

Martin Holmberg, Andris Lauberts, Ron K. Lennartsson

Slutrapport för projektet Interaktiva Adaptiva Marksensornät (IAM)

TOTALFÖRSVARETS FORSKNINGSINSTITUT

Ledningssystem

Box 1165

581 11 Linköping

FOI-R--1450--SE

December 2004

ISSN 1650-1942

Användarrapport

Martin Holmberg, Andris Lauberts, Ron K. Lennartsson

Slutrapport för projektet Interaktiva Adaptiva Marksensornät (IAM)

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Ledningssystem Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1450--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 4. Ledning, informationsteknik och sensorer	
	Månad, år December 2004	Projektnummer E7036
	Delområde 42 Spaningssensorer	
	Delområde 2	
Författare/redaktör Martin Holmberg Andris Lauberts Ron K. Lennartsson	Projektledare Martin Holmberg	
	Godkänd av	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning Försvarmakten	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig	
Rapportens titel Slutrapport för projektet Interaktiva Adaptiva Marksensomät (IAM)		
Sammanfattning (högst 200 ord) Projektet IAM (Interaktiva Adaptiva Marksensomät) syftar till att visa hur ett nätverk bestående utav marksensorer och kommunikationssystem skulle kunna utformas, samt hur systeminteraktion med användarna i ett sådant system skulle kunna ske. I denna rapport beskrivs de olika beståndsdelarna i den demonstrator som framtagits i projektet. Dessutom redovisas övergripande de resultat som kommit fram utan den teoretiska bakgrund som finns redovisad i tidigare rapporter. I projektet har visats att nätverksdelen med kommunikation och informationssystem fungerar väl. Vidare har setts att akustiska och seismiska sensorer kan användas för att följa och klassificera fordon i nätverket trots varierande terrängförhållanden. Klassificeringen förbättrades genom multisensordatafusion (röstning) och filtrering. Prestanda för sensorena är ännu inte optimerade, men räckvidden för detektion av fordon med dessa sensorer skattas till någon kilometer, medan räckvidden för klassificering och rikttningsbestämning är upp till ett par hundra meter beroende på terrängen.		
Nyckelord Sensomät, Marksensor, Distribuerad datafusion		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 36 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Command and Control Systems P.O. Box 1165 SE-581 11 Linköping	Report number, ISRN FOI-R--1450--SE	Report type User report
	Programme Areas 4. C4ISTAR	
	Month year December 2004	Project no. E7036
	Subcategories 42 Surveillance Sensors	
	Subcategories 2	
Author/s (editor/s) Martin Holmberg Andris Lauberts Ron K. Lennartsson	Project manager	
	Approved by	
	Sponsoring agency Defence forces	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) Final Report of the Project "Interactive Adaptive Ground Sensor Networks" (IAM)		
Abstract (not more than 200 words) The objective of the IAM (Interactive Adaptive Ground Sensor Networks) project is to demonstrate how a network consisting of ground sensors and communication systems can be designed, and how system user interaction for this system can be designed. In this report, an overview of the different constituents of the demonstrator developed in the project is given. Furthermore, the main results of the project are given without the theoretical framework that has been included in previous reports. In the project has been shown that the network (consisting of protocols for wireless communication and an information system) works well for these data. Furthermore, it has been shown that acoustic and seismic sensors can be used to classify and track vehicles moving in the network even though the terrain varied. The classification was improved by multisensor data fusion (voting) and filtering. The performance of the sensors has not yet been optimized, but the range for vehicle detection with these sensors is estimated to be in the order of one kilometer, while the range for classification and bearing estimation is estimated to be a few hundred meters, depending on the terrain.		
Keywords Sensor Network, Ground Sensor, Distributed data fusion		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 36 p.	
	Price acc. to pricelist	

1	Inledning.....	6
1.1	Begränsningar.....	6
1.2	Arbetet i projektet.....	6
1.3	Visualiseringsverktygen MIND och VEGA	9
1.4	Målsättning och tekniska frågeställningar.....	9
1.5	Nytta på systemnivå	9
1.6	Medarbetare.....	9
2	Scenario.....	10
3	Mätningar	14
4	Kommunikation i marksensornät	15
5	Informationssystem	17
6	Resultat.....	19
6.1	Sensorer.....	19
6.1.1	Vad vill vi ha ut från sensorerna?.....	20
6.1.2	Upptäcktsavstånd	20
6.1.3	Riktningsbestämning.....	22
6.1.4	Klassificering	25
6.1.5	Målföljning.....	32
7	Fortsatt forskning	35
8	Referenser.....	36

1 Inledning

Projektet IAM (Interaktiva Adaptiva Marksensornät) har behandlat olika aspekter rörande marksensornät. I detta sammanhang betyder termen *marksensor* en relativt enkel sensor som placeras på marken för att mäta på markmål (t.ex. fordon). Ett *marksensornät* kan definieras som ett antal geografiskt spridda marksensorer som autonomt samverkar för att gemensamt sammanställa resultat som inte skulle vara möjliga att uppnå med sensorerna var och en för sig. Det finns alternativa definitioner på dessa begrepp, så läsarna bör se definitionerna ovan endast som giltiga i denna rapport. Målsättningen med projektet har varit att realisera ett autonomt sensornät som arbetar i realtid off-line med verkliga sensordata och som klarar att följa och klassificera enstaka fordon som kör i ett geografiskt begränsat område.

1.1 Begränsningar

För att ett marksensornät ska fungera behövs flera olika komponenter; sensorer, kommunikationsmöjlighet samt mjukvara för att hantera den sensordata som erhålls. I detta projekt har vi tittat på samtliga dessa delar, men ingen del har utretts komplett. Följande begränsningar har funnits i projektet från första början:

- Endast två sensortyper används, nämligen seismiska (geofoner) och akustiska (mikrofoner)
- Mätdata samlas in på hårddisk och analyseras off-line.
- Kommunikation mellan sensorerna implementeras inte i hårdvara, utan väsentliga delar av kommunikationskaraktistika (protokoll för trådlös kommunikation) simuleras.
- Endast ett geografiskt begränsat område ska övervakas (max 10 sensornoder används)
- Endast ett fordon i taget befinner sig inom marksensornätet.
- Sensorernas positioner mäts upp manuellt, och dessa positioner kan sedan utnyttjas av nätet.
- Varje nod ska kunna sköta en viss mängd beräkningar på egen hand.
- Vi antar att sensornoderna har tillgång till en begränsad mängd energi. Detta gör att systemet måste hantera data på ett sådant sätt att beräkningarna är effektiva och att det krävs så lite kommunikation mellan sensornoderna som möjligt.
- Nätet ska vara skalbart, d.v.s. om noder tillkommer ska dessa kunna utnyttjas av systemet, och om noder faller ifrån (t.ex. p.g.a. att batterierna tar slut) så ska nätverket ändå kunna fortsätta fungera.

1.2 Arbetet i projektet

I detta projekt har vi valt att arbeta med fyra områden:

- Sensorsystem: Ett system för realtidsinsamling av data från tio sensornoder har konstruerats. Systemet består av 5 seismiska sensornoder med 3 geofoner i varje nod, samt 5 akustiska noder med 3 mikrofoner i varje nod.
- Signalanalys och datafusion: I varje sensornod beräknas bäring till målet samt särdrag och/eller klassificering av fordonet.
- Informationssystem: Ett system har designats och implementerats som hanterar dataflödet i nätet och ser till att sensordata från olika noder finns tillgänglig på "rätt"

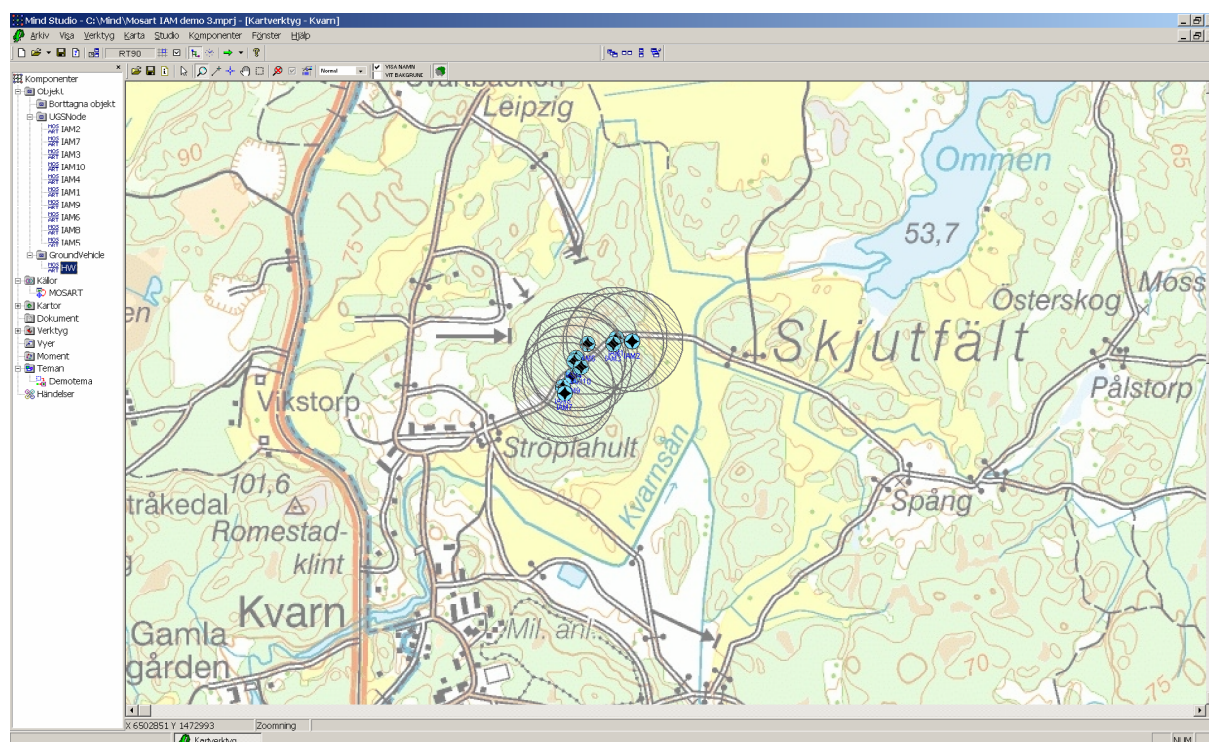
ställe för fusion. Systemet ser också till att slutresultatet finns tillgängligt för användaren/användarna.

- Kommunikationssystem: Simulering har skett av ett kommunikationsprotokoll för att kunna beräkna vilka tidsfördröjningar som uppkommer i nätet då trådlös kommunikation används.

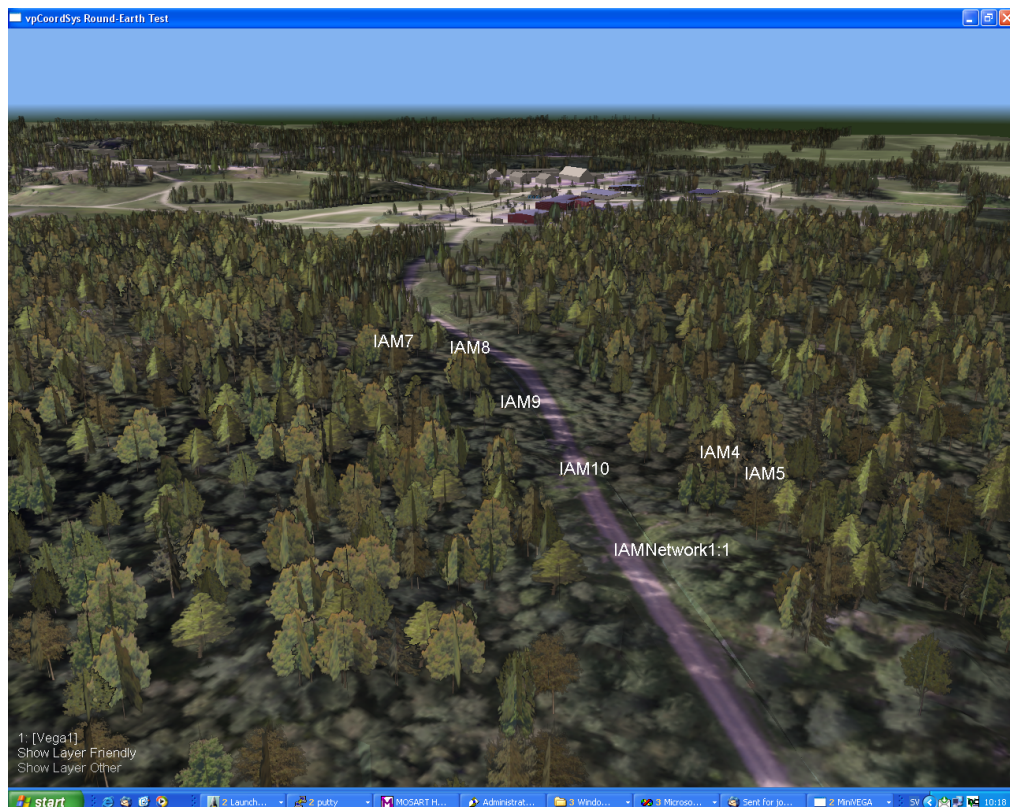
Samtliga dessa delar måste växelverka med varandra i realtid, och dessutom måste resultat kunna visualiseras på ett bra sätt. Inom FOI-projektet MOSART har en miljö utvecklats där olika forskningsprojekt kan plugga in sig med hjälp av HLA-standard, och projekten kan då utnyttja den infrastruktur som finns tillgänglig, t.ex. visualisering. Vi har valt att utveckla en modul till MOSART som innehåller möjlighet att spela upp inspelade sensordata i realtid samt funktioner för alla de olika delarna i systemet. Genom att köra vårt system i MOSART får vi flera fördelar:

- Vi behöver inte själva utveckla visualiseringsverktyg, utan kan använda oss av de två- och tredimensionella visualiseringsverktygen som finns tillgängliga (MIND och VEGA, se sektion 1.3) .
- Eftersom visualiseringen görs i så pass verklighetsnära system kommer resultaten att kunna visas på ett lättöverskådligt sätt som gör att det är enkelt att förmedla forskningsresultat.
- Våra resultat kommer att kunna återanvändas av andra projekt i framtiden.
- Genom att MOSART är kompatibelt med många andra simuleringssystem, t.ex. Visionslabbet i Enköping, så kan vi testa våra resultat tillsammans med många andra externa forsknings- eller utvecklingsgrupper.

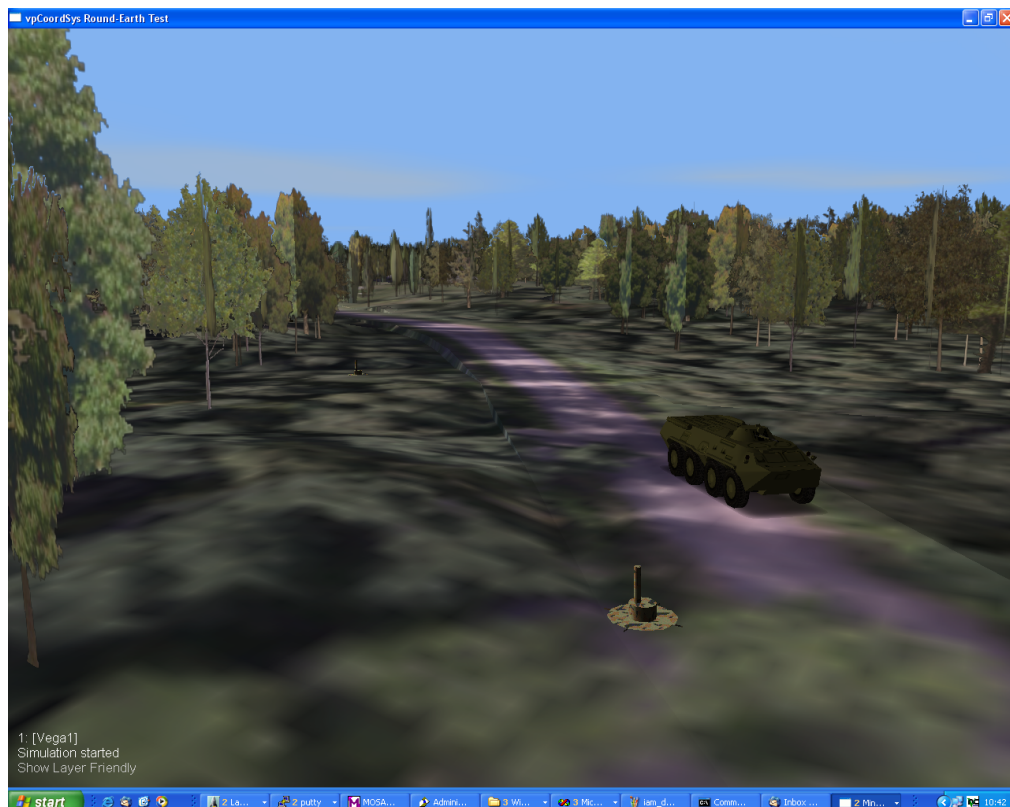
Exempel på bilder från MOSART-miljön finns i Figur 1 - Figur 3.



Figur 1. Exempel på skärmbild från MOSART-miljön. Bilden visar sensorerna (blå cirklar med svart fyrkant) och deras ungefärliga täckningsområden (skuggade, större cirklar) i MIND-miljön.



Figur 2. Exempel på skärmbild från MOSART-miljön. Bilden visar sensorernas placering (t.ex. IAM7) i den tredimensionella VEGA-miljön.



Figur 3. Exempel på skärmbild från MOSART-miljön. Bilden visar sensor (cirkel med uppstickande antenn) och fordonets position i den tredimensionella VEGA-miljön.

1.3 Visualiseringsverktygen MIND och VEGA

MIND är ett sätt att med hjälp av datorer samla in information från en förbandsövning för att både i realtid och i efterhand kunna rekonstruera och studera vad som egentligen hände ¹.

I VEGA-miljön används en högupplöst omvärldsmodell skapad inom FoT-projektet Omvärldsmodellering. Modellen är baserad på mätningar med flygburen laserradar. Byggnaderna och träden är automatiskt extraherade och markytan är draperad med ett högupplöst flygfoto. För mer information om projektet hänvisas till ².

1.4 Målsättning och tekniska frågeställningar

Målsättningen med projektet har varit att realisera ett autonomt sensornät som arbetar i realtid off-line med verkliga sensordata och som klarar att följa och klassificera enstaka fordon som kör i ett geografiskt begränsat område. Detta har kunnat infrias, även om klassningen skulle behöva utvecklas ytterligare för att kunna garantera robusthet. På vägen fram under projektet har ett antal centrala frågeställningar kommit upp, nämligen:

- Finns det någon lämplig struktur för att hantera data i nätverket för att klara klassning och följning med flera sensorer i realtid utan alltför mycket kommunikation?
- Vilken typ av information kan fås från akustiska respektive seismiska sensorer?
- Kan samma klassificeringsmodeller användas på alla sensorer av samma typ oavsett hur de är placerade (signalstyrkeoberoende)?
- Räcker det med bärings- och positionsinformation från de olika sensornoderna för att kunna följa fordonen?
- Vad får försämrade kommunikation för effekt på prestanda i nätet?

De svar som framkommit på dessa frågor finns sammanfattade i denna rapport, medan fördjupade diskussioner finns i tidigare rapporter från projektet ^{3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15}.

1.5 Nytt på systemnivå

Genom att ett helt system bestående av flera olika beståndsdelar har realiserats kommer det att vara möjligt att på ett mycket realistiskt sätt testa hur olika systemkomponenter påverkar varandra, t.ex. vad ett byte av fusionsmetoder skulle få för effekt på mängden kommunikation i nätet. Det blir då möjligt att avgöra om förändringar i enstaka komponenter gör att andra delar av systemet överbelastas, eller om kritiska flaskhalsar kan undvikas.

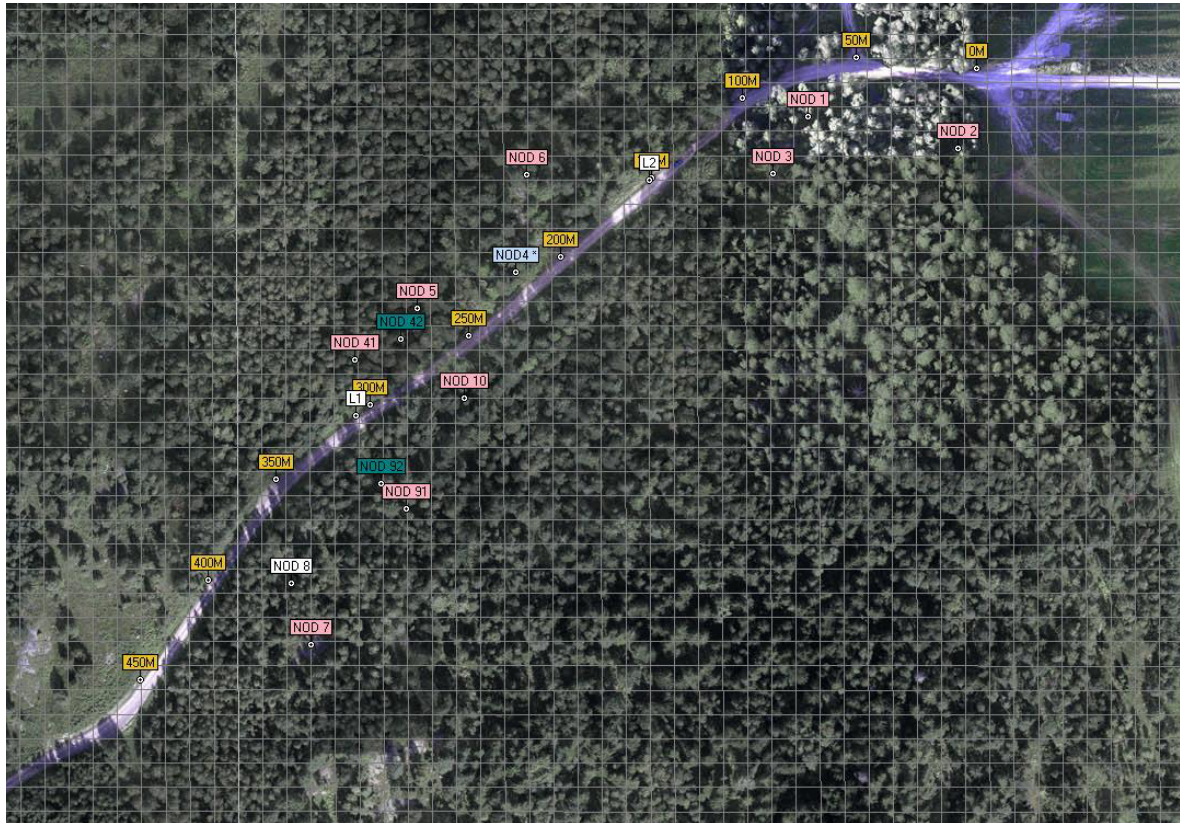
Marksensornätet som utvecklats i detta projekt har också använts som informationsbärare till det frågespråk som utvecklas i projektet "Informationssystem för markspaning" (IS-MS). Detta har lett till att man i det projektet har fått tillgång till en ny typ av sensor med andra egenskaper än tidigare testade sensorer.

1.6 Medarbetare

Under projektet har följande personer arbetat i projektet: Martin Holmberg, Mikael Brännström, Cecilia During, Tomas Eklöv, Linda Farman, Matts Gustavsson, Hans Habberstad, Erland Jungert, Fredrik Kullander, Andris Lauberts, Ron Lennartsson, Ulf Sterner och Claes Vahlberg.

2 Scenario

Ett markområde ska övervakas, och de fordon som passerar genom området ska klassificeras och målföljas. Tänkt användningsområde för detta scenario är t.ex. egenskydd vid periferi till förläggning och tidigt larm vid gränsbevakning. Det finns många fler användningsområden för marksensornät, t.ex. övervakning av erövrade terräng, men eftersom olika användningsområden ställer olika krav på målpositionens noggrannhet, radiotystnad, utplaceringstid, m.m., har vi i detta projekt valt ganska ”enkla” användningsområden för att belysa de grundläggande kraven.



Figur 4. Nätverksplacering. Kartan visar ett utsnitt av Kvarnområdet med en diagonalt gående väg omgiven av sensornoder (NOD 1-10). Två lasertriggers vid väggkanten, L1 och L2, signalerar för passage av fordon.

Området som valts ligger på övningsområdet Kvarn några mil utanför Linköping. Terrängen är småkuperad och till största delen skogsbevuxen. En väg löper genom området, och det är på denna väg som fordonen kört (se Figur 4). Skogsområdet där mätningarna utfördes avgränsas i östra delen av ett öppet fält, medan skogen fortsätter flera hundra meter i övriga riktningar från sensorområdets utsträckning. Vegetationen och höjdvariationerna påverkar den akustiska vågutbredningen, medan fasövergångar mellan olika terrängtyper (t.ex. skog-fält) påverkar den seismiska vågutbredningen. Mer diskussion kring detta finns i styckena nedan. De fordon som användes var sinsemellan olika, med varierande vikt och framdrivningsmedel. Figur 5 - Figur 10 visar bilder på samtliga sex fordon.



Figur 5. Bild på lastmaskin, 9,1 ton.



Figur 6. Bild på T72, 45 ton



Figur 7. Bild på PBV 501 (BMP501), 13,5 ton



Figur 8. Bild på MTLB 401, 11 ton



Figur 9. Bild på BTR70, 11,5 ton



Figur 10. Bild på Terrängbil 20 (TR20), 2,4 ton

3 Mätningar

De fältmätningar som utförts i projektet är två förförsök (ett i Skövde och ett i Kvarn) samt ett slutförsök (i Kvarn). Dessutom har förförsök gjorts med enstaka sensorer i FOIs lokaler samt utomhus på FOIs område. Syftet med förförsöken har varit att utvärdera sensorernas räckvidd, samt dess förmåga att riktningsbestämma och klassificera olika fordon. Dessutom har signalkanalens variation studerats, d.v.s. hur akustiska och seismiska signaler påverkas av omgivningen under utbredning från signalkällan till sensorn. Förförsöken har gett information som legat till grund för valet av sensorpositioner till slutförsöket. För de olika sensortyperna har vi sett följande problem som de primära:

- Akustiska
 - Diffraction – spridning av signalen p.g.a. träd, kullar etc.
 - Reflektion – signalen studsar mot tät vegetation, stenar etc.
 - Absorption – signalstyrkan avtar snabbt p.g.a. vegetation, snö etc.
 - Dynamik – om sensorn placeras för nära vägen måste förstärkningen ställas ned så att räckvidden blir begränsad
- Seismiska
 - Utbredningshastigheten i marken varierar med marktyp
 - Signalen dämpas olika mycket i olika marktyper och högre frekvenser dämpas mer än låga
 - Reflektioner vid övergången mellan olika markförhållanden
 - Dålig koppling vid övergångar mellan olika marktyper – ger svag signal

Utifrån detta har vi satt upp några viktiga regler för sensorutplaceringen i sensornätet:

- Sensornoderna får inte ligga för långt ifrån varandra. Lagom avstånd har bedömts vara 15-100m för att få tillräcklig täckning för att kunna följa fordon.
- Noderna måste placeras i närheten av vägen eller trolig passage (15-50m)
- Långa siktavstånd måste utnyttjas för placering av noder och därmed undvika akustiskt skymda platser
- Bestämning av vågutbredningshastigheten i marken måste göras för att kunna dimensionera geofonnoden

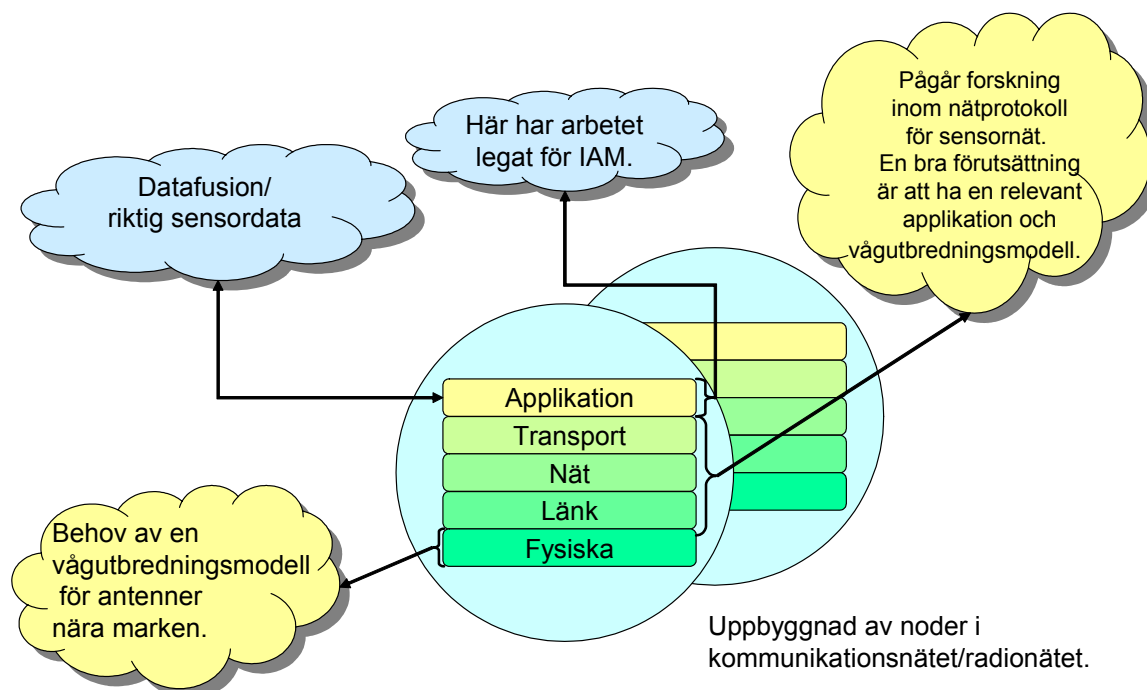
Sensornätet vid slutförsöket bestod av fem mikrofonnoder (nr 3, 5, 6, 8, 10) och fem geofonnoder (nr 1, 2, 4, 7, 9), se Figur 4. I varje nod bildar tre sensorer hörnen av en liksidig triangel så att sensorsignalerna kan användas för att riktningsbestämma källan. Vid fältförsöket gjordes mätningar på tre hjulfordon (TR20, Lastmaskin, BTR70) och tre bandfordon (MTLB401, PBV501, T72). För varje fordon samlades data in från minst sex körningar genom området. Körningarna gjordes i olika fart och med två olika färdriktningar. Fältförsöket beskrivs mer i detalj i ³.

4 Kommunikation i marksensornät

Trådlös kommunikation är en förutsättning för att marksensornät ska vara lätta att placera ut. Det finns dock flera problem inom detta område som ännu inte är helt lösta, t. ex.:

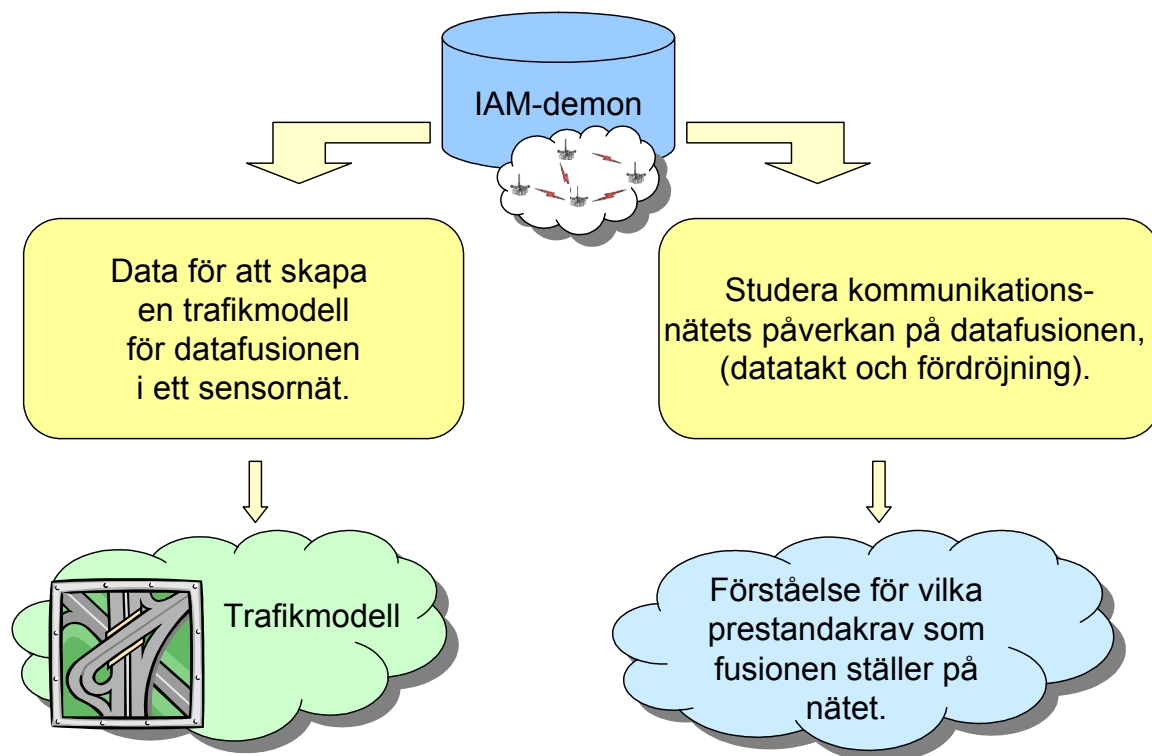
- Vågutbredning i vegetation nära marken.
- Etablering av kommunikationsnätet.
- Trafikstyrning av informationen i en dynamisk miljö.

En viktig del för att kunna designa kommunikationssystem för marksensornät är kunskap om den trafik som sensorerna och datafusionssystemet genererar i nätet. Det är därmed värdefullt att ha en realistisk trafikmodell för utvärdering av olika protokoll. Inom detta projekt har arbetet inom kommunikationsområdet koncentrerats på applikationslagret (se Figur 11) och en trafikmodell för datafusion i marksensornät har beskrivits. Den framtagna modellen kan i framtiden användas vid utvärdering av olika kommunikationslösningar för marksensornät. För en fullständig beskrivning av det arbete som gjorts, se referenser ⁷ och ¹³.



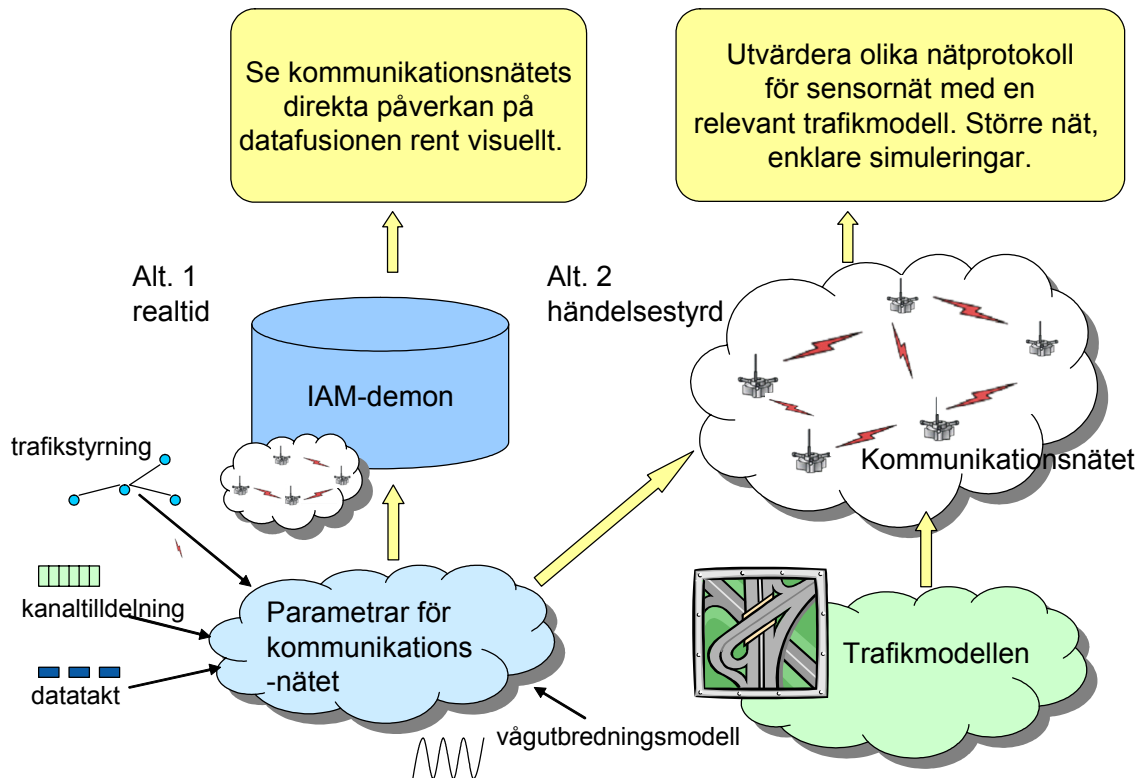
Figur 11. Beskrivning av kommunikationssystemet och var fokus ligger i projektet.

Utvärdering av olika kommunikationslösningar är även möjligt att göra med hjälp av den marksensornätdemonstrator som tagits fram inom projektet tillsammans med kommunikationssystemet. Data från informationssystemet skickas då via kommunikationssystemet i realtid. I framtiden kan detta ge möjlighet att studera hur olika datafusionsmetoder påverkas vid olika kvalitet på kommunikationen (Figur 12). Till exempel kan det visas visuellt hur kvaliteten på informationen påverkas av försämrade kommunikation. Det skulle exempelvis kunna ses genom att spåret som levereras ut från nätet kommer senare, eller att följningen inte alls fungerar p.g.a. att data inte levereras mellan sensornoderna.



Figur 12. Resultat av arbetet med kommunikationssimuleringar.

Figur 13 visar på hur en framtida användning av trafikmodellen, kommunikationssystemet och marksensornättdemonstratorn är tänkt att se ut. Den ena vägen att gå är att använda demonstratorn och kommunikationssystemet för utvärdering av kommunikationslösningar och visa på direkt påverkan rent visuellt. Detta är dock beräkningskrävande vilket innebär en begränsning i hur många noder som kan simuleras. Den andra vägen att gå är att endast använda kommunikationssystemet och den trafikmodell som tagits fram. Fördelen med detta är att simuleringarna inte är lika beräkningskrävande och därmed kan nät med ett större antal sensorer simuleras.



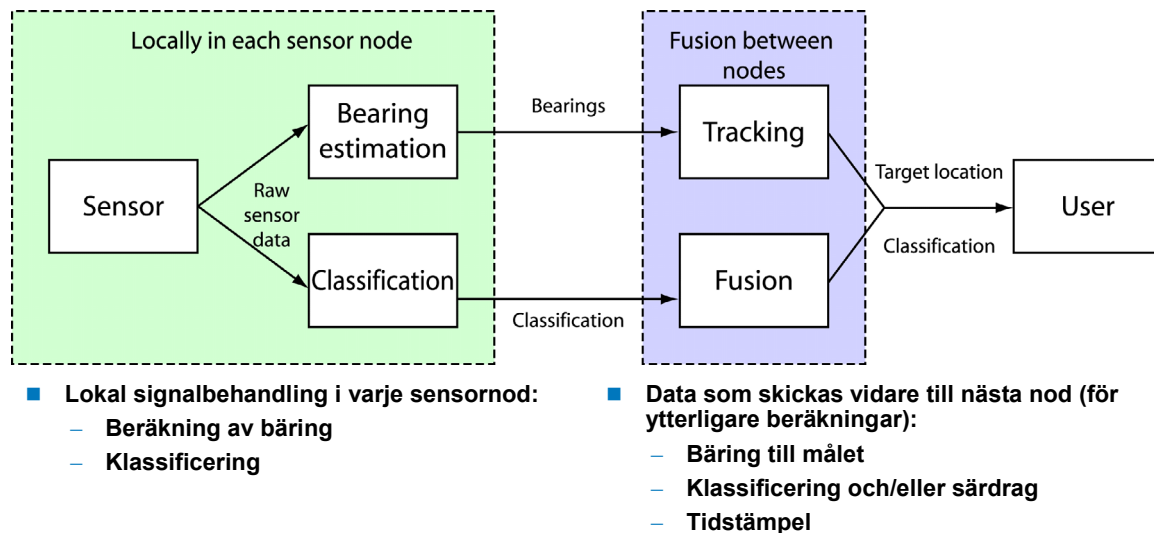
Figur 13. Möjliga framtida användningsområden för marksensornättdemonstratorn, kommunikationssystemet samt trafikmodellen.

5 Informationssystem

För att sensornoderna i nätet ska kunna samverka behöver data skickas i nätverket på ett ordnat sätt. Vidare behöver användare kunna hitta rätt information i nätet. Ett effektivt informationssystem måste alltså designas för att hantera data på bästa sätt. Ett viktigt bivillkor är att det inte får bli för mycket data som ska skickas i nätet eftersom det dels innebär en stor belastning på kommunikationsresurserna med hög energiåtgång som följd, och dels innebär det också en ökad risk för röjning.

Så kallade intelligenta agenter har använts i detta projekt för att sköta datahanteringen. Intelligenta agenter är autonoma program som utför en specifik uppgift, kan flytta sig i nätet samt har möjlighet att växelverka med andra agenter. Varje enskild agent utför en relativt enkel uppgift, men genom att definiera uppgifter för olika agenter på ett bra sätt kan agenterna tillsammans utföra komplicerade uppgifter, som t.ex. att sköta dataflödet i ett sensornät.

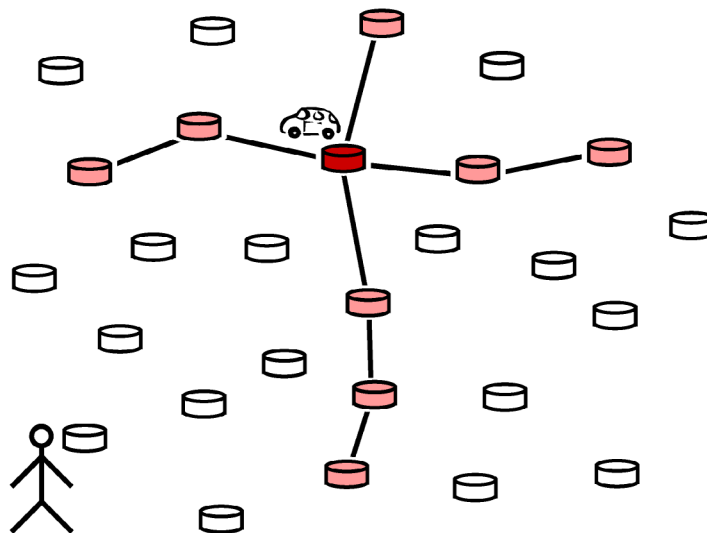
I detta projekt har definierats och använts en typ av intelligenta agenter som har till uppgift att klassificera och följa fordon i området, de kallas här för spåragerter. Då en sensor upptäcker ett fordon kommer sensorn först att leta i sin omgivning om det redan finns en spåragent för detta fordon, och om det inte gör det kommer en spåragent att skapas. Om det redan finns en spåragent för detta fordon kommer istället all sensordata (behandlad i form av bärning och klassificering/särdrag) att skickas till denna agent. Spåragenten sätter sedan samman all data från alla sensorer, vilket betyder att följning och multisensorklassificering sker i denna. Se även Figur 14.



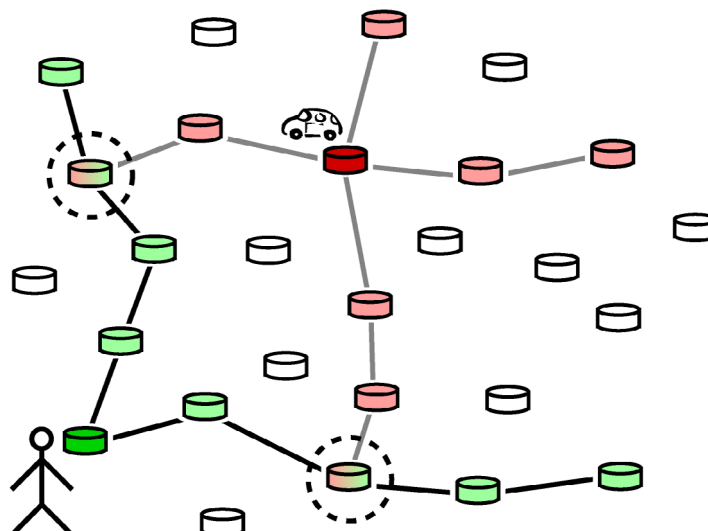
Figur 14. Beräkningar som sker lokalt (i sensorn) respektive i spåragenten (flyttbar mellan sensornoderna).

För att en användare ska kunna hitta information i nätet, och för att sensorer ska kunna hitta agenter används olika former av distribuerade uppslagningsmetoder. Dels behövs en uppslagning av spår i nätverket initierat av en användare (global uppslagning), och dels behövs uppslagning av en spåragent när en sensor upptäcker ett mål (lokal uppslagning). Global uppslagning baseras på pseudo quorums, vilket i detta fall innebär att användaren registrerar en fråga (vilken typ av information som önskas), och denna fråga sprids i två ortogonala riktningar i nätet. På samma sätt registrerar sig en spåragent då den skapas. Denna process kan ske i valfri ordning, se Figur 15. På detta sätt undviks att skicka information till alla noder i nätet, och kommunikationen kommer därför att bli lägre i nätet.

1. Spåragent registreras



1. Spåragent registreras
2. Användare registreras
3. Spår hittas



Figur 15. Principskiss för informationssökning i nätet. En spåragent registreras då ett fordon upptäcks, registrering sker i två ortogonala riktningar. Då en användare tillkommer sker registrering på samma sätt, och med mycket stor sannolikhet kommer användaren att hitta spåret.

Körningarna i demonstratorn visar att informationssystemet fungerar åtminstone för det begränsade antal mål (ett i taget) som finns i mätningarna. För att validera informationssystemet vore det intressant att testa större nätverk och flera mål och se hur prestanda påverkas.

6 Resultat

6.1 Sensorer

Den cirkulära arrayen med tre mikrofoner integrerades i en aluminiumhållare i form av en diskus (se Figur 16). Diskusen är delbar och mikrofonerna kan justeras så att sensordelens radie kan varieras från 10 till 15 cm. Vindskydd kan endast användas när mikrofonerna sticker ut ur diskusen. Noden riktar mot norr manuellt med hjälp av en markering på diskusen och en kompass. Inställningen av riktningen är viktig då beräkningarna baseras på respektive nods riktningsdata. Mikrofonenheten består av en elektretkapsel av märket Sennheiser monterad i ett rör av mässing.

Den seismiska noden konfigurerades till en cirkulär array med tre sensorer enligt samma princip som den akustiska noden. Geofonen fångar upp vibrationerna i marken via en spole som är upphängd i ett magnetfält. En förstärkning mellan 40dB till 80dB behövdes för att få maximal utstyrning i systemet. Diametern på geofonnoderna valdes till 0,6 m (förutom den nod som sattes fast i berget där diametern var 1 m) baserat på vågutbredningshastigheten i marken. Sensorerna (se Figur 16) var av typen SM6/U-B från INPUT/OUTPUT, INC.



Figur 16. Bilder på sensorerna som användes i marksensornätet. Till vänster syns en geofon, och till höger syns en nod med tre mikrofoner. Mikrofonerna sitter på ytterkanten av disken högst upp på stativet. Geofonerna placerades tre stycken i en cirkel enligt Figur 19 för varje nod.

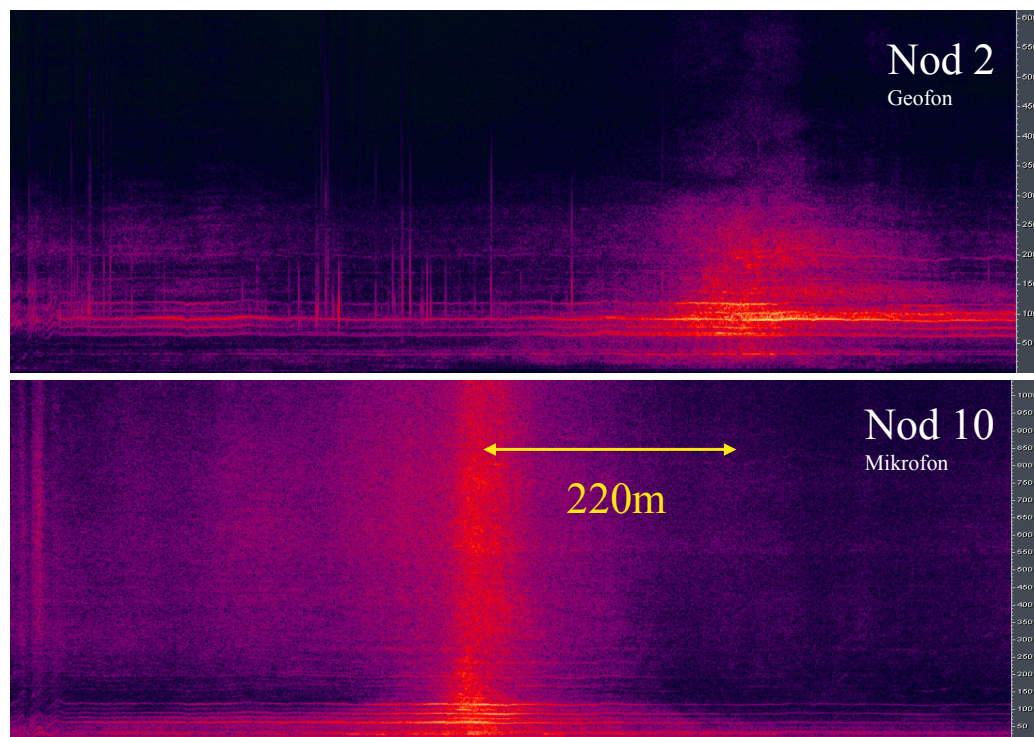
6.1.1 Vad vill vi ha ut från sensorerna?

Den signalbehandling som görs i respektive sensornod i marksensornätet syftar till att beräkna riktningen till signalkällan samt att plocka fram särdrag/klassificering för fordonet. För att göra detta behövs algoritmer som kan utföra dessa uppgifter, och dessa beskrivs noggrant i tidigare publikationer samt övergripande i nedanstående stycken. Generellt kan sägas att de framtagna algoritmerna bör uppfylla följande krav:

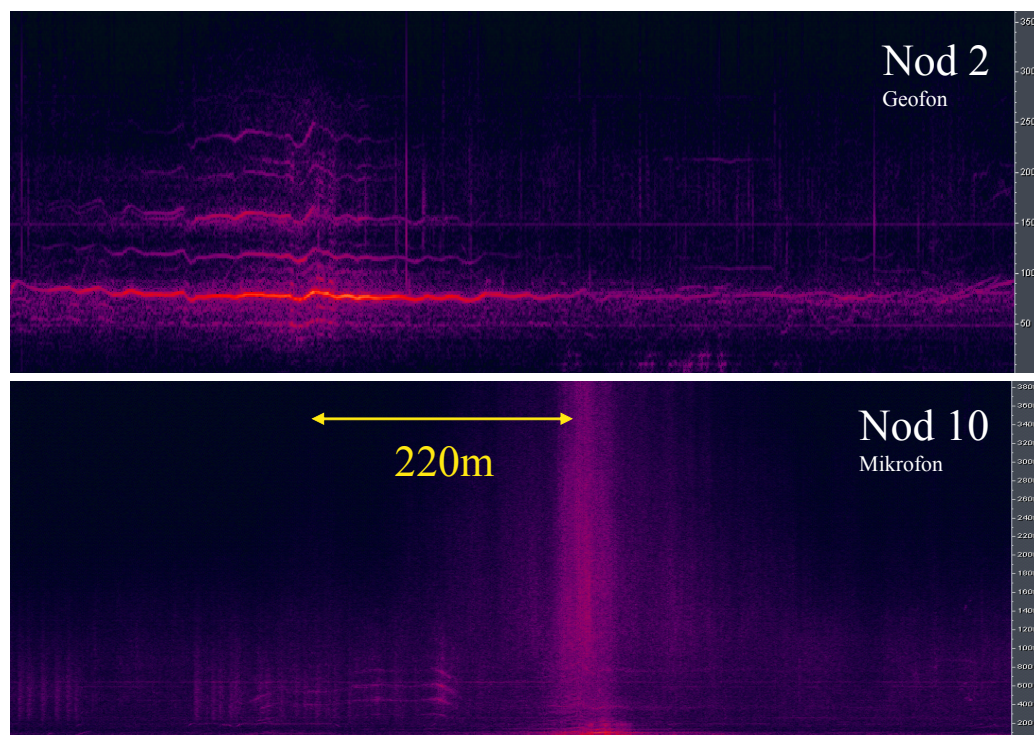
- Modellen ska baseras på och optimeras för data insamlade i fältförsök.
- En gemensam modell för alla sensorer av samma typ.
- Modellen ska uppskatta sannolikhet för klasstillhörighet i de aktuella klasserna.
- Modellen bör ge så litet fel i klassificeringen som möjligt.
- Modellen ska förenklas så långt som möjligt.
- Beräknings- och datalagringsbehoven bör klara nära realtid på vanlig PC.

6.1.2 Upptäcktsavstånd

I Figur 17 och Figur 18 visas tid-frekvensdiagram för två av fordonen i studien. Såsom kan förväntas ger det tyngre fordonet T72 betydligt starkare signaler än Terrängbil 20. Upptäcktsavståndet för de två sensortyperna varierar för olika fordon, men för geofonen tycks det vara möjligt att upptäcka närvaron av en signal på större avstånd än löpans längd även för det lättare fordonet (Terrängbil 20). Uppskattningsvis har geofonen en räckvidd på någon kilometer, och för tyngre fordon kan den vara ännu längre. Mikrofonens detektionsavstånd tycks vara betydligt kortare, särskilt för det lättare fordonet. Egentligen är det bara något hundratal meter kring själva passagen som det finns tydlig signal för Terrängbil 20, även om det ibland finns frekvenslinjer även på lite längre avstånd. Begränsningarna beror i första hand på terrängen, eftersom vegetationen effektivt dämpar den akustiska signalen.



Figur 17. Frekvensinnehåll (vertikal axel) ritat mot tid (horisontell axel) för en passage med en T72 (tungt banddrivet fordon). Styrkan i signalen ses i färgskala svart-gul. Det övre spektrogrammet kommer från en geofon, och det nedre från en mikrofon. Sensorerna var placerade 220 m från varandra, varför maximal signalstyrka inträffar vid två olika tidpunkter. Som synes finns det frekvensband under hela passagen (löpans totala längd är knappt 1 km), och det tycks som att detektion skulle kunna ske även på ännu större avstånd. Klassificering är dock svårt på långa avstånd p.g.a. variationer i frekvenstopparna.

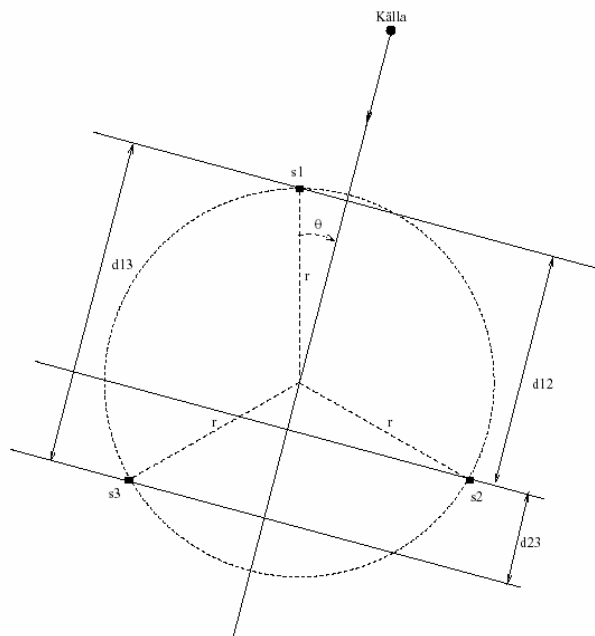


Figur 18. Frekvensinnehåll ritat mot tid för en passage med en Terrängbil 20 (lätt hjuldrivet fordon), jfr Figur 17. Som synes finns det frekvensband under hela passagen endast för geofonen, medan mikrofonen har en mycket begränsad räckvidd. Detektionsavståndet blir därför längre för geofonen än för mikrofonen.

För T72:an syns signalen längs hela löpan, men signalen är betydligt svagare än för geofonen. Upptäcktsavståndet för mikrofonen tycks dock vara mer fordonsberoende än för geofonen, och det är svårt att ge något entydigt värde. En tumregel skulle kunna vara att personbilar kan upptäckas på max något hundratal meter (beroende på terrängen), medan tyngre fordon kan upptäckas flera hundra meter bort. Dessa värden torde dock bli betydligt högre vid öppen terräng (litteraturen pratar om flera kilometer vid bra förhållanden).

6.1.3 Rikttningsbestämning

För att bestämma riktningen till ett fordon som kör i eller i närheten av sensornätet använder vi en korrelationsmetod tillsammans med antagande om plana vågor. Nätverket består av fem mikrofonnoder och fem geofonnoder. I varje sensornod är tre sensorer (mikrofoner eller geofoner) placerade med 120 graders mellanrum i en cirkulär array (se Figur 19). Mikrofonarrayens radie var 0.13 meter vilket ger en övre gränsfrekvens på 700 Hz. Geofonarrayens radie var 0.3 meter vilket ger en övre gränsfrekvens på 300 till 900 Hz beroende på utbredningshastigheten i marken (den varierar mellan noderna och uppmäts vid utplaceringen av geofonerna). Gränsfrekvenserna ovan ger lite marginal då de fordon vi studerat har effekttoppar under 200 till 300 Hz för både mikrofoner och geofoner. För att beräkna riktningen till ett fordon beräknas korskorrelationerna mellan de uppmätta signalerna i de tre sensorerna. Därefter söker vi de tidsförskjutningar som maximerar korskorrelationerna då dessa motsvarar skillnaden i ankomsttid för en vågfront till respektive sensorpar. Slutligen kan infallsvinkeln beräknas utifrån den minsta av dessa tidsskillnader. Metoden finns i detalj beskriven i ⁴.

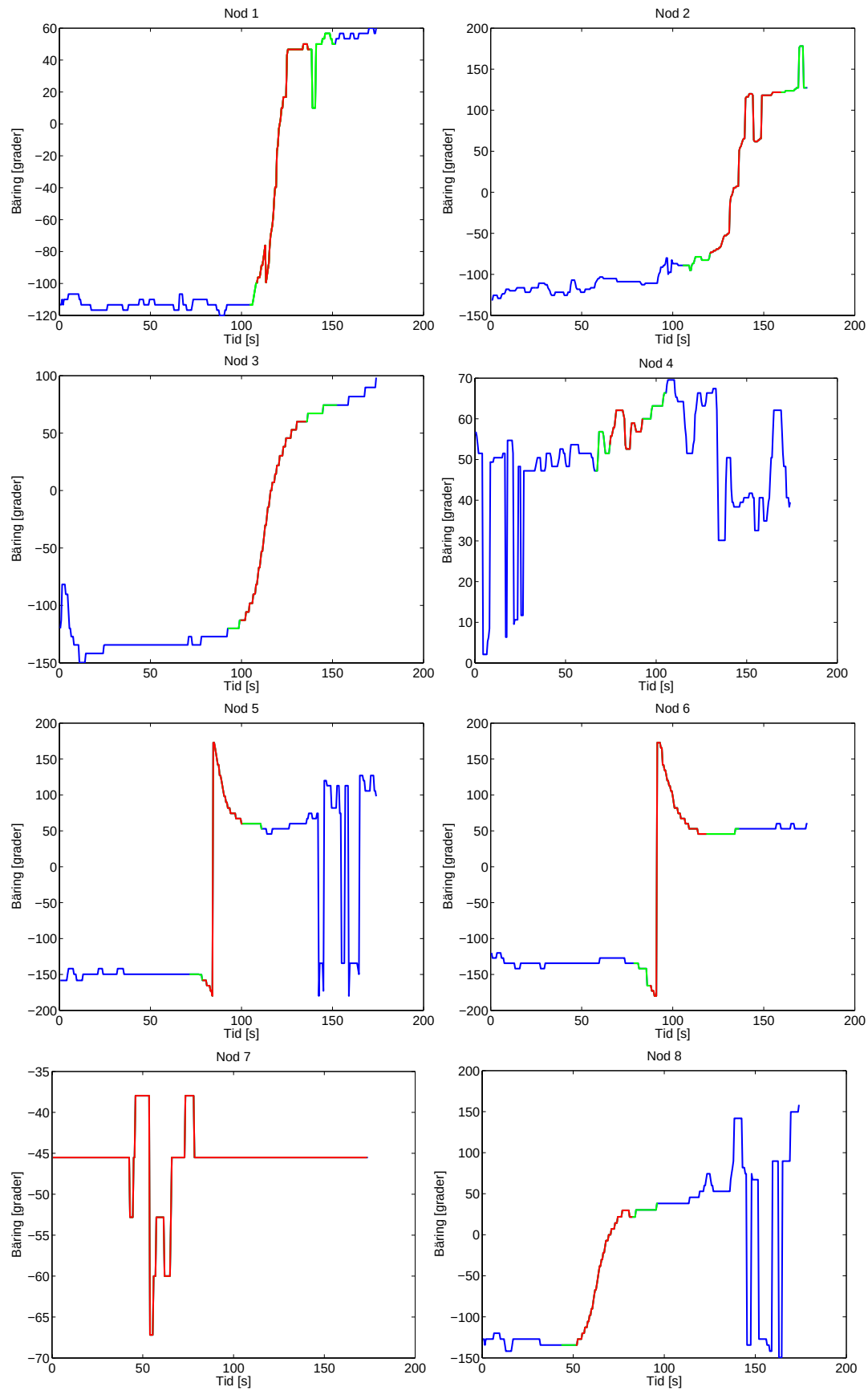


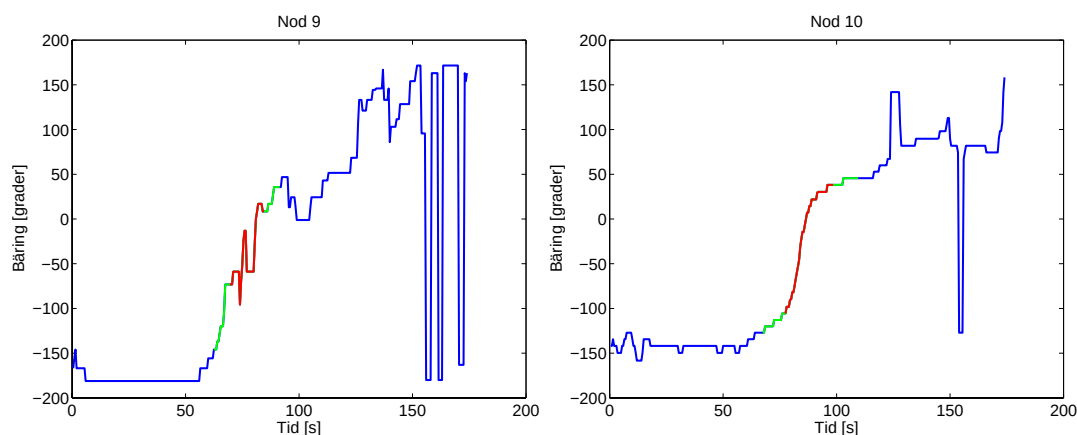
Figur 19. En cirkulär array med 3 sensorer s1, s2 och s3 utplacerade med 120 graders mellanrum.

Vi har beräknat bäringar för samtliga inspelningar som gjordes vid fältförsöket i Kvarn i oktober 2003 med denna metod. En bäring beräknas för varje sekund och nod. I Figur 20 visas resultat från bäringsberäkningar för en inspelning av en BTR 70 som körde i 20 km/h längs den grusväg som gick genom sensornätet. I det rödmarkerade området är signalenergin minst 5 procent av den maximala och i den grönmarkerade delen minst 1 procent av den maximala. De flesta noderna ger bra bäringar i 5-procentsområdet och vissa noder fungerar bra under hela inspelningen. För målsårsberäkningar (som behandlas i avsnitt 6.1.5) nyttjas endast bäringar från 1- eller 5-procentsintervallen. Noggrannheten i riktningsbestämningen kan inte beräknas exakt, och beror dessutom på vald samplingstakt. För den samplingstakt som använts vid analys (12 kHz) skattas noggrannheten till 7 grader för mikrofonnoderna, och bättre än 5 grader för geofonnoderna. Om istället samplingstakten sätts till 48 kHz kommer noggrannheten att bli cirka 3 grader för mikrofonnoderna och bättre än 1,5 grader för geofonnoderna. Det måste dock påpekas att detta rör sig om noggrannheten på riktningsbestämningen för signalen såsom den kommer fram, sedan tillkommer problematiken som tidigare nämnts att signalen inte alltid färdas raka vägen från signalkällan till sensornoden utan påverkas av reflektioner och dylikt.

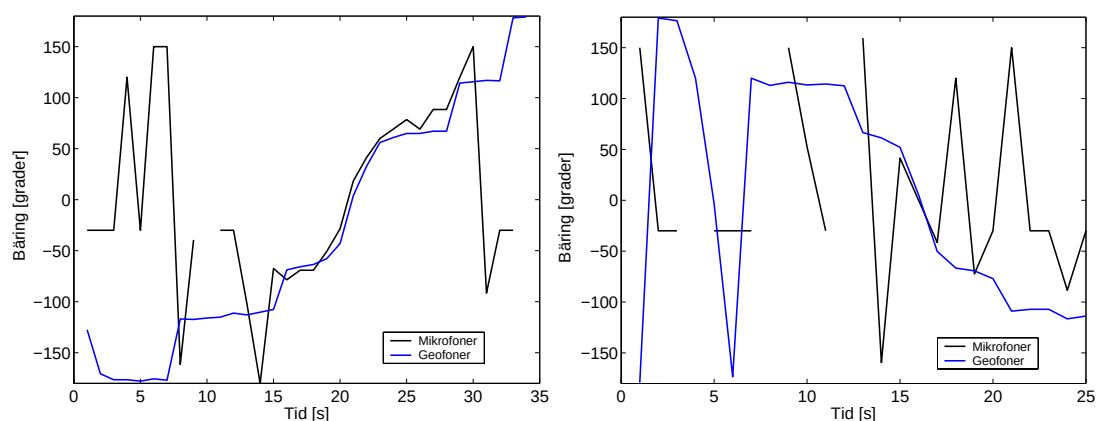
Geofonerna i nod 4 och 7 fungerar dåligt för hela passagen, vilket visar sig vara fallet för de allra flesta inspelningarna. Bärings från dessa noder används följaktligen inte för målsårsberäkningar. Geofonerna i nod 7, som var fastsatta i berget en bit ifrån vägen, fungerade dåligt på grund av för låga signalnivåer, vilket man kan se i Figur 20 (signalenergin är mer eller mindre konstant under hela passagen, vilket inte borde vara fallet vid en fordonspassage utan är ett tecken på att signalen mestadels innehåller brus). De låga signalnivåerna beror antagligen på dålig koppling mellan vägen och berget. Att nod 4 (som var placerad delvis i sankmark) fungerar dåligt beror på varierande markförhållanden för de 3 geofonerna inom noden (en geofon var placerad i något hårdare mark än de andra två). Det är följaktligen viktigt att placera geofonerna i så homogen mark som möjligt samt att tillse att de har bra koppling till marken. Sammanfattningsvis så fungerar riktningsbestämningen bra för nästan alla inspelade passager med både geofoner och mikrofoner. Mikrofonerna ger dock något stabilare riktningar och är enklare att placera ut i terrängen än geofonerna. Detta är dock inte generellt giltigt (se nedan).

I Figur 21 visas skattade riktningar från ett försök som genomfördes på FOI:s bakgård i Linköping. Geofon- och mikrofon-arrayerna var placerade så att de hade ett gemensamt centrum, det vill säga båda arrayerna ska skatta samma riktning till ett förbipasserande fordon. Sensorerna var placerade mitt på en gräsplan och ett fordon körde förbi på en väg i utkanten av gräsplanen. Som kan ses i Figur 21 så lyckas geofonerna skatta riktningen till fordonet under betydligt längre tid än vad mikrofonerna förmår. I det här fallet är tydligen geofonerna att föredra. Detta kan förklaras av att markförhållandena på platsen var homogena vilket ger bra förutsättningar för geofonerna. Däremot var sikten delvis skyddad av en liten byggnad under en del av passagen, vilket försvårar betydligt för mikrofonerna. Vilken sensortyp som bör användas beror på förhållandena på platsen som ska övervakas. En fördel med geofonerna är att de är mindre synliga i terrängen än mikrofonerna. Geofonerna sitter nertryckta i marken medan mikrofonerna är monterade på ett stativ en bit ovan mark. Mikrofonerna och geofonerna kompletterar varandra på ett bra sätt då det är olika faktorer som är begränsande för de båda sensortyperna.





Figur 20 Beräknade bäringar för en passage av en BTR 70 som körde med cirka 20 km/h på den grusväg som gick genom sensornätet. Nod 1, 2, 4, 7 och 9 var geofonnoder och nod 3, 5, 6, 8 och 10 var mikrofonnoder. I det rödmarkerade området är signalenergin minst 5 procent av den maximala och i den grönmarkerade delen minst 1 procent av den maximala.



Figur 21 Skattade bäringar för en -150 till +150 graders passage (vänstra bilden) och en +150 till -150 graders passage (högra bilden) inne på FOI:s bakgård i Linköping. Bäringar skattade med geofonarrayen (blå färg) och mikrofonarrayen (svart färg) visas i figuren. Geofonerna ger rimliga bäringsskattningar under längre tid än mikrofonerna, framförallt i den högra bilden.

6.1.4 Klassificering

Klassificering av fordonen sker i flera moment innefattande träning, validering och test.

Träning:

1. Tidssignalen från en sensornod och ett mål, se Figur 22, styckas upp i en följd av smala tidsfönster nära en fordonspassage. Varje sådant fönster analyseras med hjälp av Fourieranalys (FFT) som tar fram frekvensinnehållet av ljudet i 512 steg, se Figur 23. Analysen upprepas för alla mål.
2. Eftersom dessa FFT-koefficienter antas ha hög kovarians (d.v.s. frekvenser nära varandra har nästan samma signalstyrka), kan en reduktion av antalet parametrar från frekvensanalysen göras. Syftet med detta är att framhäva ett litet antal komponenter (PC) med största möjliga spridning mellan mätningarna. Figur 24 visar att man redan med två PC-komponenter kan upplösa en avsevärd del av de sex målklasserna i skilda grupper. Majoriteten av komponenter med låg spridning representerar huvudsakligen brus och försummas. Denna reduktionsmetod kallas PCA (Principal Component Analysis).

3. Kvarvarande PC-komponenter sätter medelvärde och spridning i en s.k. Bayes klassificerare som förutsätter en multidimensionell normalfördelning av sensordata. Indata är dimensionsreducerade PC-komponenter från olika målklasser. Utdata ger uppskattad sannolikhet för att en viss målklass observeras.
4. I verkligheten finns inga garantier som begränsar antalet olika mål till de på förhand antagna. En första generalisering är att inkludera klassen "okänd" som kan innefatta ett eller flera okända mål. Detta görs i vårt fall genom att sätta en lämplig tröskel på minsta skattade sannolikhet för att inkludera ett känt mål, i annat fall klassas målet som "okänt".

Validering:

5. Moment 1 upprepas för samma mål men vid en annan nod med samma slags sensorer.
6. Dimensionsreducering görs med *samma* transform som vid träning.
7. Samma antal sparade PC-komponenter som vid träning matas in till Bayes klassificerare.
8. Andelen korrekt klassade mål (de med störst skattad sannolikhet) plottas mot antalet sparade PC-komponenter, se Figur 25. Det visar sig att andelen korrekt klassade mål slutar växa redan vid 10 mest signifikanta PC-komponenter, vilket är en högst avsevärd dimensionsreduktion från 512 ursprungliga FFT-koefficienter. Figur 26 ger i ett s.k. förväxlingsdiagram en annan syn på valideringsresultatet baserat på 10 PC-komponenter. Här visas andelen korrekt klassificerade mål i proportion till kvadraternas storlek på diagonalen. De små kvadraterna utanför diagonalen är felklassningar, däribland också innefattande en "okänd" klass.
9. Resultatet enligt Figur 25 visar på nästan 90 % korrekt klassificering för *mikrofoner*. En motsvarande studie har också gjorts för *geofoner*, där valideringen bara träffat rätt klass i 50 % av alla fall. Slutsatsen är att klassificering inte bör göras på geofondata i detta fall.

Test:

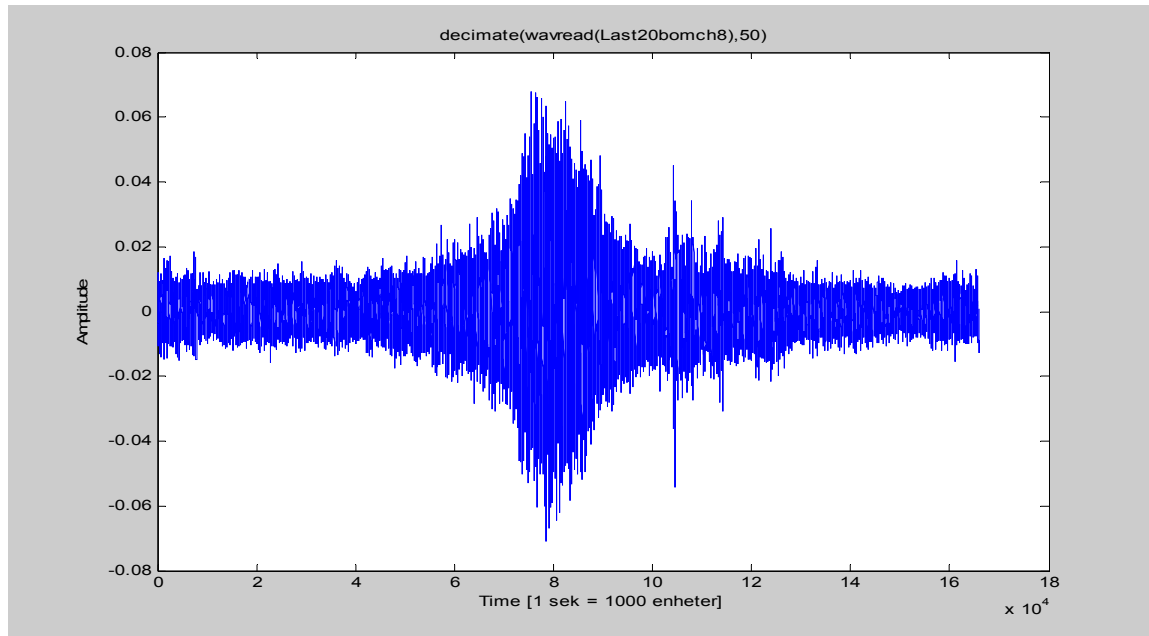
10. Moment 4 - 6 upprepas med testdata från alla sensornoder och mål.

Temporal filtrering.

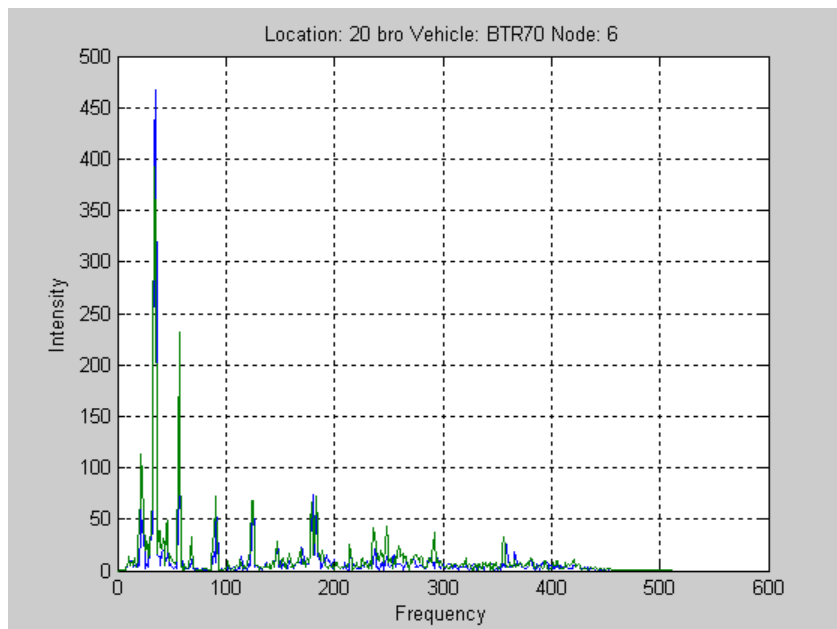
En klassificerare kan hämta information både i tid och rum. Ett närliggande sätt är att uppdatera ett klassestimat vid en nod med ett estimat baserat på data i nästföljande observationsfönster. Vid denna s.k. temporala filtrering multipliceras en skattad (tidigare uppdaterad) sannolikhet för att se ett mål vid en tidpunkt med en skattad (från Bayes klassificerare) sannolikhet för att se samma mål vid nästa tidpunkt. Efter normalisering med summan av sådana produkter för alla antagna mål fås en uppdaterad sannolikhet för att se just detta mål. Ett mål med högst skattad sannolikhet anses som mest troligt. Efter en startperiod, med ofta låg signalnivå och följaktligen osäker klassificering, ger temporal filtrering ett stabilt förlopp av allt säkrare klassificering. Egentligen bör de nya observationerna ligga tillräckligt långt fram i tid för att vara okorrelerade med de första. Det visar sig dock i praktiken att man genom en enkel viktning av nya observationer med en fördröjningsfaktor kan kompensera för delvis korrelerade observationer utan att nämnvärt försämra klassificeringsprestanda. Metoden fungerar eftersom sannolikheten att två på varandra följande mätningar tillhör samma klass är mycket hög.

Röstning – multisensorfördelar.

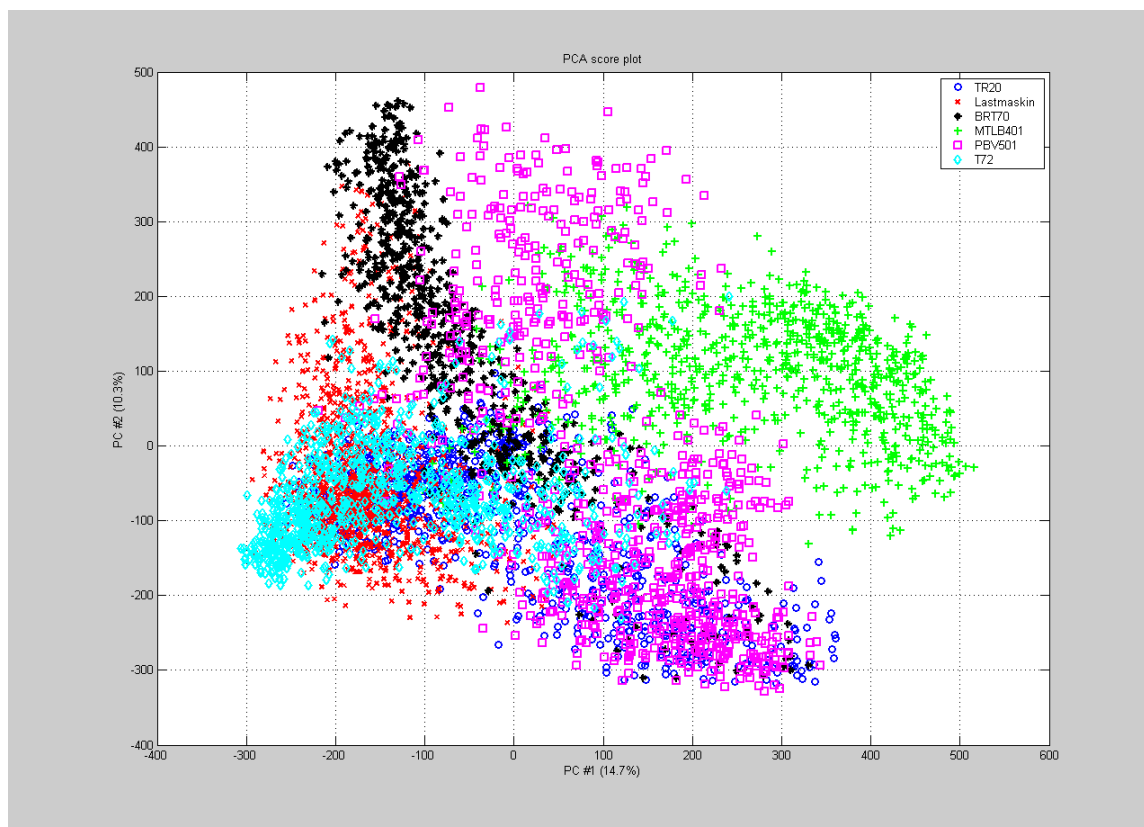
Information kan också vägas ihop från olika sensornoder som ser samma mål. En enkel, men samtidigt robust, metod är att räkna antalet röster som olika mål får från olika sensornoder efter klassificering. ”Vinnaren-tar-allt” fungerar bra och robust, även med en blandning av sensornoder av olika slag (i vårt fall mikrofoner och geofoner).



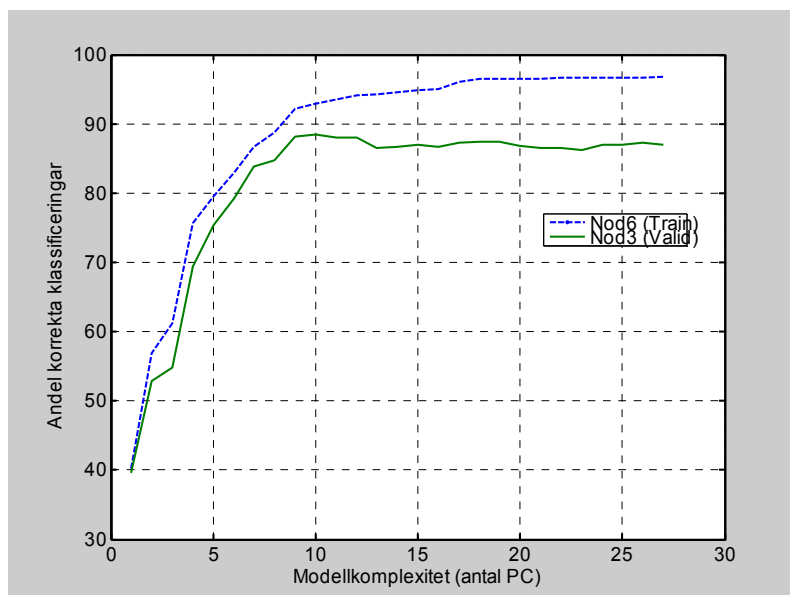
Figur 22. Mikrofonsignal av ljudet från en lastvagn.



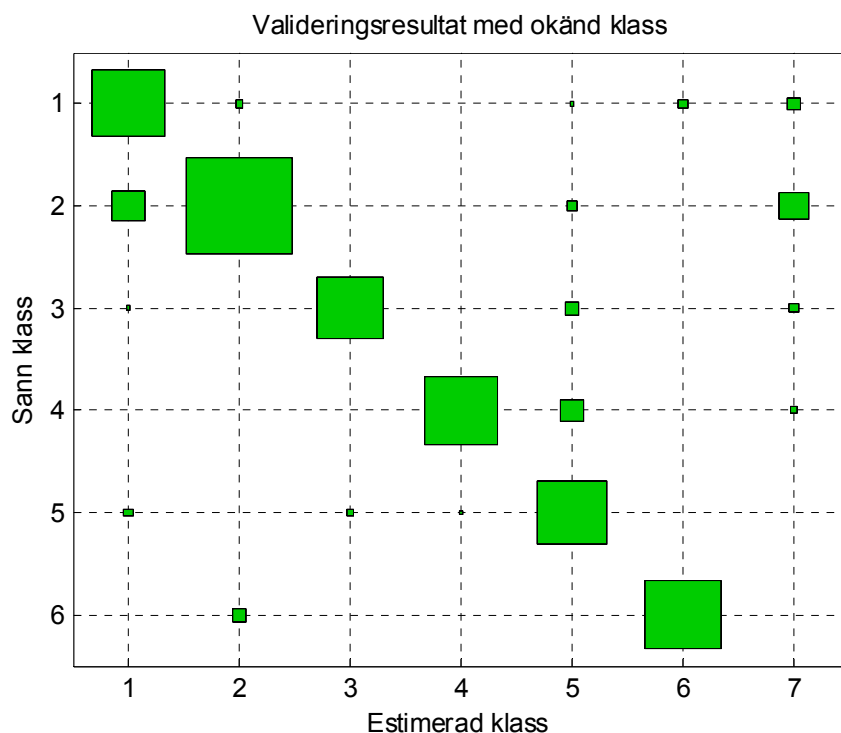
Figur 23. FFT-koefficienter för två körningar med BTR70, separerade med 0.5 s (blå, grön kurva).



Figur 24. Fördelning av två PC-komponenter för var och en av sex möjliga målklasser, baserat på tidssignaler från olika kombinationer av sensornoder, tidsfönster och körningar.



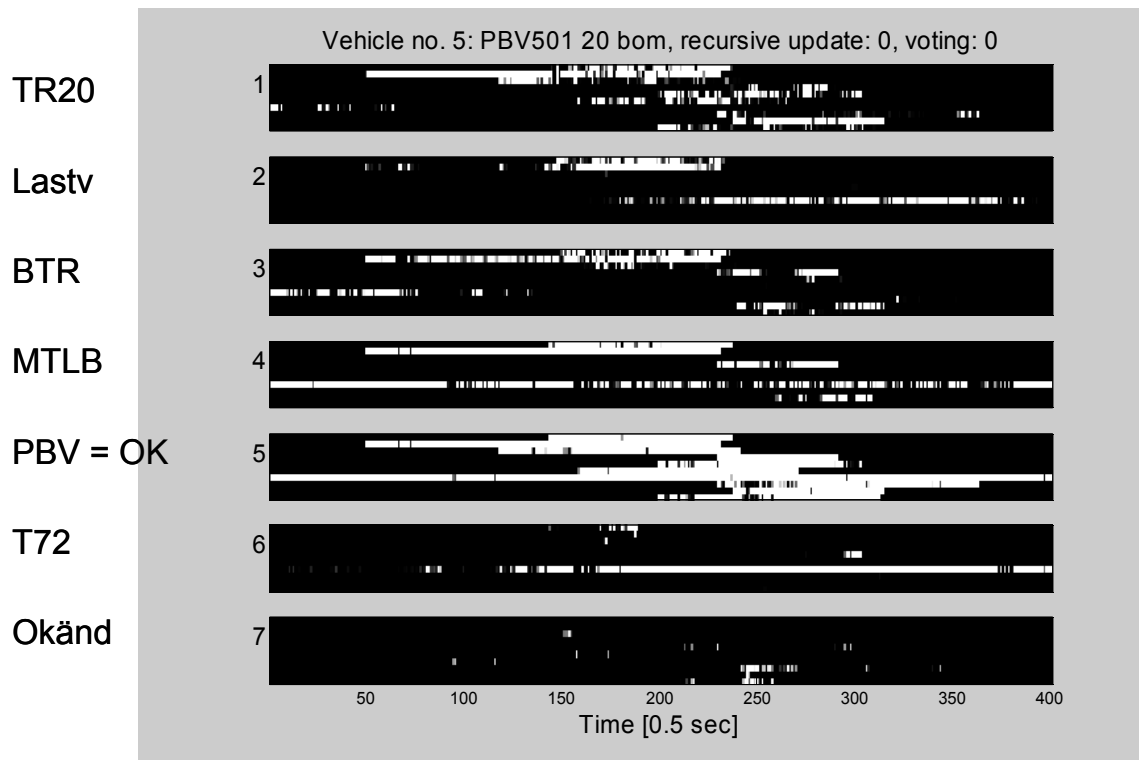
Figur 25. Klassificeringsprestanda i procent som funktion av antalet PC-komponenter efter dimensionsreduktion av FFT-koefficienter.



Figur 26. Valideringsresultat innefattande okänd klass. Sann klass i rad 1-6 och predikterad klass i kolumn 1-7 (7 = okänd). Rutornas storlek är proportionell mot antalet sammanträffande fall av sann klass mot estimerad klass. En 100 % korrekt klassificering ligger helt på diagonalen.

Resultat och slutsatser kring sensorernas prestanda och egenskaper.

Figur 27 visar ett exempel på klassificering gjord på data från alla 10 sensornoder, alltså även geofoner med sämre klassningsförmåga. De 7 delbilderna visar estimerade sannolikheter (ljusare toner = större värde) som funktion av tid för 6 kända klasser samt en "okänd klass" (delbild 7). Varje rad i en delbild representerar resultatet från en av mikrofonnoderna (nr 3, 5, 6, 8, 10) respektive geofonnoderna (nr 1, 2, 4, 7, 9). Man ser ett övervägande inslag från den sanna klassen (PBV, delbild 5), med spridda inslag från andra klasser vid olika tidpunkter. Stödet för okänd klass är svagt, åtminstone vid den givna statistiska gränsen. Notera att klassificering bara räknas för sensorsignaler överstigande en given energinivå, här 1 % av den maximalt observerade, jämför bilderna i Figur 20.

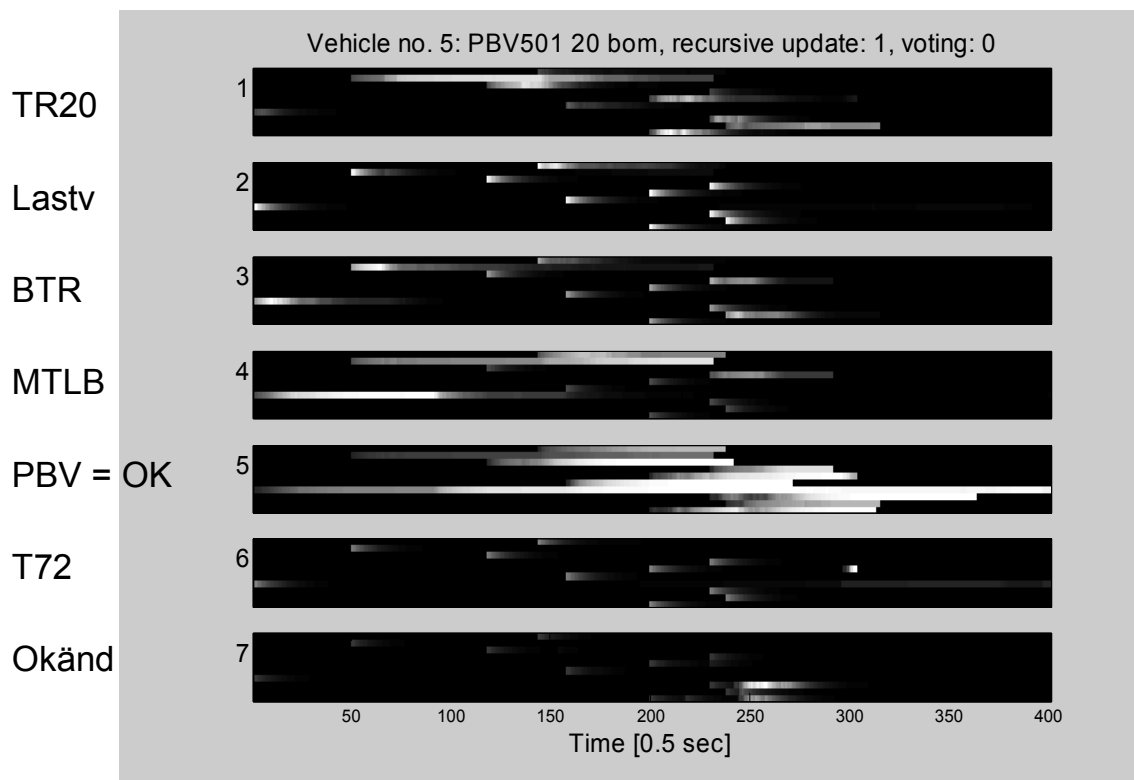


Figur 27. Klassificering av mål i 7 delbilder, omfattande 6 kända + en ”okänd” klass. Sann klass: PBV (delbild 5). Sannolikheten för varje klass estimeras från 10 olika noder (1: geo, 2: geo, 3: mic, 4: geo, 5: mic, 6: mic, 7: geo, 8: mic, 9: geo, 10: mic) i varsin smala rad som en funktion av tiden. Ljusare toner anger högre estimerad sannolikhet för antagen klass, räknat på sensorsignaler överstigande given energinivå före och efter passage.

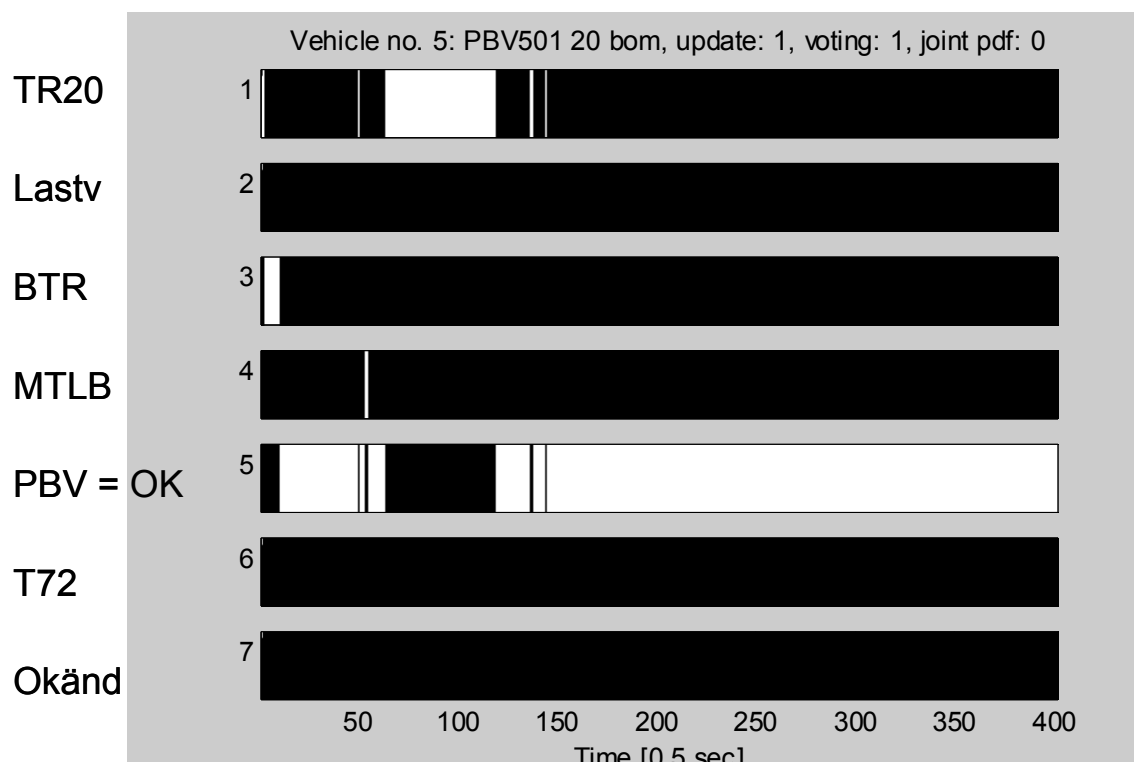
Figur 28 visar resultatet från temporal filtrering baserat på klassningar från enskilda sensorer enligt Figur 27. Man ser en, jämfört med Figur 27, betydligt mjukare övergång av estimerad sannolikhet, från en svag ton före passagen till ett maximum efter passagen (olika tider för olika noder), för den *sanna* klassen PBV. Denna utveckling avslutas ganska tvärt när ljudsignalen understiger den föreskrivna tröskeln. Detta kan jämföras med klassestimaten gång med tiden för de *falska* klasserna. Här startar estimaten ofta ganska tvärt med relativt högt värde för att dö bort gradvis. Detta är karakteristiskt för en yttre, snabbt påkommen störning som successivt dämpas av det temporala filtret. På det hela taget medför filtreringen en säkrare och tydligare klassificering. Dessutom blir utsignalen efter filtrering mer lättolkad och lättare att observera. Nackdelen med filtreringen är att en tidsfördröjning introduceras i storleksordningen 10 sekunder beroende på samplingshastigheten och fördröjningsfaktorn. Figur 29 visar resultatet av datafusion i nätverket med voting. En gemensam huvudkandidat väljs genom att räkna samman antalet lokala ”vinnare” vid de 10 sensornoderna. I detta fall har mikrofoner och geofoner viktats lika trots förhandskunskap om geofonernas sämre klassificeringsprestanda. Med undantag för tidsintervallen 3-10 och 70-120, där respektive falska mål BTR och TR20 vinner, ges för övriga tider majoriteten av rösterna på det sanna målet PBV. Röstningen blir givetvis mer robust med fler medverkande sensornoder.

Slutsatser

Efter gjorda tester syns det klart att fusion mellan noder ökar klassificeringsprestanda givet att man tar hänsyn till osäkerheten i data. Av de två prövade fusionsmetoderna tycks voting vara mest robust mot enskilda fel i sensordata. En temporal filtrering jämnar ut enskilda klassificeringar fördelaktigt för senare fusionssteg. Ytterligare förbättring av klassificering borde kunna nås genom lämplig viktning av enskilda sensorbeslut.



Figur 28. Temporal filtrering. Sann klass PBV. Övriga beteckningar, se Figur 27.



Figur 29. Röstning på mest troliga klass, baserad på Figur 28, där "vinnaren-tar-allt". Sann klass PBV.

6.1.5 Målföljning

Typ av indata

Uppgiften är att följa ett fordon som går på en väg i kuperad skogsterräng. På olika avstånd från vägen ligger akustiska och seismiska sensorer med kända positioner. Allteftersom fordonet rör sig fram på vägen alstras ljud och markvibrationer från fordonet och dess markkontakt som fortplantar sig till sensorerna. Genom att analysera tidsskillnaden mellan ljudvågor mot varje grupp av 3 sensorer i en nod fås en *bäring* mot målet (se sektion 6.1.3). Avståndsuppskattningen är mycket osäker vilket betyder att observationerna från varje sensornod kännetecknas av ett mycket utdraget osäkerhetsområde med liten utsträckning i sida (bäringsled) och stor utsträckning i avstånd (upp till ett uppskattat längsta detektionsavstånd), se Figur 30. Märk dessutom att det inte tas för givet att fordonet verkligen följer vägen vilket lämnar en extra frihetsgrad öppen i spårföljningen.



Figur 30. Bäring från en sensor med osäkerhetsområde.

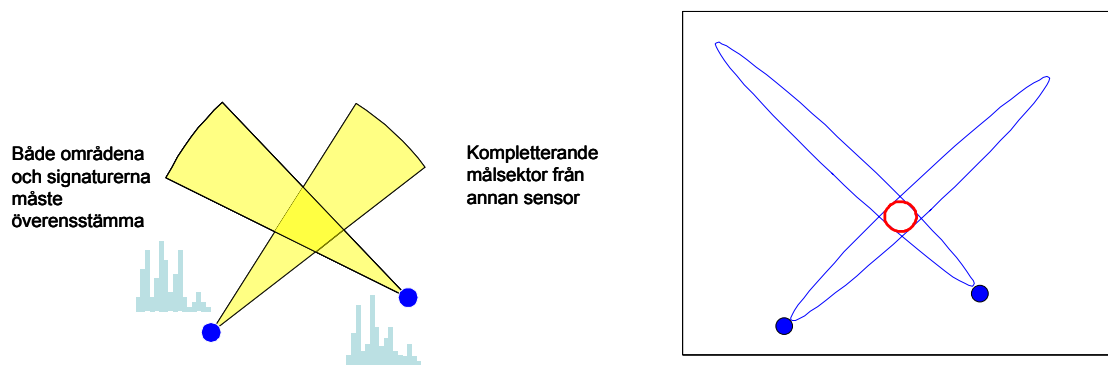
Kalmanfilter

I ett s.k. Kalmanfilter kombineras målbärningar från olika sensorer till i allmänhet ett bättre estimat på målets läge. Figur 31 visar ett sådant fall där det i vänster bild dessutom poängteras att båda sensorerna måste se samma mål, bl.a. med hjälp av jämförbara signaturer från en klassificering. Beräkningsmässigt visar det sig smartare att innesluta osäkerhetsområden i ellipser, väl medvetande att man här underskattar osäkerheten på långa avstånd. Figur 31, höger bild, visar exempel på en sådan osäkerhetshantering där man också ser resultatet av ett sammanvägt osäkerhetsområde, markerat av en mycket mindre ellips. En finess med Kalmanfiltret är att varje ny bäring uppdaterar position och dess osäkerhet från senast tidigare rörelsetillstånd. Detta betyder bl.a. att bärningar inte behöver komma samtidigt från olika sensorer, ej heller behöver hänsyn tas till tidigare observationer - endast det senaste tillståndet sparas. I synnerhet i början och slutet av en målpassage agerar en sensor en viss tid helt ensam. Eftersom filtret dessutom uppskattar målets hastighet kan spåret i brist på bärningar extrapoleras en kortare stund i väntan på en ny bäring.

Spårstart och spårslut - olika problem

I början av passagen detekteras målet på en viss signalnivå och följs av en "första" sensor (se t.ex. Figur 20, bild 2, röd-grön kurva med start vid ca 100 s). Den allra första positionen sätts nominellt till halva maximala detektionsavståndet i bäringsled. Allteftersom målet flyttar sig lämnar sensorn ifrån sig nya bärningar. Hur skall dessa bärningar kombineras för att ge en god bild av händelseförloppet? Ett alternativ är att följa målet i bäring på en fix cirkelbåge med centrum i sensornoden tills bärningar fås från en *annan* sensor. Ett andra alternativ är att direkt börja uppdatera den estimerade målpositionen med bärningar från samma sensor där även avståndet modifieras. Eftersom bärningarna hela tiden korsas i en och samma sensor kommer

avståndsestimatet att krypa allt närmare sensorn själv. Avståndet krymper inte på en gång eftersom den nya positionen egentligen bestäms av mittpunkten på två sammanvägda utdragna osäkerhetsområden, ett från tidigare positionsestimat och ett från en ny bäring. De båda alternativa metoderna kommer snart att överskatta respektive underskatta det verkliga avståndet. Först med radikalt ny information från en *oberoende* sensor fås en acceptabel positionsuppdatering, varefter spåret eventuellt styrs in mot en bättre kurs. I slutet av passagen når ljudsignalerna bara en "sista" sensor. Denna situation liknar alternativmetod två igen, fast med den stora skillnaden att spåret redan ligger relativt rätt, baserat på tidigare mätningar från oberoende sensorer. Spåret degraderas alltmer, för att på slutet bara gå "i tangentens riktning" utan något stöd från verkliga bäringar.



Figur 31. Bäringar från två sensorer med korsande osäkerhetsområden. *Vänster bild:* Osäkerhetsområden i form av skärande cirkelsektorer. *Höger bild:* Osäkerhetsområden i form av utdragna ellipser med en mycket mindre sammanvägd elliptisk area i mitten.

Skulle flera mål finnas samtidigt inom sensornätets räckvidd måste hänsyn tas till att samma mål associeras av aktuella sensorer. Associationsproblemet kan då till stor del avhjälpas genom extrainformation om måltyp från en klassificerare.

Resultat

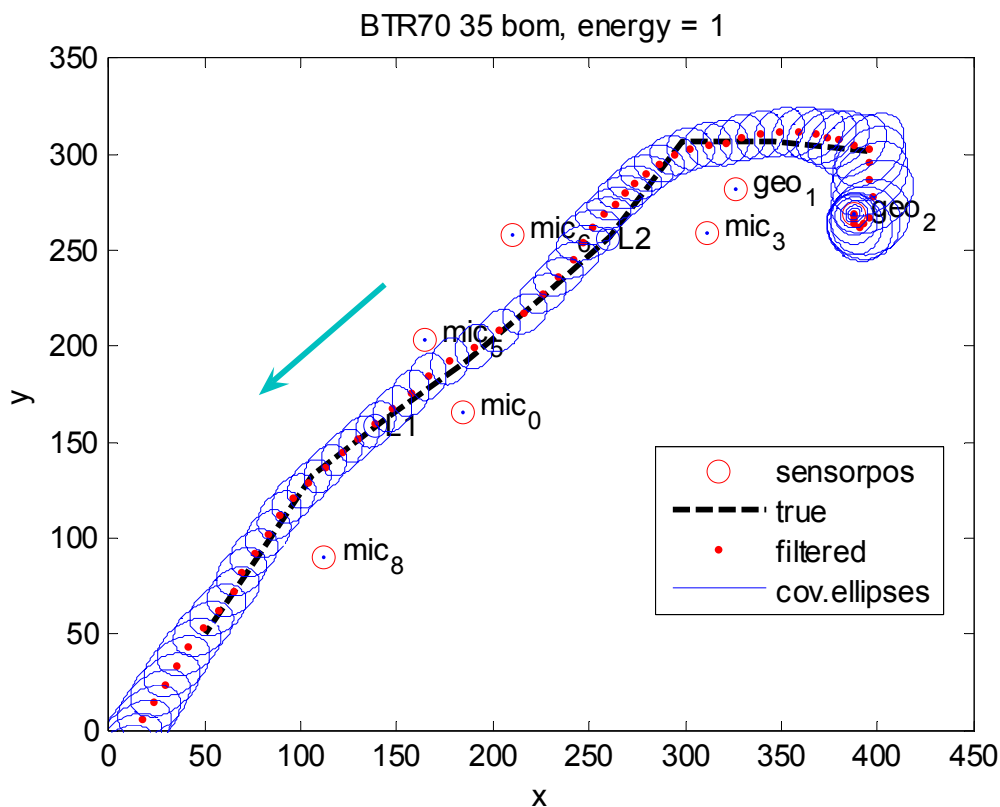
Exempel på en spårföljning med Kalmanfiltret visas i Figur 32. En BTR70 kör i jämn fart 35 km/h in i bilden uppifrån höger. Geofonnoden nr 2 upptäcker fordonet, beräknar bäringar och lämnar dessa till en "agent" som administrerar spårföljning och klassificering. Initialt dras spårsestimatet in mot den ensamt hörande sensorn. Efterhand bidrar noderna geo1 och mic3 med nya bäringar som snabbt uppdaterar positionen till att hamna nästan på vägen (svart streckad linje). Osäkerhetsområdena, begränsade av ellipser, krymper samtidigt till en mindre yta utan att helt lämna vägen. Ca 50 sekunder senare lämnar fordonet vägmarkeringen vid koordinaterna (50,50). På slutet av sträckan bidrar endast en sensor till spåret, och om inte spårningen avbryts då även denna sensor tappar kontakten med fordonet kommer spåret att gå på ren extrapolering nära vägen tack vare att vägen här inte böjer av i annan riktning. Detta bör dock undvikas i verkliga situationer.

Spårföljning har gjorts på alla löpor, innefattande sex fordon körande med olika hastighet i båda vägriktningarna. Bäringar har beräknats på två olika minsta signalnivåer, 1 % resp. 5 % av den maximala signalenergin. Kalmanfiltret har körts med olika parametervärden som kontrollerar rörelsedynamik och acceptans av bäringar. Exemplet med BTR70 i Figur 32 hör till det bättre av alla provade. Det förekommer också några avvikande fall där spårföljningen "spårar ur", oftast kort efter starten. Orsaken till detta ligger normalt i att den första sensorn (i

detektionskedjan) alltför länge ensamt matat Kalmanfiltret med helt felaktiga bäringar p.g.a. att signalkanalerna från källa till sensor varierar i kvalitet. I synnerhet kan man ana att den kuperade terrängen upp till höger i Figur 4 bjuder på besvärliga vågutbredningsförhållanden i övergången till och från det angränsande flacka fältet österut. Av liknande skäl kan man även förstå degraderad verkan hos andra sensorer, där främst geofonnod nod7 (nere till vänster i Figur 4) har en konstaterad låg känslighet, antagligen p.g.a. dålig koppling mellan olika geologiska skikt. Ett utförligare resonemang om de olika sensorernas kvaliteter ges i sektion 6.1.3.

Slutsatser

Ur gjorda experiment framgår att köra fordon kan följas väl med hänsyn taget till kända svårigheter m.a.p. terräng och sensor-känslighet. Goda prestanda vid klassificering ökar väsentligen möjligheten att signalmässigt upplösa och associera flera fordon om detta läge skulle uppstå. Dessa frågor inklusive kravet på robusthet är planerade att testas vid framtida prov.



Figur 32. Estimerat målsår från BTR70 med tillhörande osäkerhetsellipser. Bäringar tas med en sekunds mellanrum av fem samverkande mikrofonnoder (mic) och två geofonnoder (geo). Två lasertriggers, L1 och L2, registrerar passagetider. x- och y-axlarna anges i meter med origo nära vägens fortsättning.

7 Fortsatt forskning

Det finns fortfarande många obesvarade frågor inom detta område, och nedan finns förslag på fortsatt verksamhet:

- FMV har genom Lars Stålberg startat ett projekt som avser att bygga ett marksensornät som fungerar i realtid i fält. Mycket av resultaten från detta projekt kommer då att återanvändas med eller utan vissa förbättringar.
- Nu finns ett helt demosystem framtaget där flera olika systemkomponenter samverkar. Det är därför möjligt att testa hur de olika komponenterna påverkar varandra, t.ex. hur förändrad datafusion påverkas av valet av informationssystem. Sådan växelverkan vore intressant att studera vidare.
- Ur rådata går det visuellt att se att det finns mycket information som vi ännu inte lyckats extrahera på ett robust sätt. Bättre signalbehandlingsmetoder för att maximera extraerad informationsmängd skulle kunna vara ett spår att följa upp.
- I detta projekt har endast ett fordon i taget körts i nätet. Det vore intressant att studera vilka effekter som uppstår då flera fordon rör sig samtidigt i nätet.
- De mätningar som är gjorda kommer från ett nät med 10 sensornoder. Vissa problem går inte att studera fullt ut i ett sådant litet nät, och det vore därför lämpligt att simulera större nät.
- Arbetet har hittills skett utan att användare ur Försvarmakten har kunnat prova systemet. Ett sätt att få dem att prova användandet av marksensornät vore att implementera demonstratorn i IS-MARK så att de under en realistisk övning kunde se vilka mervärden ett marksensornät kan ge.
- Under projektet har vi utgått från att det finns en möjlighet att kommunicera trådlöst mellan sensorerna. Det är dock inte väl utrett hur vågutbredning sker så pass nära markytan som sensorerna är tänkta att placeras. Detta borde undersökas ytterligare.
- I projektet har endast två olika sensortyper använts, vilket har gjort att vissa förenklingar i signalbehandlingen har kunnat göras. Det vore därför värdefullt att börja studera hur nya sensortyper ska kunna integreras på ett generellt sätt.
- Det scenario som gällt under detta projekt gäller övervakning av vägsträcka i skog. Andra scenarion, t.ex. strid i bebyggelse, skulle ge andra förutsättningar. En begränsad studie av vilken påverkan detta skulle ha på ett marksensornät kommer att ske under 2005.

8 Referenser

- ¹ J. Jenvald, M. Morin, A. Worm och G. Örnberg, *MIND - ett instrument för värdering, utveckling och utbildning av krigsförband*, FOA-R--96-00351-3.8--SE, 1996.
- ² S. Ahlberg, M. Elmqvist, Å. Persson och U. Söderman, *Metoder för framställning av högupplösta syntetiska omgivningar /omvärldsmodeller för sensorsimulering*, FOI-R--1110--SE, 2003.
- ³ H. Habberstad, *Fältförsök med akustiska och seismiska givare i nätverk*, FOI-R--1087--SE, 2003.
- ⁴ R.K. Lennartsson, *Redovisning av resultat från signalbehandling från fältmätningar gjorda under 2002*, FOI-03-1461, 2003.
- ⁵ T. Eklöv, A. Lauberts och R.K. Lennartsson, *Redovisning av signalbehandlingsmetoder för nätverk av marksensorer*, FOI-R--1284--SE, 2004.
- ⁶ M. Holmberg, E. Jungert, M. Brännström, L. Farman och C. Grönwall, *Statusrapport för projektet interaktiva adaptiva marksensornät*, FOI-02-1756, 2002.
- ⁷ R.K. Lennartsson och M. Brännström, *Signalbehandlingsprinciper i interaktiva adaptiva marksensornät*, FOI-02-2390, 2002.
- ⁸ M. Brännström (red.), M. Holmberg, E. Jungert, H. Habberstad, R.K. Lennartsson, L. Farman och U. Sterner, *IAM: Definition av demonstrationssystemet*, FOI-02-3207, 2002.
- ⁹ U. Sterner och L. Farman, *Modellering av kommunikation i marksensornät*, FOI-03-751, 2003.
- ¹⁰ M. Holmberg och H. Habberstad, *Memo med förslag till demonstrator marksensornät 2004*, FOI-03-2217, 2003.
- ¹¹ H. Habberstad och F. Kullander, *Fältförsök med akustiska och seismiska givare för fordonsdetektion*, FOI-R--0703--SE, 2002.
- ¹² M. Brännström, *An Agent Architecture for an Unattended Ground Sensor Network*, FOI-R--0500--SE, 2002.
- ¹³ M. Brännström and E. Jungert, *A Scalable Agent Architecture for a Dynamic Sensor Network*, Proceedings of 1st International Workshop on the Foundations of Coordination Languages and Software Architectures, Brno, Czech Republic, August 24 2002.
- ¹⁴ M. Brännström, R.K. Lennartsson, A. Lauberts, H. Habberstad, E. Jungert, and M. Holmberg, *Distributed Data Fusion in a Ground Sensor Network*, Proceedings of The 7th International Conference on Information Fusion, Stockholm, Sweden, June 28 – July 1, 2004.
- ¹⁵ L. Farman och U. Sterner, *En generell trafikmodell för datafusion i trådlösa marksensornät*, FOI-R--1470--SE, 2004.