

# Radarteknikens Potential för Detektion och Klassificering av Landminor

Thord Andersson  
Staffan Abrahamson  
Dan Axelsson  
Hans Strifors

Erfarenheter från FM-projektet "Landminsystem,  
detektion och neutralisering"





# Radarteknikens Potential för Detektion och Klassificering av Landminor

Erfarenheter från FM-projektet "Landmins-system, detektion och neutralisering"

Thord Andersson, Staffan Abrahamson, Dan Axelsson, Hans Strifors

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                        |                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| <b>Utgivare</b><br>FOI - Totalförsvarets Forskningsinstitut<br>Sensorteknik<br>Box 1165<br>581 11 Linköping                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | <b>Rapportnummer, ISRN</b><br>FOI-R--1664--SE                          | <b>Klassificering</b><br>Teknisk rapport |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <b>Forskningsområde</b><br>4. Ledning, informationsteknik och sensorer |                                          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <b>Månad, år</b><br>Maj 2005                                           | <b>Projektnummer</b><br>E30842           |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <b>Delområde</b><br>42 Spaningssensorer                                |                                          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <b>Delområde 2</b>                                                     |                                          |
| <b>Författare/redaktör</b><br>Thord Andersson<br>Staffan Abrahamson<br>Dan Axelsson<br>Hans Strifors                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | <b>Projektledare</b><br>Stefan Sjökvist                                |                                          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <b>Godkänd av</b><br>Johan Söderström                                  |                                          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <b>Uppdragsgivare/kundbeteckning</b><br>Försvarsmakten                 |                                          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <b>Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig</b>                       |                                          |
| <b>Rapportens titel</b><br>Radarteknikens Potential för Detektion och Klassificering av Landminor - Erfarenheter från FM-projektet "Landminsystem, detektion och neutralisering"                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                        |                                          |
| <b>Sammanfattning (högst 200 ord)</b><br><p>I denna rapport redovisar vi radarteknikens potential för detektion och klassificering av landminor. Det idag viktigaste verktyget för minspaning är metalldetektorn. Med den moderna metalldetektorns hjälp kan den absoluta huvuddelen av de idag befintliga minorna detekteras, men känsligheten uppnås till priset av en drastiskt ökad känslighet även för övriga i marken förekommande metallföremål. Detta ger upphov till ett stort antal falsklarm vilka alla måste behandlas med stor försiktighet och omsorg. Radartekniken i kombination med signalbehandling ger stora möjligheter att undvika en stor andel av dessa falsklarm vilket medför en säkrare, snabbare och billigare minröjning.</p> <p>I rapporten redovisas problembakgrunden, teoretiska resultat, försöksimplementeringar och verkliga resultat från blindtester utförda i fält i Kroatien och Eksjö under 2003-2004. Avslutningsvis diskuteras även andra potentiella tillämpningar av tekniken.</p> <p>Från resultaten kan man konstatera att bredbandiga markradarsystem har stor potential att detektera och klassificera såväl ytlagda som nedgrävda minor, i alla typer av terräng, i alla väder, dygnet runt och året runt.</p> |                                                                        |                                          |
| <b>Nyckelord</b><br>Radar, GPR, Minor, Signalbehandling, Detektion, Klassificering                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                        |                                          |
| <b>Övriga bibliografiska uppgifter</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>Språk</b> Svenska                                                   |                                          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                        |                                          |
| <b>ISSN</b> 1650-1942                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <b>Antal sidor:</b> 48 s.                                              |                                          |
| <b>Distribution enligt missiv</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <b>Pris:</b> Enligt prislista                                          |                                          |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                            |                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| <b>Issuing organization</b><br>FOI – Swedish Defence Research Agency<br>Sensor Technology<br>P.O. Box 1165<br>SE-581 11 Linköping                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | <b>Report number, ISRN</b><br>FOI-R--1664--SE                                              | <b>Report type</b><br>Technical report |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>Programme Areas</b><br>4. C4ISTAR                                                       |                                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>Month year</b><br>May 2005                                                              | <b>Project no.</b><br>E30842           |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>Subcategories</b><br>42 Above water Surveillance, Target acquisition and Reconnaissance |                                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>Subcategories 2</b>                                                                     |                                        |
| <b>Author/s (editor/s)</b><br>Thord Andersson<br>Staffan Abrahamson<br>Dan Axelsson<br>Hans Strifors                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | <b>Project manager</b><br>Stefan Sjökvist                                                  |                                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>Approved by</b><br>Johan Söderström                                                     |                                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>Sponsoring agency</b><br>Swedish Armed Forces                                           |                                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>Scientifically and technically responsible</b>                                          |                                        |
| <b>Report title (In translation)</b><br>The Potential of Radar Technology for Detection and Classification of Land Mines - Experiences from the project "Land Mine Systems, Detection and Neutralization"                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                            |                                        |
| <b>Abstract (not more than 200 words)</b><br><p>In this report we present the potential of radar technology for detection and classification of land mines. Today, the most important tool for mine detection is the metal detector. With help of the modern metal detector, the absolute majority of the existing land mines can be detected. This sensitivity is however gained together with a tremendous increase in sensitivity for other metallic objects and fragments in the ground. This leads to a large number of false alarms which all have to be handled with care and precaution. The combination of radar technology and signal processing gives large opportunities to avoid a large part of these false alarms, and leads to safer, faster and less expensive mine clearance.</p> <p>In the report we discuss the context, theoretical results, experimental implementations and real results from blind tests performed in the field in Croatia and Eksjö during 2003-2004. A discussion of other potential applications concludes the report.</p> <p>The results demonstrate that broad band radar systems have great potential to detect and classify land mines in all kinds of terrain and weather, around the clock and throughout the year.</p> |                                                                                            |                                        |
| <b>Keywords</b><br>Radar, GPR, Mines, Signal Processing, Detection, Classification                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                            |                                        |
| <b>Further bibliographic information</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <b>Language</b> Swedish                                                                    |                                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                            |                                        |
| <b>ISSN</b> 1650-1942                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | <b>Pages</b> 48 p.                                                                         |                                        |
| <b>Price acc. to pricelist</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                            |                                        |



# Innehåll

|                                                                                |           |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Innehåll.....</b>                                                           | <b>5</b>  |
| <b>1 Bakgrund .....</b>                                                        | <b>7</b>  |
| <b>2 Radarns teoretiska potential.....</b>                                     | <b>8</b>  |
| 2.1 Kort historik .....                                                        | 8         |
| 2.2 Klassificering av mål med samtidig estimering av djup och fukthalt.....    | 9         |
| 2.3 Radarns potential.....                                                     | 12        |
| <b>3 Radarns potential kopplat till försvarsmaktens hotbildsscenarioer ...</b> | <b>13</b> |
| 3.1 Markburet spaningssystem.....                                              | 13        |
| 3.1.1 Sensorbärare.....                                                        | 13        |
| 3.1.2 Tänkbara sensorer och dess tillämpningar .....                           | 13        |
| 3.1.3 Uppskattning av sensorernas prestanda och begränsningar .....            | 14        |
| 3.2 Flygburen mindetektion och övervakning .....                               | 14        |
| <b>4 Utvecklingssystemet HUMUS .....</b>                                       | <b>17</b> |
| 4.1 Försöksplattformar .....                                                   | 17        |
| 4.1.1 Syfte .....                                                              | 17        |
| 4.1.2 Evolution.....                                                           | 17        |
| 4.1.3 Systembeskrivning.....                                                   | 19        |
| 4.1.4 Operatörsgränssnitt .....                                                | 20        |
| 4.2 Mätfaciliteter .....                                                       | 21        |
| 4.3 Signalbehandling.....                                                      | 22        |
| 4.3.1 Problembeskrivning .....                                                 | 22        |
| 4.3.2 Detektionsstrategier .....                                               | 22        |
| 4.3.3 Hierarkisk Klassificeringsmodell.....                                    | 22        |
| 4.3.4 Signalmodeller .....                                                     | 23        |
| 4.3.5 Träningsfasen.....                                                       | 24        |
| 4.3.6 Klassificeringsfasen .....                                               | 25        |
| 4.3.7 Ett verkligt exempel.....                                                | 25        |
| 4.3.8 Sammanfattning .....                                                     | 32        |
| <b>5 Resultat från fälttest i Kroatien och Eksjö.....</b>                      | <b>33</b> |
| 5.1 Varför göra fälttest? .....                                                | 33        |
| 5.2 Kroatien.....                                                              | 34        |
| 5.2.1 Mätplatsbeskrivning.....                                                 | 34        |
| 5.2.2 Blindtest 1 – Beredd Mark.....                                           | 36        |
| 5.2.3 Blindtest 2 – Väg .....                                                  | 37        |
| 5.3 Eksjö.....                                                                 | 39        |
| 5.3.1 Mätplatsbeskrivning.....                                                 | 39        |
| 5.3.2 Blindtest 1 – Jordbana 2003.....                                         | 40        |

---

|          |                                                                                                   |           |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.3.3    | Blindtest 2 – Jordbana 2004.....                                                                  | 40        |
| 5.3.4    | Blindtest 3 – Grusväg 2003.....                                                                   | 41        |
| 5.4      | Sammanfattning och förslag till fortsatt arbete .....                                             | 43        |
| 5.4.1    | Förslag till fortsatt arbete .....                                                                | 43        |
| <b>6</b> | <b>Andra tillämpningar .....</b>                                                                  | <b>44</b> |
| 6.1      | Utveckling av ett fordonsburet detektions- och klassificeringssystem för OXA i<br>skjutfält ..... | 44        |
| <b>7</b> | <b>Sammanfattning .....</b>                                                                       | <b>45</b> |
| 7.1      | Förslag till fortsatt arbete .....                                                                | 46        |
|          | <b>Referenser.....</b>                                                                            | <b>47</b> |



# 1 Bakgrund

Försvarsmaktsprojektet "Landminsystem, detektion och neutralisering" har syftat till att genom nya sökutrustningar eller förbättrade metoder för detektion av landminor och oexploderad ammunition öka egna förbands rörlighet och överlevnad exempelvis i samband med internationella operationer. Avsikten med en detektionsutrustning är att få en så hög detektionssannolikhet som möjligt samtidigt som falsklarmen kraftigt reduceras. Därigenom kan säkerheten och hastigheten vid ammunitionsröjning avsevärt ökas.

Det idag viktigaste verktyget för minspaning är metalldetektorn. Med dess hjälp kan den absoluta huvuddelen av de idag befintliga minorna detekteras. Moderna metalldetektorer är tillräckligt känsliga för att detektera litet metallinnehåll, men känsligheten uppnås till priset av drastiskt ökad känslighet även för övriga i marken förekommande metallföremål. Detta ger upphov till ett stort antal falsklarm vilka måste behandlas med samma försiktighet och omsorg.

Det är i skenet av detta som FOI har bedrivit forskning inom minspaning med markradar. Radarn detekterar minor genom att minans dielektriska egenskaper skiljer sig från de hos den omgivande jorden. Detta medför att radarenergi reflekteras från minan och avslöjar minans position och djup. Minans konstruktion och material ger sammantaget upphov till för varje grupp av minor unika egenskaper, ett fingeravtryck för radar som ger möjligheter till identifiering av den aktuella mingruppen, men framförallt skilja minan från falsklarm.

Målet med radarverksamheten har varit att utveckla en mindetektor. Det vill säga ett system som automatiskt klassificerar det detekterade objektet. I framtida snabba stridsförlopp med både ytlagda och nedgrävda minor är det helt nödvändigt att fokusera mot minspaningssystem som har kapacitet att klassificera minor.

## 2 Radarns teoretiska potential

En viktig uppgift för traditionell signalanalys är att karakterisera signaler, vanligen registrerade i form av tidseriedata. De karakteriserande särdragen har i allmänhet inget djupare samband med de fysikaliska processer som genererar signalerna. Framgången med minradarprojektet beror till en del på att analysmetoder har utvecklats som just är baserade på fysikaliska insikter om hur returpulser från ett radarbelyst objekt genereras och hur de utbreder sig i markliknande medier.

### 2.1 Kort historik

Tidigt i minradarprojektets historia, då markminor ännu inte hade blivit föremål för studium, vanns en viktig insikt i projektet: Signaturinformation om ett radarmål belyst av en ultrabredbandig puls kan bäst utvinnas, om *hela* den återspridda radarpulsen utnyttjas, den primära, direktreflekterade returen så väl som de efterföljande sekundära returerna. Detta faktum, som nu kan synas självklart, möttes av protester när det presenterades vid den första SPIE konferensen om automatisk måligenkänning i Orlando år 1991, Ref. [1]. Vid denna tid var intresset för transienta radarreturer främst knutet till The Singularity Expansion Method (SEM), se artikel av C. Baum i [14].

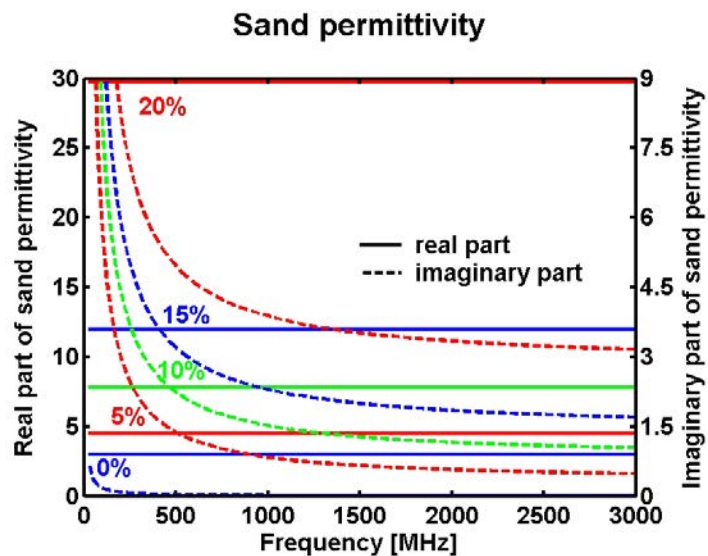
Nedgrävda minliknande objekt studerades i projektet ursprungligen med hjälp av impulsradar och signaturinformation genererades framför allt i frekvensdomänen och i den kombinerade tid-frekvensdomänen. En tidig kunskap var, att signaturer i frekvensdomänen var mycket känsliga för objektets nedgrävningsdjup, varför tid-frekvensdistributioner snabbt vann erkännande i forskargruppen, Ref. [4]. Ett antal olika tid-frekvensdistributioner undersöktes för att utröna deras relativa meriter som underlag för måligenkänning. Det var främst förmågan att utvinna distinkta signatursärdrag och distributionens robusthet som studerades, Ref. [6]. Det framgick att en pseudo-Wignerdistribution (PWD), förutom att fördelaktigt skilja ut sig från övriga undersökta distributioner, är beräkningsmässigt effektiv. Samstämmiga resultat nåddes också i ett försök att identifiera objekt nedsänkta under vatten, där klickljud alstrade av delfiner användes som undersökande signal, Ref. [10].

Pulser utsända från impulsradar uppvisar en bristfällig repeterbarhet. Radar med stegad frekvens (SFCW radar) är i allmänhet väsentligt stabilare, eftersom den sänder ut mycket långa pulståg av en frekvens i taget. Med hjälp av digital Fourier-transformteknik kan tidseriedata syntetiseras med utomordentligt god repeterbarhet. En olägenhet med sådana syntetiserade vågformer är emellertid att alla signalkomponenter som hörör från objekt utanför det s.k. entydighetsavståndet avbildas innanför denna gräns. I praktiken har detta dock inte vållat några problem i minradartillämpningar, Ref. [7, 13].

I en serie arbeten, främst Ref. [11, 12, 5], har ett helt nytt koncept för identifiering av nedgrävda mål utvecklats. Först påvisades möjligheten teoretiskt, därefter har metoden implementerats och testats vid fältförsök. Metoden bygger på kunskap om elektromagnetiska vågors utbredning i dispersiva och dissipativa medier samt reflektionsegenskaper hos gränssytan mellan olika medier. Denna kunskap kan utnyttjas för att generera PWD-signaturer av detekterade mål, när målets djup och markens fukthalt är kända. För vart och ett av de sökta målobjekten skapas en mall när objektet befinner sig på ett känt djup i mark av känd fukthalt. Vid klassificering av ett detekterat mål används sedan en global optimeringsalgoritm för att anpassa djup och fukthalt, nu betraktade som okända parametrar, så att målets signatur på bästa sätt anpassas till var och en av de framtagna objektmallarna. Anpassningen karakteriseras av ett numeriskt värde på en kostnadsfunktion. Till sist klassificeras målet enligt den mall som svarar mot det minsta värdet av kostnadsfunktionen. Dessutom utgör det till denna mall hörande parametervärdena för djup och fukthalt uppskattningar av målets aktuella djup och markens fukthalt.

## 2.2 Klassificering av mål med samtidig estimering av djup och fukthalt

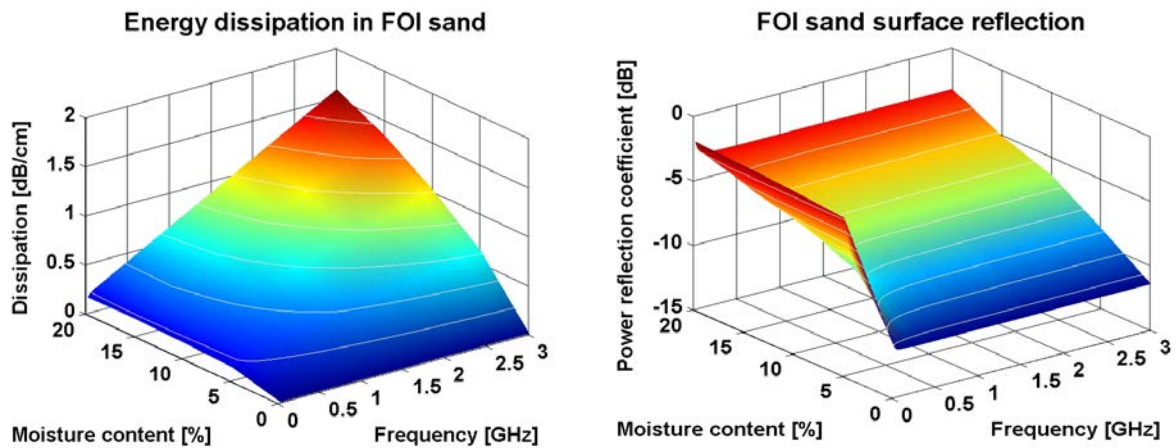
För att demonstrera hur väl denna klassificeringsmetod kan fungera i praktiken har en SFCW radar använts som transmitterar 55 olika frekvenser i våglängdsbandet 300–3000 MHz i steg om 50 MHz. Syntetiserade tidserier motsvarar här en samplingsfrekvens av 12,8 GS/s och har en utsträckning av 20ns. De redovisade mätningarna har utförts vid SWEDECs testområde i Eksjö med det manburna radarsystemet HUMUS (HUMANitarian MULTIsensor System) utvecklat vid FOI. De dielektriska egenskaperna hos den mark som nyttjades vid SWEDEC är inte kända, men data enligt Figur 1 användes vid beräkningarna. Dessa data är preliminärt framtagna för den sand som finns i inomhustestboxen [16] vid FOI, Linköping.



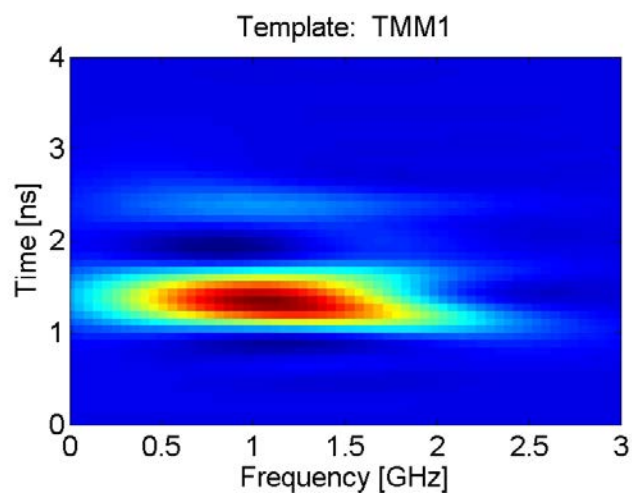
Figur 1: Dielektriska egenskaper hos fuktig sand

Sand med dielektriska egenskaper enligt Figur 1 uppvisar energidissipation uttryckt i dB/cm som funktion av fukthalt och frekvens enligt Figur 2, vänster ytplot. På motsvarande sätt visar Figur 2, höger ytplot, reflektionskoefficienten i dB vid gränsytan mellan sand och luft.

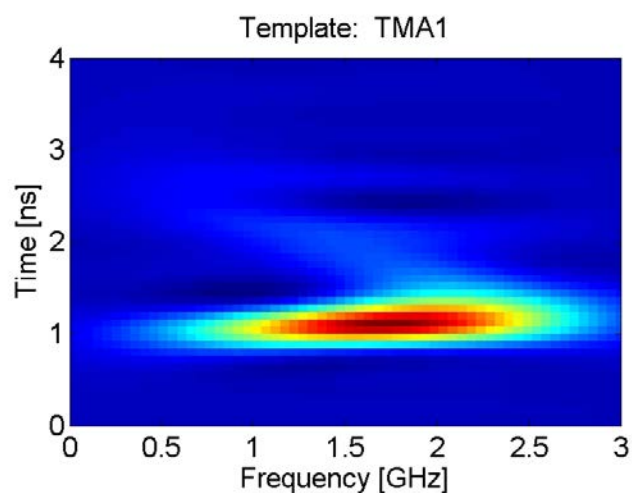
Vidare visas exempel på PWD-mallar för två mål, metallmina TMM1 och lågmetallisk mina TMA1, Figur 3 respektive Figur 4, vänster delfigur. Höger delfigur avbildar respektive mina, vilka båda är tankminor av storleken 30 cm i diameter.



Figur 2: Vågutbredningsegenskaper hos sand med dielektriska egenskaper enligt Figur 1



Figur 3: PWD-mall och metallmina TMM1



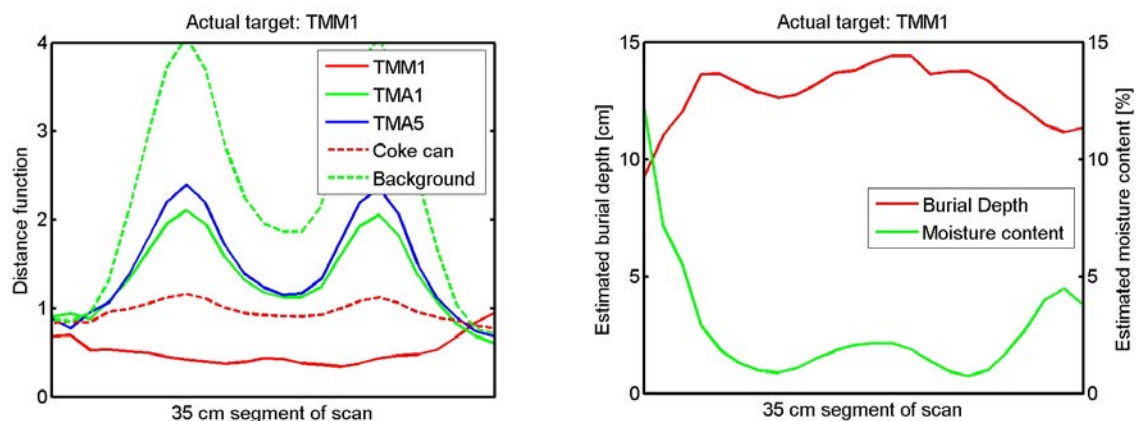
Figur 4: PWD-mall och lågmetallisk mina TMA1

Vid minletning låter operatören antennen framför honom svepa över en bredd av ungefär 1 m, och han flyttar sig framåt några centimeter mellan varje svep. Vid svepet registreras 75 vågformer som omedelbart presenteras för operatören på en bildskärm. Radarmätningarna vid SWEDEC gjordes i oktober 2003 men den optimeringsbaserade klassificeringsmetoden har implementerats senare och dess möjligheter demonstrerats, Ref. [5].

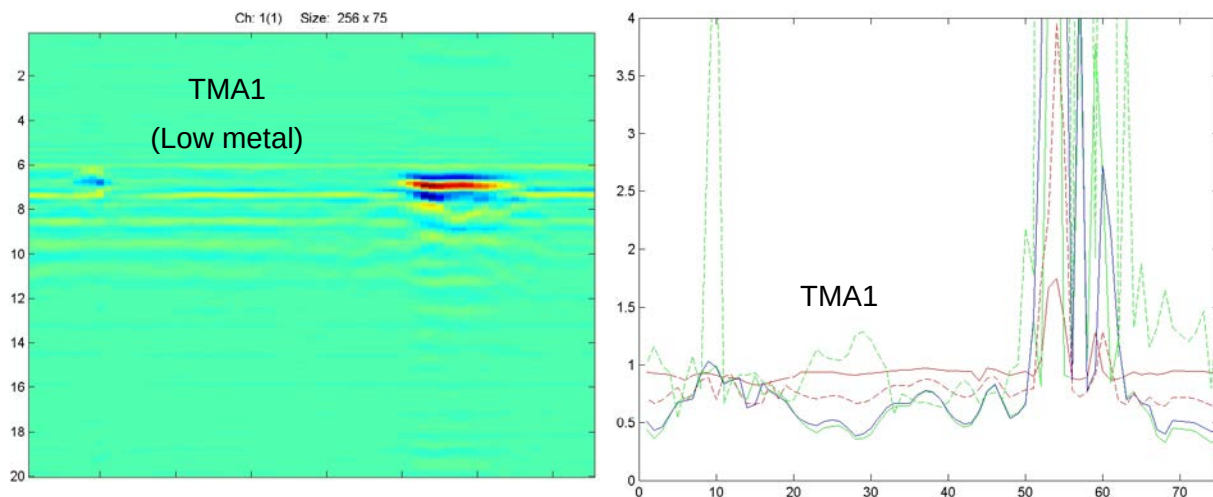
Figur 5 visar ett exempel på klassificering av ett mål längs ett 35 cm långt segment av ett svep. Den nedersta, röda kurvan i vänster diagram utgörs av distansfunktionen eller kostnadsfunktionen när mallen svarar mot TMM1 minan (Figur 3), som därmed ger korrekt klassificering. Höger diagram anger uppskattningar av detta måls djup (13–14 cm) och markens fukthalt (ca 2%). Det verkliga djupet var ca 20 cm medan den verkliga fukthalten vid mättillfället inte var känd.

Figur 6 (vänster) visar en djupvy av samtliga 75 tidsserier registrerade under ett svep. Motsvarande kostnadsfunktioner när registrerad vågform anpassats till mållmallarna visas i diagrammet till höger. Till höger i djupvyn kan ett objekt tydligt urskiljas svarande mot vågformerna nr 50–65. Kostnadsfunktionen hörande till dessa vågformer uppvisar dock ingen som helst konsekvens i fråga om värdet från en vågform till nästa. Slutsatsen är att detta objekt, som förvisso ger en stark retursignal, inte är något av de sökta målen. Det var känt vid mättillfället att klotter i form av t.ex. metallfragment fanns i marken, och det är sannolikt ett sådant fragment som gett upphov till den starka signalen. Som framgår av diagrammet till höger i Figur 6 radar emellertid kostnadsfunktionerna upp sig mycket prydligt för vågformerna nr 20–35. Här har den lågmetalliska minan TMA1 blivit klassificerad med TMA5, också en lågmetallisk mina, som stark konkurrent. I djupvyn kan man dock på sin höjd ana någon liten kontrast vid minans position.

Detta resultat är intressant eftersom det visar, att även i fall, där traditionell detektering med hjälp av målets kontrast mot omgivningen inte förmår finna ett eftersökt objekt, kan klassificeringsalgoritmen också tjäna syftet att detektera mål.



Figur 5: Kostnadsfunktion (vänster) och estimerat djup och fukthalt för klassificerat mål (höger)



Figur 6: Djupvy av 75 vågformer (vänster) och mot mallarna svarande kostnadsfunktioner (höger)  
X-axlarna representerar vågformerna

## 2.3 Radarns potential

Denna redogörelse för vad ultrabredbandiga radarsystem, impulsradar eller stegadfrekvens-radar, kan åstadkomma visar att sådana system med tillräckligt avancerad signalanalys kan utvecklas till kraftfulla redskap för att finna objekt under markytan. I projektet har intresset fokuserats på nedgrävda markminor, och att finna dem en och en. Naturligtvis kan system av detta slag även detektera och klassificera ytlagda minor, vilket i själva verket utgör ett något enklare problem. Ytlagda minor är ett enklare problem dels därför att störande markklotter anländer till radarn senare än huvuddelen av retursignalen från minan, dels därför att minan befinner sig i ett välkänt medium, nämligen luft. Vidare utgör vegetation ett ringa hinder för upptäckt och identifiering, även om målen är dolda för ögat.

Vad som sagts om markminor gäller naturligtvis också o-exploderad ammunition (OXA). För OXA kompliceras problemet något av att målens orientering i marken kan skifta avsevärt. Å andra sidan är sådana mål alltid metalliska, vilket ger starka retursignaler.

Slutligen förtjänar det att understrykas, att om avsikten är att detektera stationära objekt i klottermiljö, måste målidentifiering integreras med detekteringen. Om inte, blir följden en avsevärd falsklarmfrekvens oberoende av vilket system för detektering som används. För att återknyta till inledningen är för den skull inget system för detektion av stationära objekt bättre än de metoder för signalanalys som används för målidentifieringen.



### 3 Radarns potential kopplat till försvarsmaktens hotbildsscenarioer

Vikten av svensk minröjningskapacitet för eget behov och för internationella fredsfrämjande insatser har betonats under de senaste åren. Behovet av effektiva sensorer är stort för min- och explosivämnesdetektion och för att säkerställa minfria områden. Genom att kunna minska de ytor som måste genomsökas, s.k. *area reduction*, och effektivt lokalisera enskild mina, kan röjningsprocessen snabbas upp avsevärt samtidigt som säkerheten för minröjningspersonalen förbättras. Efter hand har FoU-behovet ytterligare aktualiserats till följd av det ökade svenska engagemanget i olika internationella insatser. Delar av forskningsresultaten och erfarenheterna från internationellt utbyte kan nu användas för min- och explosivämnesdetektion.

Av de hotbildsscenarioer som används i försvarsmaktsstudien "FramFoT" är punkterna 1-5 kopplade till begränsat väpnat angrepp och punkten 6 till internationella insatser. Underlag till hotbildsscenarioerna är taget ur Försvarsmaktens funktionsstudie, se [15].

1. Bataljons anfall mot nyligen luftlandsatt fiende
2. Bataljons anfall mot försvarsgrupperad fiende
3. Bataljons anfall över vattendrag
4. Strid i bebyggelse
5. Bekämpning av grupperade förband med avståndslagda minor
6. Kontroll av väg med avseende på återminering i internationella insatser

Fokuseringen mot begränsat väpnat angrepp har med tiden tonats ned och verksamhet kopplat till internationella insatser har lyfts fram.

När det gäller markburna spaningssystem kopplade till hotbildsscenarioer är forskningsresultaten applicerbara på "Kontroll av väg med avseende på återminering i internationella insatser" och till viss del på "Strid i bebyggelse".

Flygburna spaningssystem har potential att stödja alla scenarioer främst när det gäller minområdesdetektion men på sikt även utpekning av enskilda minor.

#### 3.1 Markburet spaningssystem

Genom att utnyttja radars unika egenskaper att både detektera och klassificera objekt så lämpar sig metoden särskilt för detektering av stridsvagnsminor i väg och även på andra relativt jämna markområden. En lågfrekvent bredbandsradar anpassad för stridsvagnsminor möjliggör detektion av objekt till minst ett djup av 50 cm. Klassificeringen sorterar bort stenar, metallfragment och lyfter fram minor och minliknande objekt.

##### 3.1.1 Sensorbärare

En tänkbar sensorbärare är ett splitterskyddat fordon. Det splitterskyddade fordonet förses med en frontmonterad radar och en hydraulisk arm där en valfri sensor eller ett aggregat för vegetationsröjning kan installeras. Se Figur 7.

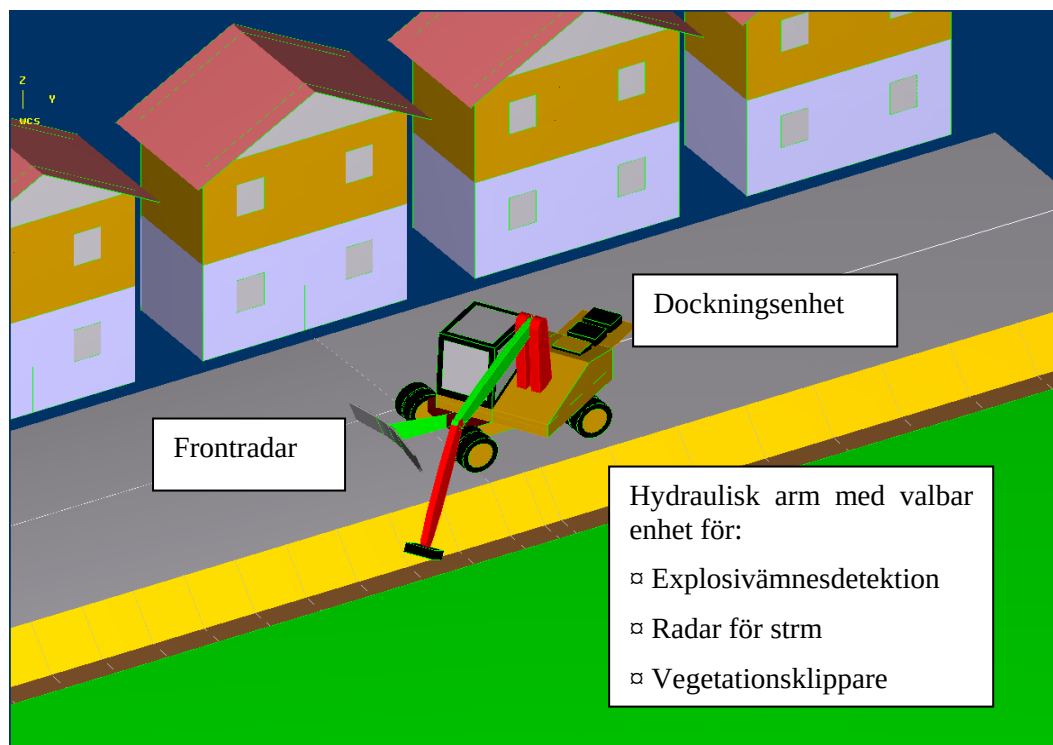
##### 3.1.2 Tänkbara sensorer och dess tillämpningar

En frontmonterad radar för nedgrävda mineringar i väg och en dockningsbar radar för nedgrävda mineringar i diken/dikesrenar. Systemet kan kompletteras med en dockningsbar sugenhet för kemisk detektion som kopplas till den hydrauliska armen. Analysenhet placeras i det

splitterskyddade fordonet. Tänkbara tillämpningar för kemisk explosivämnesdetektion är IED/försåt för områden, byggnader och fordon samt för längre tids platslagda mineringar. Systemet kan också kompletteras med optik för sidverkande minor.

### 3.1.3 Uppskattning av sensorernas prestanda och begränsningar

- *Radar*: Realtidsanalys kan genomföras upp till 10-20 km/h beroende på markförhållanden och typ av fordon. Radarsystemets signalbehandlingsprestanda samt vikt och storlek är inte gränssättande. Detektionssannolikhet är stor.
- *Kemi*: Analys tar 0- flera minuter beroende på system. Detektionsgräns är för närvarande  $10^{-9}$  gram per gram torrsustans (TS). Denna förbättras under hand. Det går inte att genomföra s.k. *pinpointing*.
- *Optik*: Kräver ytterligare forskningsinsatser innan ett operativt förslag kan läggas.



Figur 7: Fordonsburet spaningssystem kopplat till internationella insatser.

## 3.2 Flygburen mindetektion och övervakning

Nyligen har Mirage System [21] och Schiebel Technology [22] utvecklat ett flygburet mindetektions- och övervakningssystem bekostat av amerikanska armén. Radarsensorn var monterad på en obemannad minihelikopter utvecklad av Schiebel. Minihelikoptern är väl lämpad för uppgiften pga. att den kan genomföra precisa navigationsflygningar och därigenom möjliggör SAR-avbildningar.

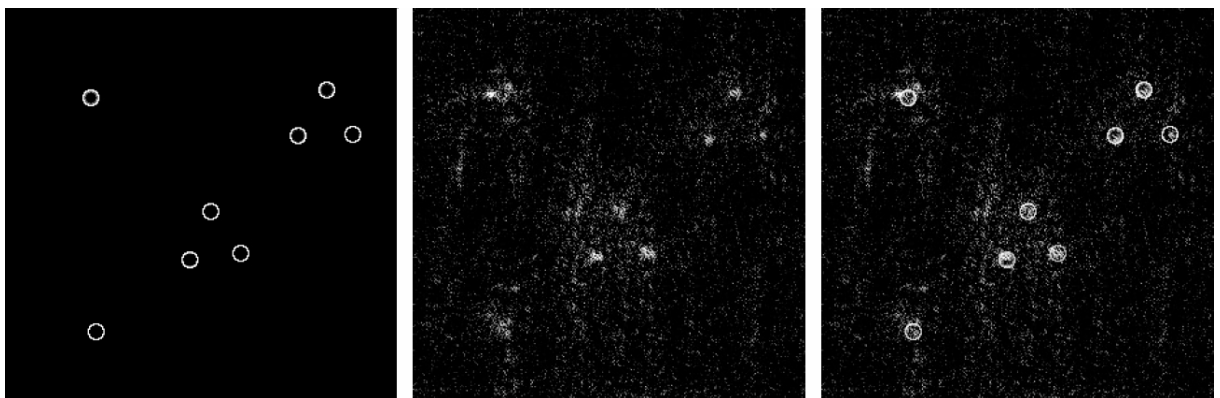
Jungfruflygningen utföll väl och en uppgradering görs av radarsystemet för kommande flygningar. Minihelikoptern med radarsystemet presenteras i Figur 8.





Figur 8: Schiebels minihelikopter "Camcopter" med Mirage radarsystem [21, 22]

Fotavtrycket vid den aktuella flygningen var 65m x 65m. I detta område fanns en yta på 15m x 15m, där 8 stridsvagnsminor var utlagda. En av dessa minor låg på ytan medan 7 var nedgrävda ca 11 cm räknat från ytan till toppen på minan. I figurerna nedan (Figur 9) jämförs GPR/SAR-bilden med s.k. *ground truth*. Den vänstra bilden visar minornas position. Den mittersta figuren visar den avbildande GPR/SAR-bilden genererad av radarsystemet och den högra bilden visar SAR-bilden med överlagrad *ground truth*.



Minornas verkliga position

GPR/SAR-bild över området

SAR-bild med överlagrad pos.

Figur 9: Exempel på resultat från en flygburen GPR SAR registrering [21].

Man kan konstatera att SAR-tekniken möjliggör detektion av stridsvagnsminor från flygburna system. Informationen är dock av ringa värde om den inte följs upp av signalbehandling så att minor kan pekats ut även i okända klotterbemängda områden.

Det som hittills framkommit från öppen amerikansk publicering är att SAR-klassificering baserar sig på signalstyrkan från ekot, dess utbredning i markplanet, målekots position i tidssvaret och under senare tid även ekots frekvensinnehåll. Noterbart är att det är i linje med FOIs tidiga forskningsresultat.

Oberoende av teknik är klassificering av data nödvändigt i ett framtida spaningssystem. Blinda klassificeringstester har genomförts med FOI:s radarsystem på SRV:s testfält i Kroatien och på SWEDEC:s testområde i Eksjö. De blindtester som gjordes bevisade systemets effektivitet mot minor och okänslighet mot falska mål.

Sammanfattningsvis kan man konstatera att:

- Bredbandiga radarsystem har potential att detektera och klassificera såväl ytlagda som nedgrävda minor. Då radarn kan detektera alla dielektricitetskontraster i marken krävs signalbehandling för att urskilja efterfrågade objekt.
- I markfallet har radarn potential att detektera och klassificera minor i alla typer av terräng dygnet runt och året runt.
- Radarsystem möjliggör klassificering och tredimensionell visualisering av objekt.
- I flygfallet har SAR-radar potential för detektion och klassificering av minor i alla miljöer.

## 4 Utvecklingssystemet HUMUS

I detta kapitel går vi igenom HUMUS-systemets uppbyggnad på system- och signalbehandlingsnivå, samt beskriver metoder och arbetssätt. En kort historik ges även över de olika systeminkarnationerna. Ett signalbehandlingsexempel med verkliga mätdata avslutar kapitlet.

### 4.1 Försöksplattformar

#### 4.1.1 Syfte

Vi önskade en plattform för utveckling av både hård- och mjukvara för minspaning med radar. Vi har utvecklat en plattform, som nu är i tredje generationen, som är moduluppbyggd där både hårda och mjuka komponenter kan utvecklas och bytas ut.

#### 4.1.2 Evolution

Minspaning med radar vid FOI (dåvarande FOA) började i slutet på 1980-talet med inlånad utrustning. Enkla mätningar kunde utföras för att känna på hur radarsignaturer från objekt under markytan såg ut. Resultaten såg lovande ut och så småningom kunde det första minradarprojektet starta.

Det första försökssystemet som togs fram var fordonsburet med impulsradar och ett antal antenner inköpt från ERA, England [23]. Systemet utvecklades, framförallt mjukvaran, och användes under åren 1989-1992. Den egna utvecklingen bestod av framtagning av den mekaniska upphängningen och avsökningsanordningen för antennen. På mjukvarusidan var det fråga om systemprogrammering och enkel signalbehandling för presentation av radardata.



Figur 10: Det första minradarspaningssystemet som utvecklades vid FOA 1989.

**1992** önskades FM ett personburet system för att kunna detektera truppminor. Det första personburna systemet på FOI ser vi i Figur 11. Vi använde samma systemkomponenter som i det fordonsburna systemet plus att det tillkom en operatörsterminal. Det var endast antennen och terminalen som operatören bar med sig. Radar, huvuddator och strömförsörjning stod på en vagn vid sidan. Mätsignal, data och kraft fördes över på kablar.



*Figur 11: Den första manburna plattformen. Utvecklades och användes 1992-1995.*

**1995** utvecklades försöksplattformen BURLOC. En ny impulsradar och en ny antenn med dubbla korslagda dipoler inköptes från ERA, England [23]. Kapslingen och antennupphängningen designades av och inköptes från Zenith Design AB, Malmö. Nu fick vi ett system där alla komponenterna kunde bäras av operatören. Den kraftfulla signalbehandlingen utfördes i en sidodator. Data skickades trådlöst mellan enheterna.



*Figur 12: BURLOC, ett komplett system som operatören kunde bära. Användes och utvecklades 1995-1999.*

Från 1999 utvecklades försöksplattformen HUMUS. Nu hade vi haft ytterligare en finansiär i form UD/Sida och senare också ett EU-projekt så ny hårdvara kunde utvecklas. Sedan 1996 hade vi i ett samarbetsprojekt med CelsiusTech (CTE) [24] haft målet att ta fram ett multisensorsystem med radar och metalldetektor. Här fick vi in en SFCW-radar från CTE och antenner provades från CTE, ERA [23] och FOI. Sedan 2000 har vi koncentrerat oss på enbart radar.



*Figur 13: Den senaste plattformen, HUMUS. Utvecklad och använd sedan 1999.*

I plattformen HUMUS fick vi en bättre miljö för operatören. Framförallt var det skärmens höga placering som gjorde den lättare att se i solljus samt att det blev fri sikt ner mot marken och det område som skulle avsökas.

#### **4.1.3 Systembeskrivning**

Humus är en försöksplattform där vi kan prova olika sensorer och sensorelektronik. De teknologier som var aktuella när Humus utvecklades 1999 var radar och metalldetektor, vilka kombinerades till ett multisensorsystem. Sedan 2000 har vi koncentrerat utvecklingen på radarsignalbehandling. I Figur 14 ser vi ett blockschema för de ingående systemdelarna i Humus.

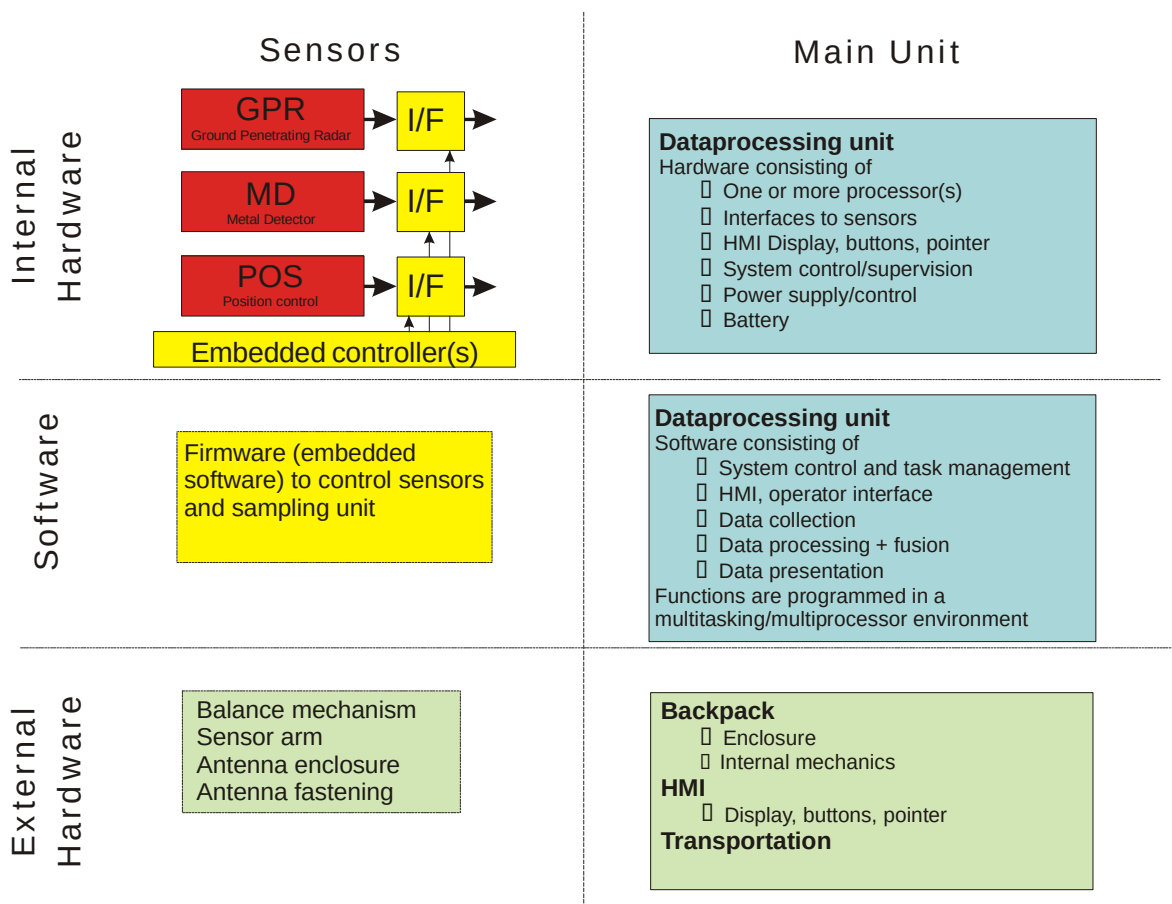
Kolumnerna i figuren visar:

1. *Sensors:* Sensorernas hård- och mjukvara samt kapsling och upphängning
2. *Main unit:* Huvudenhetens hård- och mjukvara samt kapsling och upphängning.

Raderna i figuren visar:

1. *Internal hardware:* sensorer och elektronik.
2. *Software:* mjukvara i huvud- och sidodatorer.
3. *External hardware:* kapsling, sensorarm, display och operatörskontroller.



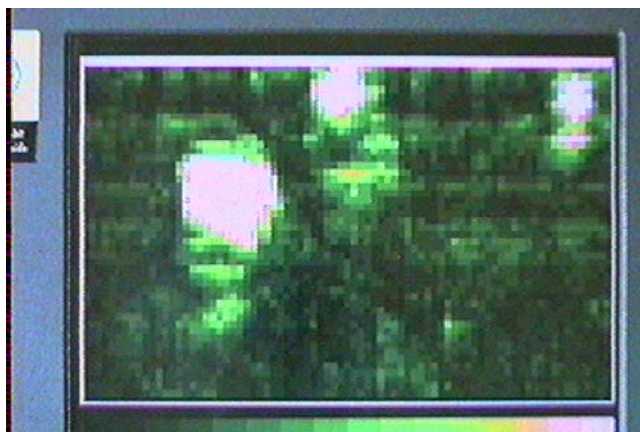


Figur 14: Blockschemat över HUMUS.

Förutom de komponenter som nämns ovan finns en trådlös kommunikationslänk till en sidodator som kan få data i realtid, utföra signalbehandling och därefter returnera resultat till HUMUS och operatören. Sidodatorn tjänar ytterligare ett syfte och det är vid demonstrationer så kan vi visa åhörarna vad som händer med samma bilder som operatören ser.

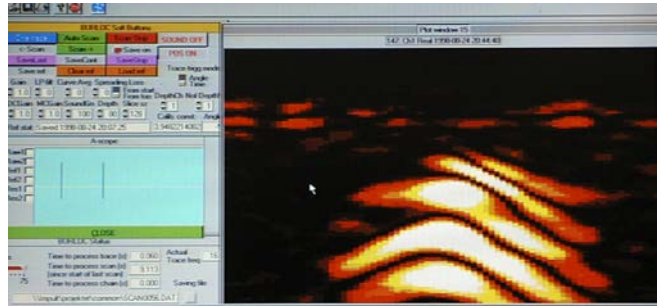
#### 4.1.4 Operatörsgränssnitt

Användargränssnittet i plattformen har utvecklats genom åren. Första systemet som byggdes 1989, byggdes kring operativsystemet MSDOS. Vi kunde presentera radardata i djupvyer eller topvy. Det fanns få valmöjligheter hur data och information i övrigt skulle visas. Ett exempel på djupvy kan ses i Figur 15.



Figur 15: Operatörsvy från 1993.

Sedan 1995 har vi använt MS Windows som miljö och därigenom haft ett fönsterbaserat operativsystem. Möjligheterna och användarvänligheten förbättrades avsevärt. Nu fick vi en helt ny värld att arbeta i, ett mer intuitivt och informativt gränssnitt. Genom att önskad information kan väljas av operatören vid varje tillfälle så blir också programmeringen enklare. Man behöver inte på förhand bestämma olika informations synlighet och placering, utan det kan användaren bestämma.



*Figur 16: Exempel på operatörsvy från 1998. Här är valmöjligheterna att visa information många.*

## 4.2 Mätfaciliteter

För att kunna utveckla ett minspaningssystem så krävs, förutom minor och andra övningsobjekt, också relevanta och kontrollerbara miljöer att mäta i. Vi har därför byggt upp två försöksanläggningar, en inomhus och en utomhus. Inomhusanläggningen har en testbox som mäter 5 x 5 x 1,5 m, se Figur 17. Över testboxen kan en robotarm röra sig med stor noggrannhet, styrd från en dator. Utomhus har vi åtta olika testboxar med varierande innehåll som simulerar olika markförhållanden.

För en noggrann beskrivning av dessa försöksanläggningar samt använda referensobjekt, mätinstrument och antenner se referens [16].



*Figur 17: Inomhustestboxen där HUMUS är monterad på roboten. I förgrunden ser vi styrdator och skärmar för föreläsning.*

## 4.3 Signalbehandling

I denna sektion kommer vi att diskutera signalbehandlingens uppgift, vilka problem som måste lösas och hur vi har valt att angripa dessa. Vi kommer också att ge signalbehandlingsexempel på verkliga radarsignaler.

### 4.3.1 Problembeskrivning

En GPR försöker hitta nedgrävda objekt genom att sända elektromagnetisk strålning ner i marken och sedan ta emot och analysera den reflekterade strålningen. Signalbehandlingens uppgift är att, för varje punkt som radarantennen sveper över, avgöra om den reflekterade radarsignalen härrör från något farligt objekt, t.ex. en mina, eller om ekot kommer från vanlig och säker mark.

Man vill alltså att signalbehandlingen skall larma för minor men ingenting annat. Detta är generellt ett svårt problem eftersom man samtidigt vill maximera upptäcktssannolikheten och minimera falsklarmssannolikheten. Missar systemet en mina utgör den en dödsfara för operatören eller för framtida brukare av marken. Larmar systemet istället ofta och i onödan för splitter, stenar och annat, kommer minröjningen att ta väldigt lång tid. Det sistnämnda fallet gäller ofta för metalldetektorn som larmar för alla typer av metallsplitter och metallskrot i marken. Vi har alltså ett optimeringsproblem där detektionsprestanda måste vägas mot falsklarmsbenägenhet.

### 4.3.2 Detektionsstrategier

Det finns två grundläggande strategier för hur man löser detektionsproblemet:

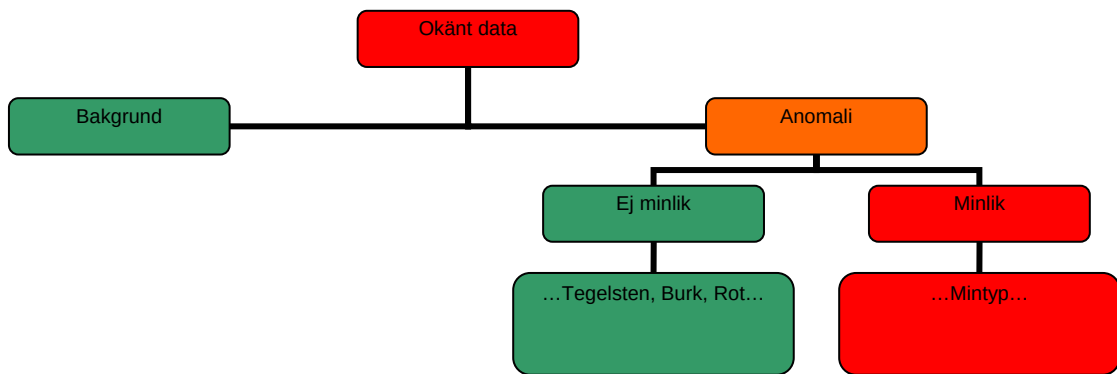
- "Mincentrerad detektion": Här antar man att man vet vilka typer av farliga objekt som finns i marken och man letar efter radarreflektioner som härrör från dessa. Hittar man inte några sådana reflektioner antar man att marken är säker. Fördelen med detta angreppssätt är att man får väldigt specifik och noggrann utpekning av de kända minorna. Nackdelen är att man gör stora antaganden om vad man letar efter. Vad händer t.ex. om en mina är skadad, vattenfylld eller ligger i överlapp med en annan mina?
- "Markcentrerad detektion": Här försöker man karaktärisera "vanlig mark" så bra att man larmar vid avvikelser från detta. Fördelen med detta angreppssätt är att man gör få antaganden om vilka minor man letar efter eller hur de ligger i marken. Nackdelen är att det finns stora variationer i vanlig mark och att det kan vara svårt att avgöra vilka variationer som är "farligare" än andra. Detta gör att det kan vara svårt att göra markkaraktäriseringen robust och balanserad.

Vår ansats är en strategi som inkorporerar det bästa från de bägge ovanstående; vi vill att systemet larmar om den reflekterade radarsignalen är tillräckligt lik en känd minsignal *eller* om signalen är tillräckligt olik den estimerade marksignalen. På detta sätt försöker vi minimera risken för att missa en mina vilket är en prioritet. Priset man får betala med denna strategi är att man riskerar en hög falsklarmssannolikhet om detektionen görs oförsiktigt. Problemet som återstår nu är att definiera vad man menar med att en signal är "tillräckligt lik/olik" en annan signal. Vi återkommer till detta senare.

### 4.3.3 Hierarkisk Klassificeringsmodell

Vår detektionsstrategi implementeras med en hierarkisk klassificeringsmodell, se Figur 18 nedan, vilket bryter ner klassificeringsproblemet i mindre och enklare delar, var och en klart definierade.





Figur 18: Hierarkisk klassificeringsmodell

Klassificeringen görs enligt följande:

1. *Okänt data* analyseras och klassificeringssystemet försöker bevisa att det är tillräckligt likt den estimerade marken samtidigt som det är tillräckligt olik alla kända farliga objekt. Lyckas systemet med detta klassas datat som säker *Bakgrund*, annars klassas datat som en potentiellt farlig *Anomali*.
2. En *Anomali* analyseras vidare och systemet försöker bevisa att signalen härrör från någon känd ofarlig källa såsom en tegelsten, en burk eller något liknande. Lyckas detta klassas datat som *Ej Minlik*, annars så jämförs signalen mot kända minobjekt. Är signalen tillräckligt lik en eller flera kända minor så klassas datat som *Minlik*. Misslyckas bägge testerna så stannar klassificeringen vid nivån *Anomali*.
3. Data som är klassificerat som *Ej Minlik* testas mot kända ofarliga objekt. Är signalen unikt lik en av dessa klassificeras data som detta objekt, annars stannar klassificeringen vid *Ej Minlik*.
4. Data som är klassificerat som *Minlik* testas mot kända farliga objekt. Är signalen unikt lik en av dessa klassificeras data som detta objekt, annars stannar klassificeringen vid *Minlik*.

Den viktigaste nivån i klassificeringshierarkin är den första där systemet avgör om datat härrör från vanlig mark eller inte, vilket normalt räcker för att besluta om grävning skall ske eller ej. De andra nivåerna används för att få en noggrannare klassificering och/eller för att minska antalet falsklarm, vilket är användbart men inte helt nödvändigt.

#### 4.3.4 Signalmodeller

För att kunna genomföra klassificeringen behöver man kunna jämföra inkommande signaler med signalmodeller för de objekt man är intresserad av, dvs. för marken och markobjekten. Dessa modeller kan definieras på olika sätt:

- Datadrivna modeller: Man bygger utifrån verkliga signaler, s.k. *träningsdata*, upp modeller för hur signalerna från marken och markobjekten ser ut. Ofta skapas inte dessa explicit utan är en biprodukt av att man tränar en klassificerare att skilja mellan olika klasser av signaler. Man brukar ibland kalla dessa klassificerare för "modellfria" vilket inte är sant eftersom klassificerarens uppbyggnad alltid implicerar en viss underliggande modellstruktur. Fördelen med datadrivna modeller är att man snabbt och automatiskt får en modell som är anpassad till den aktuella mätplatsen och till det aktuella radarsystemet. Bland nackdelarna kan nämnas svårigheten att avgöra vad i modellen som härrör från den fysikaliska

verkligheten och vad som är artefakter från data och algoritmval. Modellen blir ofta en "svart låda" som är svåranalyserbar och från vilken det är svårt att dra några generella slutsatser om verkligheten. Ett annat närbesläktat problem är hur generella de framtagna modellerna är; gäller de enbart för det givna träningsdatat men inte för nytt data så är modellerna värdelösa.

- Teoretiska modeller: Man bygger upp fysikaliska modeller för hur marken och markobjekten interagerar med den utsända elektromagnetiska strålningen, och för hur den reflekterade strålningen tas emot och samplas av radarsystemet. Dessa modeller utnyttjas sedan till att räkna ut en förväntad signal för respektive objekt. En fördel med teoretiska modeller är att man kan utnyttja de fysikaliska insikter man har om problemet. En annan fördel är att inga träningsdata krävs. Nackdelen är att det är svårt att bygga upp modeller som fångar verklighetens alla variationsmöjligheter på ett bra sätt. T.ex. krävs en väldigt god systemkännedom.
- Parametriserade teoretiska modeller: Dessa modeller grundar sig i fysikaliska modeller av verkligheten men vissa parametrar skattas ifrån verkliga data. Denna variant är en kombination av de bägge föregående och är vanligtvis ett sunt designval; man låser fast det man vet om verkligheten i modellen och skattar det man inte vet.

I den nuvarande versionen av klassificeringssystemet används uteslutande datadrivna modeller eftersom dessa har givit väldigt bra resultat. Vi strävar dock att gå mot mer fysikaliskt underbyggda modeller eftersom dessa är lättare att analysera och ger värdefulla fysikaliska insikter av datat, vilket de datadrivna modellerna inte ger om man inte explicit konstruerar dem för det.

#### 4.3.5 Träningsfasen

Eftersom vi använder datadrivna modeller måste vi skapa dessa innan systemet går att använda för klassificering. Detta görs i den s.k. *träningsfasen*. I träningsfasen samlar man in data från markavsnitt där man vet vad som ligger begravt. Eftersom vi då har både indata, i form av exempelsignaler, och utdata, i form av objekttyp, kan vi träna alla klassificerare i vår hierarkiska klassificeringsmodell, se Figur 18, så att de ger rätt klassificering för alla träningsdata. Frågan är nu hur pass bra dessa upptränade modeller fungerar för nytt data från okänd mark? Dvs. vilka generaliseringsegenskaper får systemet? Detta är ett svårt problem som studeras i fältet "Statistical Learning Theory" [17]. Grovt sätt har vi två fall som beror på modellens komplexitet, den verkliga modellens komplexitet och tillgången till träningsdata som representerar den verkliga modellen:

- "Overfitting": Modellen är mer komplex och har fler frihetsgrader än den "sanna" modellen som genererar träningsdatat. Detta resulterar i att modellen inte bara klarar av att modellera den underliggande signalen i träningsdatat, men även det brus och de systemartefakter som råkar finnas däri. Resultatet blir att systemet får dåliga generaliseringsegenskaper.
- "Underfitting": Modellen är mindre komplex och har färre frihetsgrader än den "sanna" modellen som genererar träningsdatat. Detta resulterar i att modellen inte klarar av att modellera den underliggande signalen i träningsdatat vilket också leder till dåliga generaliseringsegenskaper.

Detta problem brukar kallas bias/varians-dilemmat och det gäller alltså att hitta en förklaringsmodell till träningsdatat som är precis lagom komplicerad för att få bästa möjliga generaliseringsprestanda.

Till och börja med använde vi artificiella neuronnät (ANN) för att implementera klassificerarna. Dessa fungerar utmärkt men kräver stor insikt vid träningen av dem eftersom bias/varians-dilemmat gör att vi måste vara försiktiga vid valet av modellkomplexitet. I ANN-fallet innebär det att man måste vara försiktig vid valet av antalet dolda lager och antalet neuroner i varje lager. En annan besläktad nackdel med vanliga ANN är att träningsalgoritmerna som används för att optimera

modellen till träningsdatat ofta är känsliga för lokala minima. Detta innebär att man inte kan vara säker på att en bra lösning har hittats efter optimering. Även om den funna lösningen fungerar bra på träningsdata kan man märka att lösningen har dåliga generaliseringsegenskaper. En tränad och erfaren signalbehandlare kan till viss del lära sig att känna igen ”bra” och ”dåliga” optimeringspass, men metoden är i grunden orubust.

Problemet med ANN är att de tillhör en klass av klassificerare som baserar sig på något som kallas för ”Empirical Risk Minimization”. Detta innebär att de enbart koncentrerar sig på att minimera klassificeringsfelen, den empiriska risken, för träningsdata medan generaliseringsegenskaperna ignoreras. En annan klass av klassificerare baserar sig på s.k. ”Structural Risk Minimization” och kommer från fältet ”Statistical Learning Theory” [17]. Dessa klassificerare anpassar modellkomplexiteten till mängden och komplexiteten hos träningsdata vilket gör att de minimerar det förväntade generaliseringsfelet. En populär klassificerare som tillhör denna klass är s.k. Support Vector Machines (SVM) vilket vi numera använder istället för ANN. Enligt vår erfarenhet ger SVM klassificerings- och generaliseringsprestanda som motsvarar de bästa ANN-träningarna. Med SVM försvinner också problemet med lokala minima eftersom SVM baserar sig på ett konvext optimeringsproblem med ett garanterat globalt minima.

#### **4.3.6 Klassificeringsfasen**

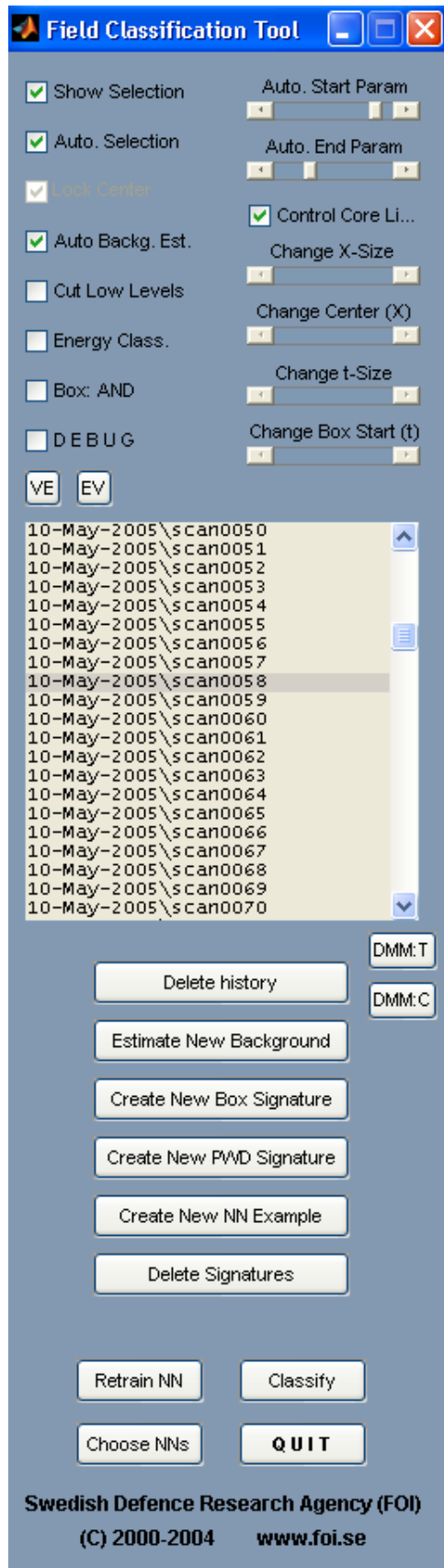
Efter vi med träningsdata har tränat alla SVM-klassificerare i hierarkin, se Figur 18, är vi redo att använda systemet. Nya data körs igenom klassificeringshierarkin och den resulterande klassificeringen utgör tillsammans med en visualisering av radardatat det beslutsstöd operatören använder sig av för att bestämma om man skall börja pika efter en mina eller ej.

#### **4.3.7 Ett verkligt exempel**

I denna sektion kommer vi att gå igenom de olika signalbehandlingssteg som krävs då HUMUS-systemet skall användas på en ny plats med nya objekt. Verkliga data från en jordbana i Eksjö kommer att användas. I exemplet kommer vi använda mätdata från en ickemetallisk TMA-1, se Figur 22, och från ren bakgrund för att träna klassificeringssystemet. Vi testar sedan systemet med nya mätdata från en ny bakgrund, från ett splitter och avslutningsvis från en ny mina.

##### **4.3.7.1 Insamling av träningsdata**

Det första steget är att samla in tränings- eller exempeldata från den aktuella marken och de aktuella objekten så att vi kan träna klassificerarna. Detta görs genom att man avdelar en liten markyta och gräver ner exempelobjekt av de klasser av minor man är intresserad av att hitta. Det är viktigt att man också lämnar en del av träningsytan precis som den är. Denna del används för att modellera ”vanlig mark” enligt resonemanget i sektion 4.3.2.



Figur 19: Fältverket

Då träningsmarken är färdigpreparerad går man över området med HUMUS och samlar in radardata samtidigt som ett noggrant protokoll förs. Mätningen görs genom att operatören går framåt några centimeter i taget, och för varje steg sveper antennen från vänster till höger i en cirkelbåge. Under varje svep görs 75 stycken s.k. *trace* (vågformer), vilket är ekvidistant samplade radarmätningar å 256 tids-sampel. Resultatet av ett svep blir följaktligen en 256x75 datamatrix där varje kolonn är ett trace som är en radarmätning över en viss markpunkt. Datamatrixen kan man lätt visualisera som en bild vilken kan tolkas som ett tvärsnitt ner i marken under svepet.

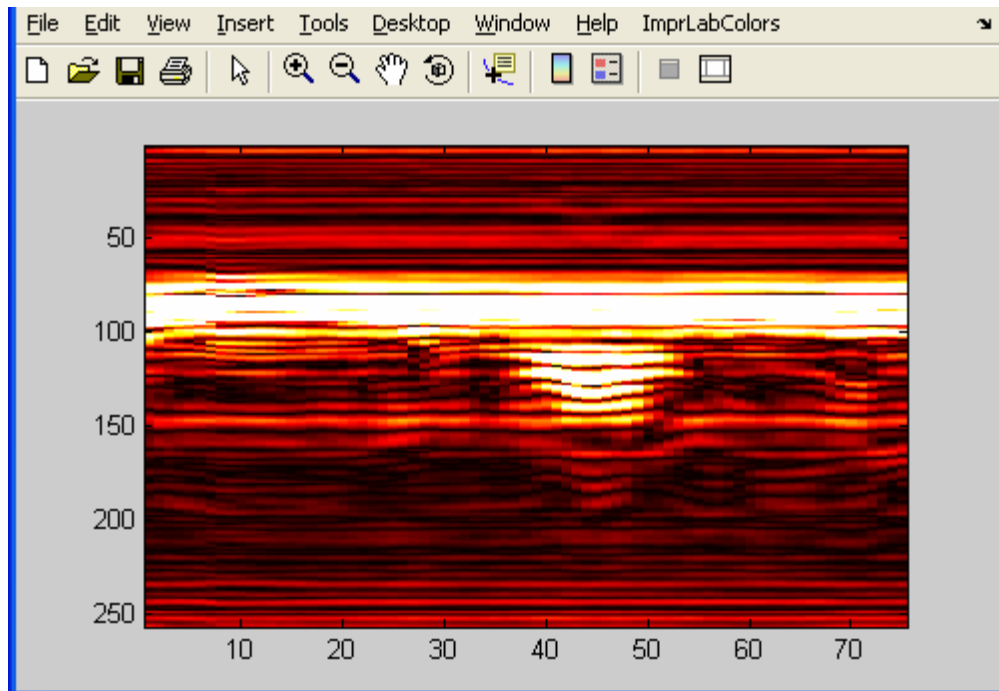
Då hela träningsområdet har mätts upp har vi en mängd sådana datamatriser, kallade *svep*, och ett protokoll över vilken position varje svep härrör ifrån.

#### 4.3.7.2 Val av signaturer

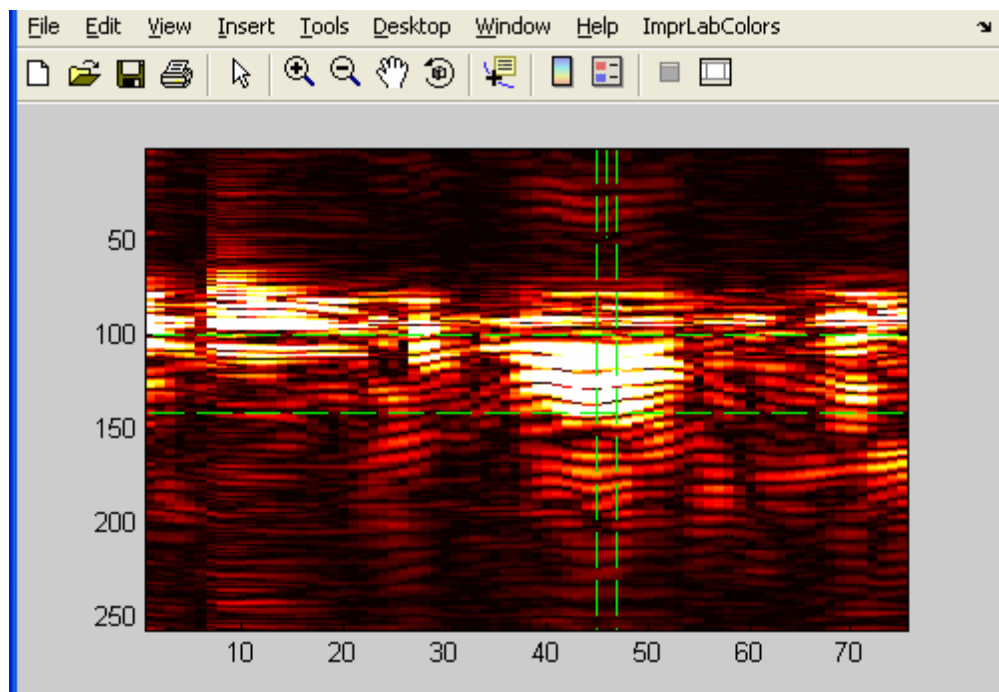
Då vi har erhållit träningsdata är det dags att träna klassificerarna i den hierarkiska strukturen i Figur 18. För att träna klassificerarna måste man först generera träningsexempel utifrån den "råa" träningsdatavolymen. Detta, i sin tur, kräver s.k. *signaturer* som är träningsdata som operatören särskilt väljer ut för att representera ett visst objekt.

För att underlätta hanteringen av träningsdata, signaturer, träningsexempel och klassificerare har vi utvecklat ett grafiskt verktyg, det s.k. *fältverket*, i MATLAB, se Figur 19. Med fältverket underlättas även algoritmutveckling betydligt då det är relativt enkelt att lägga till eller modifiera funktioner.

En signatur skapas genom att med hjälp av fältverket och protokollet välja ut ett relevant svep, och sedan markera de trace i datamatrixen vilka med säkerhet härrör från markpositioner där minan ligger begravd. I Figur 20 ser vi rådatat från ett svep över en ickemetallisk mina. Vi ser vidare att centrerat runt trace 45 ligger en ansamling kraftiga reflektioner mellan tidssampel 100→150. För att välja några trace runt runt trace 45 använder vi fältverket, se Figur 19 samt Figur 21. Först slår vi på en bakgrundsreduktion för att signalvariationer från trace till trace skall framgå tydligare. Sedan använder vi selektionsverket för att markera de trace som ligger i centrum av minan.



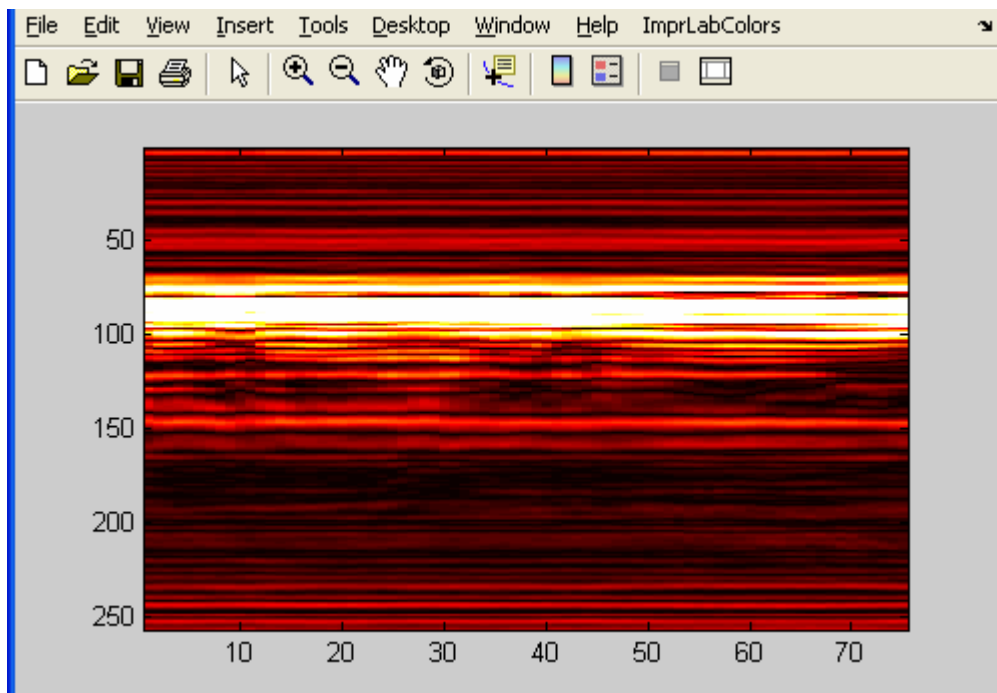
Figur 20: Ett svep över en ickemetallisk mina (träning). I bilden visas rådata.



Figur 21: Ett svep över en ickemetallisk mina (träning). I bilden visas filtrerat rådata samt val av trace.



Figur 22: En ickemetallisk stridsvagnsmina, TMA1.



Figur 23: Ett svep över fri mark (träning). I bilden visas rådata.

Nu är vi redo att skapa en signatur för den aktuella minan och trycker därför "Create New NN example"<sup>1</sup> i fältverktyget varpå skannet och de valda tracen sparas undan.

Vi skapar också en signatur för fri mark, ett s.k. bakgrundssvep, se Figur 23. För en bakgrundssignatur gäller att alla trace är representativa för fri mark så vi behöver inte använda selektionsverktyget i detta fall.

#### 4.3.7.3 Träning av klassificerare

Utifrån de två skapade signaturerna vill vi nu träna en klassificerare i det första lagret av den hierarkiska klassificeringsstrukturen, se Figur 18. Vi vill att klassificeraren lär sig för mindata men ej för bakgrundsdata.

Följande steg utförs nu: (Denna del är väldigt detaljerad och är avsedd som implementationsdokumentation)

1. Alla trace (inte bara de markerade) för alla aktuella signaturer samlas i en stor matris. Matrisen korrigeras så att det är ungefär lika många negativa(icke-mina) som positiva(mina) exempel.
2. Dimensionsreduktion genomförs:
  - a. För varje trace görs en tid/frekvens-analys (enligt teorin i kapitel 2) vilken vektoriseras och läggs till sist i det aktuella tracet. Varje trace-vektor består nu av en tidsvektor och en tid/frekvens-vektor.
  - b. För varje trace subtraheras medel-tracet för att ta bort konstanta komponenter (systemartefakter och dylikt).
  - c. Varje trace-vektor normaliseras nu till längden ett. (Vi vill ha en energioberoende dimensionsreduktion.)
  - d. För varje trace subtraheras medeltracet så att medeltracet ligger i origo.
  - e. Gör principalkomponentanalys på datat och spara dimensionerna där vi har mest variation i datat.
  - f. Projicera alla trace på den nya basen.
3. För varje markerat trace i de aktuella signaturerna, centrera ett datafönster över tracet i den nya basen. (Fönsterbredden är valbar men är vanligtvis 21 trace.)
  - a. Vektorisera datafönstret och lägg till den nya vektorn till en matris av träningsexempel.
4. Komplettera eventuellt träningsmatrisen med kopior på exempel så att ungefär samma antal positiva som negativa exempel erhålls. Detta krävs för att träningen skall bli så bias-fri som möjligt.
5. Den andra dimensionsreduktionen utförs nu:
  - a. För varje exempel, subtrahera medel exemplet så att det nya medel exemplet ligger i origo.
  - b. Gör principalkomponentanalys på datat och spara dimensionerna där vi har mest variation i datat.
  - c. Projicera alla exempel på den nya basen.

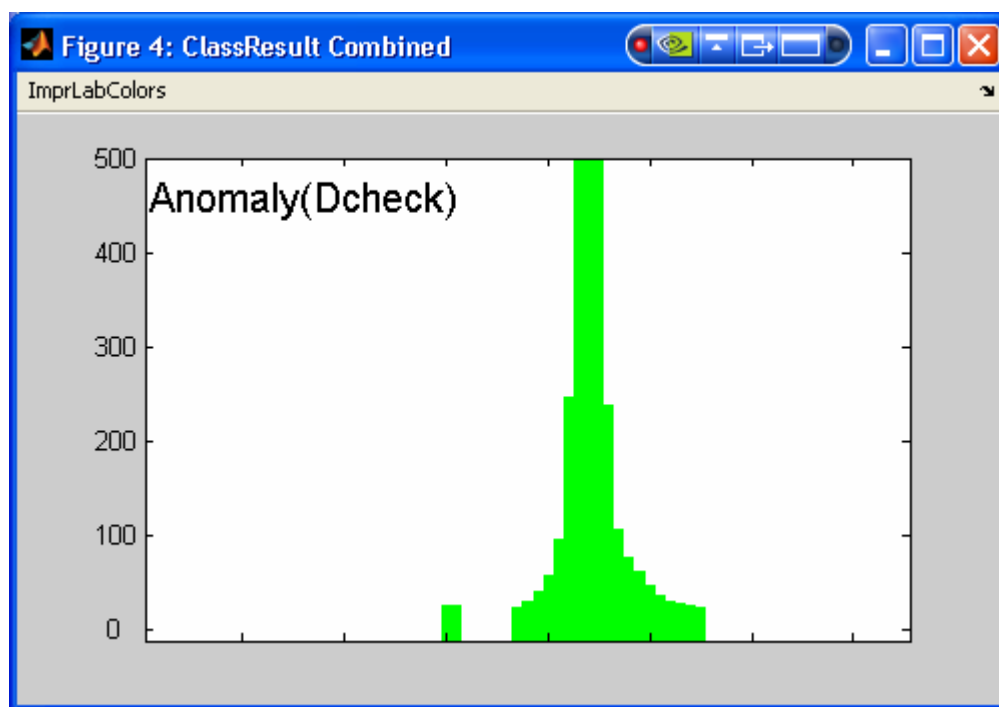
---

<sup>1</sup> Namnet "Create New NN Example" heter så av historiska skäl och borde egentligen heta "Create New Signature".



6. Förbered datat för användning i klassificerarens träningsalgoritm. (Olika klassificerare har olika krav här.)
  - a. För varje exempel, subtrahera medelexemplet så att det nya medelexemplet ligger i origo.
  - b. Skala varje exempelkomponent så att variansen över alla exempel per komponent blir ett.
7. Kör klassificerarens träningsalgoritm på träningsdata. I vårt fall har vi testat, se sektion 4.3.5, Artificiella Neurala Nätverk (ANN) [18] och Support Vector Machines (SVM) [17, 18, 19].
8. Spara resultaten från de olika förberedelsestegen, t.ex. PCA-dimensionerna och alla medelvärden, tillsammans med den nyoptimerade klassificeraren. Detta behövs när klassificering senare skall göras på nytt data.

Observera att det är först i punkt 7 ovan själva klassificeringsalgoritmen blir inblandad. Stort förberedelsearbete krävs för att behandla träningsexemplen så att träningen blir så effektiv och robust som möjligt. Bland annat vill vi ha så få och så okorrelerade inkomponenter som möjligt till klassificeraren. Olika klassificerare har olika krav på träningsdata men det är klokt att bemöda sig att göra förbehandlingen korrekt då det ofta lönar sig i termer av generalisering och robusthet.



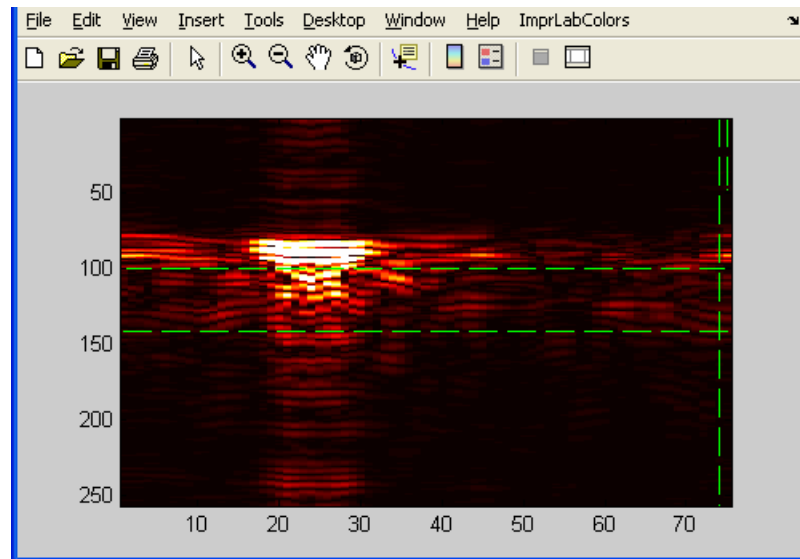
Figur 24: Klassificerarens utslag (logaritmiskt) på träningsdata från den ickemetalliska minan, Figur 21.

Avslutningsvis testar vi den nytränade klassificeraren på träningsdata. I Figur 24 ser vi utdata (logaritmisk y-axel) från klassificeraren då den matas med träningsdata från minan, se Figur 21. Som vi kan se får vi ett tydligt utslag för minan med ett maximum i de trace som vi valde i signaturen. Testar vi klassificeraren på träningsdatat från fri mark, Figur 23, ger den inget utslag alls vilket är precis vad vi vill ha.

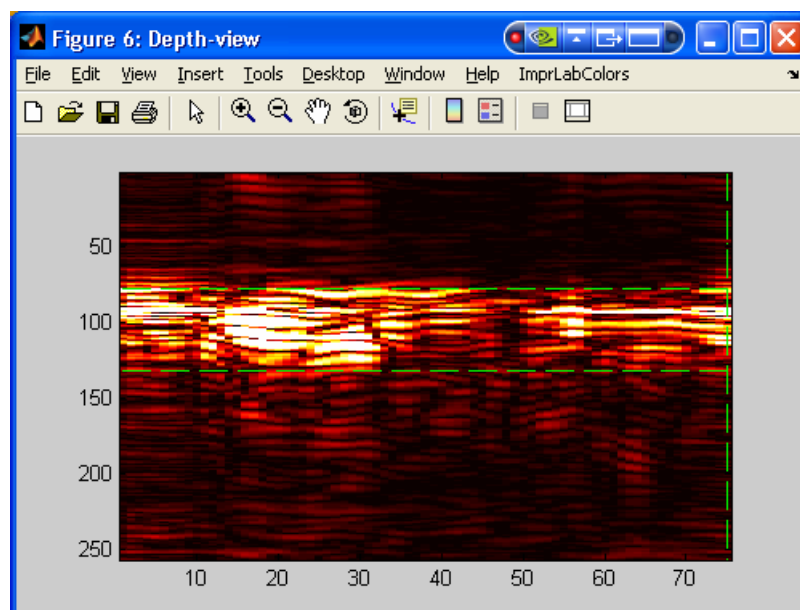
#### 4.3.7.4 Validering av klassificerare på nytt data

Vi skall nu avsluta vårt verkliga exempel med att undersöka hur väl den framtagna klassificeraren generaliserar, dvs. hur väl den fungerar på nytt, okänt, data. För att klassificeraren skall fungera krävs att vi förbehandlar det nya datat med de vektorer, matriser och baser vi beräknade under klassificerarens träningsfas, se sektion 4.3.7.3 ovan.

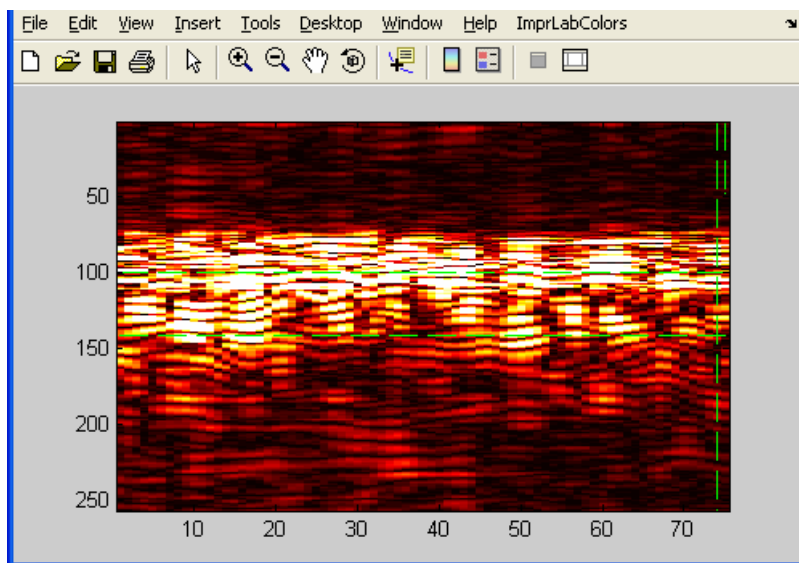
Klassificeraren matas med mätdata från ett valideringsområde där vi vet vad som ligger nergrävt; en TMA-1 ickemetallisk mina (Figur 25), ett splitter (Figur 26) och fri mark (Figur 27). Vi vill att klassificeraren larmar endast för den ickemetalliska minan.



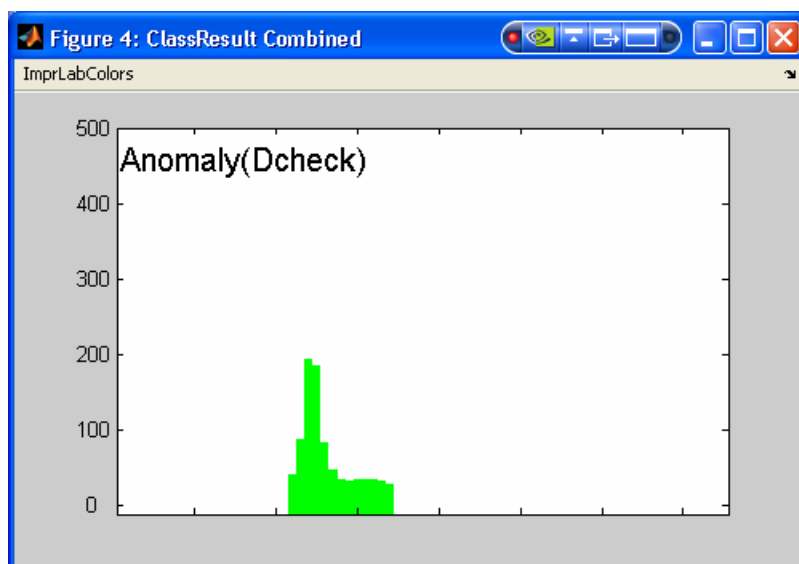
Figur 25: Ett svep över ickemetallisk mina (validering). Bilden visar filtrerat rådata.



Figur 26: Ett svep över splitter (validering). Bilden visar filtrerat rådata.



Figur 27: Ett svep över fri mark (validering). Bilden visar filtrerat rådata.



Figur 28: Klassificerarens utslag (logaritmiskt) på valideringsdata från den ickemetalliska minan, Figur 25.

Som vi ser i Figur 28 får vi ett tydligt utslag från klassificeraren då den matas med data från valideringsminan i Figur 25. Då klassificeraren matas med data från splittret och den fria marken ger den inga utslag alls, precis vad vi ville!

#### 4.3.8 Sammanfattning

Vi har i stora drag presenterat den signalbehandling som utförs i HUMUS-systemet för klassificering av nedgrävda objekt. Många detaljer har uteslutits men dessa är inte centrala för förståelsen, även om de är nödvändiga i praktiken.

För att evaluera hur väl signalbehandlingen fungerar i praktiken har HUMUS-systemet genomgått fem blindtester, två i Kroatien och tre i Eksjö. Resultaten diskuteras i nästa kapitel.

## 5 Resultat från fälttest i Kroatien och Eksjö

I detta kapitel kommer vi att presentera resultaten från de blindtest vi genomfört i fält, två i Kroatien och tre i Eksjö. Fördelen med blindtester är att HUMUS-operatörerna inte känner till var minorna är nedgrävda i ett visst område utan måste förlita sig på systemets utsagor. Detta garanterar att testerna av HUMUS-systemets prestanda blir objektiva. Testerna var till HUMUS nackdel då vi vid testerna inte fick gräva vid larm. Normalt sätt kan man kontinuerligt förbättra HUMUS genom att vid falsklarm träna om systemet med data från falsklarmet. Denna möjlighet gavs inte vid dessa blindtester.

### 5.1 Varför göra fälttest?

När systemet efter en utvecklingsperiod börjar bli stabilt och testerna i våra testboxar, se sektion 4.2 och referens [16], är positiva, då är det dags att pröva systemet i fält. Fältförsök är viktiga av många olika skäl:

- **Okända markförhållanden:**  
Det är lätt hänt att man anpassar systemet till de förhållanden som gäller i labbet, se sektion 4.2 och referens [16], även om man medvetet försöker undvika det. Därför är det oerhört värdefullt att testa systemet på okänd mark där man erhåller de variationer i viktiga parametrar som är svåra att efterlikna i labbet. Detta kan t.ex. vara variationer i jordens egenskaper, störobjekt, ytans strukturer och radarns koppling till marken, se Figur 29.
- **Okänd omgivande mätmiljö:**  
I fält tillkommer variationer i mätmiljön som är svåra att efterlikna i labbet. Detta kan t.ex. röra sig om sol, regn, vind, luftfuktighet och elektromagnetisk miljö. Förutom att dessa variationer påverkar själva mätningarna och klassificeringen, så testas dessa också robustheten, eller "fältmässigheten", hos de tekniska systemen och i själva mätproceduren. Exempel på typiska frågor som uppkommer här är: Klarar systemet regn? Vilken uppställning är bäst? Blåser utrustningen bort? Vilka delar är känsliga?
- **Okänd supportmiljö:**  
I labbmiljön [16] så finns alla typer av verktyg och hjälpmedel att tillgå. I fältförsök framkommer vad som verkligen krävs i support för att systemet skall fungera och kunna underhållas under en viss tidsperiod. Exempel på typiska frågor som uppkommer här är: Finns det elektricitet och vilken kvalitet har den? Är våra batterier laddade? Vilka verktyg krävs för att byta en antenn? Hur kommunicerar man i dåligt väder?
- **Okänd utvecklingsmiljö:**  
Detta är egentligen den "mjuka" sidan av den ovanstående punkten. Dvs. vad krävs det för utvecklingsverktyg och hjälpmedel i mjukvara för att kunna köra, underhålla eller vidareutveckla systemet i fält? Exempel på typiska frågor som uppkommer här är: Kan vi fjärrstyra datorerna? Hur lång tid tar det att göra en ändring och starta om systemet? Hur synkroniserar man ändringar över ett antal datorer?



Figur 29: Varierande markförhållanden

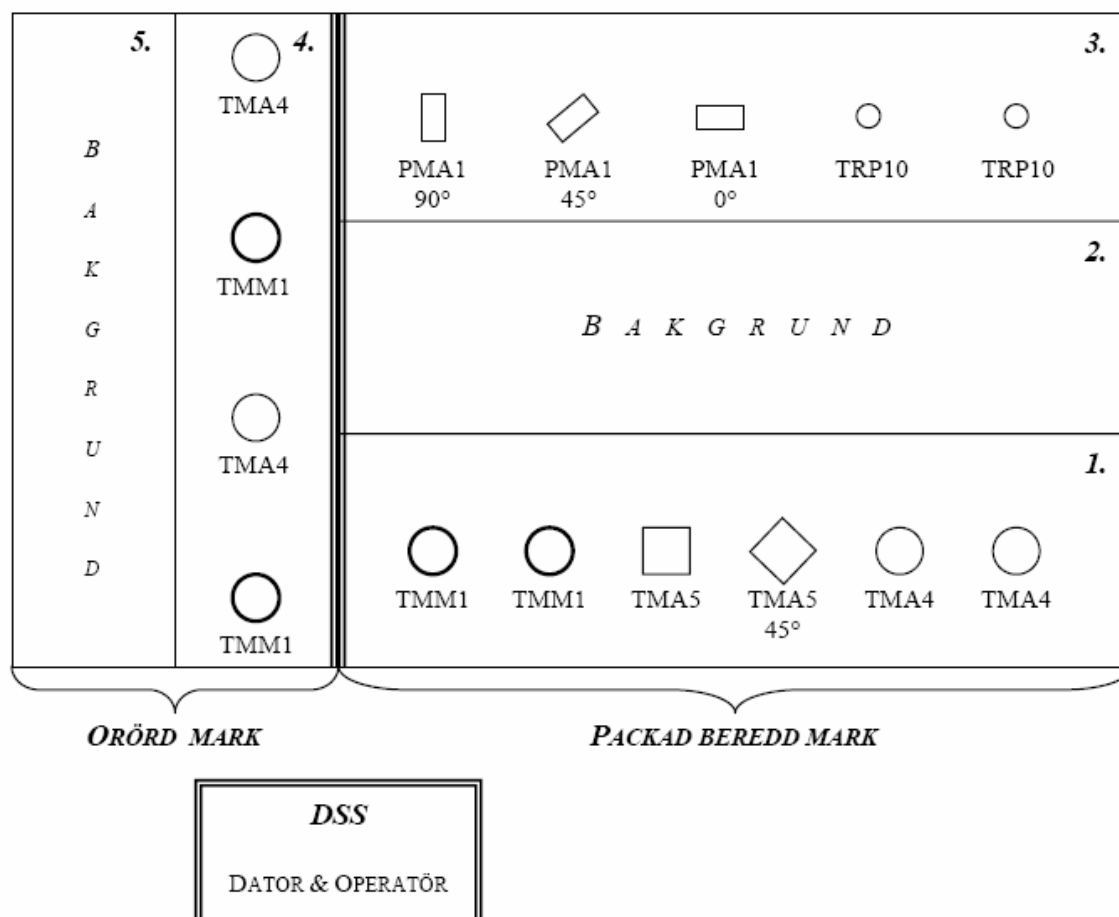
Vår erfarenhet av fältförsök är mycket positiv då man får en direkt feedback, inte bara på delsystemens prestanda, utan hur hela systemet fungerar ihop med dess för- och nackdelar. Detta har lett fram till flexiblare och robustare algoritmer samt hård- och mjukvara.

## 5.2 Kroatien

I april 2003 åkte vi (minradargruppen) till Kroatien med HUMUS-systemet med målet att under fältmässiga förhållanden evaluera prestanda och robusthet hos systemet. Under en veckas tid pågick ett antal olika aktiviteter, däribland mätningar på testobjekt samt utvärdering och vidareutveckling av detektions- och klassificeringsalgoritmer. Resan blev en stor framgång då HUMUS-systemet i det avslutande blindtestet, planerat av SRV, detekterade *alla* nedlagda minobjekt *utan något* falsklarm.

### 5.2.1 Mätplatsbeskrivning

Mätningarna och testerna utfördes på en liten del av SRVs stora testfält i närheten av Zadar i Kroatien. Fältet är platt och väldigt öppet, beväxt med gräs och enstaka buskar och träd (Figur 31, Figur 32, Figur 33). Marken innehåller mycket sten och är mycket svårberedd. Testområdet delades in enligt Figur 30.



Figur 30: Mätupställning Kroatien





*Figur 31: Exempel på autentisk Kroatisk mark*



*Figur 32: Vy över område 1 sedd från område 4. Område 2 & 3 till vänster i bild.  
Testfältet fortsätter i bakgrunden.*





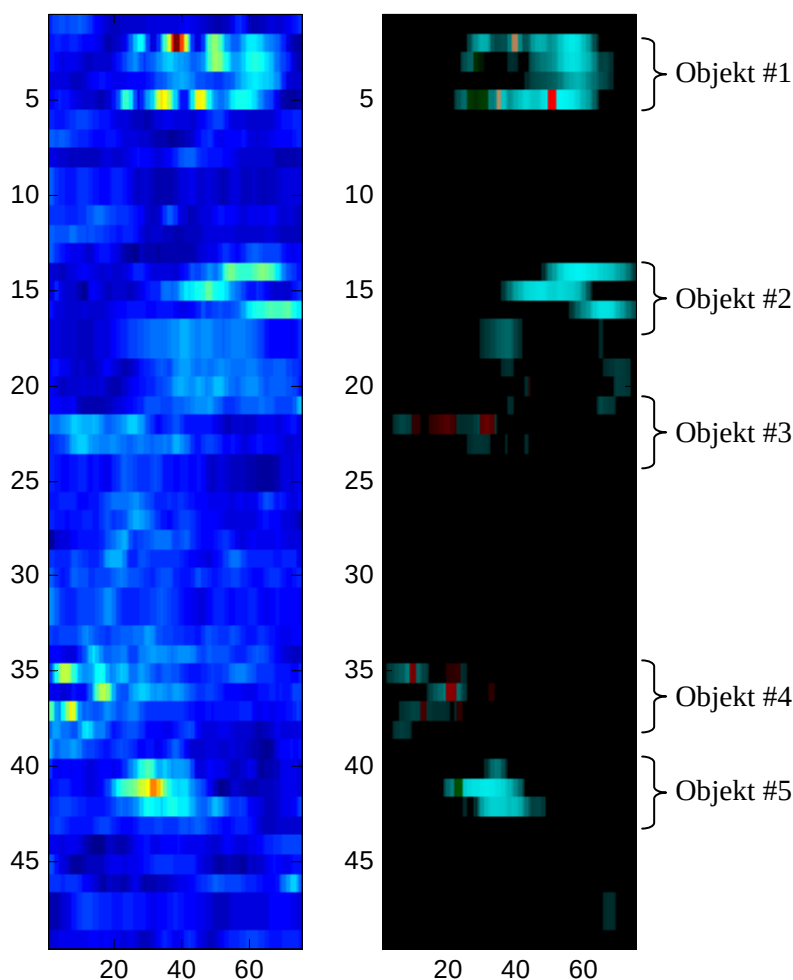
*Figur 33: Område 4 (vänster) och 5 (höger) med bilden tagen från toppen av område 4. Humus och supportdatorn i bakgrunden.*

### **5.2.2 Blindtest 1 – Beredd Mark**

Det första blindtestet, arrangerat av SRV, lades mitt emellan testområde 1 & 2, se Figur 30. Sex stycken minobjekt grävdes ner; 2 TMA-4, 2 TMA-5 (antitank) samt 2 TMM-1 (antitank av metall).

Objekten lades ned, av SRV utan HUMUS-teamets vetskap, med varierande attityder och vridningar, och en TMA5 lades upp och ner. Förutom övningsobjekten gjordes ett antal falska grävspår och en stor sten grävdes ned. Vädret vid blindtestet var mycket stark sidvind med lätt regn vilket försvårade testet ytterligare (operatören hade svårt att stå stilla i blåsten). Operatören gick långsamt framåt och vid larm gjorde han kontrollerande svep. Då operatören inte kunde friklassa ett område rapporterades detta till SRV-gruppen som en detektion.





Figur 34: Blindtest beredd mark. Till vänster ser vi energibilden över området och till höger ser vi motsvarande klassningsresultat. (OBS! Intensiteten i bilden är medvetet överdriven för vissa svaga utslag.)

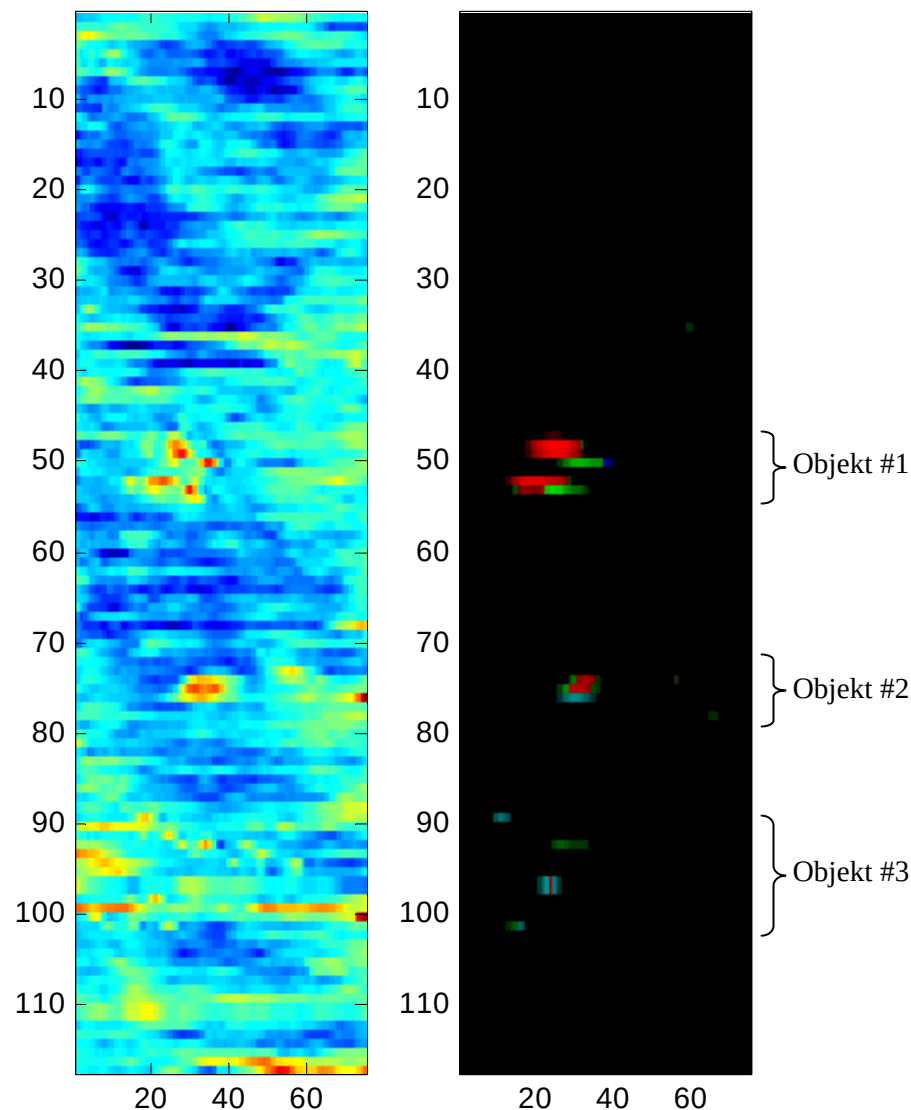
Resultaten av det första blindtestet var väldigt lyckade; 5 av de 6 objekten hittades och inga falsklarm rapporterades, se Figur 34.

Anledningen till att ett objekt missades är att det låg bredvid objekt 3 med ett sådant avstånd att ett svep täckte det ena objektet men inte det andra. Dvs. det ena objekten låg längst till vänster i banan från operatören sett, och det andra objektet låg längst till höger. Denna miss kan alltså tillskrivas en bristande svepmetodik alternativt en alltför bred bana. Man kan här se behovet av ett integrerat navigationssystem där operatören direkt får feedback vilka områden han/hon har friklassat och vilka områden som återstår. Ett sådant navigationssystem skulle ge stora fördelar när det gäller just operatörsfeedback, men även för visualisering, klassificering och uppföljning.

### 5.2.3 Blindtest 2 – Väg

Det andra blindtestet förlades av SRV till en terrängväg med mycket sten och packad jord i direkt anslutning till testområdet. En bil körde över området innan testet. Vädret vid detta test var soligt med måttlig vind. För att försvåra testet fick HUMUS-teamet innan testet falsk information om att 6 stycken övningsobjekt hade grävts ned, vilket i verkligheten bara var 3 stycken: 2 st TMM1 och en TMA4. Förutom objekten så gjordes även här falska grävspår. Samma friklassningsmetod

användes som i förra blindtestet; Operatören gick långsamt framåt och vid larm gjorde han kontrollerande svep. Då operatören inte kunde friklassa ett område rapporterades detta till SRV-gruppen som en detektion.



*Figur 35: Blindtest väg. Till vänster ser vi energibilden över området och till höger ser vi motsvarande klassningsresultat. (OBS! Intensiteten i bilden är medvetet överdriven för vissa svaga utslag.)*

Resultaten av det sista blindtestet är nära nog perfekta, *alla objekt hittades utan falsklarm*, se Figur 35. Vi kan dessutom se att vi fick starka larm för objekt 1 och 2, emedan objekt 3 gav svaga men konsistenta larm vid upprepade svep.

I Figur 36 ser vi en ögonblicksbild från det andra blindtestet. Vi ser den första detektionen markerad med en sten mellan operatörens ben. Vi ser också prov på den flexibilitet HUMUS-systemet erbjuder; HUMUS kommunicerar med supportdatorn, kallad DSS, till vänster i bild, bredvid bilen. DSS gör klassificeringsberäkningar och skickar resultaten tillbaka till HUMUS. Samtidigt fjärrstyrs DSS från DSS-operatörens laptop (till höger i bild) varifrån man erhåller resultat och kan kontrollera DSS och även HUMUS.



Figur 36: Bild från blindtest 2.

*Den första detektionen ses markerad med en sten mellan operatörens ben. HUMUS kommunicerar med DSS till vänster i bild som i sin tur fjärrstyrs av laptopen till höger.*

## 5.3 Eksjö

Under ett par veckor i skiftet oktober/november under 2003 och 2004 har vi genomfört tre olika blindtester vid SWEDECs försöksområde i Eksjö. Blindtesterna 2003 är delvis redovisade i en rapport från SWEDEC [20]. I rapporten jämförs HUMUS med serieproducerade system i termer av vikt, hastighet etc. Detta var inte syftet med blindtesterna från vår sida, utan blindtesterna gjorde vi för att evaluera och validera de grundläggande klassificeringsalgoritmerna i systemet. Faktorer såsom vikt, hastighet och användarvänlighet kan vid en eventuell framtida produktifiering av HUMUS enkelt anpassas efter behov och smak; radarsystemet och signalbehandlingen är inte gränssättande härvidlag. Ur klassificerings- och robusthetssynpunkt var blindtesterna synnerligen lyckade vilket vi redogör för nedan.

### 5.3.1 Mätplatsbeskrivning

Blindtesterna utfördes på motsvarande sätt som i Kroatien. SWEDEC hade på två olika områden grävt ner ett antal minor på olika djup tillsammans med falska grävspår, metallsplitter, betongplattor samt cola-burkar. På varje område hade 12 minor av tre olika sorter på olika djup grävts ner. Minorna var stridsvagnsminor utan tändare av sorten TMA-1 (ickemetallisk), TMA-5 (ickemetallisk) samt TMM-1 (metall). Det första området var en jordbana på ca. 40 kvadratmeter som delades upp i tre olika banor, s.k. *lanes*. Denna jordbana användes vid två olika blindtest; ett 2003 då inget gräs eller ogräs hade hunnit växa (Figur 37) och ett 2004 då betydande grästuvor hade vuxit upp (Figur 39). Gräslagret och tuvorna kan påverka klassificeringsprestanda då det blir svårare att följa marken med antennen med konstant höjd samt att fukttinnehållet gör att antennen

”kopplar” till marken på olika sätt. Det andra området var en grusväg på ca. 120 kvadratmeter som var nylagd över en gammal skogsväg med djupa hjulspår (Figur 40). Grusvägen delades upp i fyra olika lanes.

### 5.3.2 Blindtest 1 – Jordbana 2003

Resultatet av blindtest 1, som gjordes på jordbanan 2003, ses i Figur 37.



*Figur 37: Detektionsresultat jordbanan i Eksjö 2003.  
(Färgerna på konerna betyder inget)*

Alla minor hittades med bara ett falsklarm! Observera att några av minorna ligger precis på eller precis utanför det avgränsade testområdet vilket försvårade testet ytterligare. Som tidigare nämnts fick vi heller inte gräva vid larm vilket gjorde att vi inte kunde utnyttja HUMUS-systemets möjlighet till kontinuerlig förbättring.

Ett bevis på att systemet är väldigt lättanvänt och robust är att en officer från Ing 2 (Figur 38) efter 15 minuters instruktion kunde gå över jordbanan och få samma detektionsresultat som vi som utvecklat systemet!

### 5.3.3 Blindtest 2 – Jordbana 2004

Resultatet av blindtest 2, som gjordes på jordbanan 2004, ses i Figur 39. Även denna gång hittades alla minor, men vi erhöll fyra stycken falsklarm. Alla dessa falsklarm var av liknande signalkaraktär, vilken innebär att tre av dessa falsklarm troligen skulle kunna ha undvikits om vi hade haft möjligheten att gräva vid larm och träna om systemet med det nya datat.





Figur 38: En Ing 2 officer testar HUMUS

Att antalet falsklarm ökade från 2003 till 2004 beror troligtvis på att grästuvorna dels gjorde det svårare att svepa antennen över marken på en konstant höjd, men också att antennens elektromagnetiska koppling till marken varierade under svepet<sup>2</sup>. Dessa effekter och hur man allmänt kompenserar för dem är ett ämne för framtida utveckling och forskning. En direkt åtgärd är att gräva vid larm och utnyttja den nyvunna kunskapen genom att träna om systemet med det nya datat.

#### 5.3.4 Blindtest 3 – Grusväg 2003

Resultatet av blindtest 3, som gjordes på grusvägen 2003, ses i Figur 40. Av tolv nedgrävda minor hittade vi elva med sju falsklarm.

Den försämrade detektionsprestandan, jämfört med de andra blindtesterna, beror på att marken i det område vi tog upp träningsdata ej var representativ för testområdet. Under grusvägen går en gammal skogsväg med djupa hjulspår vilket syntes tydligt i radarbilderna. Dessa hjulspår fanns inte på träningsområdet vilket ledde till att systemet tränades på data som inte var representativt för testet. Detta i sin tur gav upphov till försämrade detektioner och falsklarm under själva blindtestet. *Detta är i sig helt normalt; man kan inte kräva eller förutsätta att man i förväg skall veta allting om det man letar efter!* Däremot hade vi velat arbeta enligt vår detektionsmetod, dvs. att gräva vid larm och träna om systemet med det nya datat. Denna möjlighet till kontinuerlig förbättring av systemet hade vi inte vid blindtestet, men med den skulle resultatet förmodligen ha blivit betydligt bättre och i linje med de andra blindtesterna.

Lärdomen av detta blindtest är att man inte kan förlita sig på träningsdata för mycket, utan att dessa bara skall ses som en bra utgångspunkt för en kontinuerlig adaptering av systemet till den rådande mätmiljön. Framtida blindtester måste också utformas så att detta, mycket naturliga, arbetssätt tillåts.

<sup>2</sup> Det regnade kontinuerligt under testet 2004 vilket gjorde att gräset var väldigt blött.



*Figur 39: Detektionsresultat jordbanan i Eksjö 2004  
(Färgerna på konerna betyder inget)*



*Figur 40: Detektionsresultat grusvägen i Eksjö 2003  
(Färgerna på konerna betyder inget)*



## **5.4 Sammanfattning och förslag till fortsatt arbete**

I detta kapitel har vi presenterat resultaten från fem olika blindtest vi genomfört under fältmätningar i Kroatien och Eksjö under 2003-04. Vår erfarenhet av fältförsök är mycket positiv då man får en direkt feedback, inte bara på delsystemens prestanda, utan hur hela systemet fungerar ihop med dess för- och nackdelar. Detta har lett fram till flexiblare och robustare algoritmer samt hård- och mjukvara.

Vi kan utifrån de presenterade resultaten konstatera att HUMUS är:

- ett flexibelt utvecklingssystem som, enligt FMs uppdrag, hittar stridsvagnsminor i olika miljöer med väldigt låg falsklarmsnivå!
- ett unikt system (enligt internationella konferenser och utvärderingar) med automatisk klassificering och integrerat beslutsstöd!
- ett av få system (enligt internationella konferenser och utvärderingar) som tillåter kontinuerlig förbättring!
- enkelt att använda: En otränad operatör med 15 minuters instruktion klarar uppgiften!
- utvecklingsbart med stor potential att klara även ytlagda minor samt truppminor!

### **5.4.1 Förslag till fortsatt arbete**

I kapitlet har vi diskuterat en rad egenskaper hos HUMUS-systemet där vidare forskning och utveckling är önskvärd:

- Hantering av ännu större variationer i min- och markegenskaper
  - Automatisk kompensering av fukt och djup [12], se även kapitel 2.
  - Signalrepresentationer & nya analysmetoder som är mer invarianter mot hur antennsvepet förhåller sig till minans position och orientering, se även kapitel 4.
- Utnyttjande av positions- och orienteringsbestämning av antennen
  - Fler frihetsgrader i klassificeringen
  - Kompensation för t.ex. varierande höjd under ett svep
  - Automatisk loggföring och rapportgenerering
  - Operatörsstöd:
    - Återkoppling av täckningsgrad
    - Visualisering (2D,3D) av begravda objekt

## 6 Andra tillämpningar

De senaste årens nedskärningar inom försvaret, har lett till avveckling av många övnings- och skjutfält. För att kunna utnyttja marken måste riskerna med OXA bedömas. Det går inte att överlämna områdena för exploatering utan att områdena först röjs på OXA. Kostnaderna för röjning är mycket stora och tidsödande. Dagens sökmetoder baseras i huvudsak på metalldetektorer och magnetometrar. Ingen metod som testats kan urskilja OXA från splitter med en godtagbar nivå. Varje larm innebär att røjarna måste gräva fram föremålet. Vid hög splitterkoncentration blir konsekvensen i stort sett att hela fält måste grävas upp. I dagsläget finns det 40 000 – 60 000 ha skjutfält som berörs. Det går snabbt att konstatera att uppgiften är orimlig att lösa om inte nya röjningskoncept tas fram.

Baserat på testerna från Eksjö där alla stridsvagnsminor detekterades och så gott som alla splitter undertrycktes framstår GPR med klassificering som ett attraktivt alternativ. Ett möjligt lösningsförslag presenteras i nästa sektion.

### **6.1 Utveckling av ett fordonsburet detektions- och klassificeringssystem för OXA i skjutfält**

Ett vegetationsrøjningsfordon utrustas med ett GPR-system för detektion och klassificering av OXA. Systemet ger en hög detektionsnivå samtidigt som falsklarmen undertrycks. Det finns också möjlighet att visualisera det detekterade objektet tredimensionellt vilket även innefattar djupinformation.

Uppskattade prestandavärden:

- Røjningsbredd/detektionsbredd 2-3 m. Bredden är kopplad till fordonets røjningsbredd och antennens utformning
- Hastighet 3-10 km/h beroende på markförhållanden. Radarsystemet begränsar inte hastigheten
- Maximal kapacitet beräknas till 20 000 m<sup>2</sup>/h eller maximalt 15 – 20 ha/dag, beroende på markförhållanden

Tekniken med dess prestanda möjliggör en snabbare och kostnadseffektivare røjning. Förutom Sverige finns det en omfattande utlandsmarknad där exportframgångar är möjliga.

## 7 Sammanfattning

Vi har i denna rapport redovisat radarteknikens potential för detektion och klassificering av landminor enligt erfarenheterna från FM-projektet "Landminsystem, detektion och neutralisering". Rapporten började med en kort inledning där bakgrunden till intresset för radartekniken i minspaningssammanhang presenterades. Sedan gick vi igenom ett kapitel som redogjorde för radarns teoretiska potential i dessa sammanhang och refererade till en rad vetenskapliga artiklar som vi producerat. Vi knöt därefter denna potential till försvarsmaktens hotbildsscenarioer och diskuterade hur radartekniken med fördel skulle kunna användas i några av scenarierna. I de följande kapitlen presenterades uppbyggnaden av HUMUS-systemet, både hård- och signalbehandlingsmässigt, arbetsmetoden visades och vi redogjorde resultaten från ett antal lyckade blindtest vi utfört vid fältmätningar i Kroatien och Eksjö. Vår erfarenhet av fältförsök är mycket positiv då man får en direkt feedback, inte bara på delsystemens prestanda, utan hur hela systemet fungerar ihop med dess för- och nackdelar. Detta har lett fram till flexiblere och robustare algoritmer samt hård- och mjukvara. Avslutningsvis i rapporten diskuterades andra tillämpningar som kan dra nytta av radartekniken.

Vi kan utifrån diskussionerna och de presenterade resultaten konstatera att HUMUS är:

- ett flexibelt utvecklingssystem som, enligt FMs uppdrag, hittar stridsvagnsminor i olika miljöer med väldigt låg falsklarmsnivå!
- ett unikt system (enligt internationella konferenser och utvärderingar) med automatisk klassificering och integrerat beslutsstöd!
- ett av få system (enligt internationella konferenser och utvärderingar) som tillåter kontinuerlig förbättring!
- enkelt att använda: En otränad operatör med 15 minuters instruktion klarar uppgiften!
- utvecklingsbart med stor potential att klara även ytlagda minor samt truppminor!



*Figur 41: Den senaste plattformen, HUMUS. Utvecklad och använd sedan 1999.*

Sammanfattningsvis och mer generellt kan man vidare konstatera att:

- Bredbandiga radarsystem har potential att detektera och klassificera såväl ytlagda som nedgrävda minor. Då radarn kan detektera alla dielektricitetskontraster i marken krävs signalbehandling för att urskilja efterfrågade objekt.
- I markfallet har radarn potential att detektera och klassificera minor i alla typer av terräng dygnet runt och året runt.
- Radarsystem möjliggör klassificering och tredimensionell visualisering av objekt.
- I flygfallet har SAR-radar potential för detektion och klassificering av minor i alla miljöer.

## **7.1 Förslag till fortsatt arbete**

Vi har också diskuterat egenskaper hos HUMUS-systemet, Figur 41, där vidare forskning och utveckling är önskvärd:

- Hantering av ännu större variationer i min- och markegenskaper
  - Automatisk kompensering av fukt och djup [12], se även kapitel 2.
  - Signalrepresentationer & nya analysmetoder som är mer invarianter mot hur antennsvepet förhåller sig till minans position och orientering, se även kapitel 4.
- Utnyttjande av positions- och orienteringsbestämning av antennen
  - Fler frihetsgrader i klassificeringen
  - Kompensation för t.ex. varierande höjd under ett svep
  - Automatisk loggföring och rapportgenerering
  - Operatörsstöd:
    - Återkoppling av täckningsgrad
    - Visualisering (2D,3D) av begrävda objekt

## Referenser

1. S. Abrahamson, B. Brusmark, H. C. Strifors, and G. C. Gaunaurd, "Target identification by means of impulse radar," in *Automatic Object Recognition*, Sadjadi, F. A., Ed., Proc. SPIE Vol. 1471, 1991, 130–141.
2. S. Abrahamson, A. Ericsson, A. Gustafsson, H. C. Strifors, and G. C. Gaunaurd, "Comparison of fuzzy-cluster based time-frequency signatures for automatic classification of underground mine-like targets," in *Automatic Object Recognition IX*, Sadjadi, F. A., Ed., Proc. SPIE Vol. 3718, 1999, 128–139.
3. G. C. Gaunaurd and H. C. Strifors, "Signal analysis by means of time-frequency (Wigner-type) distributions—Applications to sonar and radar echoes," *Proc. IEEE*, Vol. 84, 1231–1248, Sep. 1996.
4. H. C. Strifors, S. Abrahamson, B. Brusmark, and G. C. Gaunaurd, "Signature features in time-frequency of simple targets extracted by ground penetrating radar," in *Automatic Object Recognition V*, Sadjadi, F. A., Ed., Proc. SPIE Vol. 2485, 1995, 175–186.
5. H. C. Strifors, T. Andersson, D. Axelsson, and G. C. Gaunaurd, "A method for classifying underground targets and simultaneously estimating their burial conditions," to be published in *Automatic Target Recognition XV*, Sadjadi, F. A., Ed., Proc. SPIE Vol. 5807, 2005.
6. H. C. Strifors, B. Brusmark, A. Gustafsson, and G. C. Gaunaurd, "Analysis in the joint time-frequency domain of signatures extracted from targets buried underground," in *Automatic Object Recognition VI*, Sadjadi, F. A., Ed., Proc. SPIE Vol. 2756, 1996, 152–163.
7. H. C. Strifors, A. Friedmann, S. Abrahamson, and G. C. Gaunaurd, "Comparison of the relative merits for target recognition by ultra-wideband radar based on emitted impulse or step-frequency wave," in *Automatic Object Recognition X*, Sadjadi, F. A., Ed., Proc. SPIE Vol. 4050, 2000, 2–263.
8. H. C. Strifors and G. C. Gaunaurd, "Time-frequency signatures of penetrable or impenetrable targets buried in lossy half-spaces," to be published in *Subsurface Sensing Technologies and Applications: An International Journal*, Vol. 6, July 2005.
9. H. C. Strifors, G. C. Gaunaurd, B. Brusmark, and S. Abrahamson, "Transient interactions of an EM pulse with a dielectric spherical shell," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. 42, April 1994, 453–462.
10. H. C. Strifors, G. C. Gaunaurd, and P. W. B. Moore, "Analysis in the joint time-frequency domain of the identifying signatures of submerged targets insonified by dolphin clicks," in *Automatic Target Recognition VII*, Sadjadi, F. A., Ed., Proc. SPIE Vol. 3069, 1997, 16–25.
11. H. C. Strifors, G. C. Gaunaurd, and A. Sullivan, "Reception and processing of electromagnetic pulses after propagation through dispersive and dissipative media," in *Automatic Object Recognition XIII*, Sadjadi, F. A., Ed., Proc. SPIE Vol. 5094, 2003, 208–219.
12. H. C. Strifors, G. C. Gaunaurd, and A. Sullivan, "Simultaneous classification of underground targets and determination of burial depth and soil moisture content," in *Automatic Object Recognition XIV*, Sadjadi, F. A., Ed., Proc. SPIE Vol. 5426, 2004, 256–263.



13. H. C. Strifors, A. Gustafsson, S. Abrahamson, and G. C. Gaunaurd, "Automatic classification of mine-like targets buried underground using time-frequency signatures extracted by a stepped-frequency radar," in *Automatic Object Recognition XI*, Sadjadi, F. A., Ed., Proc. SPIE Vol. 4379, 2001, 246–254.
14. C. Baum, L. B. Felsen (Ed.), "Transients in Electromagnetic Fields", Springer, 1976, pp. 129–179.
15. Försvarsmaktens funktionsstudie, delstudie am- och minröjningsverksamhet, HKV Referens #13 301:63968, 2003-03-31
16. Svante Björklund, Dan Axelsson, "Experimental Research Facilities at FOA for Finding Land Mines with Radar in 2000", FOA MEMO 00-6220/L, December 2000.
17. Vladimir N. Vapnik, "Statistical Learning Theory", ISBN 0-471-03003-1, 1998, John Wiley & Sons, Inc.
18. Simon Haykin, "Neural Networks; A comprehensive Foundation", ISBN 0-13-273350-1, 1999, Second Edition, Prentice-Hall, Inc.
19. Shawe-Taylor and Cristianni, "Kernel Methods for Pattern Analysis", ISBN 0-521-81397-2, 2004, Cambridge University Press
20. Göran Danielsson, "HUMUS-DSS Test and Evaluation", SWEDEC, Reference Number: 13 345:60344, 2004-09-10
21. Mirage GPR Systems, <http://www.miragegpr.com/>
22. Schiebel Corporation, <http://www.schiebel.net/>
23. ERA Technology Ltd., <http://www.era.co.uk/>
24. SAAB, <http://www.saab.se/>

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  
Sensorteknik  
Box 1165  
581 11 Linköping

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

[www.foi.se](http://www.foi.se)