaningssensorn slavas en laser eller radarbelysare som belyser målet och robotens passiva målsökare styr mot mål med hjälp av reflexer från målet. Till skillnad från indirekt eld krävs att spaningssensorn har kontakt med målet fram till dess att roboten når fram. Exempel på

system som använder denna teknik är pv-robotsystemen HELLFIRE och KORNET samt laserstyrda glidbomber.

Gemensamt för systemen ovan är att spanings- och invisningssensorerna generellt befinner sig på relativt konstant avstånd från mål samt att en människa finns med i loopen. Detta senare gör det svårare att prediktera effekten av våra motåtgärder då individer reagerar olika beroende på användarens utbildningsnivå. För robotsystem med egen målinmätning och målföljning är förloppet mer dynamiskt då roboten anflyger mot mål. För dessa system krävs kännedom om robotens räckvidd, hastighet, banprofil, manöverförmåga och styrprincip.

Kännedom om hotsystems egenskaper och prestanda inhämtas före, under och efter genomförda uppdrag. Omvärldsbevakning kan ske med hjälp av öppna källor, som exempel kan nämnas tidskrifter, försvarsutställningar och konferenser. Dessa källor ger endast en grov uppfattning om hotsystemens prestanda och egenskaper samt innehåller i många fall missvisande information. För att få detaljerad kännedom om hotsystem krävs även tillgång till materielundersökningar och annan hemligstämplad information vilket tar lång tid och är resurskrävande. Information kan även inhämtas under uppdrag då plattformarna med hjälp av egna sensorer registrerar egenskaper för aktuella hotsystem. Efter genomfört uppdrag bearbetas och analyseras inhämtad information och biblioteksfunktioner uppdateras inför nästa uppdrag.

För att exemplifiera vilka typer av parametrar som kan vara aktuellt att beskriva för ett hotsystem, ges nedan exempel på kända och öppna systemegenskaper för pv-robotsystemet AT-4 SPIGOT [65], [66].



Figur 23 AT-4 SPIGOT

Våglängdsområde:	0.4-0.7 μm
Synfält:	5°
Förstoringssgrad:	10 ggr
Max målföljning sida:	1.5°/s
Max målföljning höjd:	1.5°/s

Tabell 2 Data för visuellt sikte 9P135

Våglängdsområde:	8-12 μm
Detektortyp:	CMT
Synfält:	2,4 x 4,6°
Spatiell upplösning:	0,5 mrad
Temp. upplösning:	0,15-0,2 C°
Detektionsavstånd:	3200 m (måltyp och insatsmiljö anges ej)
Id-avstånd:	1600 m

Tabell 3 Data för termiskt nattsikte Mulat-115 (1PN86-V/VI)

Räckvidd:	75–2500 m
Medelhastighet:	180-200 m/s
Banprofil	Line of sight
Invisning:	Trådstyrning SACLOS

Tabell 4 Data för pv-roboten i AT-4 Spigot

5.1.2 Miljö- och geografiska data

För att kunna genomföra ett uppdrag med minimal signatur och maximal effekt av telekrigsåtgärder är kunskap om miljön och terrängen av stor vikt. God kunskap om miljöförhållandena ger också förbättrade möjligheter att bedöma motståndarens förutsättningar i form av sensorförmåga och vapenverkan. En sammanställning av underlagsbehovet för signaturanpassning fokuserad på internationella insatser finns i [67] men sammanställningen torde vara allmänt intressant.

Miljön karakteriseras av flera olika faktorer som brett påverkar taktiken och kan exempelvis delas in i följande kategorier:

Topografin som påverkar möjligheterna till framryckning, möjligheten till fri sikt samt vapens verkansområde.

Terrängtypen som förmodligen den mest avgörande faktorn. Exempel på terrängtyper är skog, småbrutet landskap, urban miljö. Olika vegetationstyper. Infrastrukturen kan räknas in här såsom vägar, broar, flygfält.

Bakgrunden som här avser den lokala bakgrunden i vilken plattformen ska smälta in. Varje terrängtyp erbjuder ett antal olika bakgrunder som ger olika förutsättningar för signaturanpassning och telekrig. För det optiska området där strålningen har försumbar penetrationsförmåga är kunskap om vegetation och ytmateriel viktig.

Flera olika kompletterande metoder finns för att skaffa miljöinformationen. De är användbara i lite olika tidsperspektiv och grovt kan man tänka sig olika faser i informationsinhämtandet:

Före operationen kan allmän områdesinformation samlas in över ett relativt stort område.

I samband med uppdragsplaneringen krävs en mer noggrann beskrivning av miljön där uppdraget ska genomföras. Underlaget ligger till grund för detaljerad planering och kan användas för att jämföra olika handlingsalternativ.

Under uppdraget behöver den lokala miljön, och framför allt bakgrunderna, bedömas. Behov att "se runt hörnet" kan finnas.

Olika metoder att skaffa miljöinformation finns som är användbar i en eller flera av faserna ovan. Några exempel är:

Satellitspaning som kan ge högupplösta bilder ner till en halvmeters upplösning åtminstone och därmed god terrängkännedom. Spaning i flera våglängdsband ger dessutom möjligheter till klassificering av vegetationen, bebyggelse och infrastruktur.

Flygspaning som också ger bilder men med ännu bättre upplösning. Spaning på låg höjd, bl.a. med hjälp av UAV, kan ge ytterligare information genom att spaning kan ske i flera vinklar och geometrier och bakgrunder bättre kan uppskattas, se exempelvis [68]. Men hjälp av laserbaserade sensorsystem kan en 3D karta av området tas fram.

Observationer från mark, där olika typer av information kan erhållas från observationer av civilpersoner eller militär spaning.

Befintligt kartmaterial som är den traditionella metoden för miljöinformation som bygger på kommersiellt eller militärt underlag. Bygger på tidigare flygspaning och karakterisering från mark före konflikten. Underrättelseverksamhet ger stöd.

Egna sensorer på plattformen kan användas för att skapa en aktuell miljöbeskrivning. Sensorerna kan arbeta i flera olika våglängdsband och vara både passiva och aktiva. Om flera plattformar samverkar kan en gemensam kartbild byggas upp.

Taktisk kartering som är ett samlingsbegrepp för datafångst och databehandling för uppdragsplanering. Information från alla metoderna ovan avses med syftet att ständigt förbättra kunskapen om insatsområdets miljö. En förstudie presenteras i [69].

Omvärldsmodeller framtagna utifrån insamlade eller estimerade data av terrängen. Den kan vara tredimensionell och mer eller mindre väl beskriva olika egenskaper hos miljön inom kategorierna geometri, terrängtyp, bakgrund, vegetation, mm. En första modell kan finnas före operationen och den kan sedan i flera steg förbättras allteftersom mer data kan utnyttjas. Relaterar till både Taktisk kartering och GIS-system.

GIS-system (Geografiska InformationsSystem) vilket inte är en insamlingsmetod i sig utan ett sätt att strukturera och samla miljöinformation. Datafusion är centralt och GIS-system kommer att få en allt större roll i framtiden.

5.1.3 Atmosfärs- och väderinformation

Framför allt inom det optiska området är signaturen starkt beroende av väderförhållandena i form av atmosfärs effekter i sträckan mellan plattform och sensor. Låg transmission ger upphov till kontrastnedsättningar och signaturen suddas ut. Väderförhållandena påverkar också plattformens signatur mer direkt i och med att in- och utstrålning hos mål och bakgrund ger upphov till temperaturdifferenser som ökar kontrasten, se vidare kapitel 5.1.4. Aktuella väderparametrar är en förutsättning för prediktion av såväl objekt som lokal bakgrunds aktuella signaturnivå i det optiska området. Detektionsavståndet för akustiska signaler beror till stor del på hur ljudhastighetsprofilen ser ut och har en direkt koppling till aktuell vädersituation. Blåst och nederbörd har en direkt påverkan på sensorfunktionaliteten med en förhöjd brusnivå i systemet som följd.

Inom radarområdet är den atmosfärska dämpningen, som orsakas av t ex atmosfärgaser och partiklar (föroreningar, dimma, damm etc.) mellan plattform och sensor, mycket liten i

jämförelse med det optiska området. Det är därför inte lika kritiskt att ha detaljerad atmosfärs- och/eller väderinformation som för det optiska fallet. Dock kan bakgrundsreturen påverkas kraftigt på grund av t ex nederbörd.

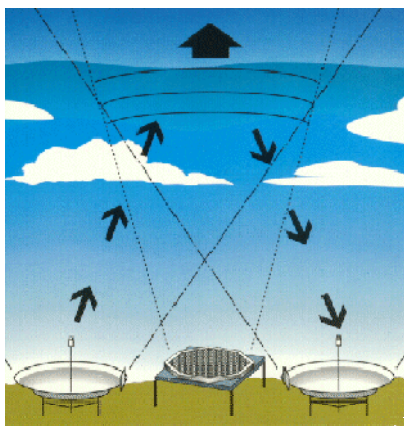
Olika källor finns för väderdata, både statistiska och aktuella mätningar, se vidare [67]. För prognosframtagning finns olika typer av modeller. Atmosfärens transmissions- och strålningsegenskaper kan beräknas för alla våglängdsband med hjälp av speciella program. På samma sätt som för kunskap om miljön kan olika faser identifieras: Före operationen, I samband med uppdragsplaneringen och Under uppdraget. Olika metoder, datakällor och modeller är användbara i de olika faserna. Nedan följer en översikt som innefattar samtliga faser.

Källor för väderinformation är:

Statistik från synoptiska data Data från normala regelbundna observationer, som har registrerats och tidigare använts som prognosunderlag, kan användas för statistisk analys av väderförhållanden för ett visst område. "Hur brukar vädret vara?"

Observationer Kan genomföras av central vädertjänst eller av personal som ingår i förbandet, exempelvis med hjälp av en väderstation. De väderparametrar som är viktigast för att beräkna signatur (och sensorprestanda) i det optiska området är temperatur, relativ fuktighet och sikt. Förutom dessa är ur signaturanpassningssynpunkt även övriga väderparametrar (vindhastighet, vindriktning, nederbörd) viktiga. In- och utstrålning (både kort- och långvågig) är viktig för att t.ex. kunna bedöma vilket maskeringsskydd som erfordras i IR-området. I radio/radarfallet är speciellt nederbörd starkt räckviddsbegränsande. SYNOP är de väderobservationer som rapporteras varje timma. Denna datatakt kan vara för långsam ur signaturanpassningssynpunkt eftersom vädret – särskilt molnigheten – brukar variera snabbt. Kontinuerlig registrering av väderdata via en automatisk väderstation kan vara att föredra

Vind och temperaturprofil med R.A.S.S. (Radio Acoustic Sounding System) Har förmågan att mäta ljudhastigheten och lufttemperaturen genom att analysera bakåtspridd radiostrålning beroende på inhomogen påverkan av atmosfären med hjälp av akustiska pulser [70].



Figur 24 Mätning av vind och temperaturprofil med R.A.S.S.

Aerosolkartläggning med LIDAR Lidarsondering innebär att pulsad laserstrålning emitteras i en stråle ut i atmosfären och bakåtspridd strålning, som sprids av partiklar, detekteras i en mottagare som är placerad intill lasern. Ur den detekterade strålningen

kan atmosfärens transmission som funktion av avståndet från LIDAR-systemet beräknas. Finns inte operativt ännu.

Satellitdata Sedan 1960-talet har satellitbilder varit ett av de viktigaste verktygen i meteorologernas arbete. I allt högre grad används satellitdata som indata till numeriska prognosmodeller. De viktigaste vädersatelliterna är f.n. NOAA- och Meteosat satelliterna. På SMHI behandlas data från dessa för SMHIs och FMs behov [71].

In-situmätning av väderdata På utvalda plattformar kan vädersensorer placeras för att under ett uppdrag kunna karakterisera atmosfärsförhållandena. Informationen är nödvändig för att ständigt kunna känna sin signatur, se kapitel 5.1.8, men också för att uppskatta de egna sensorernas förmåga att upptäcka hot. Informationen kan utbytas mellan plattformar.

Några exempel på modeller för väderprognoser och beräkning av optiska atmosfärsegenskaper är:

HIRLAM (High Resolution Limited Area Model) är ett samarbetsprojekt mellan vädertjänsterna i de fem nordiska länderna, Irland, Nederländerna, Spanien samt Frankrike. Prognoser som kan tas fram är t.ex. 1d HIRLAM som ger atmosfärsdata i en luftpelare över en valfri punkt angiven i latitud och longitud som funktion av tiden. För varje tidssteg ges dessutom värden för regn, snö, fuktdis, dimma, åska, vind (riktning och styrka), sikt, temperatur samt daggpunkt. En annan typ är 3d HIRLAM där information för en yta presenteras i kartform.

Climat och EOSAEL Climat ingår i programpaketet EOSAEL från amerikanska Army Research Laboratory (ARL) och är en klimatologisk modul. Data från 795 stationer i stor del av världen registrerade under elva år, har lagt grund för en klimatmodell indelad i 74 icke överlappande regioner.

Öppna källor på Internet Tjänsten WorldClimat på internet kan exemplifiera det utbud som finns tillgängligt. Här kan man få medelvärden månadsvis för temperatur och nederbörd för valfri plats i världen.

MODTRAN Standardprogram för beräkning av atmosfärens påverkan på strålning vid optiska våglängder med spektralupplösningen 2 cm^{-1} , se [72]. Även tänkbart att använda i plattformssystem.

FASCODE Samma funktion som MODTRAN men med högre spektralupplösning (linjeupplöst). Utnyttjar databasen HITRAN.

Modeller för strålbaneberäkningar Vid beräkning av optisk vågutbredning genom atmosfären över havsytan, måste man ta hänsyn till de speciella effekter som råder vid gränsytan mellan luft och hav, t.ex. avböjning. Exempel på programpaket där strålbaneberäkning ingår är IRBLEM, ARTEAM och EOSTAR.

5.1.4 Signatur inom optiska området

Signaturkännedom är en förutsättning för avvägningen mellan SAT och TK. I [73] berörs frågan för ett markfordon. Med Optiska området avses här hela spektret från termisk IR (TIR) till visuellt och ultraviolett (UV). Termisk IR (TIR) kan delas upp i områdena SWIR, MWIR och LWIR.

Med optisk signatur avses olika egenskaper hos ett objekt som kan registreras med en optisk sensor. D.v.s. egenskaper som åstadkommer någon slags kontrast mot objektets bakgrund och kan användas för att diskriminera objektet relativt bakgrunden, huvudsakligen:

- Egenstrålningsnivå
- Reflektans
- Spektral fördelning
- Temporala variationer
- Rumslig utbredning; storlek, form, inre struktur
- Rörelse
- Indirekta effekter: spår mm

Signaturen beror både av objektet i sig och av sensorsystemet. Dessutom spelar miljöfaktorer in. Strålning från omgivningen kan speglas i objektet och atmosfären dämpar alltid strålningen från objektet på dess väg mot sensorn. Sammanfattningsvis kan sägas att en plattformens signatur eller kontrast mot bakgrunden ges av

- Plattformens inneboende egenskaper
- Plattformens status och attityd för tillfället
- Bakgrundens och omgivningens egenskaper
- Atmosfärens egenskaper
- Hotsensorn egenskaper

Strålningsnivån från ett objekt ges av egenstrålningen från objektet och av den i objektet reflekterade strålningen. Skrovets egenstrålning ges av dess temperatur och emissiviteten hos ytan. Högre temperatur och emissivitet ger högre strålningsnivå. Höjd temperatur kan bero på interna värmekällor vars värme förs ut till ytersidan av skrovet genom ledning eller via luftutblås. Reflekterad strålning från omgivningen kan bestå av naturliga strålningskällor såsom sol, himmel och mark men även av artificiella källor såsom t.ex. laser. Den totala strålningsnivån från ett objekt kan skrivas:

$$L_{\text{objekt}}(\lambda) = \varepsilon(\lambda)L^{BB}(T_{\text{objekt}}, \lambda) + \rho(\lambda)L_{\text{omgivning}}(\lambda)$$

där

ε ytans emissivitet

ρ ytans reflektivitet

$L_{\text{omgivning}}$ omgivningens strålningsnivå

$L^{BB}(T_{\text{objekt}}, \lambda)$ strålningsnivån från en svartkropp med temperaturen T_{objekt} , se nedan

Dessutom gäller att reflektansen hos en yta är ett minus emissiviteten (om transmissionen försummas): $\rho=1-\varepsilon$. En yta som har låg emissivitet, och därmed låg egenstrålning, reflekterar i högre grad omgivningen. Emissiviteten är dessutom ofta kraftigt vinkelberoende.

Strålningen från skrov, partiklar i förbränningar, med mera består i regel av svartkroppstrålning. Dess nivå och spektrala fördelning ges av Plancks strålningslag som ger att strålningsnivån ökar kraftigt med temperaturen men varierar relativt långsamt med våglängden.

Strålningsnivån från avgaser ges av mängden strålande gas i förbränningen samt temperaturen. Finns det partiklar i förbränningen ges nivån av partikelmängden och temperaturen. Van-

ligaste bränslet är olika typer av kolväteföreningar och dessa ger huvudsakligen koldioxid CO_2 och vattenånga H_2O som slutprodukt. Båda dessa molekyler har starka emissionsband i MWIR och utgör därför en väsentlig del av signaturen.

Beroende på sensorsystem så är objektets geometriska utbredning mer eller mindre kännetecknande. I ett icke avbildande sensorsystem är det den totala strålningsnivån som finns i sensorns synfält som är viktig. Geometriska detaljer kan inte registreras. För ett avbildande system är däremot storlek, form och inre struktur dessutom av betydelse.

Objektets rörelse är också en del av signaturen och är något som kan användas dels för att hitta ett mål i bakgrunden men också för att skilja mellan olika objekt, t.ex. mål och skenmål. Till signaturen hör också indirekta signaturer såsom spår. Spåret visar på någon tidigare rörelse som kan vara karakteristisk.

Atmosfären påverkar signaturen hos objektet och måste därför också alltid beaktas. Dämpningen som orsakas av atmosfären härrör dels från absorption i luftens molekyler, framför allt vattenånga och koldioxid, och dels från absorption och spridning i luftens aerosoler. Molekylabsorptionen varierar mycket med våglängd medan aerosoldämpningen uppvisar ett förhållandevis svagt beroende av våglängd.

Vid värdering av signatur är kunskap om bakgrunden högst väsentlig. Det är hela tiden kontrasten mellan målet och bakgrunden som styr hur ett sensorsystem uppfattar målet. Himlen och marken har olika strålningsegenskaper och kommenteras här var för sig.

Himmelsbakgrunden består av svartkroppsstrålning från moln respektive solen samt av linje-strålning från atmosfärens gasmolekyler. En klar dag med lite moln ger lägre nivåer, himlen ser "kall" ut. Solstrålningen sprids i aerosoler, t.ex. moln, samt filtreras spektralt mer eller mindre av atmosfären. Solstrålningen är betydelsefull för våglängder kortare än ca $3,5 \mu\text{m}$ medan strålningen från moln och gaser är mest betydelsefull för längre våglängder.

Markbakgrunden har i huvudsak svartkroppskaraktistik och kontraster i bakgrunden ges till största delen av temperaturskillnader. Temperaturskillnaderna blir störst när instrålningen från solen är som kraftigast, d.v.s. en klar dag. Mulet väder ger låga kontraster och regnväder ännu lägre. Vid solsken kan reflexer förekomma i högre reflekterande markobjekt, t.ex. plåttak, glasrutor mm, för korta våglängder. Vid klart väder speglar dessutom dessa objekt in himlen, som är kallare än marken, vilket medför att kontrasten blir negativ.

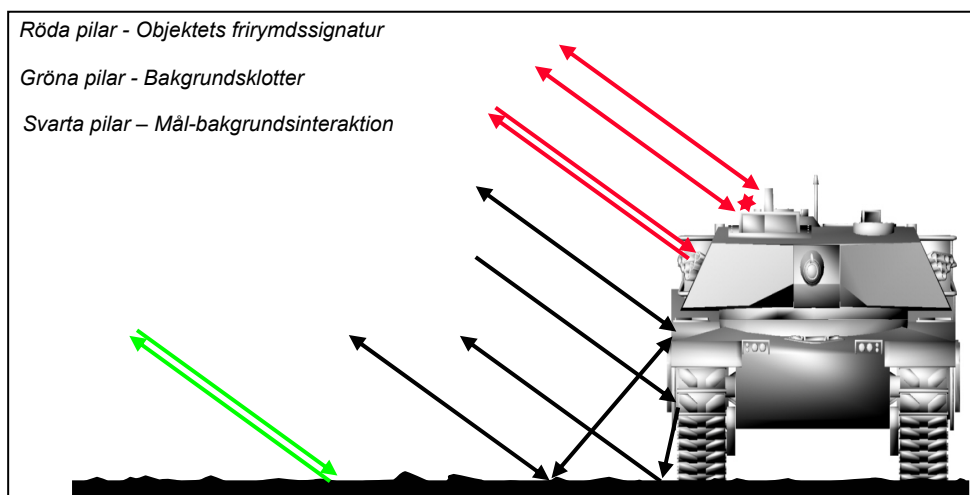
5.1.5 Signatur inom radarområdet

En förutsättning för att man överhuvudtaget skall ha möjlighet att kunna ha relevant signaturkännedom är att man har kännedom om hotet och hotsensorns prestanda (se avsnitt 6.1.1), t.ex. uppgifter om frekvensband, polarisation, uteffekt, dynamik mm. Dessutom krävs att man har möjligheter att utföra relativt goda bedömningar i vilken riktning hotet finns samt hur tidskritiskt hotet är. Riktningensbestämningen kräver olika noggrannhetsgrad vid olika typer av aktuellt hot. Man kan t.ex. tänka sig att spaningshotet finns i relativt breda vinkelsektorer och att tiden mellan upptäckt och bekämpning är relativt lång medan hotet från en missil eller robot med radarmålsökare är långt mycket smalare i vinkel samt mer tidskritiskt.

Med radarsignatur avses olika egenskaper hos ett objekt som kan registreras med en radar sensor. Man kan, teoretiskt, dela upp de olika komponenterna som ger bidrag till den totala

radarsignaturen på följande sätt:

- Frirymdsmålarean för objektet, dvs returen från objektet som om det skulle befinna sig i bakgrundsfri miljö.
- Bakgrundens egenretur (klotter).
- Interaktionsbidrag mellan objekt och bakgrunden, se Figur 25



Figur 25 Schematisk figur på hur man kan dela upp den totala radarreturen i olika komponenter.

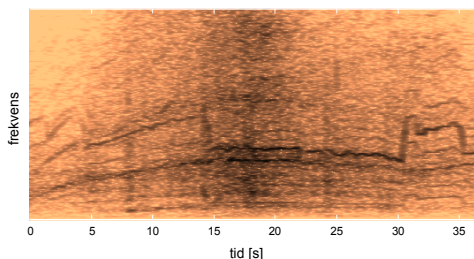
Dessutom påverkas möjligheten att detektera, klassificera, identifiera och/eller mållåsa av radarns prestanda, dvs. parametrar som uteffekt, bandbredd, koherens, polarisation mm är viktiga parametrar som man bör ta hänsyn till då man utför signaturanpassningsåtgärder på ett objekt. I kapitel 5.2.1.2 beskrivs hur man kan påverka och/eller styra signaturen delvis utifrån de punkter som beskrivs ovan.

5.1.6 Akustisk signatur

I likhet med IR området är sensorn passiv, så många av det områdets egenskaper går att jämföras med akustik och liknande resonemang sker:

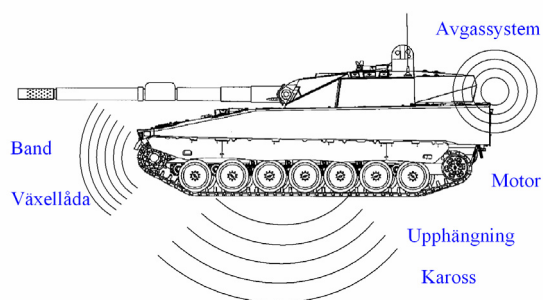
Akustisk signatur är något som åstadkommer någon slags kontrast mot bakgrundsnivån som kan användas för att diskriminera objektet relativt bakgrunden, huvudsakligen genom objektets:

- Egenstrålningsnivå
- Spektral fördelning
- Temporala variationer, växlingar och olika belastningsfall
- Riktningskaraktär
- Rörelse, doppler



Akustisk signatur uppkommer främst från de delar där stora mängder luft sätts i rörelse som till exempel från rotern på en helikopter eller avgassystemet på ett markfordon. Från respektive akustisk källa skapas övertoner i olika nivåer, dessa i kombination med de olika grundtonerna kallas den akustiska signaturen. Det går att dela in signaturer i olika klasser där motortypen är samma men drivlinan är olika. Ett exempel på denna uppdelning är mellan

band- och hjulfordon. Se Figur 26.



Figur 26 Ett markfordon med olika akustiska källor

5.1.7 Mått för signatur

Vid avvägningen mellan plattformens signaturstatus i olika våglängdsband och övriga förhållanden måste något slags signaturmått användas. Olika mått är tänkbara som alla har styrkor och svagheter beroende på hur de tas fram och hur de ska användas. I Tabell 5 finns några rimliga krav sammanställda som man kan ställa på ett signaturmått.

Krav	Exempel på mått som kan uppfylla kravet	Kommentar
Vara lätt att mäta upp eller beräkna	<u>Optiska området</u> • Temperturdifferens mål-bakgrund • Temperatur eller radians hos målet • Radiansdifferens mål-bakgrund • Visuell färgskillnad mål-bakgrund <u>Radarområdet</u> • Radarmålarean för ett objekt i frirymd eller i några olika typer av bakgrund. • Doppler signaturen från ett objekt i rörelse. <u>Akustiska området</u> • Utstrålad ljudnivå från objekt • Bakgrunds nivå • Störnivå från andra närliggande ljudkällor • Spektralt innehåll	De olika måtten ställer olika krav på sensorer.
Vara generellt för olika aspekter på signatur	• Generaliserade kontrastmått • Upptäckts-/Klassificerings-/Identifierings-/Mållåsnings- ▪ tid ▪ avstånd ▪ sannolikhet	För texturmått se till exempel [74].
Vara oberoende av andra mått - separerbart	Måtten ovan fast utan hänsyn till bakgrund och atmosfär (samt hotsensor).	Fördelen är att bakgrund och atmosfär skulle kunna måttsättas oberoende av målet.
Harmoniera med övriga mått i avvägningsprocessen	• Upptäckts-/Klassificerings-/Identifierings-/Mållåsnings- ▪ tid ▪ avstånd ▪ sannolikhet	Förenklar sammanvägningen.

Tabell 5 Signaturmått

Det är förmodligen omöjligt att hitta ett mått som uppfyller alla dessa krav. Måtten kommer vara aspektberoende och i vissa fall avståndsberoende. Valet av mått kommer att vara väsentligt för hur avväggningsprocessen struktureras. Frågan om absolutmått eller relativmått ska användas är väsentlig. En diskussion om val av signaturmått i samband med kravsättning förs i [75].

5.1.8 Att känna sin signatur

Utbudet av metoder för att känna sin signatur spänner över ett stort område och nedan är ett sätt att strukturera metoderna. Prediktionerna som nämns nedan kan vara på olika detaljnivå. Avgörande är vilken noggrannhet som behövs och vilken tid som finns tillgänglig. Enklast är någon slags Look-up tabell som ger ett signaturmått som funktion av olika indata. Det är en mycket snabb metod men kan kräva en mycket stor databas som är baserad på mätdata eller beräkningar. Endast en mindre mängd inparametrar kan sannolikt hanteras. Mest komplicerad är en fysikaliskt baserad signaturberäkning av mål i bakgrund. I det optiska området kan den t.ex. vara baserad på raytracing. Däremellan kan olika förenklade modeller och algoritmer ligga som exempelvis bygger på antaganden om oberoende indata och linjäriserade modeller.

Listan nedan avser både fallet att den aktuella signaturen ska bestämmas och fallet att man ska prediktera vad signaturen kommer vara i framtiden för att kunna värdera olika handlingsalternativ. Fyra olika klasser kan identifieras:

Generell signaturkännedom

Bygger på att signaturen är känd för ett normalfall genom tidigare genomförda mätningar eller beräkningar. Denna information ger plattformens förutsättningar att upptäckas under vissa förutbestämda förhållanden. (terrängtyp, hotsensortyp, tid på dygnet, etc.). Detta kan sägas representera normalfallet för dagens taktiska uppträdande. Ju fler signaturmätningar under olika förhållanden som gjorts i förväg desto bättre känner man plattformens signatur.

Prediktion ombord utifrån basinformation

Viss aktuell information används för att prediktera signaturmåttet. Exempel på information är: driftstatus motor, gångtid, aktuell bakgrundstyp och status, molnighet, aspekt mot hotet. Beräkning sker ombord och är baserad på kunskap om fordonets inneboende egenskaper. Modeller krävs för att omsätta tillgänglig information till en prediktion av signaturen. Modellerna bör vara validerade i förväg och osäkerheterna kvantifierade på något sätt. Vissa situationer är troligen lättare att prediktera medan andra ger större osäkerhet.

Prediktion ombord baserad på detaljerad plattforms- och bakgrundsmätning

Detaljerad information finns tillgänglig från sensorer ombord eller i omgivningen. Det kan vara temperatursensorer i skrovet, radiometrisk mätning av bakgrund, solinstrålningsmätare, vindmätare, lufttemperatur, markfuktighet mm. Utbyte av information mellan plattformar kan förbättra funktionen. Fordonets inneboende egenskaper måste dessutom vara kända i detalj. Med hjälp av modeller kan nuvarande och framtida signatur predikteras. En intressant alternativ idé är att ha någon slags signatursensor ombord som inte mäter de fysikaliska storheterna i sig utan ger ett signaturrelaterat värde för den aktuella situationen. Hur en sådan ska se ut behöver studeras vidare men syftet skulle vara att få bra funktion med ett fåtal sensorer.

Ömsesidig signaturmätning

Signaturen hos plattformen mäts upp med en sensor på en samverkande plattform och förmedlas till den uppmätta plattformen. Sensorns egenskaper i förhållande till hotsensorns måste vara kända. Modeller ombord hanterar skillnader avseende sensortyp, aspekt, avstånd, mm. Det ger ett säkert signaturmått under förutsättning av skillnaderna mellan den samverkande sensorn och hotsensorn inte är för stora. Den ömsesidiga signaturmätningen kan också ligga till grund för prediktionen av signatur i klassen beskriven ovan.

5.2 Åtgärder

”Skyddslöken” som beskrivs i kapitel 2.3.2 visar de skyddsskal av åtgärder som omsluter en plattform eller ett förband. ”Skyddslöken” innefattar en mängd olika skyddsåtgärder, i detta kapitel avhandlas dock främst telekrig- och signaturanpassningsåtgärder.

5.2.1 Signaturstyrning

Syftet med signaturstyrningen är att undvika detektion, klassificering, identifiering och/eller mållåsning och kan användas som enskild åtgärd eller tillsammans med motmedelsinsats. Som underlag för styrningen krävs signaturkännedom, se avsnitt 5.1.8 ovan. Det är avgörande för effekten av signaturstyrningen att signaturens karaktär är känd.

Processen för att styra signaturen består av flera olika moment och initieras av något behov som uppstått eller som kommer att uppstå. Ett förslag på en process ges här:

1. Ett givet signaturmått måste minska
2. Möjliga åtgärder identifieras
3. För varje åtgärd (och kombinationer) beräknas optimala bör-värden för mätvariabeln hos åtgärden. Exempelvis: bör-värde skrovtemperatur, bästa aspekt mot hotet.
4. Utgående från bör-värden och bör-värden hos mätvariabler beräknas styrparametrar för åtgärden. Modeller ligger till grund för bestämning av i vilken grad bör-värdena kan uppnås och under vilka förutsättningar (tidsbehov, ändrad hastighet, mm)
5. Nya signaturmått beräknas som tillsammans med nuvarande signaturmått ger ett effektmått för åtgärden. Se avsnitt 5.1.7.
6. Beslut tas i avvägningsprocessen om åtgärden ska genomföras.

5.2.1.1 Signaturstyrning inom det optiska området

Exempel på åtgärder inom det optiska området för att minska sin signatur är:

- Manöver för att vända lågsignatursidan mot hotet
- Motoravdrag för att minska termisk signatur
- Övergång till annan framdrivning (t ex el-motor)
- Användning av terrängmask
- Vägval för att minska spårbildning och indirekta effekter.
- Sänkning av skrovtemperaturen
- Förändring av skrovytornas emissivitet eller färg
- Aktivering av maskering (kamouflering)

Detta kapitel innehåller inte någon teknikgenomgång men några tekniker för de olika åtgärderna kommenteras kort här. Sänkning av skrovet och avgasernas temperatur är en mycket

relevant åtgärd. Den är robust och har effekt i hela TIR-området. Nackdelen är att det kan vara en energislukande åtgärd som i sig skapar ett ännu större värmeöverskott i plattformen. Exempel på metoder är att använda luft eller vatten i skrovmonterade paneler för att anpassa temperaturen. Vanligtvis innebär det temperatursänkning men värmning är också tänkbart. En demonstration av ett sådant system redovisas i [73]. Det momentana värmeöverskottet får ventileras ut i ofarlig riktning eller på något sätt lagras i plattformen till hotet har minskat. En annan metod som framför allt är intressant för fartygstillämpningar är vattenbegjutning där skrovets temperatur sänks genom sprinkling.

En annan teknik bygger på att emissiviteten eller färgen hos ytmaterialet ändras. Olika lösningar har demonstrerats med ligger än så länge på forskningsstadiet. Exempel på metoder finns beskrivna i [76].

5.2.1.2 Signaturstyrning inom radarområdet

Signaturstyrningsåtgärder kan utföras för att uppnå snabba kamouflerande effekter, t ex vid pålåsning av en robot då snabba åtgärder måste vidtagas. Det är viktigt att betona att signaturåtgärder inte alltid är allenaåtgärder för att vilseleda eller smyga utan snarare ett komplement till att effektivisera telekrigsåtgärder, t.ex. remsmoln, facklor och/eller störåtgärder. Exempel på åtgärder inom radar området för att minska sin signatur är:

- Manöver för att vända lågsignatursidan mot hotet
- Användning av terrängmask
- Vägval för att minska spårbildning och indirekta effekter.
- Förändring av skrovytornas radaregenskaper, dvs mer absorberande eller reflekterande. Detta kan göras med hjälp av elektriskt styrda material eller genom att beklä objektet med olika ”signatur kostymer”.
- Formförändringar (snabba och på design stadiet).
- Stanna för att undvika dopplerlåsning.
- Aktivering av maskering (döljning)

5.2.1.3 Signaturstyrning inom akustik området

Klassisk akustiska signaturanpassningsåtgärder bygger på att utnyttja alternativ framdrivning i kritiska lägen samt att utnyttja väderlek och välja den framryckningsväg som ger lägst signatur. Vissa ljudkällor är av naturen svåra att kamouflera så alternativa åtgärder som till exempel vilseledning kan användas. Ett exempel på vilseledning är att använda fordon (skenmål) med mycket kraftig signatur i en annan position/riktning för att maskera ljud från fordon där själva operationen genomförs.

5.2.2 Telekrig

Telekriginsatser syftar till att förhindra, fördröja och försvåra motståndarens spaning och inmätning av våra plattformar. Val av motmedelsteknik bestäms av egenskaper hos eget VMS, kännedom om hotets egenskaper, egen position samt aktuell uppdragsfas. Andra påverkande faktorer är egen signatur, manöverförmåga, gällande ROE (Rules of Engagement) samt väder och vindförhållanden, se kapitel 2.3. I Tabell 6 och Tabell 7 presenteras möjliga motmedelstekniker inom radar och EO-området samt deras önskade hotpåverkan i insatsfaserna spaning, inmätning och följning [65], [77].

Insatsfas	Motmedel	Verkan
Spaning	Brusstörning	Reducerar hotets detektionsavstånd ²⁵
	Täckpulsstörning	Döljer egen plattform.
	Repeterstörning (DRFM)	Skapar många falska mål.
	Remsor	Döljer egen plattform eller skapar falska mål.
	Skenmål	Skapar falska mål.
	Hett klotter	Skapar skenmål genom att belysa marken
Inmätning	Brusstörning	Försvarar målinmätning.
	Repeterstörning	Skapar falska mål som försvarar målval.
	Remsor	Döljer egen plattform eller skapar falska mål som påverkar målval.
	Skenmål	Skapar falska mål och försvarar målinmätning
	Hett klotter	Skapar skenmål genom att belysa marken
Följning	Repeterstörning	Skapar falska mål med syfte att avhaka hotet.
	Remsor	Döljer egen plattform och skapar falska mål med syfte att avhaka hotet.
	Skenmål	Skapar falska mål med syfte att avhaka hotet.
	Hett klotter	Skapar skenmål genom att belysa marken

Tabell 6 Möjliga motmedel inom radarområdet

Insatsfas	Motmedel	Verkan
Spaningsfas/ sökfas	Antisensorlaser.	Bländning av hotsensor.
	Facklor/rök/vattendimma	Döljer egen plattform
	Skenmål	Skapar falska mål
Inmätning	Antisensorlaser.	Bländning av hotsensor.
	Vilseledande laser, blinkstörare	Skapar falska mål.
	Facklor/rök/vattendimma	Döljer egen plattform och försvarar inmätning.
	Skenmål	Skapar falska mål och försvarar målinmätning
Målföljning/ följefas	Antisensorlaser.	Bländning hotsensor.
	Vilseledande laser, blinkstörare	Skapar falska mål med syfte att avhaka hotet.
	Facklor/rök/vattendimma	Döljer egen plattform och skapar falska mål.
	Skenmål	Skapar falska mål med syfte att avhaka hotet.

Tabell 7 Möjliga motmedel inom elektrooptiska området

Utformning och värdering av störformer och kast/fällmönster kan ske genom en kombination av simuleringar och fältförsök. Resultat från dessa värderingar kan användas i algoritmer och åtgärdsbibliotek i VMS på plattformar för att prediktera utfall av insats. För aktiva motmedelssystem kan man utifrån kännedom om egen signatur, egna och motståndarens system samt geometriska förutsättningar, beräkna sannolik störverkan i form av räckviddspåverkan, effekter av falskmålsgenerering och i vissa fall predikterat bomavstånd. För passiva motmedelssystem med avsikt att avhaka inkommande hot används beräknat bomavstånd som en avvägningssparameter. I dagsläget tas ingen hänsyn till hur motverkansinsatsen påverkar egen signatur eller interagerar med signaturstyrning.

²⁵ Brustörning i syfte att dölja ett objekts signatur och därmed reducera detektionsavståndet kan betraktas som en aktiv signaturanpassningsåtgärd. I detta fall är gränsdragning mellan SAT och TK oklar.

5.2.3 Andra åtgärder

I förstudien har fokus varit på TK och SAT åtgärder. Detta är ju endast en delmängd av de skyddsåtgärder som finns i ”skyddslöken”, se Figur 6. Det optimala vore om alla skyddsaspekter i ”skyddslöken” kan beaktas, vilket framförs i [78] där ett globalt överlevnadsparadigm föreslås.

En av de viktigaste komponenterna som dock måste tas med i en TK/SAT värdering är plattformen/förbandets *rörelse* och *orientering* som i de flesta fall direkt påverkar möjliga TK/SAT åtgärder.

5.3 Sammanfattning

Kapitlet beskriver behovet av indata i form av: hotkännedom, miljö- och geografiska data, atmosfärs- och väderinformation. Hur signaturer beskrivs inom det optiska-, radar- och akustiska området, hur de kan predikteras och måttsättas avhandlas. Verktyg och teknik (mätningar, beräkningar och prediktering) för skapa en bild av plattformen/förbandet i sin omgivning och att prediktera hur denna förändras utifrån gjorda (eller förväntade) handlingar beskrivs. I kapitlet beskrivs även signaturstyrning och telekrigåtgärder som kan vara aktuella vid en avvägning.

6 Systemtillförlitlighet

Tillförlitligheten i avvägningen är till stor del beroende på hur väl egen status samt omvärldens status kan beskrivas samt hur väl dess framtid kan predikteras, se även kapitel 2.3. Underrättelseinformation, sensorinformation och modeller bidrar alla till dessa förmågor, se kapitel 5.

De flesta sensorer (utom t.ex. akustiska och kemiska) är avsedda att fånga upp elektromagnetisk strålning. I radarfallet är strålningen vanligen genererad hos spanaren och reflekteras tillbaka av målet medan signalspaning inom kommunikations- och radarområdena, IR- och videospänare i allmänhet är passiva och fångar den strålning som målet och dess omgivning utsänder eller vidarebefordrar.

Spaningsorganen ger vanligen ifrån sig data eller information i ett format som antingen kan tolkas av en operatör eller filtreras och omvandlas för att kunna samlas och jämföras samt bidra till den aktuella omvärldsbilden. Om sammanställning och jämförelse ska kunna ske av data från olika typer av sensorer på samma eller olika plattformar krävs dels att data kan associeras till ett gemensamt mål. Vidare måste vanligen data hanteras på ett gemensamt format samt vara relaterat till en gemensam tidbas. Vidare måste gemensamma koordinatsystem upprätthållas för att mållägen ska kunna ensas mellan olika plattformar. Vissa sensorer kan prestera måldata och eventuellt även spårdata på ett följt (rörligt) mål. Beroende på sensortyp kan uppgifter i form av målstorlek, avstånd, kontrastnivå, signalstyrka, frekvens, signalkaraktär, verksamhet, hastighet m.m. bestämmas. Målet kan i vissa fall även individ- eller typbestämmas med viss sannolikhet, vilket kan vara av betydelse både vid målassociation mellan olika sensorer och plattformar samt vid beslut om åtgärd för att möta, undvika eller avvärja det samma.

Värderings- och simuleringsmodeller har en funktion i att komplettera sensorinformationen till en fullständigare omvärldsbild. Modeller har en fördel i att (i många fall) kunna prediktera inte bara hur omvärlden utvecklas utan även hur jag själv utvecklas (t ex hur min signatur förändras i den föränderliga omvärlden). Hur noggrant ett resultat från en modell bör vara, beror av ett flertal faktorer.

En definition [79] av begreppet modell är: ”En modell är en *förenklad* avbildning av ett befintligt eller tänkt objekt eller fenomen genom en beskrivning av dess *viktigaste egenskaper* (denna kan vara i form av en verbal beskrivning eller ett datorprogram).”

Korrektheten avgörs alltså hur mycket vi förenklar avbildningen och vad vi anser vara viktiga egenskaper. Andra aspekter som begränsar hur korrekt resultatet kan bli är den tid som finns till förfogande för att ta fram resultatet samt indatas relevans och kvalité.

6.1 Indata

Vid utveckling av plattformssystem används modeller på ett flertal olika nivåer, allt från mycket detaljerade modeller för att designa tekniska delkomponenter till mindre detaljerade modeller för att värdera systemet i dess tänkta tillämpning. Vid systemutveckling finns vanligtvis gott om tid att finna indata genom t ex mätprov. Det system man avser att utveckla ska i de flesta fall ha en lång livstid varför den datamängd som ska användas vid värderingen kan bli stor då den måste representera den hotbild och det scenario som systemet kan tänkas

möta under sin livstid. Givetvis kan tilläggsåtgärder och modifieringar ske under dess livstid, men kan förutsättningarna för systemets livslånga användning definieras och implementeras i ett tidigt stadie bör endast mindre och billigare ändringar bli aktuella. Att kunna bedöma förutsättningarna för ett Svenskt försvarssystem har däremot försvårats med tanke på EU Battlegroup. Inom den aktionsradie på 600 mils från Bryssel, som EU Battlegroup ska kunna verka, kan ett utvecklat system behöva kunna användas i en mängd olika miljöer och möta hot av skiftande modernitet. Som tur (!) förändras miljö- och terrängdata långsamt och kan därför samlas in för de platser och miljöer som kan bli aktuella. Behovet av underlag för signaturanpassning vid internationella insatser finns beskrivet i [80]. Hotutvecklingen och den uppgift som systemet kan få, är däremot svårare att prediktera.

Att nyttja modeller vid planering, innebär att prediktera ett värde (t ex plattformens signatur) för en plats i framtiden. Generellt, att prediktera långt fram i tiden respektive att prediktera långt bort från den aktuella platsen innebär större osäkerheter kring indata. Osäkerheten kring data bestäms också av ett flertal andra aspekter, bland annat vilken mätthistorik kring platsen och tiden (eller en motsvarande plats och tid) som finns tillgängligt. Vissa indata kan till stor del vara styrda av "slumpen", t ex. väder och vind, medan andra som t ex. terrängens topografi, är mer eller mindre förutsägbar. Genom att känna omvärlden och mig själv (se föregående stycke) kan en bättre plan göras.

Inför ett uppdrag kommer osäkerheter kring indata att finnas, varför endast en grov långsiktig plan med initiala brytpunkter och aktioner kan tas fram. Speciellt tillkommer osäkerheter om motståndarens handlande då plattformen/förbandet upptäcks. Att planera för att undgå upptäckt samt att undvika de farligaste hoten är därför relevant inför ett uppdrag. Uppdragsmålet kan däremot vara att själv upptäcka och eliminera de farligaste hoten. Uppdragsplaneringen bör därför tala om hur jag ska dra nytta av mina SAT och TK medel för att uppnå detta mål. Här kan ingå att planera bakgrundsstörning, skenmålsanvändning och signaturanpassningåtgärder längs en lämplig väg mot målet. Att känna till var och när upptäckt troligast sker samt var i terrängen säkra reträttvägar finns, är viktigt att försöka prediktera inför uppdraget. Uppdragsmålet vid fredsbevarande uppdrag är ofta att synas och markera närvaro. Uppdragsplaneringen bör därför föreslå TK/SAT medel så att plattformen/förbandet syns på bästa sätt. "Bästa sätt" kan innebära att synas i andra våglängder än hotsystemens. Osäkerheter kring motståndarens handlande ökar kraftigt då uppdragsmålet är att synas.

Tidigt utarbetade planer måste oftast revideras och anpassas under användandet till de faktiska förhållandena då säkrare indata finns. Man kan därför fråga sig om en plan som tas fram inför ett uppdrag ska hålla samma noggrannhet uppdraget igenom. Lämpligare vore kanske att uppdraget är detaljplanerat för den första sträckan och en grövre plan, som tar i beaktande osäkerheten i indata, används för uppdragets fortsättning.

Den långsiktiga plan som tas fram innan uppdraget kan ligga som grund för en kortsiktig plan som iterativt förfinas under uppdragets genomförande. Under genomförandet kommer osäkerheter kring indata att kraftigt minska genom att plattformen är "här och nu" med sensorer som kan bestämma lägesbilden (åtminstone lokalt). Extern information från andra källor (t ex nätverket eller egna framskjutna sensorer) kan ytterligare förbättra omvärldsuppfattningen för ett större område och förhoppningsvis även för den troliga framryckningsvägen. Vid planering inför och under uppdraget kan t ex bildbehandlingsteknik [81] och Baysiansk teknik [82] användas för att fylla de luckor där indata saknas, se även kapitel 4.4.1.

6.2 Tid till förfogande

Tid till förfogande för att få fram ett resultat respektive en modells detaljeringsgrad står ofta i konflikt med varandra.

Vid systemutveckling finns vanligtvis gott om tid för att ta fram resultat, varför detaljerade modeller kan användas. Vid teknisk systemutveckling (t ex beräkning av signaturer för delkomponenter) används vanligtvis mycket detaljerade modeller. Däremot vid stridsteknisk värdering, som har att se systemet i sin helhet och i sin användning, används mindre detaljerade modeller. Det finns inte (och kommer troligtvis aldrig finnas) den uppsättning av detaljerade modeller som tillsammans kan beskriva ett helt system i sin användning. Att modellera en del i helheten med hög precision medan andra modelleras ”mellan tummen och pekfingeret” är improduktivt. En balans mellan modellerna bör finnas.

Som sagts i kapitel 6.1 har osäkerheten kring systems framtida användningsområde och användningsmiljö ökat genom engagemanget i EU Battlegroup. En stridsteknisk och stridstaktisk värdering som underlag för systemutveckling behöver i framtiden behandla en större variation av förutsättningar, t ex genom fler simuleringar med varierande indata. Detta innebär att en fullständig värdering av ett system kan ta tid. Problemet med tid till förfogande är dock snarare aktuellt vid planering inför och under ett uppdrag. Speciellt blir behovet av tid akut vid planering under uppdragets genomförande.

Vid planering inför ett uppdrag begränsas planeringstiden, dock är förutsättningarna bättre kända, varför färre handlingsalternativ är att värdera. Som sagts i föregående kapitel bör upptäcksplanering vara viktigast inför ett uppdrag.

Vid planering under uppdrag, där ett flertal handlingsalternativ ska värderas, finns en begränsad tidsrymd för att ta fram det ”optimala” handlingsalternativet. Ju längre in i framtiden planen sträcker sig (planeringshorisont), desto fler alternativ finns att värdera på grundval av mer och mer osäkra data (vad avser tid i framtiden och avstånd från plattformen). Är planeringshorisonten kort finns färre handlingsalternativ att värdera på grundval av säkrare indata. I planen bör riskerna att framgent hamna i ogynnsamma eller riskabla lägen genom det planerade handlandet tidigt värderas. En sådan värdering kan inte göras med en alltför kort planeringshorisont. Hur handlingsalternativet påverkar andra funktioner för det totala skyddet, t ex egen sensoranvändning, bör däremot kunna värderas med en kortare planeringshorisont. Denna diskussion kring planeringshorisont anknyter till lokalt och globalt optimum och de optimeringsmetoder som beskrivs i kapitel 4.2.1. Oavsett planeringshorisont behöver planen och dess förväntade resultat utarbetas och värderas innan det första handlingsalternativet effektueras vilket ställer krav på tidseffektiva metoder (se kapitel 4) och modeller för värdering av handlingsalternativen (se kapitel 5).

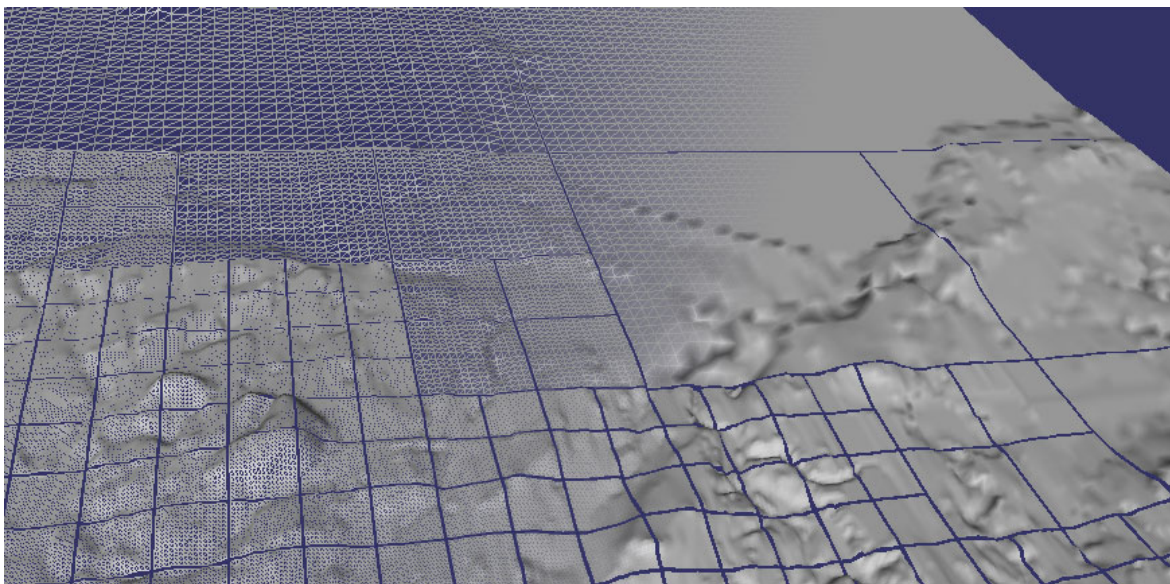
Antalet handlingsalternativ, effektiviteten på den metod som optimerar planen och detaljeringsgraden på de modeller som bedömer handlingsalternativen är faktorer som avgör vilken tid som finns till förfogande för att arbeta fram en plan. Dynamiken i scenariot är en annan faktor. Sker många och snabba händelser i scenariot finns mindre tid till eftertanke. I flygfallet är scenariots dynamik kraftigt kopplat till flygplanets dynamiska prestanda medan i markfallet är dynamiken snarare kopplat till vilken stridsfas som stridsfordonet befinner sig i. Ju längre in i ”skyddslöken” (se Figur 6) striden befinner sig i, desto mindre tid till förfogande finns för att ta fram ett handlingsalternativ.

Antalet handlingsalternativ som ska värderas kan minskas genom att en bra tumregel finns (se kapitel 4.2.3 och beskrivningen av $h(n)$ i A*) i den planeringsmetod som används och där modellen ingår. En tumregel som förkastar dåliga och prioriterar bra handlingsalternativ efter vad som erfarenhetsmässigt visat sig ge bäst resultat. Med en vägledning via en sådan vägledning behöver inte alla handlingsalternativ värderas.

En ”modell” för planering under uppdrag skulle kunna vara - en planeringsprocess som kontinuerligt skapar en ”närapå” optimal global plan fram till nästa brytpunkt i den plan som togs fram inför uppdraget, utifrån tumregler och tabellslagningar, samtidigt som en annan process lokalt optimerar (förfinar) planen under framryckningen med mer detaljerade bedömningar utgående från säkrare indata. Hur och om förfiningen av planen görs är beroende på om tid till förfogande finns. Genom att ”modellen” alltid tillhandahåller en grov ”närapå” optimal plan har vi i alla fall ett handlingsalternativ om tid saknas.

6.3 Dynamisk detaljeringsgrad

Den ”modell” för planering under uppdrag som beskrevs i föregående kapitel, skissar på en hierarki av värderingsmodeller från tumregler till detaljerade modeller. Utgående från tid till förfogande och tillgång till och kvalitet på indata används den modell som kan fånga de viktigaste egenskaperna. Detta liknar mycket LOD-nivåer (Level Of Detail) som används i datorgrafik, där 3D-objekt som befinner sig långt från kameran i scenen modelleras enklare och där 3D-modellens komplexitet successivt ökar då den närmar sig kameran.



Figur 27 Ett exempel på hur detaljnivån förändras med avståndet. Bild från [6].

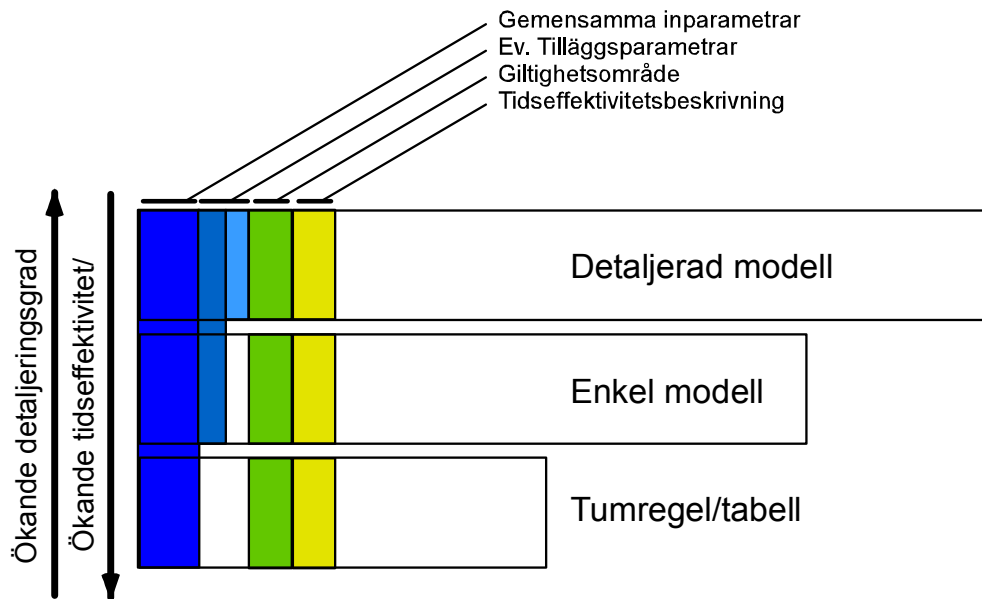
”Planeringsmodellen” bör därför på samma sätt som en grafikmotor²⁶ välja den lämpligaste modellen för tillfället.

²⁶ T ex OpenGL eller Direct X

En vision hur en sådan modellhierarki skulle kunna se ut beskrivs nedan.

För att modeller ska kunna ”växlas” mot varandra, skulle modellerna i hierarkin kunna bestå av:

- en grunduppsättning inparametrar
- eventuella tilläggsparametrar
- en beskrivning av giltighetsområdet för modellen och inparametrarna (vilken noggrannhet måste varje inparameter ha för att modellen kan anses lämplig att använda)
- en beskrivning av modellens tidseffektivitet



Figur 28 En modellhierarki

De gemensamma parametrarna måste ha identifierats för att överhuvudtaget någon av modellerna ska kunna exekveras. De modeller som existerar i hierarkin måste tillsammans täcka det giltighetsområde som inparametrarna kan förväntas ha. Existerar, för en modell, en fullständig uppsättning av tilläggsparametrar och giltighetsområdet är uppfyllt, så kan den exekveras. Den modell som uppfyller villkoren ovan och som samtidigt uppfyller prestandakraven väljs som modell. Tidseffektivitetskraven sätts av ”planeringsmodellen”. I [83] beskrivs ett realtidsramverk som implementerar en hierarkisk modellstruktur.

På samma sätt kan den planeringsmetod som används planera grövre om t ex indata håller en låg kvalitet och förfina den när data finns tillgänglig. Detta innebär ofta att snabbare men kanske inte optimala planer fås. Se [36] där en initialt grov plan tas fram som sedan förfinas för att finna den ”billigaste” vägen.

I många fall bör förenklade modellerna kunna utvinnas ur mer detaljerade. En modell som bygger tabelluppslagning kan ju oftast extraheras ur en mer detaljerad fysikalisk modell. En mängd²⁷ forskning sker internationellt kring hur modellers komplexitet kan minskas (*model order reduction*) till så kallade *proper models*²⁸.

²⁷ En sökning av ”model order reduction” på Internet med Google ger 45 000 träffar.

²⁸ En definition på *proper model* som förekommer är: den enklaste möjligaste modell som med fysikaliskt meningsfulla parametrar korrekt predikterar förväntat resultat.

Med detaljerad kunskap kan mer detaljerade planer tas fram och mer precisa åtgärder sättas in. Om vi i planeringen nyttjar en högupplöst terrängdatabas skulle vi kunna planera en väg och nyttja de fina detaljerna i terrängen för att hålla oss dolda. Med en detaljerad modell av störverkan mot ett hotsystem kan vi koncentrera vår störning (vad gäller störform, störfrekvens, störriktning) mot hotet. Är däremot vår terrängdatabas felaktig eller det aktuella hotets frekvens något skilt från det vi använde i störverkansvärderingen kan vår plan slå helt fel när åtgärderna slutligen sätts in.

Som sagts tidigare är vissa fenomen mer förutsägbara än andra och kan därför modelleras med högre detaljeringsgrad medan andra däremot är av stokastisk natur. Som exempel på det senare kan aktiv störning mot system i många fall uppvisa ett kaosartat beteende [84]²⁹. Från en god störverkan kan en liten ändring av indata resultera i en dålig störverkan. Orsaken till detta är att aktiv störning i många fall slår mot olinjära delar av det system det avser att störa. Speciellt blir detta påtagligt då ett verkligt system jämförs mot ett motsvarande simulerat system. Dålig korrelation uppvisas mellan verkansresultaten om inte de olinjära delarna av det verkliga systemet simuleras oerhört detaljerat och att korrekta indata används. För att detaljerat kunna modellera vår störverkan måste vi känna till interna parametrar för den specifika individen av hotsystem vi möter. Samtidigt finns vid planering en mängd osäkerheter kring andra indata, varför en modell som snarare ger ett medelverkansmått är lämpligare att använda än en modell som ger resultat som ”flaxar hit och dit”. Att rekommendera åtgärder som på ett *robust* sätt ökar plattformens/förbandets överlevnad är viktigt för att skapa förtroende hos användarna. För att skapa tilltro till modellen bör den även innehålla förslag till inmätning och observationer under t ex en framryckning som bekräftar och verifierar att föreslagen åtgärd är rimlig. En annan förtroendeskapande ansats är att systemet presenterar det huvudsakliga underlag som ligger till grund för åtgärdsförslaget. Se även kapitel 2.4, ”Tilltro och MSI-aspekter”.

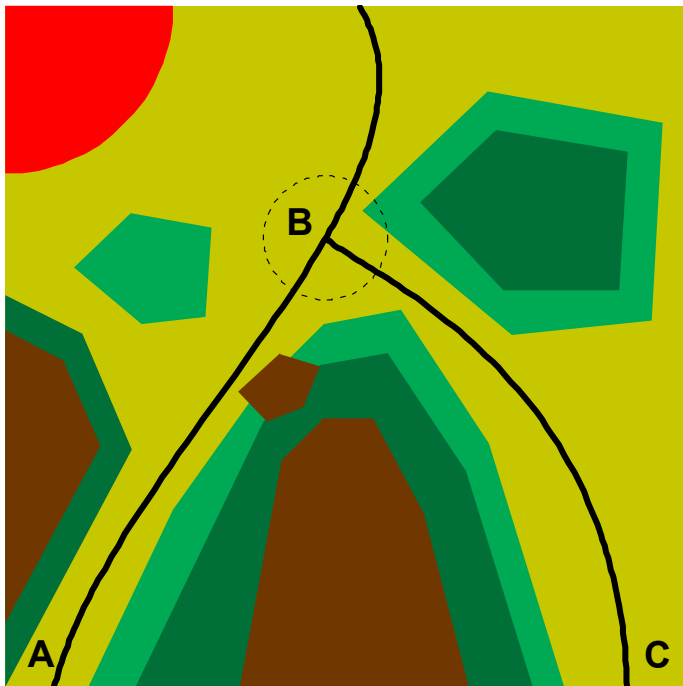
6.4 Sammanfattning

Kapitlet diskuterar de faktorer som inverkar för att erhålla tillförlitlighet och noggrannhet i de förslag som ett TK/SAT stödverktyg kan presentera. Faktorer som identifierats är tillgång och kvalité på indata, tid till förfogande för att ta fram beslut, de använda metodernas tidseffektivitet samt detaljeringsgraden på de verktyg och modeller som används i avvägningen. Dessa faktorer inverkar vid systemutveckling, uppdragsplanering och under uppdrag avhandlas.

²⁹ Passiva störåtgärder (t ex remsor, facklor, rök) som snarare skapar fysiska skenmål ger inte detta kaosartade beteende (diskussion med författaren till [84]).

7 Demoarbetet

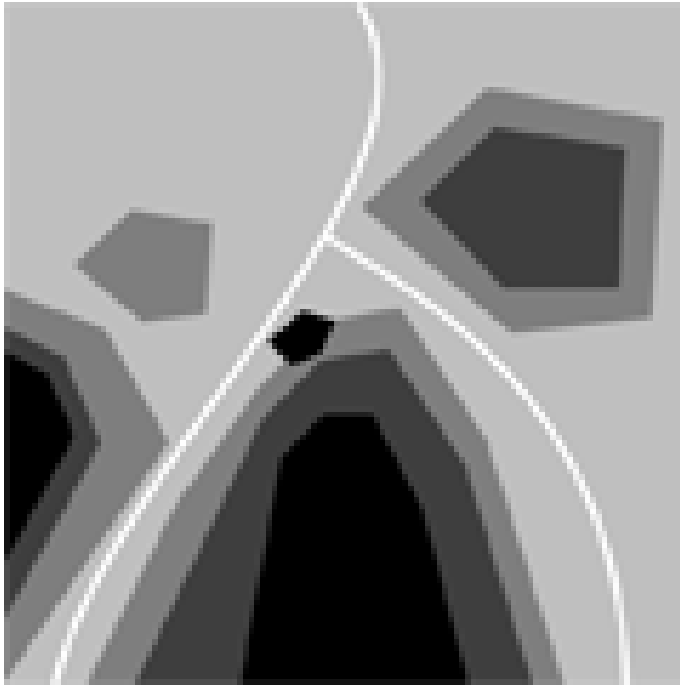
Denna förstudie har även innefattat en demonstration av en avvägningsmetodik mellan signaturanpassningsteknik och telekrypteknik. Då detaljerade demonstrationer av SAT respektive telekrypt redan förekommer inom många andra projekt, så har tyngdpunkten här varit att studera hur olika egenskaper kan vägas mot varandra och sedan ligga till grund för att på ett så bra sätt som möjligt välja nästa handling. Ett annat syfte har också varit att ha ett gemensamt scenario där olika aspekter kan diskuteras. Detta har lett till att nya problemställningar och insikter har framkommit.



Figur 29 Terrängavsnitt för demoscenario

Det valda scenariot består av ett terrängavsnitt där ett stridsfordon skall ta sig från startpunkten, A, via en brytpunkt, B, till en slutdestination, C. Genom att väga ihop framkomlighet i terrängen med en bedömning av hur synligt fordonet är från ett hot, så skall den bästa vägen fram till nästa punkt väljas. Potentiell hotposition är markerad med rött i Figur 29 och om hotnivån bedöms bli för hög kan fordonet använda motmedel genom att skjuta rök i hotriktningen. De färgade områdena i Figur 29 beskriver terrängen som berg (brunt), tät vegetation (mörkgrönt), gles vegetation (ljusgrönt) och öppna fält (gult). En väg (svart) med en trevägskorsning löper igenom terrängen.

Först skapas en mobilitetskarta, dvs. en bedömning av hur framkomligheten är i det aktuella området. Här har mobiliteten graderats efter terrängtyp och ju ljusare ett område är, desto lättare är det att tas sig fram. Svarta områden är helt oframkomliga.



Figur 30 Mobilitetskarta för aktuellt scenario

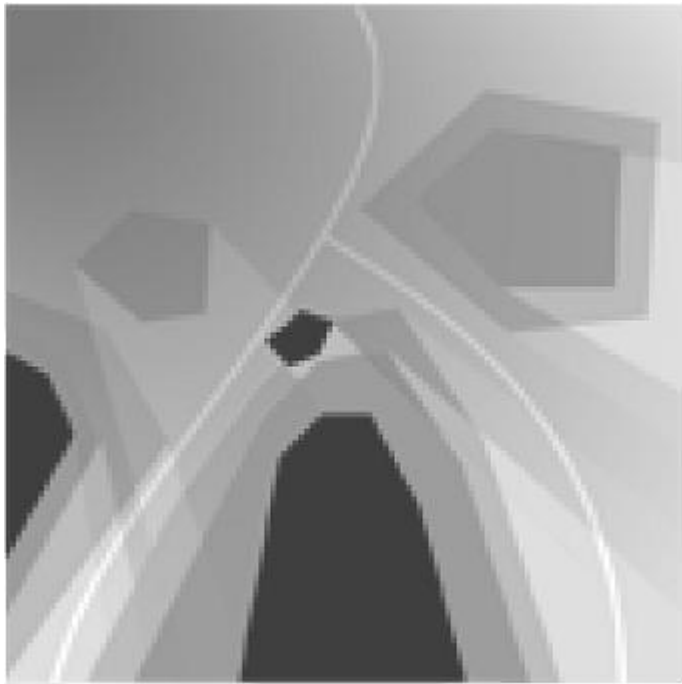
Vidare så skapas en visibilitetskarta. Den beskriver hur lätt fordonet kan upptäckas av aktuellt hot. Visibilitetskartan kan ses som en sammanslagning av fordonets signatur, hur synligt det är mot bakgrunden och hur god sikt det är vid den aktuella platsen. Ju lättare fordonet är att upptäcka desto mörkare är färgen i kartan. Områden som är omöjliga att beträda har markerats i svart. Möjligheterna till att använda telekrig har begränsats till att skjuta rök. Effekterna av röken ger då en modifierad visibilitetskarta.



Figur 31 Inledande visibilitetskarta för aktuellt scenario

På samma sätt som för mobilitet och visibilitets skulle bedömningar av signaturer och hot inom andra våglängdsområden kunna beskrivas med liknande kartor för att skapa en komplett omvärldsuppfattning. I denna demo har vi valt att endast studera mobilitet och visibilitet.

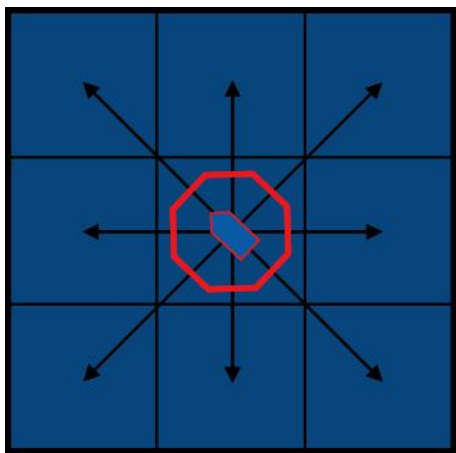
För att kunna välja en lämplig väg genom terrängen, så väljer vi att vikta ihop de två kartorna för att skapa en omvärldsbild. Syftet med detta är att endast ha en ”karta” att välja väg igenom.



Figur 32 Sammanvägd karta för aktuellt scenario

I denna demo har vi möjlighet att styra hur mobilitet och visibilitet skall vägas samman med en enkel parameter. Exemplet i Figur 32 visar en sammanvägning där mobilitet och visibilitet ges samma vikt.

När den sammanvägda omvärldsbilden är fastlagd gäller det att välja väg genom terrängen. I denna demo har varje pixel i bilden antagits vara en möjlig position. Bilden är 120 * 120 pixlar vilket skulle symbolisera en terräng om 3 * 3 km givet att varje pixel svarar mot en yta på 25 * 25 m. Varje pixel ses som en nod i en graf och att hitta vägen igenom terrängen blir då en grafsökning, där det gäller att bästa vägen genom grafen från startnoden till slutnoden. För att detta skall vara en korrekt graf måste det finnas bågar mellan noderna och till dessa bågar kopplas en kostnad för att ta sig från en nod till en annan. I demokartan sätts bågkostnaden till medelvärde av pixelvärdet i den befintliga noden och pixelvärdet i nästa nod. Vidare så antas varje nod (utom kantnoderna) vara knuten till de åtta angränsande pixlarna (noderna) och grafen antas följaktligen vara viktad men inte riktad d v s det finns en kostnad men den är lika stor oavsett färdriktning mellan två noder.



Figur 33 Aktuell nod med fordon samt de åtta möjliga angränsande noderna

Vägen från startnoden till slutnoden via ett antal noder beräknas med algoritmen A* (A-star eller A-stjärna). Heuristiken i algoritmen kan initieras antingen genom att välja det minsta avståndet antingen som det euklidiska, ”fågelvägen”, eller som ett som följer pixelmönstret utan att gå diagonalt, ”Manhattanavståndet”. Det finns även möjlighet att välja Dijkstras grafsökningsalgoritm. För beskrivning av A* hänvisas till avsnittet om grafsökning, kapitel 4.2.3.

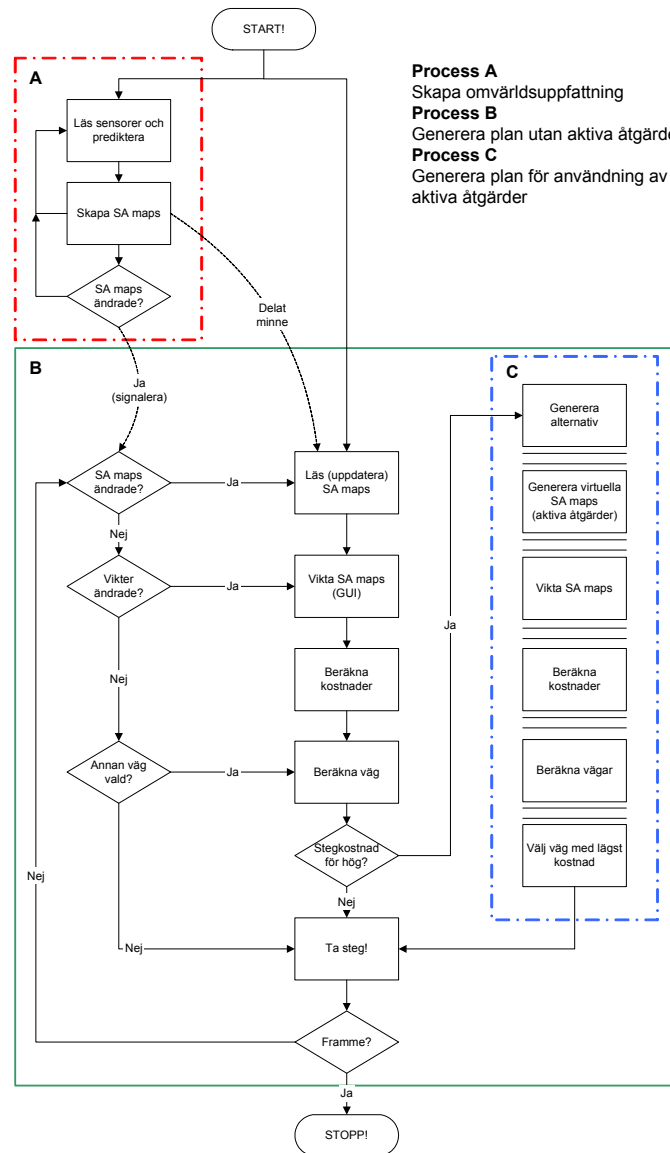
Genom att välja att beräkna vägen med en grafsökningsalgoritm som A* eller Dijkstra, så har det medfört vissa begränsningar i problemställningen. Dels så måste, vilket har påpekats ovan, all information om omvärld, hot, signaturer o.s.v. komprimeras ned i ett enda värde: kostnaden att gå från en nod till en annan. Detta kan innebära en för kraftig beskärning av informationen och att sammanvägningen blir avgörande för utfallet. Dels så får varje nod endast användas en gång och algoritmen kommer alltid fram till slutmålet oavsett totalkostnad. Att varje nod endast får användas en gång är kanske ett mindre problem, men det senare innebär att någon möjlighet till att avbryta uppdraget på grund av för hög kostnad, d.v.s. hotet är för stort, finns inte.

Den metodik som har legat till grund för tankarna med demoarbetet kan delas upp i tre processer, se Figur 34.

- *Process A* skapar omvärldsuppfattning med hjälp av underrättelser, sensorinformation och modeller. I demon innebär det inläsning av nya mobilitets- och visibilitetskarter.
- *Process B* beräknar utifrån omvärldsuppfattningen och uppdragsmålet den bästa färdvägen utan att räkna med aktiva åtgärder. Detta innebär även att övervaka förändringar, indata från process A och C, för att beräkna ny väg om förändringar sker. I demon innebär det att om mobiliteten eller visibiliteten förändras så beräknas en ny väg till nästa brytpunkt.
- *Process C* hanterar valet av lämpliga åtgärder om valet i Process B leder till behov av åtgärder. I demon innebär det att motmedel i form av stridsrök skjuts i hotriktningen, om kostnaden vid ett steg överskrider en viss ställbar nivå.

Tanken är att process A startar först och ger förutsättningarna för planeringen, därefter matas önskade brytpunkter och slutmål in och process B startar. Process A löper i bakgrunden och

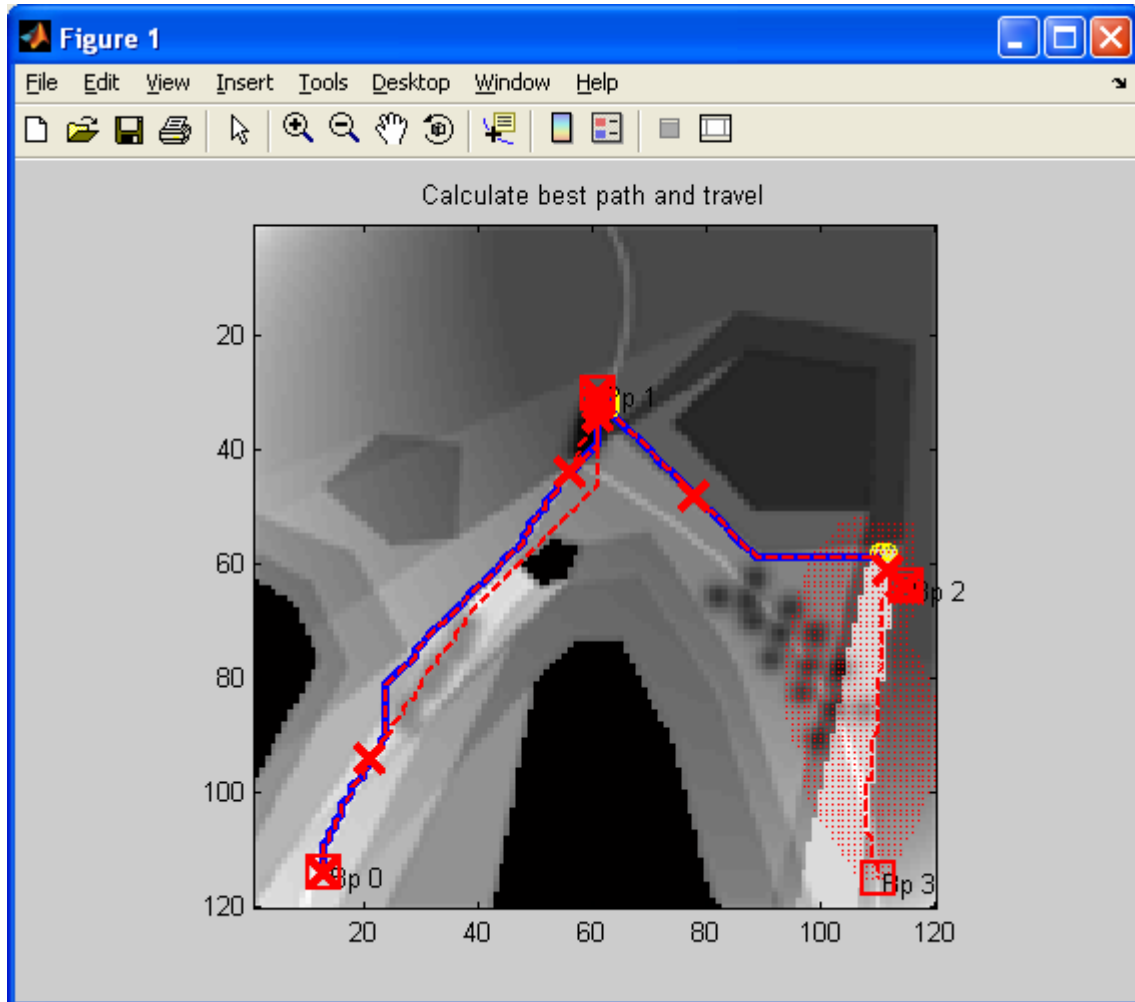
håller koll på omvärldsbeskrivningen. Om något förändras meddelas process B. Process B i sin tur löper under hela tiden och kontrollerar om vägen behöver omplaneras p.g.a. att omvärlden förändras eller om omplanering behöver göras under gång p.g.a. nya direktiv från operatören (det senare är inte implementerat i demon). Om kostnaden från ett steg till nästa överstiger en viss nivå bedöms att en åtgärd behöver sättas och process C anropas. Process C skall då generera alternativ för att minska kostnaden (hotet) genom insats av lämpligt vald åtgärd och detta leder till att färdvägen planeras om. Se Figur 34.



Figur 34 Principbild över använd metodik

Sammanfattningsvis kan man säga att avvägningen mellan SAT och telekrig genomförs dels i sammanvägningen och viktningen av omgivningen (SAT) och dels i kostnadströskelsättningen för att aktivera en åtgärd (telekrig). En vidareutveckling skulle kunna vara att lägga in viktning på en vägsträcka om åtgärder behöver användas någonstans på vägen. Det skulle kunna göra det möjligt att bestämma hur villig man är att använda motmedel under den aktuella vägsträckan. Vilket prioriteras mest: Snabb framryckning, med kraftig signatur, i skydd av motmedel eller försiktigare framryckning, med låg signatur och utan att röja sig genom att använda motmedel?

Demonstrationsprogrammet har implementerats i MATLAB där den grafiska presentationen har gjorts tämligen spartansk samt att inmatning av parametrar görs direkt i koden. Anledningen till detta är att fokuseringen är lagd på att på ett enkelt sätt ge möjligheter att testa idéer och algoritmer samt snabbt kunna göra ändringar i koden, snarare än att lägga ner tiden på grafisk formgivning och användargränssnitt.



Figur 35 Exempelbild från demonstrationsprogrammet

I Figur 35 ges en exempelbild från demonstrationsprogrammet där fordonet ska färdas från $Bp0$, via $Bp1$ och $Bp2$ till slutmålet $Bp3$. Fordonet befinner sig just nu vid $Bp2$. Bakgrunden är den sammanvägda bilden av mobilitet och visibilitet där några extra mobilitetshinder har införts samtidigt som ursprungshotet har flyttat från det övre vänstra hörnet till övre högra. Röda fyrkanter markerar startpunkt, brytpunkter och slutpunkt. Röda kryss markerar platser där omplanering har skett. Röda streckade vägar är planerade vägar och blå väg är den väg som fordonet hittills har färdats. Området med röda punkter till höger markerar vilka möjliga noder som har tagits med i beräkningen för det aktuella vägvägnittet. Platser där motmedel, rök, har använts har markerats med gula cirklar och det ljusa stråket till höger är effekten av rök som fortfarande är aktiv.

7.1 Erfarenheter från demoarbetet

Ett syfte med demoarbetet har varit att ha ett gemensamt scenario där olika aspekter kan diskuteras. Detta har varit mycket fruktsamt i att penetrera problemställningar och generera nya insikter.

För att kunna välja en lämplig väg genom terrängen, så har vi viktat ihop olika representationer (kartor) av omvärlden för att skapa en omvärldsbild. Syftet med detta är att endast ha en "karta" att välja väg igenom. En erfarenhet vid demoarbetet, är att då man väljer att endast ha en karta är det viktigt hur sammanvägningen genomförs. Genom att väga samman olika egenskaper med olika viktning så kommer viktningen att avgöra vad som har högst prioritet och därigenom styra vägvalet. Därför kommer det ha stor betydelse hur man beskriver och värderar olika egenskaper. Med den metod (A*) som har använts, så avgör viktningen också hur tidseffektiv metoden blir.

8 Diskussion och slutsatser

Förstudiens frågeställning har varit: *Hur balanseras signaturanpassning (SAT) och telekrig (TK) för att ge bästa effekt?*

Detta är ett mycket komplext problem, varför förstudien har avgränsats till de användarnära behoven av TK/SAT-stöd inför och under uppdrag. En fortsatt studie bör avgränsas ytterligare till avvägning under uppdrag med tanke på Sveriges engagemang i EU Battlegroup. Förstudien ser ett ökat behov av uppdragsstöd genom detta engagemang.

Många komplexa aspekter som: uppdragets karaktär, stridsfasen, begränsande faktorer (ROE, etc.), möjlighet till lägesbild, möjlighet att ta fram och värdera handlingsalternativ, förbandskoordinering samt tillgänglig beslutstid ingår då telekrig och signaturanpassning ska avvägas. En av de viktigaste aspekterna är att utröna: Vad är ”optimalt” sett ur karaktären hos ett uppdrag? För detta behöver användarnas synpunkter tillvaratas. Användarnas tilltro till taktikstödande verktyg är även viktigt för att verktygen ska bli använda för en effektivare taktik. Användarna måste därför involveras redan i tidiga utvecklingsskeden. För utveckling av avvägningsstöd och för att skapa systemtilltro till dessa, krävs tillgång till simuleringsresurser på olika nivåer samt på sikt verifierande prov med fältdemonstratorer.

Inga operativa system som hanterar avvägning mellan SAT och telekrig har hittats vid efterforskningar i förstudien. Däremot finns ett antal system som dynamiskt avväger telekrig- respektive signaturanpassningsåtgärder enskilt. En anledning till att vi inte har hittat några uppgifter om operativa system som kombinerat avväger TK/SAT kan vara att området troligen är omgärdat av hög sekretess. Utvecklingsarbeten inom Mission Battle Management Systems (MBMS) och FCS kan dock innehålla komponenter för ett balanserat TK/SAT skydd. Att fortsättningsvis följa upp dessa verksamheter tillsammans med nationella arbeten kring situationsanpassad signaturstyrning kan vara fruktsamt.

I förstudien har ett antal metoder som kan vara användbara vid TK/SAT avvägning studerats. Dessa metoder handlar bland annat om hur strukturer för rationella beslut kan formuleras, hur det optimala kan beräknas, hur vaga begrepp kan hanteras, hur osäkerheter kan hanteras och spelteori. De metoder som har avhandlats täcker ej alla metoder som kan användas för TK/SAT avvägning. Speciellt har planering som forskningsområde ej penetrerats i förstudien. Andra studier har dock genomförts under året som fokuserar på detta område [7]. Vilka metoder som är lämpliga att användas i ett TK/SAT stöd under uppdrag bör vidare analyseras. Kontakter och samverkan med ämnesexperter bör därför tas, i syfte att värdera metoder för TK/SAT avvägning.

Att kunna värdera och prediktera effektiviteten av telekrig- och signaturåtgärder är fundamentalt för att kunna göra en avvägning. Mätresurser och simuleringsmodeller är här nödvändiga verktyg. I rapporten beskrivs behovet av indata i form av: hotkännedom, miljö- och geografiska data, atmosfärs- och väderinformation, hur signaturer beskrivs inom det optiska-, radar- och akustiska området, hur de kan predikteras och måttsättas. För att kunna avväga TK/SAT behöver verktygen skapa en ”bild” av plattformen/förbandet i sin omgivning samt hur denna ”bild” förändras utifrån plattformen/förbandets möjliga handlingar. Hur denna ”bild” bäst beskrivs, relaterat till den avvägningsmetod (se föregående stycke) som valts, är något som bör studeras.

Att tillförlitliga åtgärdsförslag presentera från ett TK/SAT stödverktyg är viktigt. Faktorer som påverkar hur tillförlitligt ett åtgärdsförslag kan fås beror av: tillgång och kvalitet på indata, tid till förfogande för att ta fram beslut, de använda avvägningsmetodernas tidseffektivitet samt detaljeringsgraden på de verktyg och modeller som används i avvägningen. Att skapa tillförlitliga åtgärdsförslag är mycket viktigt för att skapa tilltro.

8.1 Slutsatser

Utgående från diskussionen ovan har ett antal slutsatser för det fortsatta arbetet identifierats, vilka redovisas nedan:

- ❖ En avgränsning bör göras till TK/SAT stöd under uppdrag med tanke på Sveriges engagemang i EU Battlegroup
- ❖ En avgränsning bör göras till markstrid med tanke på Sveriges engagemang i EU Battlegroup
- ❖ Ett fåtal lovande metoder bör väljas ut och värderas genom tester i funktionsmodeller. I detta arbete måste även relevanta verktyg för TK/SAT avvägning värderas
- ❖ Användarnas behov av TK/SAT stöd bör identifieras
- ❖ Användarna måste involveras tidigt i ett utvecklingsarbete för att systemtilltro ska kunna skapas

Vidare måste en samverkan utvecklas mellan områdesexperter inom signaturanpassningsteknik, telekrig, värdering, beslutsstöd och resursallokering. En styrning mot ett gemensamt mål är här nödvändigt. En väg för en sådan styrning kan vara att samla områdesexpertisen kring något demonstratorprogram.

9 Referenser

- 1 Michael Sjölund, "European Union Battle Group koncept", Artikel från Tidskrift för Amfibiekåren (TifA), Nr 3, 2005
- 2 Försvarsmakten, "FoT-strategi 2002", M7759-779002, 2002
http://www.hkv.mil.se/attachments/fot_strategi_02.pdf
- 3 Peter Klum, Claes Nelsson, Sten Nyberg, Patrik Hermansson, Göran Bolander, Jonas Rahm, Jan-Olof Ousbäck, Peter Johansson, Lars Tydén, Hans Habberstad, "Systemvärdering SAT", Användarrapport FOI-R--1480--SE, December 2004.
- 4 Martin Norsell, "Aircraft Trajectory Optimization with Tactical Constraints", Kungliga Tekniska Högskolan, ISBN 91-7283-727-6, 2004
- 5 Karin Mossberg (sammanställning), "Föreläsningskopior till kursen Kvantitativa OA-metoder, Juni 2002", FOI-D--0043--SE.
- 6 Lars Tydén, Niclas Appleby, Hanna Andersson, Joakim Bergman, Leif Festin, Daniel Haavisto, Carl Hedberg, Morgan Nordin, Sebastian Olsson, Mikael Petersson, Pär Svensson, Christer Wigren, "Slutrapport Duellsimulering Telekrig", Användarrapport FOI-R--1724--SE, November 2005
- 7 Jonas Nygårds, Per Skoglar, Jörgen Karlholm, Morgan Ulvklo, Rickard Björström, "Towards Concurrent Sensor & Path Planning - A Survey of Planning Methods Applicable to UAV Surveillance", Vetenskaplig rapport FOI-R--1711--SE, Maj 2005.
- 8 Hollnagel, E. "Human reliability analysis: Context and control". London: Academic Press. 1993
- 9 Hollnagel E. "Time and time again", Theor. Issues in Ergonomics Science 3(2)/2002 Pages 143-158, 2002
- 10 Hollnagel E. "Cognition as Control: A Pragmatic Approach to the modelling of the Joint Cognitive System", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 2003
- 11 "The skunk goes for IT", Artikel Jane's Defence Weekly (JDW) nr 1, Januari 2004, sid 28-31
- 12 "Robot Ravens?", Artikel Journal of Electronic Defence (JED), September 2002, sid 22-23
- 13 "X-45s demonstrate collaborative missions", Artikel Jane's International Defence Review (IDR), Januari 2004, sid 20
- 14 "Raptor Rising", Artikel Journal of Electronic Defence (JED), September 2001, sid 46-47
- 15 Utställningsmaterial från Wallop Defence Systems
- 16 FOI industribesök vid TERMA A/S, 2003-07-03.
- 17 FOI industribesök vid Buck Neue Technologien GMBH 2002-08-08.
- 18 www.barracuda.se
- 19 "Ballonger, mönster, döljande kjolar testas i teknikdemonstrator", Artikel FOA-tidningen, nr 6, 2000, sid 8-9.

-
- 20 www.armor.kiev.ua/fofanov/Tanks/EQP/arena.html
 - 21 www.hem.passagen.se/pgroen/strf90.htm
 - 22 "Investing in simulation", Artikel ets-news, sommaren 2003, sid 14-16.
<http://www.ets-news.com/third.php?id=236>
 - 23 "Agenter i nätet ger billigare fjärrvärme", Artikel Ny Teknik, nummer 43, Publicerad 2005-10-26
 - 24 S. Russel, P. Norvig, "Artificial Intelligence a modern approach, second edition", Prentice Hall, 2003.
 - 25 D.P. Bertsekas, Nonlinear Programming, second edition. Athena Scientific, 1999.
 - 26 D.P. Bertsekas, Dynamic Programming and Optimal Control, Vol. 1, second edition, Athena Scientific, Belmont, Massachusetts, U.S.A., 2000.
 - 27 G.L. Nemhauser, A.H.G. Rinnooy Kan and M.J. Todd, Eds., Handbook in Operations Research Management Science, Vol. 1, Optimization, Elsevier Science Publishers (North-Holland), Amsterdam, Nederländerna, 1989
 - 28 R. Fletcher, Practical methods of Optimization, second edition, John Wiley and Sons, Tiptree, Great Britain, 1987.
 - 29 D.G. Luenberger, Linear and nonlinear programming, second edition, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1984.
 - 30 <http://www.tsp.gatech.edu/sweden/index.html>
 - 31 <http://www.cs.cornell.edu/Info/People/chew/Delaunay.html>
 - 32 Kennet Gustafsson, Joel Hägersten, "Development of a neighbourhood graph for trafficability analysis", Metodrapport FOI-R--1698--SE, Juni 2005
 - 33 <http://theory.stanford.edu/~amitp/GameProgramming/MapRepresentations.html#S6>
 - 34 <http://theory.stanford.edu/~amitp/GameProgramming/>
 - 35 <http://theory.stanford.edu/~amitp/GameProgramming/Heuristics.html>
 - 36 Markus Jönsson, "An optimal pathfinder for vehicles in real-world digital terrain maps",
<http://www.student.nada.kth.se/~f93-maj/pathfinder/index.html>
 - 37 J. R. Koza, "Survey Of Genetic Algorithms And Genetic Programming", Proceedings of 1995 WESCON Conference, 7-9 November 1995, San Fransisco, CA, USA.
 - 38 A. C. Schultz, J. J. Grefenstette, "Improving Tactical Plans with Genetic Algorithms", Proceedings of the 2nd International IEEE Conference on Tools for Artificial Intelligence, 6-9 Nov 1990, Herndon, VA, USA.
 - 39 J. J. Grefenstette, "The User's Guide to SAMUEL-97: An Evolutionary Learning System", Navy Center for Applied Research in Artificial Intelligence, Naval Research Laboratory, Washington, DC, USA, 1997.
 - 40 R. E. Smith et al, "Discovering Novel Fighter Combat Maneuvers in Simulation: Simulating Test Pilot Creativity", P.J. Bentley & D.W. Corne (eds) Creative Evolutionary Systems. Morgan Kauffman, sid 467-486, 2001.

-
- 41 P. Gonsalves et al, "Intelligent Threat Assessment Processor (ITAP) using Genetic Algorithms and Fuzzy Logic", Proceedings of the 3rd International Conference on Information Fusion, Paris, France, July 2000
 - 42 R. H. Kewley, M. J. Embrechts, "Fuzzy-Genetic Decision Optimization for Positioning of Military Combat Units", 1998. Proceedings SMC'98, sid 3658 – 3664, 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, October 11 – 14 , La Jolla, CA, USA, 1998
 - 43 J.F.Smith, R.D.Rhyne, "Methods of Automated Rule Discovery for Decision Support that Exploit an Opponent's Uncertainty", FUSION 2001, Fourth International Conference on Information Fusion.
 - 44 L. Ingber, Simulated annealing: Practice versus theory, Mathl. Comput. Modelling, vol. 18, no. 11, sid 29-57, 1993.
 - 45 Lester Ingbers websida: <http://www.ingber.com>
 - 46 U. Brännlund and S. Feltenmark, Derivatafri optimering för Flight-Clearance-beräkningar, Teknisk rapport FOI-R--0678--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut, 2002.
 - 47 D.Driankov et al, "An Introduction To Fuzzy Control", Springer-Verlag, 1996.
 - 48 K.H.Goodrich, J.W.McManus, "Development Of a Tactical Guidance Research and Evaluation System (TiGRES)". AIAA Paper 893312, August 1989.
 - 49 C.E.Lan, J-J.Chan, J-Y.Ho, "Development Of An Air Combat Evaluation System", 2000. AIAA Paper 2000-3912, Aug. 2000.
 - 50 P.K.Menon, V.R.Iragavarapu, "Blended Homing Guidance Law Using Fuzzy Logic", 1998 AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, August 10-12, Boston, Massachusetts, USA.
 - 51 J.F.Smith, R.D.Rhyne, "Fuzzy Rule Determination By Co-evolutionary Data Mining", FUSION 2001, Fourth International Conference on Information Fusion.
 - 52 J.F.Smith, R.D.Rhyne, "Fuzzy Logic Resource Manager: Fuzzy Decision Logic and Validation", Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence, IC-AI '99, June 28 - July 1, 1999, Las Vegas, Nevada, USA.
 - 53 J.F.Smith, "Co-evolutionary Data Mining in Phase Space for Robust Fuzzy Resource Management". Proceedings of the 7th International Conference on Information Fusion Stockholm Sweden, 28 Juni till 1 Juli 2004 in
 - 54 C.Tran, A.Abraham, L.Jain, "A Concurrent Fuzzy-Neural Network Approach for Decision Support Systems", The IEEE International Conference on Fuzzy Systems, FUZZ-IEEE'03, IEEE Press, ISBN 0780378113, sid 1092-1097, 2003
 - 55 P.Gonsalves et al, "Intelligent Threat Assessment Processor (ITAP) using Genetic Algorithms and Fuzzy Logic", Proceedings of the 3rd International Conference on Information Fusion, Paris, France, Juli 2000
 - 56 Waltz, Edward; Llinas, James; "Multisensor Data Fusion". ISBN 0-89006-277-3, Artech House
 - 57 Hall, David; Llinas, James; "Handbook of Multisensor Data Fusion". ISBN 0-8493-2379-7, CRC-PRESS

-
- 58 Hall, David; "Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion". ISBN o-89006-558-6, Artech House
 - 59 Rabin, Steve; "AI Game Programming Wisdom". ISBN 1-58450-077-8
 - 60 Blixt, Johan; Jansson, Benny; Mossberg, Karin; "Baysianska nätverk och dess tillämpningar inom OA-verksamheten". FOI- R--1411--SE, 2005
 - 61 Bergsten, Ulla; Schubert, Johan; Svensson, Per; "Beslutssystemet DEZZY - en översikt". FOA, MILINF89, seminariedokumentation
 - 62 Olander, Nils; "Några metoder för osäkra resonemang". FOI C 30492-3.3, maj 1988
 - 63 Ronnie Johansson, Christian Mårtensson, Robert Suzić, Pontus Svenson, "Stochastic dynamic programming for resource allocation", Metodrapport FOI-R--1666--SE, September 2005.
 - 64 David A. Burke, "Towards a Game Theory Model of Information Warfare", Air University Student Research Paper 2000
<http://www.iwar.org.uk/iwar/resources/usaf/maxwell/students/2000/afit-gss-lal-99d-1.htm>
 - 65 FMV:Aund. Handbok Armémateriel på Balkan 1999., FMV:Aund AML 10 400:236/99
 - 66 <http://www.wonderland.org.nz/fagot.htm>
 - 67 Stefan Nilsson m.fl., "Underlagsbehov vid signaturanpassning för internationella insatser - en förstudie", FOI-R--1325--SE, (2004)
 - 68 Morgan Ulvklo m.fl., "Image processing and sensor management for autonomous UAV surveillance", Airborne intelligence, surveillance, reconnaissance (ISR) systems and applications, Proc. SPIE vol 5409, FOI-S--1531--SE, (2004)
 - 69 Ulf Söderman, Simon Ahlberg, Svante Björklund, "Taktisk Kartering – en kort förstudie", FOI Memo 1202 (2005).
 - 70 <http://www.remtechinc.com/rass.htm>
 - 71 Pia Hultgren, "Utredning Satellitprodukter", SMHI 2004
 - 72 Kneizys F.X. et.al., "The MODTRAN2/3 Report and LOWTRAN 7 MODEL", från Ontar corporation, Andover, MA 01845, USA; 1996, www.ontar.com.
 - 73 Johan Westin m.fl., "Active control of infrared signature: System implementation in a ground vehicle", Targets and Backgrounds IX: Characterization and Representation, Proc. SPIE Vol. 5075. (2003)
 - 74 S. Nyberg, and L. Bohman, "Assessing Camouflage Methods Using Textural Features", Opt. Eng. 40(9), 1869-1876 (2001).
 - 75 "FMV riktlinjer för teknisk kravsättning avseende signaturanpassning". Under utarbetande, kontaktpersoner: Ola Dickman FMV och Lars Bohman FOI.
 - 76 Kariis Hans, m.fl., "Styrbara signaturmaterial - möjligheter och forskningsbehov", FOI-R--1412--SE, 2004.
 - 77 Studien "Verkanslaser/DIRCM", HKV H12 860. 200

-
- 78 Johnny Heikell, "Electronic Warfare Self-Protection of Battlefield Helicopters: A Holistic View", Helsingfors Tekniska Högskola, ISBN 951-22-7545-7, 2005
<http://lib.hut.fi/Diss/2005/isbn9512275465/>
- 79 Andre Tommy, Bergsten Ulla, Sporre Lena, "Verifiering, validering och ackreditering av simuleringsmodeller - en förstudie", FOA-R--99-01146-202--SE, 1999
- 80 S. Nilsson, mfl., "Underlagsbehov vid signaturanpassning för internationella insatser - en förstudie", FOI Teknisk rapport FOI-R--1325--SE, 2004
- 81 Tuan Q. Pham, Lucas J. van Vliet, "Normalized averaging using adaptive applicability functions with applications in image reconstruction from sparsely and randomly sampled data", Pattern Recognition Group, Delft University of Technology, The Netherlands. Proceedings från den 13th Scandinavian Conference on Image Analysis SCIA, 2003
- 82 S. Russel, P. Norvig, "Artificial Intelligence a modern approach", second edition, Prentice Hall, 2003. Kapitel 13.7
- 83 Kangsun Lee, Paul A Fishwick, "OOPM/RT: A Multimodeling Methodology for Real-Time Simulation", Software Lab., Corporate R & D Institute, SamSung Electronics, Seoul, Korea och Dept. of Computer Information Science and Engineering, University of Florida, USA, 1999, http://www.cise.ufl.edu/tech_reports/tr99/
- 84 Trevor Tucker, "Jammer Testing And Chaos", <http://www.tti.on.ca/Chaos.pdf>