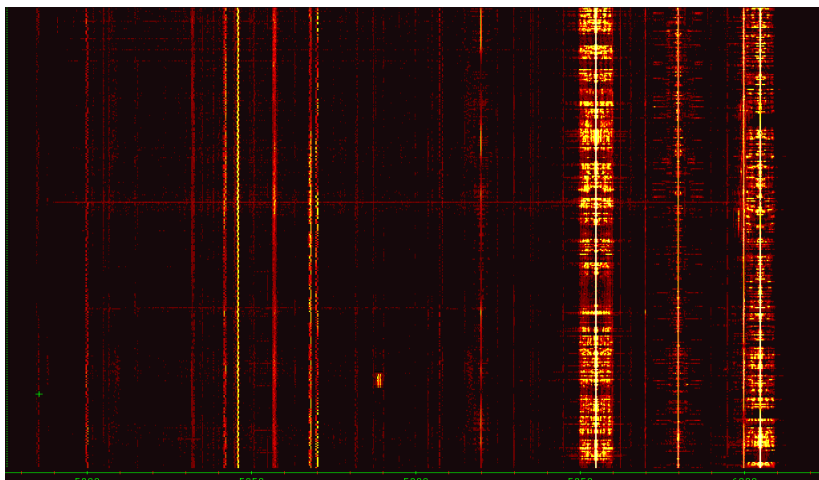


## **DMT - LPI**

### Digital Mottagarteknik



## Slutrapport för projektet Digital Mottagarteknik

Rolf Gustavsson, Peter Nagy, Johan Falk



TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

Ledningssystemteknik

Box 1165

581 11 Linköping

FOI-R--0328--SE

December 2001

ISSN 1650-1942

**Användarrapport**

# Slutrapport för projektet Digital Mottagarteknik

Rolf Gustavsson, Peter Nagy, Johan Falk

<b>Utgivare</b> Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Ledningssystemteknik Box 1165 581 11 Linköping	<b>Rapportnummer, ISRN</b> FOI-R--0328--SE	<b>Klassificering</b> Användarrapport	
	<b>Forskningsområde</b> 6. Telekrig		
	<b>Månad, år</b> December 2001	<b>Projektnummer</b> E 7018	
	<b>Verksamhetsgren</b> 5. Uppdragsfinansierad verksamhet		
	<b>Delområde</b> 61 Telekrigföring med EM-vapen och skydd		
	<b>Författare/redaktör</b> Rolf Gustavsson Peter Nagy Johan Falk	<b>Projektledare</b> Rolf Gustavsson	
<b>Godkänd av</b> Lennart Nyström			
<b>Uppdragsgivare/kundbeteckning</b> Försvarsmakten			
<b>Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig</b> Rolf Gustavsson			
<b>Rapportens titel</b> Slutrapport för projektet Digital Mottagarteknik			
<b>Sammanfattning (högst 200 ord)</b> Projektet digital mottagarteknik har sedan 1989 bidragit till en ökad kunskap inom försvarsmakten om signalspaning och pejling på kortvågsbandet. Med hjälp av de system som man under åren har byggt upp inom projektet (Konrad, DMT-systemet, KOPEK och SESAM) har man under ett stort antal fältprov och demonstrationer kunnat visa de bredbandiga digitala signalspaningssystemens förmåga till upptäckt, analys och lägesbestämning (även efter sändningens slut) av signaler som tidigare ansågs som svårhanterliga.  Under de senaste åren har ett arbete bedrivits med upptäckt- och lägesbestämning med TDOA-teknik av såväl bandspridda som smalbandiga kommunikationssignaler. Detta kan få stor betydelse då ett sådant system kan göras litet och lätt vilket ger förutsättningar för att kunna verka från ex vis små UAVer.			
<b>Nyckelord</b> Signalspaning, kortvåg, modulationsklassificering, upptäckt, pejling, DSSS, bandspridda signaler, bredbandiga SIS-system, KOS, DMT, digital mottagarteknik			
<b>Övriga bibliografiska uppgifter</b>	<b>Språk</b> Svenska		
<b>ISSN</b> 1650-1942	<b>Antal sidor:</b> 28 s.		
<b>Distribution enligt missiv</b>	<b>Pris: Enligt prislista</b>  <b>Sekretess</b>		

<b>Issuing organization</b> FOI – Swedish Defence Research Agency Command and Control Warfare Technology P.O. Box 1165 SE-581 11 Linköping	<b>Report number, ISRN</b> FOI-R--0328--SE	<b>Report type</b> User report
	<b>Research area code</b> 6. Electronic Warfare	
	<b>Month year</b> December 2001	<b>Project no.</b> E 7018
	<b>Customers code</b> 5. Contracted Research	
	<b>Sub area code</b> 61 Electronic Warfare including Electromagnetic Weapons and Protection	
<b>Author/s (editor/s)</b> Rolf Gustavsson Peter Nagy Johan Falk	<b>Project manager</b> Rolf Gustavsson	
	<b>Approved by</b> Lennart Nyström	
	<b>Sponsoring agency</b> The Swedish Armed Forces	
	<b>Scientifically and technically responsible</b> Rolf Gustavsson	
<b>Report title (In translation)</b> Final Report for the Digital ESM Systems Project		
<b>Abstract (not more than 200 words)</b> <p>Since 1989 the Digital ESM Systems project has contributed to a higher level of understanding for ESM-techniques and direction finding in the HF-band. The capabilities of wideband digital ESM-systems to detect, analyse and locate transmissions that has formerly been considered difficult to cope with have been demonstrated both in a laboratory environment and in numerous field trials using the systems developed in the project.</p> <p>During the last couple of years work has been done in the area of detection and direction finding of both spread spectrum- and narrowband communications signals using TDOA (time difference of arrival) techniques. The technique can be used in a small and light system which has the potential of fitting in a UAV-concept which may prove to be an important future application.</p>		
<b>Keywords</b> Electronic Support, ES, Wideband ESM-systems, DSSS, Spread Spectrum signals, Detection, Direction Finding, HF		
<b>Further bibliographic information</b>	<b>Language</b> Swedish	
<b>ISSN</b> 1650-1942	<b>Pages</b> 28 p.	
	<b>Price acc. to pricelist</b> <b>Security classification</b>	



## Innehållsförteckning

Innehållsförteckning.....	5
1 Bakgrund .....	7
2 Syfte.....	7
3 Intressenter.....	7
4 Demonstratorer och system.....	8
4.1 DMT-systemet .....	8
4.1.1 Bredbandig övervakningsdisplay .....	9
4.1.2 Digitalt lyssningsminne .....	10
4.2 KOPEK .....	11
4.3 SESAM .....	12
5 Signalbehandling .....	13
5.1 Rikttnings- och lägesbestämning.....	13
5.1.1 Pejling med Watson-Wattmetoden.....	13
5.1.2 Pejling med MUSIC-metoden .....	15
5.1.3 Rikttningsbestämning genom TDOA-estimering .....	17
5.2 Automatisk signalanalys.....	19
5.2.1 Automatisk detektion av korta sändningar.....	19
5.2.2 Automatisk modulationsanalys .....	20
5.3 Upptäckt och rikttningsbestämning av direktsekvensspridda signaler.....	21
5.3.1 Kvadrerande mottagare.....	21
5.3.2 Korrelerande mottagare .....	22
5.4 Kalibrering.....	22
6 Kunskapsöverföring .....	24
7 Resultat .....	24

## Bilageförteckning

A. Fältprov och försök .....	25
B. Rapporter och artiklar.....	26





## 1 Bakgrund

Projektet digital mottagarteknik (DMT) tog form på FOA under slutet av 1980-talet. Man såg att utvecklingen av snabba kretsar för digitalisering började uppnå prestanda som gjorde tekniken intressant för bredbandig digitalisering av radiosignaler. Eftersom det ännu inte var möjligt att digitalisera mer än 1-2 MHz med tillräcklig prestanda beslöt man sig för att ett signalspaningssystem för kortvågsbandet skulle vara en lämplig försöksplattform för att utvärdera tekniken. I kortvågsbandet (2-30 MHz) räcker den bandbredden för att få in hundratals samtidiga signaler, tanken var att se om ett bredbandigt signalspaningssystem med digital teknik kunde hjälpa en signalspaningsoperatör att effektivt övervaka alla dessa.

Projektet tog ordentlig fart i och med genomförandet av ett examensarbete som inriktade sig mot konstruktion av bredbandiga digitala mottagare för kortvågsbandet. Examensarbetet utfördes av Fredrik Oscarsson som senare blev projektledare för projektet. Den mottagare som konstruerades blev grunden för det enkanaliga DMT-systemet. DMT-systemet blev en bra plattform för att implementera metoder för t ex automatisk signalupptäckt och automatisk modulationsklassificering.

FRA som tidigt blev intresserade av den bredbandiga digitala tekniken lade 1993 ett uppdrag till FOA att med utveckla ett pejlsystem med samma bandbredd som DMT-systemet och 1996 levererades pejlsystemet KOPEK till beställaren. Dessförinnan hade man dock i projektet kunnat använda systemet med full funktionalitet i drygt ett halvår.

1997 gick projektet in i en ny fas och inriktades mot bl a högupplösande pejlmetoder och SIS-metoder mot så kallade smygsignaler. Projektets nya namn blev DMT-LPI (LPI - Low probability of Intercept = smygradio). I DMT-LPI har en ny bredbandig digital forskningsplattform för kortvågs-SIS byggts upp. Systemet heter SESAM och har 8 parallella bredbandiga kanaler. Med SESAM systemet fick man möjligheten att studera s k högupplösande pejlmetoder. Genom att dela upp mottagarkanalerna i två delsystem får man två SESAM-system som kan användas för lägesbestämning med krysspejling vid försvarsmaktens övningar.

## 2 Syfte

Syftet med projektet var att utvärdera den bredbandiga digitala teknikens möjligheter för effektiv signalspaning i kortvågsbandet och att samtidigt bygga upp kunskap kring automatiska metoder för detektion och lägesbestämning av s k smygradio-signaler.

## 3 Intressenter

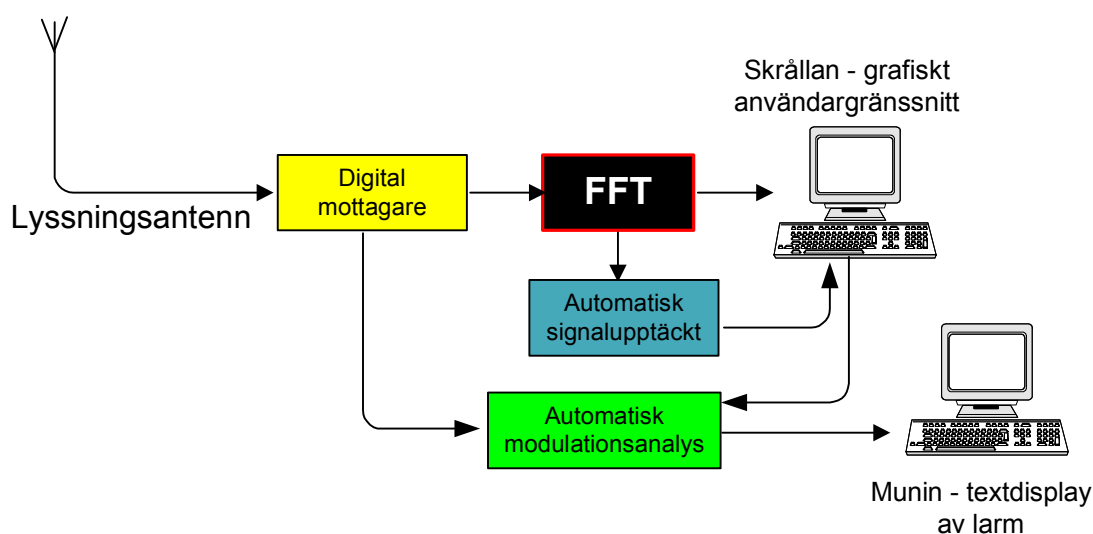
Arbetet i projektet har bedrivits i nära samarbete med Marinens telekrigsenhet (MTC TK – numera MTK TK) och användargruppen televapen kortvåg, med deltagare ur bl a ATK, S1, K3, K4, och marinen. En stor del av fältprovsverksamheten har kunnat genomföras tack vare uppdrag från FMV. Under projektets första del var intresset från FRA mycket stort. En kopia av DMT-systemet har varit i operativ drift hos FRA sedan 1993 och samma år beställdes pejlsystemet KOPEK. Kontakterna har upprätthållits bl a genom att personal från FRA hela tiden deltagit i projektet.

## 4 Demonstratorer och system

Under projektets gång har 3 bredbandiga signalspaningssystem byggts upp: DMT-systemet, KOPEK och SESAM.

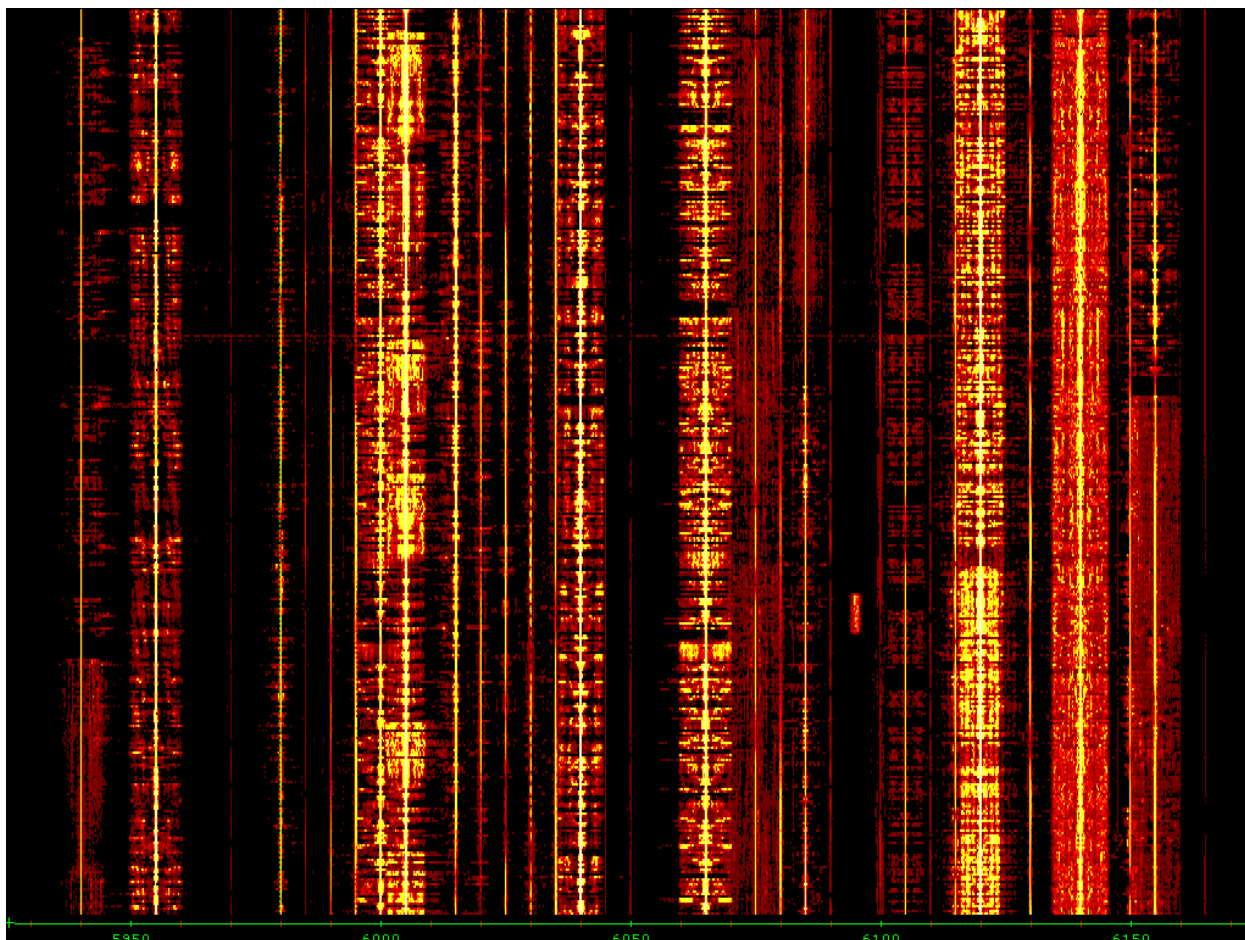
### 4.1 DMT-systemet

DMT-systemet utvecklades från början kring en på FOA egenutvecklad bredbandig digital mottagare - Konrad. Då en kommersiell mottagare med bättre dynamik köptes in från Steinbrecher corporation i USA blev den FOA-utvecklade mottagaren över. En kopia av DMT byggdes upp runt denna och har sedan dess varit på operativ drift hos FRA under namnet KONRAD (vilket ursprungligen var namnet på FOA-mottagaren).



*Figur 1 Systemskiss över DMT-systemet. FFT – Fast Fourier Transform beräknar signalens frekvensinnehåll och skickar vidare ett frekvensspektrum som färgkodas med avseende på signalstyrkan. Det grafiska användargränssnittet bygger upp en vattenfallsdisplay av dessa spektrum.*

Operatörsgränssnittet i DMT-systemet, Skrållan, är uppbyggd som en vattenfallsdisplay där nya färgkodade frekvensspektrum läggs till i nederkanten av bilden medan den äldre informationen scrollas uppåt. I bilden framträder allt starkare radiosignaler som allt ljusare färger. Frekvens visas längs x-axeln och tiden löper längs y-axeln. Med hjälp av mus-markören kan operatören styra ut en smalbandig lyssningsmottagare på den aktuella frekvensen.

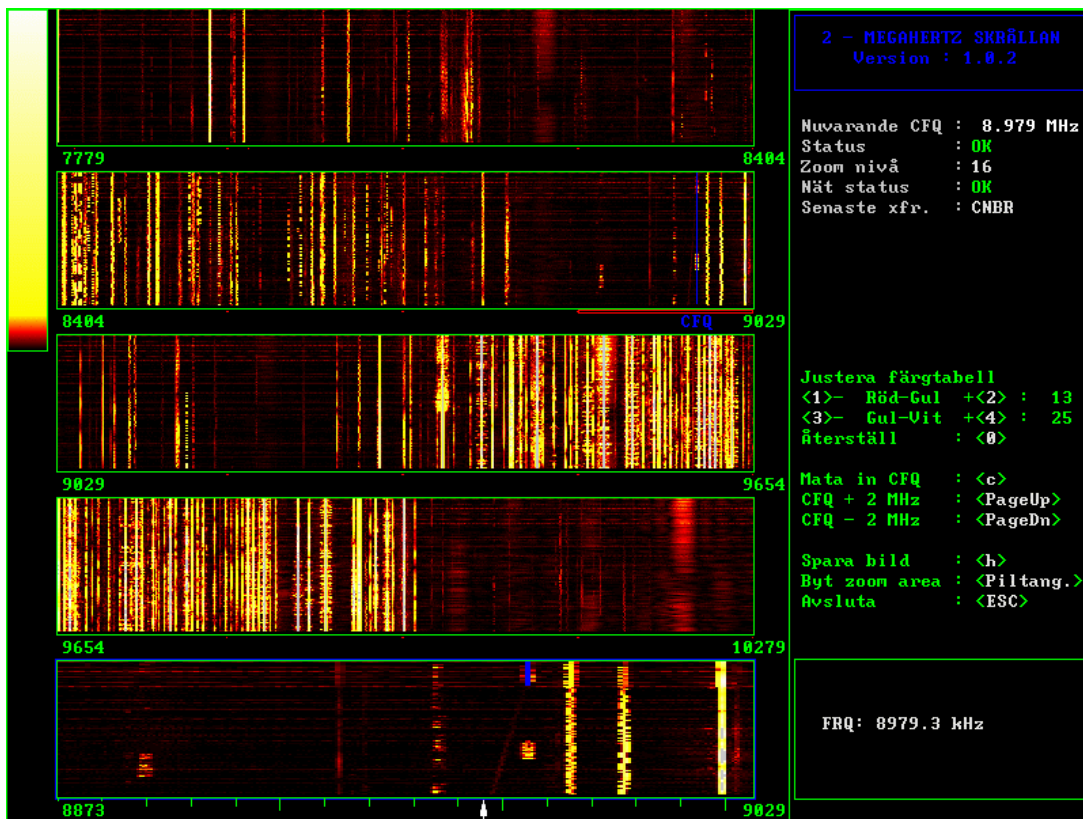


Figur 2 Det grafiska operatörsgränssnittet i DMT-systemet – Skrållan.

En automatisk metod för upptäckt av möjliga korttidssändningar och en metod för klassificering av enkla digitala modulationsformer implementerades i DMT. Systemet kan kopplas ihop med KOPEK och ger då ett system som automatiskt kan upptäcka, modulationsbestämma och bäringsbestämma korta sändningar. Innan den bredbandiga digitala tekniken slog igenom ansågs sådana vara ytterst svåra att hantera för ett SIS-system.

#### 4.1.1 Bredbandig övervakningsdisplay

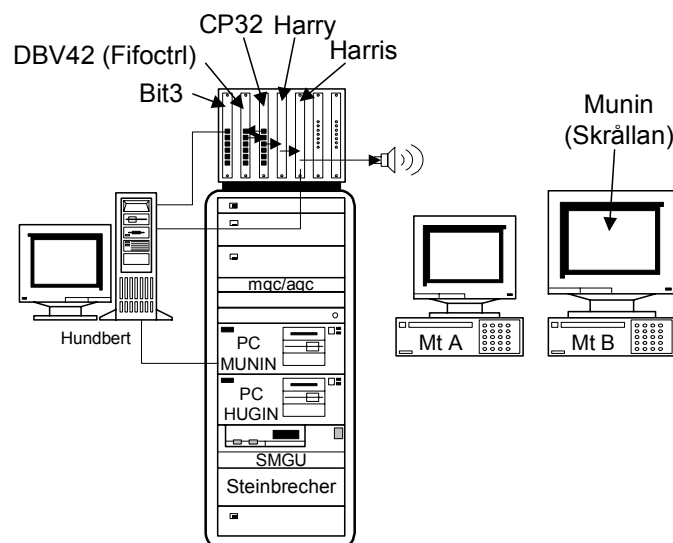
Genom ett tillägg till DMT-systemet gjorde man 1995 en modifiering som tillät frekvensövervakning över 2,5 MHz bandbredd. Den digitala dataströmmen tappades då av före decimeringskortet och skickades vidare till en separat DSP som beräknade frekvensspektrum med FFT-teknik. En separat övervakningsdator kunde därefter visa upp en vattenfallsdisplay över 2,5 MHz uppdelat i 4 delfönster. I ett femte delfönster förstörades en vald del av bandet upp.



Figur 3 Meg-skrällan användes för övervakning av 2,5 MHz momentan bandbredd. Informationen presenterades i fem delfönster där det nedersta delfönstret visade en inzoomad del av frekvensbandet.

Meg-skrällan som den nya övervakningsdisplayen kallades användes för upptäckt av marina sändningar i samband med en större marinövning på västkusten 1996.

#### 4.1.2 Digitalt lyssningsminne

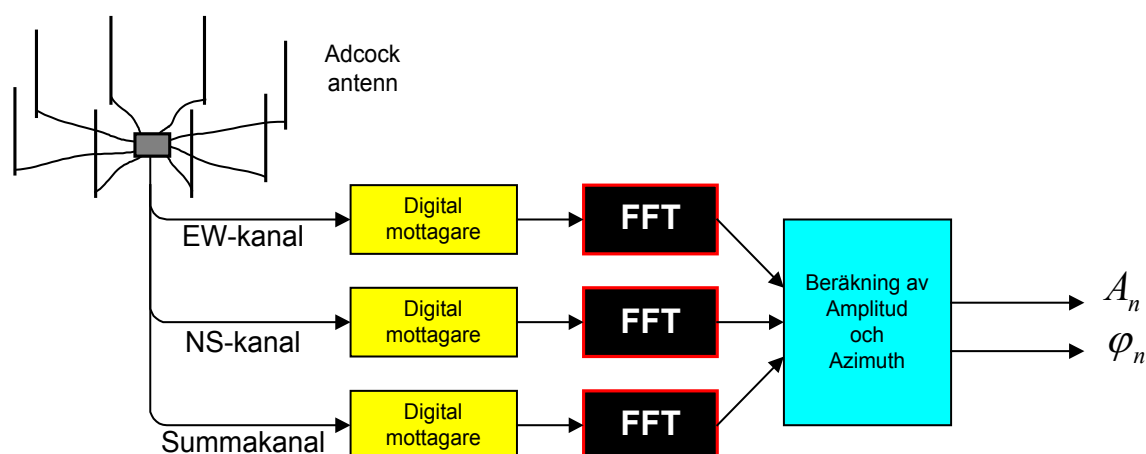


Figur 4 Skiss över DMT-systemet med delsystemet Ronix med ett bredbandigt digitalt lyssningsminne.

I ett examensarbete infördes ett lyssningsminne som täcker 250 kHz bandbredd med ett minnesdjup på ca 60 sekunders i DMT-systemet. Minnet fungerar som en digital inspelningsbuffert där de senaste 60 sekunders tidsdata ligger lagrade. Bredbandigt utdata från minnet matas ut med en valbar tidsfördröjning till en sk drop-mottagare (en dedicerad signal-behandlingskrets). Denna skär ut en smalbandig signal och matar vidare den till en D/A-omvandlare och en högtalare. När operatören väljer en signal på skärmen så sätts den valbara tidsfördröjningen för utmatningen av data och drop-mottagaren ställs in på den valda frekvensen. Med delsystemet som kallas Ronix kan operatören alltså lyssna på vilken som helst av signalerna på skärmen, även om signalen slutat sända innan operatören upptäcker den!

## 4.2 KOPEK

Ett 3-kanaligt pejlsystem färdigställdes under åren 1994-1996 och övergick därefter till FRA. Systemet som kom att kallas KOPEK arbetade enligt Watson-Wattmetoden. Systemet arbetar liksom DMT-systemet med en momentan bandbredd av 250 kHz. Även här görs en frekvensindelning i ett stort antal smalbandiga signaler med hjälp av FFT. I den efterföljande bäringsberäkningen kan sedan amplitud och infallsriktning utvinnas i varje smal kanal. Skärmbilden som operatören får upp är mycket lik vattenfallsdisplayen i DMT-systemet men istället för att indikera signalstyrka används färginformationen i stället för att visa vilken infallsriktning till antennen som signalen har i varje smal kanal. Detta sätt att presentera data användes senare även i SESAM-systemet.

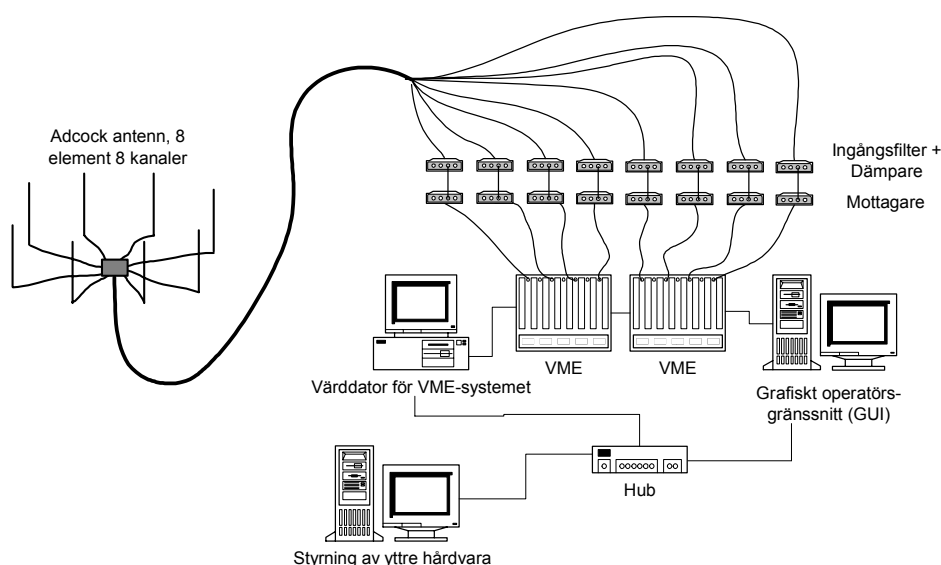


Figur 5 Blockschemat över KOPEK-systemet

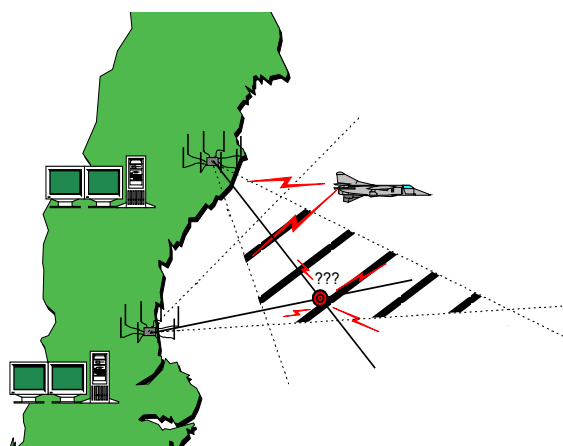
Indata till KOPEK utgörs av tre antennkanaler från en adcock-antenn med 8 antennelement. För att beräkna bäring utifrån de tre kanalerna används Watson-Wattmetoden som finns beskriven i avsnitt 6.1.1. Denna metod ger med den tillgängliga antennen upphov till systematiska fel som uppgår till i storleksordningen  $3-4^\circ$ . I KOPEK-systemet reducerades det systematiska felet till ungefär en tiondedel av detta med en metod framtagen av Johansson och Johansson [11]. En liknande korrektion görs i SESAM-systemet, se vidare kapitel 5.1.1.

### 4.3 SESAM

När KOPEK-systemet levererats till FRA beslöt man sig för att bygga upp ett nytt bredbandigt pejlsystem på FOA. Det nya systemet byggdes efter principen att så mycket som möjligt av funktionen skulle bestämmas i mjukvaran. Denna idé liknar till stor del den som ligger till grund för konceptet *software radio*, arbetsnamnet för det nya systemet blev därför SESAM som är en något haltande akronym för *Software ESM*. (ESM - Electronic Support Measures var den då rådande förkortning som närmast korresponderade mot svenskans SIS). Hårdvaran skulle vara lätt att konfigurera om efter de systembehov som man hade i det aktuella sammanhanget. Ett krav för hårdvarudesignen var att man vid ett och samma tillfälle skulle kunna hantera upp till 8 antennkanaler. Ett annat krav var att de tillgängliga kanalerna skulle kunna delas upp så att två delsystem med 3 eller 4-kanaliga pejlar skulle kunna användas för krysspejling.



Figur 6 Ett SESAM-system med 8 kanaler. Gruniden med systemlösningen är att så mycket signalbehandling som möjligt ska ske på den digitala sidan.



Figur 7 Ett delat SESAM-system kan användas som en krysspejlande enhet i samband med övningsverksamhet. Var och en av pejlarna innehåller då 4 mottagarkanaler, 3 av dessa används för pejling med Watson-Wattmetoden.

## 5 Signalbehandling

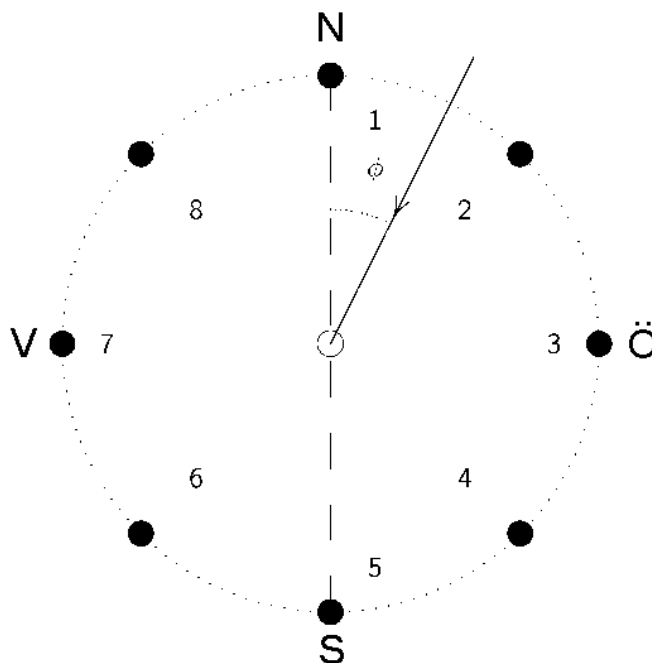
Det är nu ungefär ett decennium sedan de första bredbandiga digitala mottagarna kom som hade tillräckligt hög dynamik för att vara användbara på kortvågsbandet. Det är inte längre särskilt svårt att få tag i tillräckligt bra hårdvara för att bygga ett system med goda prestanda. Bekymret under de senaste fem åren har snarare varit vad man ska göra med allt data som kan utvinnas med ett sådant system. Det har blivit allt intressantare att mer eller mindre automatiskt kunna peka ut vilka signaler som kan vara av intresse för signalspaningsoperatören.

### 5.1 Riktungs- och lägesbestämning

#### 5.1.1 Pejling med Watson-Wattmetoden

Den pejlteknik som använts som standardmetod i SESAM är Watson-Wattmetoden. Att denna metod valdes beror dels på att vi från FRA i samband med uppbyggnaden av KOPEK fick låna en 8 elements adcockantenn med en sk goniometer som är gjord för Watson-Wattmetoden. Vidare så var idén i början att använda en enkel och beprövad pejlmetod.

Watson Wattmetoden beräknar en bäring genom att jämföra spänningar från en östvästlig lob med en nordsydlig lob som man t.ex. kan få från två korsade ramantenner. P.g.a. de begränsningar som ramantennen har genom sin oförmåga att pejla radiosignaler med rymdvågsutbredning korrekt (då polarisationen avviker från vertikal) så utvecklade Adcock den antenneteknik som kallas adcockantenn redan 1919.

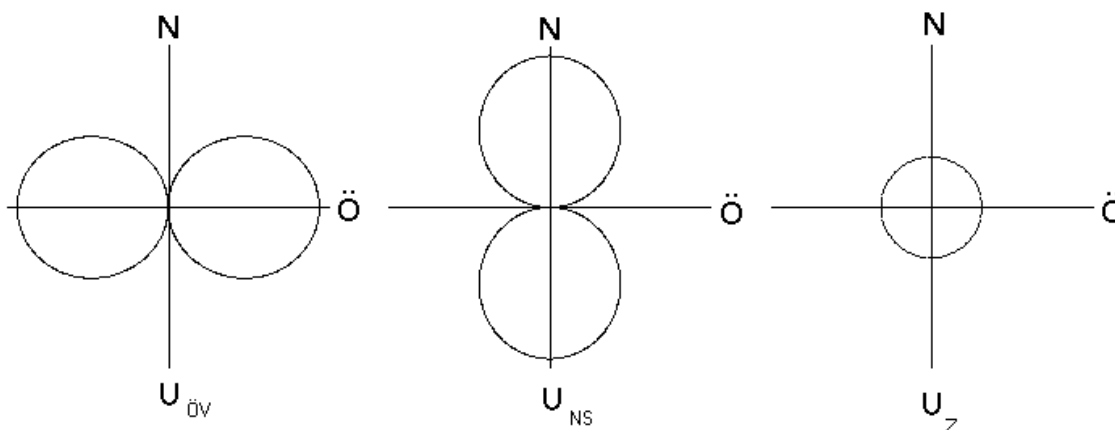


Figur 8 I figuren visas elementens inbördes placering i en adcockantenn med åtta element. Varje antennelement består av en aktiv vertikal dipolantenn.

I en goniometer skapas de tre spänningar som behövs för pejlingen. Följande spänningar skapas

$$\begin{aligned}
 U_{\text{öv}} &= U_3 - U_7 + U_2 - U_6 + U_4 - U_8 \\
 \text{(Ekv 2.1)} \quad U_{\text{NS}} &= U_1 - U_5 + U_2 - U_6 + U_8 - U_4 \\
 U_Z &= U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 + U_6 + U_7 + U_8
 \end{aligned}$$

och följande lobutseenden fås

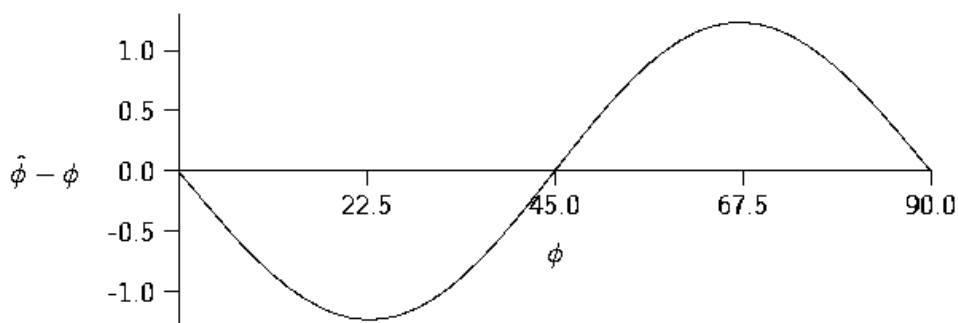


Figur 9 Antennendiagram för Öst-Väst, Nord-Syd och Summakanalerna från adcockantennens lobformande goniometer.

Från de östvästliga och nordsydliga loberna kan man beräkna en finbäring genom uttrycket

$$\text{(Ekv 2.2)} \quad \varphi = \tan^{-1} \left| \frac{U_{\text{öv}}}{U_{\text{NS}}} \right|.$$

Med hjälp av den tredje spänningen  $U_Z$  kan man bestämma en grovbäring, d.v.s., i vilken kvadrant bäringen ligger. Det ovan givna sambandet gäller bara approximativt. Ju fler element man har i en ring desto mindre blir felet. För en fyraelementring kan felet uppgå till ca  $6^\circ$  och för en åttaelementring blir det systematiska felet maximalt ca  $1^\circ$ , se figuren nedan.



Figur 10 Systematiskt fel i skattningen av infallsvinkeln till en 8-elements adcockantenn om skattningen i ekv 2.2 används utan korrektion.

För att reducera detta systematiska fel har en korrektionsmetod tagits fram. För att kunna korrigera för felet måste man ha en grov skattning på elevationsvinkeln. Detta ledde fram till den implementerade algoritmen som också ger ett värde på elevationsvinkeln.

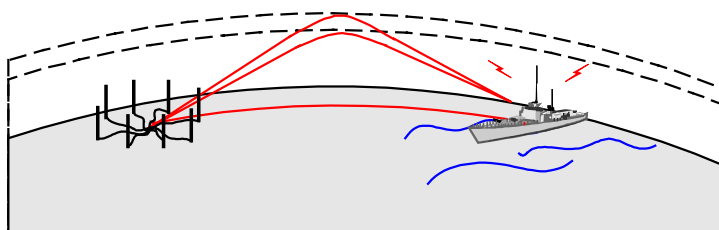


En utförlig beskrivning av den felkorrektionen som tagits fram och hur elevationsvinkeln beräknas beskrivs i rapporten Nagy [36].

### 5.1.2 Pejling med MUSIC-metoden

I DMT-LPI projektet har vi tagit fram ett 8-kanaligt system för att kunna utvärdera moderna s.k. högupplösande pejlmeter. Genom att använda ett flertal antenner (i vårt fall 8) kan man matematiskt skapa ett "signalrum" som tillåter att man pejar flera signaler på samma frekvens. På köpet kan man få, beroende på algoritmval, hög upplösning i bäring (azimut och elevation). Vidare så kan man genom lobformning lyssna på en godtycklig signal bland de pejlade.

Möjligheten att peja flera signaler på samma frekvens ger stora möjligheter att förbättra kortvågspejlens funktion på taktiska avstånd. I en traditionell pejl av Watson Watt-typ så blandas alla signaler på samma frekvens samman och den bäring man får blir ett viktat medelvärde av alla olika signalernas bäringar. I till exempel en situation med flervägsutbredning kommer den mottagna signalen att bestå av summan av ett antal signalkomponenter med olika tidsfördröjningar (de olika signalerna härför från olika utbredningsmoder - utbredningsvägar). Fördröjningarna för en signal ges av den vågutbredningsväg signalen följt. Den interferens som uppstår vid flervägsutbredning gör signalen svårpejlade. Om man däremot kunde peja varje signalkomponent för sig så får man en mycket stabilare bäring. Det är denna förmåga att peja på olika signalkomponenter som gör de högupplösande metoderna så värdefulla för kortvågspejling för taktiskt bruk.



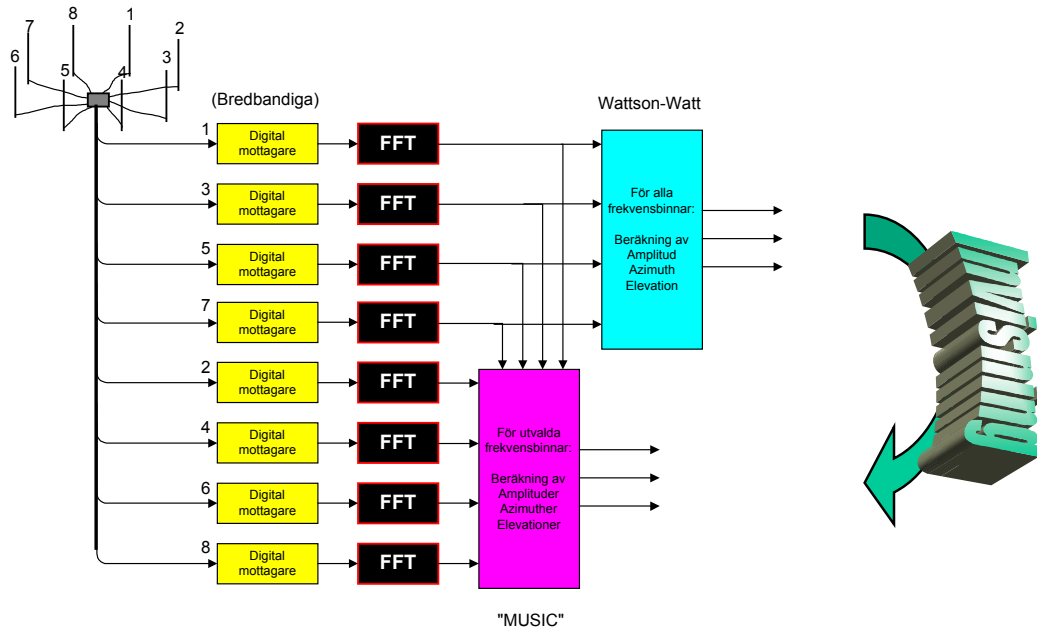
Figur 11 Flervägsutbredning genom jonosfären är mycket vanligt på kortvågsbandet. De olika signalvägarna interfererar med varandra och kan momentant ge stora bäringsavvikelser

#### 5.1.2.1 SYSTEMET

##### Hårdvara

SESAM-systemet har 8 mottagarkanalerna som kan kopplas till varsin antenn. Den antennkonfiguration som vi valt är en uniformt cirkulär array. Detta val är inte alltid det bästa valet för högupplösande metoder men p. g. a. bakåtkompatibilitet så var detta val nödvändigt. SESAM-systemet ska kunna peja ett stort antal kanaler momentant (> 1000 kanaler, > 5 ggr per sekund). Detta är inte möjligt med de högupplösande metoderna med sin höga beräkningskomplexitet. (Dock så sker det en snabb utveckling på beräkningsidan. De DSPer som lanseras nu är ca 10 ggr kraftfullare än de vi använder och redan nu så presenteras nästa generation DSPer som är 100 ggr kraftfullare.) I SESAM-systemet kommer därför en hybridlösning att användas. Den klassiska Watson-Wattmetoden som bara hanterar en signal per frekvens kommer att peja de flesta kanalerna, som (praktiskt sett) bara innehåller en signal.

Vid indikation på att flera signaler är närvarande på samma frekvens så ska bäringsberäkning göras av den högupplösande metoden MUSIC (MULTIpLe SIGnAl CLAsSiFiCaTiOn). En trolig arbetsfördelning blir att den högupplösande metoden tar några få procent av alla kanalerna och den klassiska Watson-Wattmetoden tar resten.



Figur 12 SESAM som multikanalpejl ska kombinera snabbheten hos Watson-Wattmetoden och upplösningsförmågan hos MUSIC

För att de högupplösande metoderna ska fungera bra vid pejling av många samtida signaler så måste systemet vara riktigt kalibrerat. Härvid menas s. k. elektrisk kalibrering varvid systemet i sig själv kalibreras. Vid ensignalfallet torde toleransen mot kalibreringsfel vara ganska stor. I projektet har vi tagit fram metoder för kalibrering av systemet.

Vid inledande tester av det 8-kanaliga systemet så visade det sig att 2 av de 8 kanalerna var felaktiga. För den ena kanalen var det tidsinformationen som var felaktig. Detta kunde hanteras genom att tidsinformationen i den kanalen ignorerades. För den andra felaktiga kanalen så var det signalnivån som var för låg. Eventuellt så är signalen också på något sätt korrupt.

## Mjukvara

I de inledande experimenten användes tre olika programmoduler för att implementera pejlfunktionen:

1. Datasamling
2. Första pejlsteg med Watson-Wattmetoden
3. Andra pejlsteg med en högupplösande algoritm

Den första modulen som hanterar datasamlingen, tar emot data från de 8-antennerna och skickar vidare data till pejlsystemet. Den ursprungliga datamängden reduceras för att minska på data som ska bearbetas. För nuvarande används filsystemet för att föra över data till pejlfunktionen som är implementerad i MATLAB. Fördelen med att implementera algoritmerna i MATLAB är att det underlättar testning och utvärdering av nya algoritmer.

Den andra modulen implementerar en vanlig Watson-Wattpejl. Denna modul kommer att pejla de flesta signalerna. Genom att utvärdera ett godhetstal kan man få information om huruvida signalen är ensam på en frekvens eller om det finns flera signaler. De kanaler som indikerar att flera signaler är närvarande skickas vidare till pejling med den högupplösande algoritmen.

Den tredje modulen som implementerats är det andra pejlsteget som använder en högupplösande algoritm (MUSIC i vårt fall) för att kunna pejla alla signaler som finns på den aktuella kanalen.

I ett fullt utvecklat system så kommer pejlresultaten från både pejlstegen att sammanställas och presenteras för operatören.

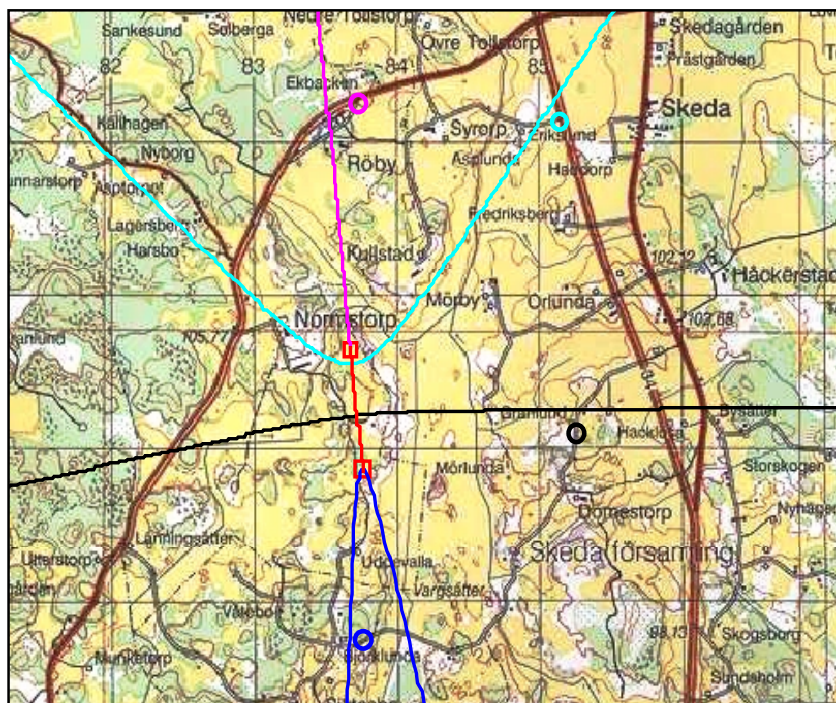
Några data som kan ge en bra utvärdering av den högupplösande tekniken har ännu inte samlats in.

Vidare kan man läsa om högupplösande teknik i Nagy [47] samt Hyberg [40,41].

### 5.1.3 Riktningbestämning genom TDOA-estimering

I detta kapitel ges en kort introduktion till TDOA-estimering och hur TDOA (Time difference of arrival = ankomsttidsskillnad) kan användas för riktningbestämning. Med riktningbestämning avses skattning av azimutvinkeln, dvs elevationsvinkeln antas vara noll och kompassriktning i planet bestäms.

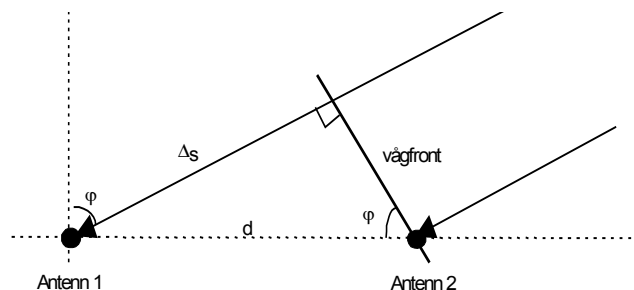
Försök med TDOA-baserad pejling har gjordes mha SESAM under våren och sommaren år 2000, se Larsson [43].



Figur 13 TDOA –försök med SESAM 9 april – 21 juni 2000. De röda fyrkanterna motsvarar mottagarantennernas position (inbördes avstånd ca 750 meter). Cirkelarna är sanna positioner för sändarplatserna och de färgade hyperblerna motsvarar uppmätt tidsförskjutning från respektive sändning.

### 5.1.3.1 Förhållandet mellan TDOA och ankomstvinkeln

Vi tänker oss den tvådimensionella situationen med en elektromagnetisk våg som faller in i horisontalplanet och tas emot med hjälp av två spatialt separerade antenner.



Figur 14 En elektromagnetisk våg infaller i horisontalplanet mot två separerade antenner. Gångvägsskillnaden  $\Delta s$  medför att den mottagna signalen i antenn 1 kommer att vara tidsfördröjd jämfört med signalen i antenn 2. Genom att bestämma ankomsttidsskillnaden (TDOA) mellan de två signalerna kan riktning till signalen bestämmas

De båda antennerna tar emot signalerna  $s_1(t)$  och  $s_2(t)$  där  $s_1(t)$  är en tidsfördröjd kopia av  $s_2(t)$ . TDOA mellan de två vågfronter som tas emot av de båda antennerna ges av

$$(Ekv 5.1) \quad \Delta t = \Delta s/c$$

där  $c$  är ljushastigheten och  $\Delta s$  är sträckan som motsvaras av TDOA,  $\Delta t$ , mellan de båda signalerna  $s_1(t)$  och  $s_2(t)$ .

Om avståndet mellan sändare och mottagare antas vara mycket större än avståndet mellan de båda mottagarantennerna kan en modell med plana vågor användas. Detta ger

$$(Ekv 5.2) \quad \Delta s = d \cdot \sin(\varphi)$$

och följande uttryck för ankomstvinkeln fås,

$$(Ekv 5.3) \quad \varphi = \arcsin(c \cdot \Delta t / d)$$

Genom att bestämma ankomsttidsskillnaden (TDOA) mellan de två signalerna kan vi alltså bestämma riktning till signalen.

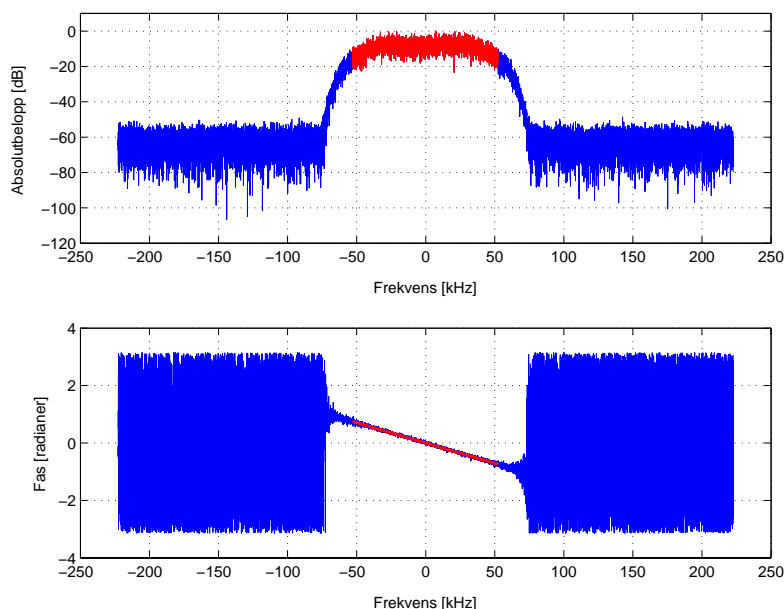
### 5.1.3.2 TDOA-estimering i frekvensdomän

Korrelation kan användas vid estimering av ankomsttidsskillnaden. Korskorrelationen,  $CCF[k]$ , mäter överensstämmelsen mellan de två mottagna signalerna och ger ett max för det  $k$  som motsvarar TDOA,  $\Delta t$ . Genom att fouriertransformera korskorrelationsfunktionen fås korsspektraltätheten, CSD (Cross Spectral Density). Fasen för CSD-funktionen är linjärt beroende av TDOA enligt,

$$(Ekv 5.4) \quad \arg(CSD[n]) = -2\pi n \Delta t / N$$

och en skattning av TDOA (och ankomstvinkeln) kan fås genom minstakvadrat skattning av faskurvan. Utseendet för amplitud- och fas för CSD vid närvaro av en direktsekvensspridd signal i vitt gaussiskt brus visas i figur 15.

Fönstring av korskorrelationsfunktionen, CCF, ger ett riktningfilter som används för att minska interferenser från ej önskvärda riktningar. Vidare används medelvärdesbildning för att öka robustheten av TDOA-skattningen. En av anledningarna till att skattning av TDOA görs i frekvensdomän är den mycket enkla frekvensfiltreringen och därigenom möjligheten till parallell bredbandig signalbehandling och riktningbestämning av alla signaler i aktuellt frekvensspektrum.



Figur 15 Amplitud (övre bilden) och fas (undre bilden) för korsspektraltätheten, CSD, för en direktsekvensspridd signal i vitt gaussiskt brus. Faskurvans lutning i det frekvensområde där signalen finns (i figuren markerat med rött) är proportionell mot signalens TDOA.

## 5.2 Automatisk signalanalys

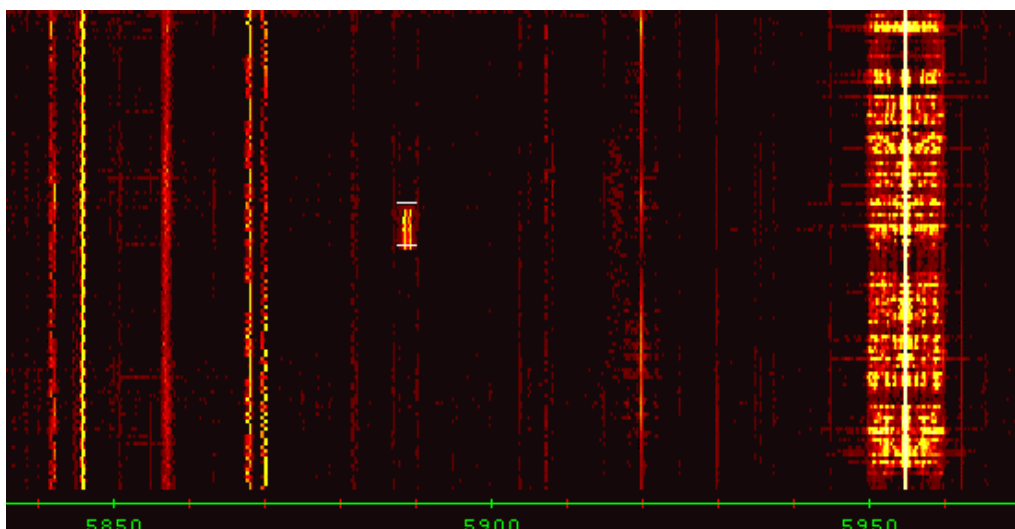
### 5.2.1 Automatisk detektion av korta sändningar

Under åren 1993-1996 utvecklades en signalbehandlingsalgoritm för detektion av möjliga korttidssändningar i projektet och under det kommande året implementerades algoritmen i en signalprocessor i DMT-systemet.

Algoritmen använder en kombination av signal- och bildbehandlingskriterium för att ur undre delen av en skrällanbild sälla fram signaler som har sändningslängder och bandbredder som svarar mot de kriterier (filter) som användaren ställt upp.

Huvudmomenten är:

- Bilddatafilter som undertrycker kontinuerliga signaler
- Frekvensanalys som kontrollerar spannet för signalernas tidslängd och tar bort upprepade sändningar.
- Detektion av start och sluttider för varje enskild frekvens
- ”Klustring” hopslagning av närliggande binnar m samma start- och sluttider. Detta ger bandbredd och centerfrekvens
- Ta bort kända, blockerade frekvenser.
- Kontrollera bandbredd och tidslängd mot uppställda filter.



Figur 16 En del av en skärmbild från DMT-systemet. Bilden visar 9 sekunders data (längs y-axeln) över 130 kHz bandbredd (längs x-axeln). Den korta sändningen på frekvensen 5890 kHz har detekterats. Dess tidslängd och bandbredd har markerats med vita streck.

### 5.2.2 Automatisk modulationsanalys

Arbetet med automatiska metoder för modulationsanalys har pågått sedan början av 90-talet. Det mesta utvecklingsarbetet bedrevs innan DMT-LPI projektet startades och finns avrapporterade i ett antal konferensbidrag , [14, 15, 16, 26, 28].

Metoder har tagits fram för att klassificera signaler med följande analoga modulationer

- AM
- FM
- PM
- SSB

Dessa metoder har inte implementerats i DMT-systemet.

Vidare så har metoder tagits fram för ett antal digitala modulationsformer

- FSK
- MSK
- PSK-2
- PSK-4
- PSK-8

Dessa metoder har implementerats i DMT-systemet.

Erfarenheter med dessa metoder visar att det i vissa fall, då man har flervägsutbredning, är nödvändigt att använda sig av kanalutjämnare för att få en signal som går att klassificera på ett tillfredställande sätt. Detta oberoende av om det används modemmet använder kanalutjämnare eller inte, kommunikationen och signalspanaren har ofta olika förutsättningar. Företrädesvis måste man använda sig av blinda metoder då inget är känt om modement i förhand och ofta används inte heller några kända träningssekvenser.

På senare år har kunskaperna inom området använts inom de akademiska kurser som FOI bedrivit. Materialet finns återgivet i den kurslitteratur som används [24]. Vidare så har en sammanfattande rapport givits ut [44].

Inom DMT-LPI har vi bedrivit ett arbete som ska ge tillgång till en smalbandig radiokanal med minne för signalanalys i SESAM. Detta kommer att ge tillgång till data för modulationsanalys och annan signalanalys. Det är ett delsystem från DMT-systemet, RONIX [30], som har modifierats för användning i SESAM systemet.

Vidare så har vi startat ett arbete för att utveckla nya metoder för modulationsklassificering som ska kunna klara av de modem som vi ser i dag och i en nära framtid. För kortvågsområdet finns det ett antal standarder och rekommendationer för modem. Ambitionen är att vi ska utveckla tekniker för att analysera dessa modem och skaffa oss kunskap så att vi snabbt ska kunna ta fram nya metoder när nya standarder dyker upp.

En preliminär genomgång visar klart på en gemensam trend för modemutvecklingen. För att klara de höga datatakter som efterlyses i dag inom olika användningsområden så går man mot någon form av PSK eller QAM. Den standardisering som sker leder också till att variationen i modulation och datatakter är små. Modulationen kommer därför framöver att ha mindre betydelse för att kunna identifiera olika system. Detta hjälps dock upp av det faktum att snabba modem med hög tillförlitlighet ställer stora krav på rätt hantering av kanalen. Man använder sig av olika tekniker för att hantera detta så som kanalkodning (felrättande koder), blockindelning, interleaving, kanalutjämning, etc. Här finns det en stor variation i parametervärdet mellan olika system. Därför krävs det av en framgångsrik signalanalys att även de metoder som använts för att hantera kanalen analyseras (med tillhörande parametrar).

Viktiga standarder att studera är bland annat:

MIL-STD-188-110B	Militär standard för kortvågsmodem. Innehåller såväl serietonsmodem med PSK/QAM-modulation som parallelltonmodem med PSK-modulation.
MIL-STD-188-110A	Standarden har ersatts av B. Den gamla innehåller inga QAM alternativ.
FED-STD-1052	Civil variant av MIL-STD-188-110A/B.
MIL-STD-188-141B	ALE standard med modem motsvarande MIL-STD-188-110A fast anpassade för korttidssändningar.
STANAG 5066 Annex G	Standarden beskriver mycket mer än modem men man har specificerat en egen vågform i Annex G

## 5.3 Upptäckt och riktningsbestämning av direktsekvensspridda signaler

### 5.3.1 Kvadrerande mottagare

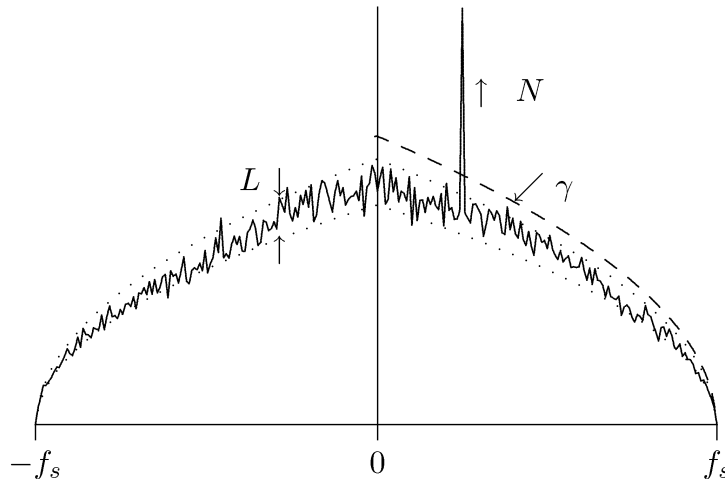
Tekniken för riktningsbestämning och detektion av bandspridda signaler av direktsekvenstyp med BPSK-modulation har studerats i projektet. Frågan som skulle besvaras var huruvida man kunde använda befintlig utrustning (antennor, mottagare, och DSP-system) för att upptäcka och pejla dessa signaler.

I rapporten Nagy [36] visades att man kunde använda Watson-Wattmetoden för att pejla BPSK-signalerna efter det att de hade kvadrerats. Vi fick följande formel för finbäringen

$$(Ekv 5.5) \quad \varphi = \tan^{-1} \sqrt{\frac{U^2_{\text{öV}}}{U^2_{\text{NS}}}}$$

där  $U^2_{NS}$  och  $U^2_{OV}$  är spänningarna för de kvadrerade signalerna. För att tekniken med kvadrerade mottagare ska fungera måste man först städa bort alla smalbandiga signaler innan man kvadrerar. Den framtagna pejlalgoritmen har ännu inte implementerats i SESAM systemet. Vidare information om pejling med kvadrerade mottagare finns i Johansson [35].

Vidare har detektionen av de kvadrerade signalerna studerats.



Figur 17 Frekvensspektrum för den kvadrerade signalen när en bandspridd BPSK-modulerad signal är närvarande. Antal sampel,  $N$ , antal medelvärdesbildningar,  $L$ , och detektionströskeln  $\gamma$  väljs efter krav på snabbhet, tillförlitlighet och känslighet.

Figur 17 visar spektrumet för den kvadrerade signalen när en bandspridd BPSK-modulerad signal är närvarande,  $f_s$  är sampeltakten. Det finns tre parametrar som man kan kontrollera:  $N$  anger antal sampel som beräkningen gjorts på,  $L$  är antalet dataset som använts för medelvärdesbildning och  $\gamma$  som är detektionströskeln. Genom lämpliga val av dessa parametrar så får man en detektor med önskad känslighet och önskad felsannolikhet.

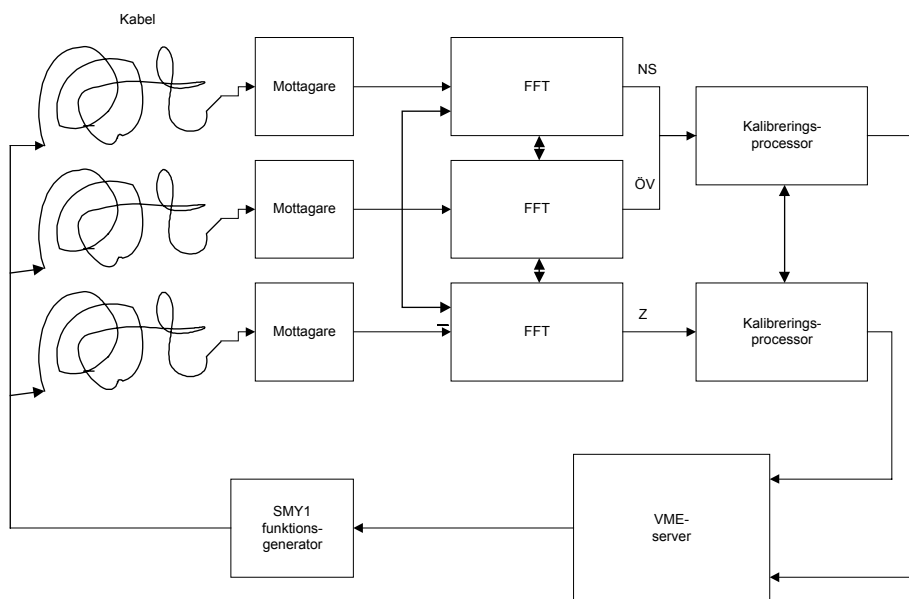
### 5.3.2 Korrelerande mottagare

Med hjälp av korrelation av kan man mäta ankomsttidsskillnaden för en signal mellan två separerade mottagarkanaler. Med hjälp av ankomsttidsskillnaderna mellan 4 mottagarkanaler kan ett entydigt läge bestämmas för sändaren. Korrelationen mellan antensignalerna blir tydligare ju bredbandigare signal som tagits emot vilket innebär att metoden lämpar sig väl för inmätning av direktsekvensspridda signaler. Metoden har en fördel framför den ovan beskrivna kvadrerade mottagaren: den är oberoende av den bandspridda signalens modulation. För mer information se rapporterna av Finne [29] och Elbornsson [46] och Ahnström [49].

## 5.4 Kalibrering

För att få ett välfungerande pejlsystem med god noggrannhet så måste man kalibrera systemet. Därför har ett antal kalibreringsmetoder för SESAM systemet utvecklats. Eftersom det är pejlfunktionen som ställer stora krav på kalibreringen så matchas de olika kanalerna så alla kanaler ger samma respons för en given frekvens. Inget försök görs för att kalibrera en enskild kanal till att få samma egenskaper för alla frekvenser. En typisk kalibreringsuppkoppling för det trekanaliga systemet visas i figur 18 nedan.





Figur 18 Kalibreringsuppkoppling för ett 3-kanaligt SESAM-system. Signalgeneratoren matar in en kalibreringssignal i mottagarna via de tre antennkablarna. Antennernas egenskaper kalibreras ej med denna uppkoppling.

För att beskriva kalibreringsmetoder så kan man dela in dem dels efter hur de sveper över det frekvensområde som ska kalibreras och dels hur det momentana spektrumet hos kalibreringssignalen ser ut. Principiellt så kan svepen vara:

- *Programstyrda* – programvaran som sköter kalibreringen ställer ut önskad frekvens därefter sker en inmätning av signalen innan nästa kalibreringsfrekvens ställs in. I vårt system skulle detta förfarande ge väldigt långsam kalibrering.
- *Automatiskt svep med synkron datainsamling* – svepet styrs automatiskt av tongeneratoren själv medan datainsamlingen sker synkront mot svepet. Detta förfarande ger en mycket snabbare kalibrering än den programstyrda.
- *Automatiskt svep med asynkron datainsamling* – svepet styrs automatiskt av tongeneratoren själv medan datainsamlingen sker asynkront. Med denna teknik kan mycket snabb kalibrering göras.

Spektrumet hos den svepta signalen kan antingen bestå av en ensam ton eller så kan spektrumet bestå av ett kamspektrum.

För SESAM-systemet har vi implementerat två kalibreringsmetoder:

1. Automatiskt svep med synkron datainsamling i kombination med en ensam svepande ton.
2. Automatiskt svep med asynkron datainsamling i kombination med ett svepande kamspektrum.

Den andra metoden är snabb och klarar av att kalibrera bandbredden 2 MHz på 0.5 sekunder. Den första metoden är långsammare man används för att kontrollera riktigheten hos den snabba metoden då den tillåter datainsamling och kalibrering av redan kalibrerade data.

## 6 Kunskapsöverföring

Deltagare i projektet har sedan början av 1990-talet medverkat i utbildning av officerare ur försvarsmakten i flera typer av kurser. Några exempel är Högre kurs i Telekrig och den fyra veckor långa akademiska kurs i robusta sambandssystem som båda arrangeras av FOI för Försvarshögskolans räkning. Ett samarbete har bedrivits med försvarsmaktens användargrupp televapen kortvåg sedan 1999. Ett stort antal fältprov, ofta i samband med marin- eller arméövningar, har genomförts tillsammans med denna grupp och tillsammans med enhet MTC – TK (nu: MTK TK) vilket har bidragit till en betydligt utökad kompetens inom försvarsmakten av signalspaning och pejling inom kortvågsbandet. En förteckning av prov och försök finns i bilaga A. En stor mängd rapporter har också publicerats. En förteckning över dessa återfinns i bilaga B.

## 7 Resultat

Projektet digital mottagarteknik har sedan 1989 bidragit till ökad kunskap inom försvarsmakten om signalspaning och pejling på kortvågsbandet. Projektet har bidragit till att man återigen har tagit upp frågan om taktisk signalspaning på kortvåg inom t ex arméns televapen och från marina plattformar. Med hjälp av de system som man under åren har byggt upp inom projektet (Konrad, DMT-systemet, KOPEK och SESAM) har man under ett stort antal demonstrationer kunnat visa de bredbandiga digitala signalspaningssystemens förmåga till upptäckt, analys och lägesbestämning (även efter sändningens slut) av signaler som tidigare ansågs som svårhanterliga.

Två av de signalspaningssystem som byggts upp inom ramen för projektet har övergått till FRA och där bidragit till deras produktion.

Under de senaste åren har ett arbete bedrivits med upptäckt- och lägesbestämning med TDOA-teknik av såväl bandspridda som smalbandiga kommunikationssignaler. Detta kan få stor betydelse då ett sådant system kan göras litet och lätt vilket ger förutsättningar för att kunna verka från ex vis små UAVer.

## A. Fältprov och försök

Sedan 1994 har man i projektet deltagit i prov och försök bl a med avsikt att öka och sprida kunskap om taktisk kortvågssignalspaning och pejling inom försvarsmakten. Detta har skett i samband med framförallt armé- och marinövningar.

Några av de övningar där personal och SIS-system från projektet medverkat är:

1. KFÖ 94 – Bredbandig frekvensövervakning med DMT-systemet med inriktning på manuell upptäckt av digitala datasändningar från marina förband.
2. 1995 - Fältprov i Östhammar vid marinövning, DMT och KOPEK
3. Råka 96 – Upptäckt och lägesbestämning av datasändningar från marina förband
4. Fältförsök Karlskoga-Linköping – SIS-jämförelse av två system för korttidssändningar.
5. Enköping 1999, Rhode & Schwartz DDF01M – Utvärdering av en kommersiellt tillgänglig smalbandig digital pejl. från Rhode & Schwartz.
6. Kvarn 1999, Rhode & Schwartz DDF01M – Fortsatt utvärdering av en kommersiellt tillgänglig smalbandig digital pejl från Rhode & Schwartz.
7. Blekinge/Öland 1999, 2 st SESAM, DDF01M och MOPS – Samspel mellan bredbandiga SIS-system, pejl- och störsystem.
8. 2000 Älvdalen, 2 st SESAM – Pejl- och lägesbestämningsförsök i besvärliga geografiska förhållanden i samband med en arméövning (ASSÖ)
9. 2000 Enköping, SESAM och WJ9012A – Funktionstest och utvärdering av pejlen WJ9012A som är en 8-kanalig smalbandig pejl med högupplösande pejlalgoritm (MUSIC). Inledande försök med högupplösande pejlalgoritmer i SESAM
10. 2000 Inmätning av data för TDOA-försök
11. 2001 Långtidsmätning med SESAM – Insamling av pejldata för jonofärsutbredda signaler under en längre tid.
12. 2001 Tierp, WJ9012A – Devieringsmätningar med 8-kanalig smalbandig pejl med högupplösande pejlalgoritm.

## B. Rapporter och artiklar

1. **Beorulf - simuleringsmiljö för digitala moduleringsformer.** FOA 1990, FOA D 30571-8.3. *Gustavsson Rolf*
2. **Digital signalspaning öppnar nya möjligheter.** FOA-tidningen, 1991:1:22-23. *Bergdal Hans, Oscarsson Fredrik*
3. **Bandpassamplig och kvadraturuppdelning av signaler med stor dynamik. Ett systemförslag.** FOA 1991, FOA D 30595-8.3. *Oscarsson Fredrik*
4. **Redogörelse för utrikes tjänsteresa.** FOA 1991, FOA D 30603-8.3. *Oscarsson Fredrik*
5. **Wideband HF receiver with digital quadrature splitting. (Publ. in: HF 92, Nordic shortwave conf., p. 225-231. Fårö, Aug 11-13, 1992).** FOA 1992, FOA B 30288-3.6, *Oscarsson Fredrik*
6. **Växelvis sampling av bandpassignaler med stor bandbredd och dynamik. Slutlig utvärdering av metoden.** FOA 1992, FOA D 30655-3.6. *Oscarsson Fredrik, Johansson Thomas*
7. **Växelvis sampling av bandpassignaler med stor bandbredd och dynamik. Slutlig utvärdering av metoden.** FOA 1992, FOA D 30655-3.6. *Oscarsson Fredrik, Johansson Thomas*
8. **Wideband HF receiver with digital quadrature splitting. (Publ. in: ICSPAT '93, Intern. Conf. on signal processing applications and technology, vol. 2, p. 1267-1271. Santa Clara, CA, Sept 28-Oct 1, 1993).** FOA 1993, FOA B 30340-3.5. *Oscarsson Fredrik, Lindblad Arne*
9. **Digital mottagarteknik. AGC-enheten.** FOA 1993, FOA D 30717-3.6. *Johansson Thomas*
10. **Drutten. Digital basbandskonvertering och decimering.** FOA 1993, FOA D 30693-3.6, *Johansson Thomas*
11. **Algorithms for a digital radio direction finding system in the HF band.** FOA 1993, FOA C 30738-3.6 (även utgiven som LiTH-ISY-EX-1389). *Johansson Thomas B, Johansson H Thomas*
12. **Digital mottagarteknik: Detektion av snabbsändare i en tät signalmiljö.** FOA 1993, FOA D 30719-3.6. *Gustavsson Rolf*
13. **Upptäckt av möjliga korttidssändningar i en tät signalmiljö.** FOA 1993, FOA C 30744-3.6 (även utgiven som LiTH-ISY-EX-1369). *Gustavsson Rolf*
14. **A DSP-Implementation of a method for classification of analogue modulated radio signals.** 1994, bidrag i *Proc. Of the ICSPAT'94*, Dallas, Texas. *Peter Nagy*
15. **Analysis of a method for classification of analogue modulated radio signals. (Publ. in: EUSIPCO '94, 7. European Signal Processing Conf. Proc. Edinburgh, UK, Sept 13-16, 1994.)** FOA 1994, FOA B 30341-3.6. *Nagy Peter A J*
16. **Modulation classifier for multi channel systems and multi transmitter situations. (Publ. in: MILCOM '94. Long Branch, NJ, Oct 2-5, 1994 ).** FOA 1994, FOA B 30354-3.6. *Nagy Peter A J*
17. **FFT beräkningar i KOPEK-systemet. Beskrivning av SPANE och KURRE.** FOA 1994, FOA-D--94-00007-3.6--SE. *Lindblad Arne*
18. **Konrad. Wide band digital HF receiver.** FOA 1994, FOA C 30745-3.6. *Oscarsson Fredrik*
19. **Digital ESM systems group - a brief presentation of current activities.** FOA 1994, FOA D 30758-3.6. *Johansson Thomas B*

20. **DRUTTEN. Digital baseband conversion and decimation.** FOA 1995, FOA-D--95-00077-3.6--SE. *Johansson Thomas B*
21. **Beskrivning av signalprocessorkort DSP56/1.** FOA 1995, FOA-D--95-00111-3.6--SE (FOA-D--94-00111-3.6--SE felaktigt på omslaget). *Lindblad Arne*
22. **Kvaser - A digital HF receiver for wideband applications.** FOA 1995, FOA-R--95-00133-3.6--SE. *Oscarsson Fredrik*
23. **Kvaser HF receiver for wideband applications. (Pres. at HF 95, Nordic Shortwave Conference. Proceedings. Fårö, Sverige 1995).** FOA 1995, FOA-B--95-00075-3.6--SE. *Oscarsson Fredrik*
24. **Kompendium i signalspaningsteknik. Del 1. Grunder samt radiosignalspaning.** FOA 1995, (CKLT. RSS-SiS) Avd: 3 Acc-nr: 3/99/095. *Andersson Börje, Bergdal Hans, Gustavsson Rolf, Nagy Peter, Oscarsson Fredrik*
25. **Methods for detection of direct-sequence spread-spectrum signals in a high interference environment. (Project DMT).** FOA 1995, FOA-R--95-00127-3.6--SE (även utgiven som LiTH-ISY-EX-1547). *Svanström Mattias*
26. **The Implementation of a Modulation Classifier and Signal FIFO for Analysis of Burst Transmissions.** 1995, bidrag i Proc. Of the ICSPAT'95, Boston, MA, USA. *Peter Nagy*
27. **En implementerad reelltidsalgoritm för signalupptäckt inom kortvågsbandet.** FOA 1997, FOA-RH--95-00104-616-SE, *Rolf Gustavsson*
28. **Modulation Classification – an unified view.** 1996, bidrag i Proceedings of the VIII European Signal Processing Conference – EUSIPCO'96, Trieste, Italy. *Peter Nagy*
29. **Methods for direction-finding of direct-sequence spread-spectrum signals.** FOA 1996, FOA-R--96-00250-3.6--SE (även utgiven som LiTH-ISY-EX-1655). *Finne Magnus*
30. **Minnesfunktion och smalbandig digital mottagare i ett signalspaningssystem för kortvåg.** FOA 1997, FOA-R--97-00650-616--SE (även utgiven som LiTH-ISY-EX-1701). *Andersson Roger, Bergström Niklas*
31. **Fältförsök med DMT, ARMDAT och KV-Dart.** FOA 1997, FOA-RH--96-00140-616, *Fredrik Oscarsson*
32. **Erfarenheter och resultat av kortvågs-SIS i samband med övningen Hummern.** FOA 1997, FOA-RH--97-00194-616-SE, *Rolf Gustavsson, Leif Persson, Thomas Widén*
33. **SESAM. A versatile research platform for digital wideband ESM techniques. (In: HF 1998, session 6.1.1-6.1.8. Fårö, Aug 11-13, 1998),** FOA 1998, FOA-B--98-00350-616--SE. *Gustavsson Rolf*
34. **Signalspanare med digitala minnen - Nya tidens signalspanare övervakar hundratals signaler samtidigt. Bredbandig digital teknik förnyar signalspaningen mot kommunikation.** 1998, FOA-tidningen 1998:5:10-11. *Gustavsson Rolf*
35. **Direction fining of direct-sequence spread spectrum signals. (DMT Digital electronic support systems.** FOA 1998, FOA-R--97-00562-616--SE) (FOA-R--98-00562-616--SE i rapporten) (även utgiven som LiTH-ISY-EX-1769). *Johansson Erika*
36. **Direction finding for the SESAM-system.** FOA 1998, FOA-R--97-00428-616--SE. *Nagy Peter*
37. **Geometrisk pejlfelsanalys.** FOA 1998, FOA-R--98-00881-616--SE. *Falk Johan, Gustavsson Rolf*
38. **Utvärdering av Rohde & Schwartz DDF01M pejlsystem.** FOA 1999, FOA-R--99-01183-616--SE. *Falk Johan, Gustavsson Rolf, Nagy Peter, Persson Leif*
39. **Utvärdering av Rohde & Schwartz DDF01M pejlsystem.** FOA 1999, FOA-R--99-01183-616--SE. **Falk Johan, Gustavsson Rolf, Nagy Peter, Persson Leif**

40. **A comparison of model based DOA methods for circular arrays in the HF band.** FOA 1999, FOA-R--99-01113-616--SE. *Hyberg Per*
41. **Circular to linear array mapping using calibration data.**  
**Cirkulär till linjär avbildning av gruppantenner medelst kalibreringsdata.** FOA 2000, FOA-R--00-01782-616--SE. *Hyberg Per*
42. **Computational efficiency & bandwidth in superresolution circular arrays.** FOA 2000, FOA-R--99-01419-616--SE. *Hyberg Per*
43. **Modellutveckling av ett TDOA-positioneringssystem.** FOI 2001, FOI-R--0122--SE (även utgiven som Blekinge Tekniska Högskola examensarbete MME0103). *Larsson Mats*
44. **An introduction to modulation classification.** FOI 2001, FOI-R--0238--SE. *Nagy Peter*
45. **Circular to Linear Array Mapping and Bias Reduction.** KTH 2001, TRITA-S3-SB-0119 ISRN KTH/SB/R--01/19-SE. *Hyberg Per*
46. **Upptäckt och riktningsbestämning av bandspridda signaler med hjälp av korrelation.** FOI 2001, FOI-R--0030--SE. *Elbornsson Ulrika.*
47. **En första utvärdering av 8-kanaligt system och MUSIC.** FOI 2002, FOI-MEMO--02-292, *Peter Nagy*
48. **Långtidsprov med SESAM - Observation av bäringsavvikelser vid pejling av långväga signaler.** FOI 2002, FOI-MEMO--01-4114, *Daniel Johansson, Leif Persson, Rolf Gustavsson*
49. **Experimentell prestanda för upptäckt och riktningsbestämning av direktsekvensspridda signaler med hjälp av korrelation,** FOI 2002, FOI-MEMO--01-4113, *Ulrika Ahnström*