

FFI RAPPORT

SENSOTEK interferometrisk syntetisk aperture sonar for HUGIN AUV

HANSEN Roy Edgar

FFI/RAPPORT-2001/03193

FFIBM/808/116

Godkjent
Kjeller 20 juni 2001



Nils Størkersen
Forskningsjef

**SENSOTEK interferometrisk syntetisk aperture sonar
for HUGIN AUV**

HANSEN Roy Edgar

FFI/RAPPORT-2001/03193

FORSVARETS FORSKNINGSINSTITUTT
Norwegian Defence Research Establishment
Postboks 25, 2027 Kjeller, Norge

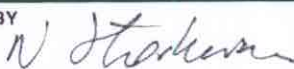
FORSVARETS FORSKNING SINSTITUTT (FFI)
Norwegian Defence Research Establishment

UNCLASSIFIED

P O BOX 25
 NO-2027 KJELLER, NORWAY

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE
 (when data entered)

REPORT DOCUMENTATION PAGE

1) PUBL/REPORT NUMBER FFI/RAPPORT-2001/03193	2) SECURITY CLASSIFICATION UNCLASSIFIED	3) NUMBER OF PAGES
1a) PROJECT REFERENCE FFIBM/808/116	2a) DECLASSIFICATION/DOWNGRADING SCHEDULE -	
4) TITLE SENSOTEK interferometrisk syntetisk aperture sonar for HUGIN AUV SENSOTEK Interferometric Synthetic Aperture Sonar for HUGIN AUV		
5) NAMES OF AUTHOR(S) IN FULL (surname first) HANSEN Roy Edgar		
6) DISTRIBUTION STATEMENT Approved for public release. Distribution unlimited. (Offentlig tilgjengelig)		
7) INDEXING TERMS IN ENGLISH:		
a) <u>Synthetic aperture sonar</u>		IN NORWEGIAN:
b) <u>Interferometry</u>		a) <u>Syntetisk aperture sonar</u>
c) <u>Sonar imaging</u>		b) <u>Interferometri</u>
d) <u>Autonomous underwater vehicle</u>		c) <u>Sonar avbildning</u>
e) <u>Motion compensation</u>		d) <u>Autonome undervannsfarkoster</u>
		e) <u>bevegelseskompensasjon</u>
THESAURUS REFERENCE:		
8) ABSTRACT <p>The project "Sensor technology for AUV based mine hunting" (SENSOTEK) is a collaboration between FFI, Kongsberg Simrad AS and Simrad AS to develop a prototype interferometric synthetic aperture sonar (SAS) for the HUGIN AUV within 3 years. In this work we present the design of the SAS system, and possible ways to operate the sonar.</p> <p>The sonar system consists of two along-track receiver arrays and a two-dimensional phased array transmitter. The target resolution is 3×3 cm for both imagery and bathymetry, and the area coverage rate is maximum 400 m²/s.</p> <p>Motion compensation along the synthetic aperture is done by integrating the Displaced Phase Center Antenna (DPCA) technique with the aided Inertial Navigation System (INS). DPCA estimated sway and surge is used as aiding sensors (similar to a Correlation Velocity Log, CVL) for the navigation system.</p> <p>There are two different operational modes: Conventional strip-map mode and <i>multi-look</i> or <i>multi-aspect</i> mode. In multi-look mode, the independent images can be used either to: 1) reduce speckle in the image; 2) produce images in different aspect angles for multi-aspect shadow classification; 3) Improve the phase unwrapping for full resolution inteferometric processing.</p>		
9) DATE 20 June 2001	AUTHORIZED BY This page only  Nils Størkersen	POSITION Director of Research

UNCLASSIFIED

ISBN 82-464-0524-1

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE
 (when data entered)

INNHOOLD

	Side	
1	INNLEDNING	7
1.1	SENSOTEK arbeidsgruppe	7
1.2	Engelske faguttrykk og norsk oversettelse	8
1.3	Forkortelser	8
2	SYNTETISK APERTURE SONAR OPERASJON	9
2.1	Multi-element mottaker	10
2.2	Displaced Phase Center Antenna (DPCA)	11
2.3	Interferometri	13
2.4	Integrasjon av treghetsnavigasjon og DPCA mikronavigasjon	15
2.5	SAS-prosessering	17
2.5.1	Beamforming	17
2.5.2	Autofokus	18
2.6	SAS-operasjon	19
2.6.1	Strip-map mode	19
2.6.2	Multi-look eller multi-aspekt mode	19
3	DESIGN AV SENSOTEK SAS	21
3.1	Frekvensområde	21
3.2	Transducere	22
3.3	Elektronikk	23
4	OPPLØSNING	23
4.1	Teoretisk oppløsning	24
4.2	Praktisk asimut oppløsning	24
4.3	Datamengde	25
5	DEKNINGSGRAD	25
5.1	Case 1: Maksimal avstand $R_2 = 375$ m	26
5.2	Case 2: Hastighet $v_{opt} = 2.0$ m/s	27
5.3	Case 3: Hastighet $v_{max} = 2.0$ m/s	27
6	ALTERNATIVE KONSEPTER	28
6.1	Ping-pong SAS	28
6.2	Multi-swath SAS	29
6.3	Multiple pulser	29
6.4	Pulskoding	30
	Litteratur	31
	Fordelingsliste	35

SENSOTEK interferometrisk syntetisk aperture sonar for HUGIN AUV

1 INNLEDNING

Syntetisk aperture sonar (SAS) teknologi har potensiale til en størrelsesorden bedre asimut oppløsning enn konvensjonelle sidescan sonarer. I minejaksammenheng betyr det at SAS har potensiale til bedre oppløsning enn de fleste klassifikasjonssonarer og bedre dekningsgrad enn de fleste deteksjonssonarer.

Autonome undervannsfarkost (AUV) teknologi er nå på det stadium at og flere og flere potensielle brukere, både sivilt og militært, fatter interesse for denne teknologien (1). HUGIN-familien av AUVer som er utviklet av FFI og Kongsberg Simrad AS, har vært i kommersiell bruk i offshoreindustrien siden 1997 (2) (3). Militær bruk av AUVer blant annet for minejakt, er i økende grad interessant med den raske utviklingen av teknologien. Mange land har allerede planer for innføring av AUVer i sitt sjøforsvar (4).

Autonome undervannsfarkoster er ideelle plattformer for SAS-operasjon i kraft av de kan bevege seg meget stabilt gjennom vannmassene, nær havbunnen. I tillegg har sanne autonome systemer et høykvalitets treghetsnavigasjonssystem som kan gi nøyaktig posisjon og orientering til farkosten underveis. FFI har gjennom en årrekke opparbeidet ekspertise innen navigasjon og autonom operasjon.

SACLANT Undersea Research Centre (SACLANTCEN eller SLC) har et Joint Research Program (JRP) Mine Detection and Classification, der FFI deltar sammen med 6 andre NATO land. Dette JRP ledes av Marc Pinto og arbeider med SAS-prosessering, bevegelseskompensasjon og interferometri. Gjennom samarbeidet og deltagelse i eksperiment med Pintos gruppe har vi fått innsikt i prinsipper og virkemåte til eksisterende høyoppløselige SAS-systemer.

Med denne bakgrunnen startet FFI prosjektet Sensorteknologi for AUV-basert minejakt (SENSOTEK) 1. juli 2000. Prosjektet er et samarbeid mellom FFI, Kongsberg Simrad AS og Simrad AS og har som mål å instrumentere HUGIN med et prototype SAS-system innen 3 år.

Den resulterende sensoren består av to mottakerarray i kjøreretning og en todimensjonal fasestyrt sender, og har potensiale til oppløsning på 3×3 cm for både sonarbilde og bathymetri. Dekningsraten er maksimalt $400 \text{ m}^2/\text{s}$ (for et ensidig system), og maksimal avstand er 400 m.

1.1 SENSOTEK arbeidsgruppe

8. september 2000 ble det avholdt et møte mellom Kongsberg Simrad, Simrad og FFI, der det ble nedsatt en arbeidsgruppe. Gruppen har arbeidet med konsepter for SAS-operasjon, og mulige design. Underveis ble det klart at SAS-systemet skal bestå av standardkomponenter for neste generasjon elektronikk og transducere. Design av SENSOTEK SAS-system er et resultat av gruppens arbeide. Siste møte før denne rapporten ble skrevet var 23. mai 2001.

Arbeidsgruppen har bestått av

Tore Werner Hansen	Kongsberg Simrad
Bjørnar Langli	Kongsberg Simrad
Bjarte Berntsen	Simrad
Even Borten Lunde	Simrad
Håvard Nes	Simrad
Roy Edgar Hansen	FFI
Per Espen Hagen	FFI

1.2 Engelske faguttrykk og norsk oversettelse

Siden engelsk er innarbeidet som internasjonalt teknisk språk både for tidsskrifter og bøker, finnes det en del ord og uttrykk som ikke lar seg oversette til noe kjent/meningsfullt norsk ord. I denne rapporten brukes blant annet:

ambiguitet	Flertydighet.
array	Rekke av elementer. Et mottakerarray - rekke av mottakere.
aperture	Åpning. Syntetisk aperture - syntetisk antenneåpning.
aiding	Støtte. Aiding sensor - støttesensor.
beam	Stråle. Beamforming - stråleforming, beambredde - strålebredde.
broadside	Bredside. Sideveis med normalt innfall.
multi-look	Teknikk innen SAR/SAS for å generere flere uavhengige bilder eller "look".
sampling	Innsamling av diskrete punkter i tid eller rom.
sidescan	Sideseende. Sidescan sonar - sideseende sonar.
slant-range	Skråningsavstand. Det akustiske planet (i motsetning til langs bunnen).
speckle	Flekk. kornstøy i syntetisk aperture bilder.
smoothing	Glatting. Smoothing av Kalmanfiltere er et begrep for å benytte både fortid og fremtid i KF beregningene.
swath	Spor. Bredde på stripen som SAS-systemet kartlegger.
unwrap	Pakke opp. Unwrapping av fase betyr å løse ut 2π ambiguiteter.

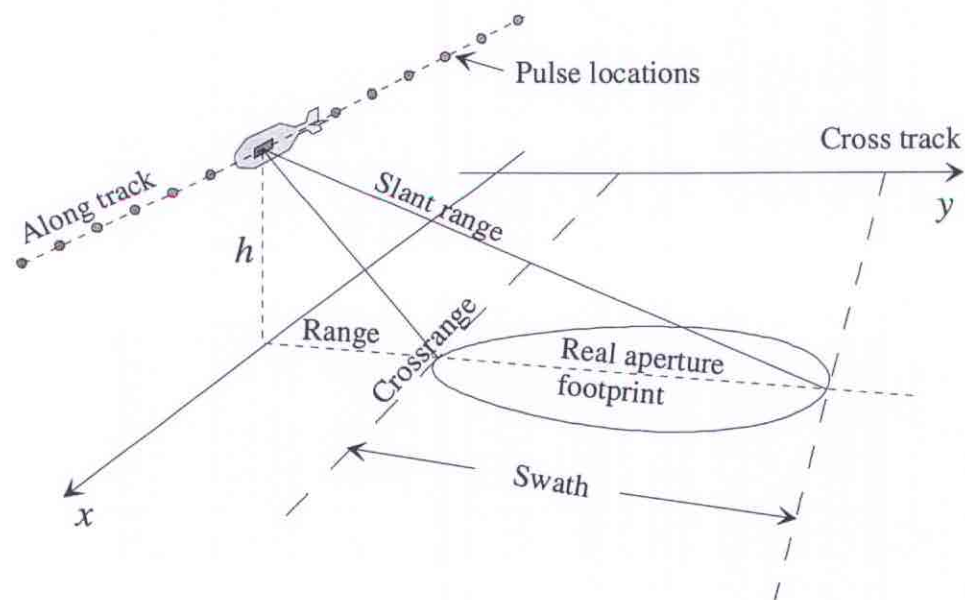
Jeg har valgt å beholde de engelske ordene i teksten slik at rapporten blir mest mulig lesbar. I tillegg har jeg valgt å benytte engelsk for de 6 frihetsgradene for bevegelse.

1.3 Forkortelser

ACS	Accelerated Chirp Scaling
AUV	Autonomous Underwater Vehicle
CRLB	Cramér-Rao Lower Bound
CSS	Coastal Systems Station (en del av NSWC)
CVL	Correlation Velocity Log
DGPS	Differensiell GPS (Global Positioning System)
DPCA	Displaced Phase Center Antenna
DTI	Dynamics Technology Inc.

DVL	Doppler Velocity Log
EKF	Extended Kalman Filter
HF	High Frequency
HiPAP	High Precision Acoustic Positioning (et Kongsberg-Simrad produkt)
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
InSAS	Interferometrisk SAS
JRP	Joint Research Project
KF	Kalman Filter
LF	Low Frequency
LFM	Lineær frekvensmodulasjon (samme som "chirp")
NSWC	Naval Surface Warfare Center (USA)
PGA	Phase Gradient Autofocus
PRI	Pulsrepetisjonsintervall
RMA	Range Migration Algorithm
SACLANT	Supreme Allied Commander Atlantic
SAR	Syntetisk aperture radar
SAS	Syntetisk aperture sonar
SLC	SACLANTCEN — SACLANT Undersea Research Centre
SNR	Signal to Noise Ratio
TDC	Time Domain Correlation
TDOA	Time Difference Of Arrival

2 SYNTETISK APERTURE SONAR OPERASJON



Figur 2-1 AUV med syntetisk aperture sonar

Syntetisk aperture prosessering er en teknikk for å øke asimetriske oppløsning eller oppløsning langs kjøreretning (crossrange, along track) på basis av sonarbevegelse. Figur 2-1 skisserer en typisk geometri med en sideseende sonar montert på en Autonomous Underwater Vehicle (AUV) som beveger seg langs en trajektorie. Et syntetisk array kan konstrueres, der hvert element i arrayet

har posisjon hvor vi sender ut og mottar et ping. Asimut vinkelopløsning er gitt som akustisk bølgelengde dividert med lengde på array, dvs lengre array gir bedre oppløsning. Den maksimale asimut oppløsning for en syntetisk aperture er $d/2$, der d er lengden på hvert element i kjøreretning, uavhengig av både avstand og akustisk bølgelengde.

Generelt kan syntetisk aperture prosessering deles inn i tre deler:

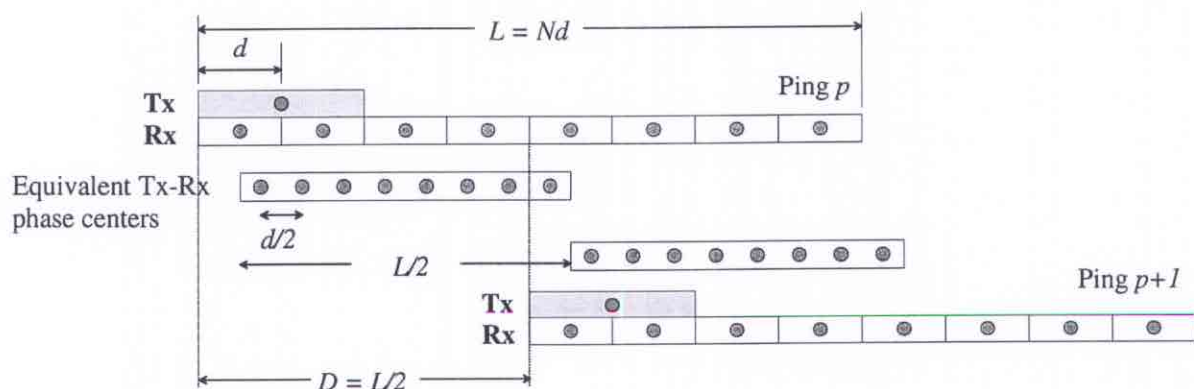
1. Bevegelseskompensasjon.
2. Syntetisk aperture stråleforming (billedannelse).
3. Autofokus (korreksjon for ukompensert bevegelsesfeil).

Videre i dette kapittelet gis en innføring i teknikk og virkemåte på hvordan SAS-operasjon er tenkt på FFIs AUV HUGIN.

2.1 Multi-element mottaker

En teknikk for å omgå problemet med aperture undersampling er å bruke multiple mottakere langs kjøreretning (5) (6). Dette er ikke noen ny teknikk (7), og er anerkjent som den beste metoden for å undertrykke sideløber/gitterløber (8). Dette er ekvivalent med periodisk fortynnede array, også kalt Vernier-array (9).

Anta en mottaker bestående av N elementer med utstrekning d , på en total lengde $L = Nd$, som skissert i Figur 2-2. Denne bistatiske geometrien kan erstattes av en "fasesenterantenne" gitt av middelposisjon til hvert sender-mottaker element. Den tilsvarende fasesenterantennen har da utstrekning $L/2$, hvor hvert element er adskilt med $d/2$.



Figur 2-2 Multielement mottaker

For at fasesenterapproximasjonen skal være gyldig, må alle spredere i samme avstand interferere likt (12). Sagt med andre ord, veilengden fra sender via reflektor til mottaker må avvike lite fra to ganger avstand mellom fasesenteret og reflektor. Dette tilsvarer følgende krav

$$\frac{\Delta^2}{4\lambda}(1 - \cos^2 \beta/2) \ll r \quad (2.1)$$

der Δ er avstand mellom sender og mottaker, β er asimut beambredde og r er avstand fra fasesenter til mottaker. For 60° beambredde og 100 kHz frekvens blir dette $\Delta^2/0.24 \ll r$. For $L = 1.5$ m, og senderen plassert i enden av mottakerarrayet som i Figur 2-2, får vi maksimal

$\Delta = L = 1.5$ m, og kravet at fasesenterapproximasjonen holder dersom $r \gg 9.4$ m, noe som kan bryte med SAS-operasjon på kort avstand. Dersom senderen plasseres midt på mottakerarrayet, blir kravet $r \gg 2.3$ m, som mest sannsynlig er oppfylt for all type operasjon.

Fasesenterapproximasjonen er bare relevant for mikronavigasjon (se neste delkapittel) og rask SAS-prosessering av typen Chirp Scaling eller bølgetallsmigrasjon (se delkapittel 2.5). For SAS beamforming med Time Domain Correlation (TDC), må avstands- og vinkel-avhengig tidsforsinkelse beregnes fra hvert element til hver posisjon, og det vil da ikke være noe ekstra beregningsbyrde å bruke full bistatisk geometri.

Den maksimale distanse AUVen kan tilbakelegge mellom hvert ping blir da $L/2$, eller tilsvarende, maksimal hastighet blir

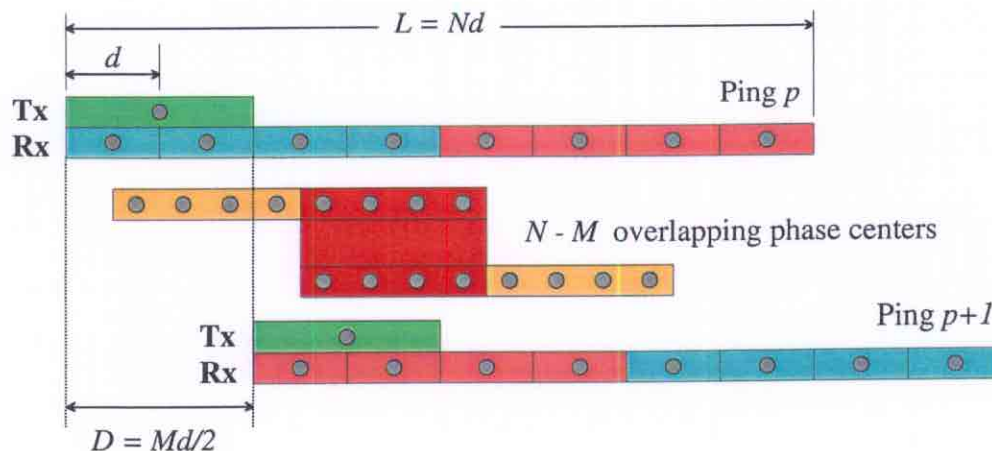
$$v_{\max} = \frac{L/2}{PRI} \quad (2.2)$$

der pulsrepetisjonsintervallet (PRI) er relatert til sporbredde (swath) i det akustiske planet, eller slant-range (se Figur 2-1)

$$PRI = \frac{2 \times swath}{c}, \quad swath = R_{\max} - R_{\min} \quad (2.3)$$

og c er fasehastigheten (tilnærmet lik 1500 m/s). Dersom samtidig sending og mottaking ikke tillates, må $swath = R_{\max}$ benyttes. Lengde på mottaker i kjøreretning, hastighet og sporbredde er relatert gjennom disse ligningene alene. Se kapittel 5 for eksempler på mulige konfigurasjoner for fast lengde på mottakeren. Oppløsning er relatert til båndbredde og strålebredde for hvert element (se kapittel 4).

2.2 Displaced Phase Center Antenna (DPCA)



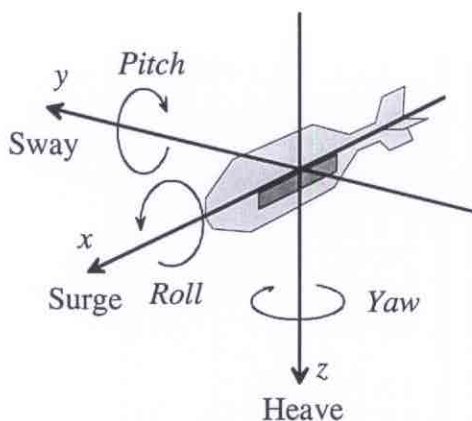
Figur 2-3 DPCA prinsipp

Dersom plattformen forflytter seg $D = Md/2$ fra ping til ping, der $M < N$, vil det være $N-M$ overlappende fasesentere, som skissert i Figur 2-3. For hvert ping par representerer disse over-

lappende fasesentere uavhengige målinger i samme posisjon. Ved å krysskorrelere i to dimensjoner (tid og posisjon) kan følgende relative bevegelse fra ping til ping estimeres (10) (11):

- Sideveis forflytning (sway) (se Figur 2-4) i slant-range planet på basis av midlere tidsforsinkelse over alle overlappende fasesentere.
- Rotasjon (yaw) i slant-range planet på basis av forskjellen mellom tidsforsinkelse over alle overlappende fasesentere.
- Forflytning i kjøreretning (surge).

De estimerte bevegelsene kan da brukes til beregning av trajektorie langs en syntetisk aperture.



Figur 2-4 Posisjon og orientering for AUV bevegelse

Displaced Phase Center (DPC) ble først lansert av R.S. Raven i 1978 (13), og eksperimentelt verifisert av R. W. Sheriff i 1992 (14). I dag blir denne teknikken benyttet under forskjellige navn av forskjellige miljøer: DPCA (10), Ping to Ping Cross Correlation (P^2C^2) (15), Redundant Phase Center (RPC) (16). DPCA teknikken er en form for Space-Time Adaptive Processing (STAP) (17) som også benyttes i radaranvendelser, men da til å skille bevegende mål på bakken fra bakken selv, også kalt GMTI (Ground Moving Target Indicator), og ikke til bevegelseskompensasjon (42). DPCA har også fellestrekk med along-track Interferometri (interferometri basert på flere pass i samme trajektorie) (18).

Nøyaktigheten til DPCA estimert sway, surge og yaw fra ping til ping er en funksjon av:

- Antall overlappende fasesentere.
- Reverberasjon til støynivå (metoden baserer seg på ping til ping korrelasjon av bunnekk).
- Tid-båndbredde produktet.
- DPCA yaw estimat er i tillegg en funksjon av utstrekningen av de overlappende fasesentere (eller vinkelopløsning).

Større overlappfaktor $\alpha = L/2D$ gir bedre nøyaktighet, men også lavere plattformhastighet

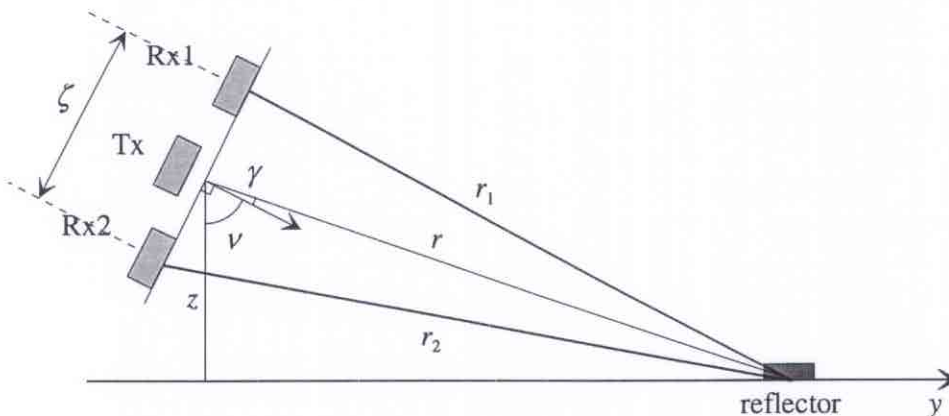
$$v = \frac{L/2}{PRI} \frac{1}{\alpha} \quad (2.4)$$

Den totale feil i den estimerte trajektorien over den syntetiske aperturen er den akkumulerte feil over alle DPCA estimater (ping par) som benyttes. Større overlappfaktor gir ikke nødvendigvis mindre feil i den totale trajektorien. Bellettini og Pinto (12) har beregnet den optimale overlappfaktor for DPCA navigasjon alene og funnet at $\alpha = 4$ er optimalt for yaw-estimat og $\alpha = 2$ er optimalt for sway-estimat.

Den teoretiske nøyaktigheten av DPCA sway estimat kan beregnes (10) (11), og er ekstremt høy for et typisk SAS-system. Dersom sonaren er kalibrert (dvs den elektriske gangvei, og fysisk posisjon for sender og alle mottakere er kjent) med tilstrekkelig nøyaktighet, er det mulig å oppnå teoretisk ytelse. Beregnet DPCA sway nøyaktighet på basis av målinger er av størrelsesorden 25-50 μm (19) (20). Dersom sonarsystemet ikke er kalibrert tilstrekkelig, vil restfeil føre til eksempelvis bias i yaw-estimatet (21).

Den begrensende faktor for SAS-prosessering på basis av DPCA mikronavigasjon alene er akkumulert yaw feil langs den syntetiske aperturen (12).

2.3 Interferometri



Figur 2-5 Geometri for interferometrisk måling av relativ høyde

Prinsippet for interferometri er å retningsbestemme reflektorer på basis av to eller flere mottakere langs en baselinje i vertikalplanet, som skissert i Figur 2-5. For bathymetrisk kartlegging antas bunnen å være en entydig flate, og på basis av vertikal retning til hver oppløsningscelle kan et topografisk kart av bunnen dannes. Dette er operasjonsmetoden til et multistråle-ekkolodd for skrått innfall (24) (28).

Retningen relativt til baselinjen γ er relatert til tidsdifferens τ av mottatt signal på de to mottakerne gjennom

$$\tau = \frac{r_2 - r_1}{c} \approx \frac{\zeta \sin \gamma}{c} \quad (2.5)$$

Relativ høyde mellom platform og bunn i avstand r blir da $z = r \sin(\gamma + \nu)$. Denne problemstillingen er ekvivalent til bestemmelse av tidsdifferens (Time Difference Of Arrival, TDOA), som er omfattende dekket i litteraturen (25). Teoretisk nøyaktighet (CRLB) for TDOA kan

beregnes og er et standard resultat fra litteraturen (se Quazi i (25)). Denne beregningen er ekvivalent til CRLB for DPCA (26) (27).

Inteferometrisk tidsforsinkelse kan estimeres i redusert oppløsning (kalt "grov interferometri" i denne rapporten) ved å krysskorrelere et gitt tidsintervall (vindu) fra de to mottakerne. Lengre korrelasjonsvindu gir bedre signal til støy forhold og derved bedre nøyaktighet i estimatet av høyde, men dårligere horisontal oppløsning ("grov" refereres til horisontal oppløsning, ikke vertikal nøyaktighet). Tidsvinduet må være lite nok slik at den tilsvarende delen av havbunnen oppfattes geometrisk likt av de to mottakerne, ellers oppstår baselinje dekorrelasjon (29). Estimat av tidsforsinkelse kan gis som (27) (30)

$$\hat{\tau} = \frac{\phi}{2\pi f_c} + \frac{m}{f_c} \quad (2.6)$$

der f_c er senterfrekvens for det utsendte signal, og m er ambiguitetsnummer, som bestemmes ut fra posisjon til maksimum av magnituden til krysskorrelasjonen. ϕ er fase i maksimumspunktet av krysskorrelasjonen. Antall ambiguiteter er bestemt av båndbredde til senterfrekvens forholdet (Q-faktor). Feil estimert ambiguitetsnummer m er beskrevet som "the sliding effect" i (28). Operasjonsteknikken for et multistråle-ekkolodd (som har fylt hele baselinjen med mottakere), er å danne to parallelle sideseende stråler med forskjellig senterpunkt for å fjerne (eller redusere) ambiguitetene.

Et interessant design-spørsmål er om det finnes en optimal avstand ζ mellom mottakerne. Simuleringer (26) viser at for grov interferometri finnes det en optimal avstand. Den er imidlertid en funksjon av signal til støy, båndbredde, korrelasjonsvindu og avstand. Større SNR tillater større avstand helt til baselinje dekorrelasjon gjør seg gjeldende.

I full oppløsning interferometri estimeres høyde i hver oppløsningscelle ved hjelp av å "unwrap" faseforskjellen mellom de to mottatte signalene for så å relatere fase til elevasjon. Denne teknikken er svært utsatt for støy, men i utgangspunktet enkel for 1D data. 2D fase unwrapping er et mere komplekst problem og er omfattende behandlet i litteraturen (18). Her benyttes også krysskorrelasjon (ekvivalent til grov interferometri) for å koreregistrere de to komplekse bildene fra øvre og nedre mottaker før fasen unwrappes (32).

Interferometrisk syntetisk aperture radar (InSAR) er en veletablert teknikk for fly- og satellitt-bårne radarsystemer (31). Den tilsvarende sonarteknikken interferometrisk SAS (InSAS) er fortsatt et aktivt forskningsfelt (8) (15).

Både grov interferometri og full interferometri kan anvendes på alle typer sonarbilder:

- Sidescan bilder: hvert ping danner en linje ved faset array bilde kun broadside.
- Faset array bilder: hvert ping danner et 2D bilde ved å fase mottakeren i alle retninger.
- SAS bilder: Et 2D fokusert bilde dannes av alle ping langs en trajektorie.

Pinto (27) demonstrerer grov interferometri både på faset array bilder og SAS bilder med forskjellig størrelse på tidsvinduet.

2.4 Integrasjon av treghetsnavigasjon og DPCA mikronavigasjon

Navigasjonssystemet er en essensiell del av alle AUVer. I HUGIN I er det et aided treghetsnavigasjonssystem (INS), bestående av en Honeywell HG9848A som er en 1 nmi/time klasse IMU (Inertial Measurement Unit) og en PC for beregning av navigasjonsligningene og Kalmanfilterligningene. Systemet er basert på et error-state Extended Kalman Filter (EKF) (36), med Doppler log (DVL), trykkmåler, kompass og eventuelt posisjonsestimater fra moderskip (DGPS+HiPAP) som aiding sensorer (33). Dette er skissert med grønn farge i Figur 2-6. Disse aiding sensorer er nødvendig for å holde feilen bundet. En INS alene vil ha ubegrenset feil.

Estimat av plattform-posisjon og -orientering på basis av DPCA mikronavigasjon alene, er begrenset av DPCA yaw-estimat (se delkapittel 2.2). HUGINs navigasjonssystem har potensiale til flere størrelsesordener mere nøyaktig yaw-estimat enn DPCA mikronavigasjon kan gi. For å kunne relatere orienteringen til navigasjonssystemet med slant-range (det akustiske planet, se Figur 2-1), må imidlertid retningen til slant-range estimeres for hver avstand (range). Dette kan gjøres med grov interferometri anvendt på broadside faset array data for hvert ping. Denne erkjennelsen er bakgrunnen til gjennomføringen av InSAS 2000, der et interferometrisk SAS-system og et treghetsnavigasjonssystem ble kjørt i kontrollerte omgivelser på en skinne (34) (35).

DPCA gir et ping til ping estimat av relativ forflytning på basis av krysskorrelasjon, ekvivalent til en Correlation Velocity Log (CVL). For sway og surge estimat er nøyaktigheten potensielt svært høy, dersom estimat av slant-range planet er godt. Dette gjør DPCA sway og surge til attraktive aiding sensorer til treghetsnavigasjonssystemet.

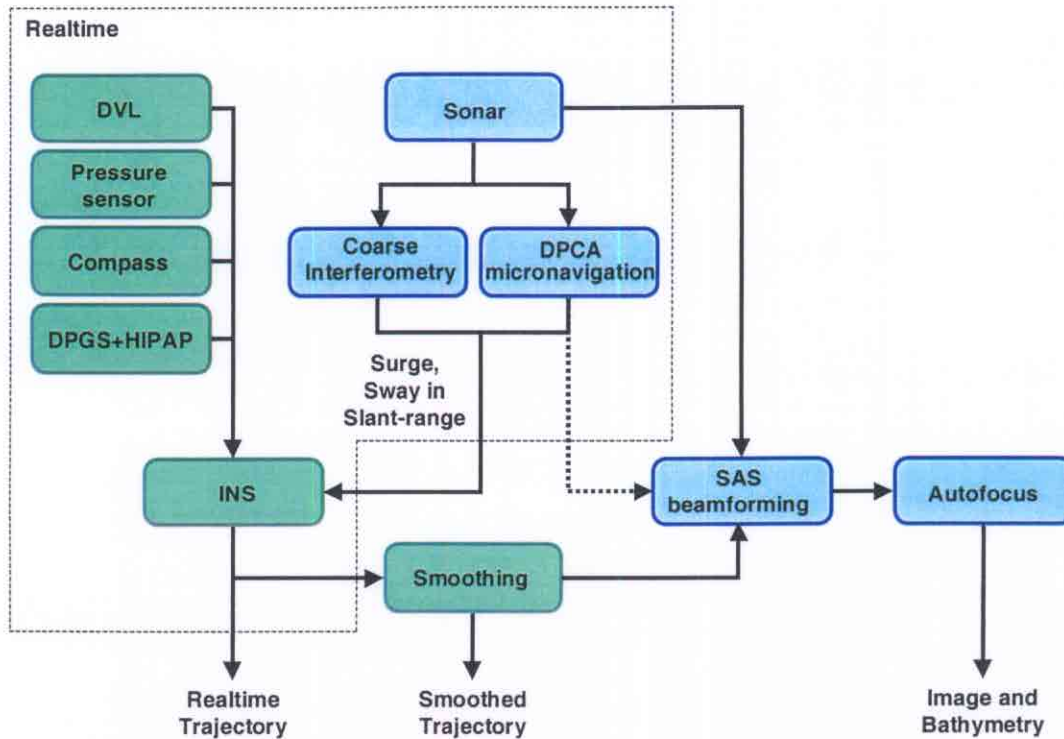
For at DPCA skal kunne brukes effektivt som aiding sensor, må nøyaktigheten, eller mere presist feilen, både hvit-støy og farget støy (ukorrelert og korrelert feil) oppgis til EKF (36), noe som ikke nødvendigvis er trivielt å estimere. Eksempelvis vil DPCA sway nøyaktighet være koblet til heave og pitch (se Figur 2-4). I tillegg kan også fluktuasjoner i propagasjonsmediet (i stedet for AUV forflytning) gi utslag på DPCA mikronavigasjon. Dette skal kompenseres for i SAS beamforming, men ikke tas med i beregningene av AUV posisjon og orientering. Dette er et aktivt forskningsområde der FFI samarbeider med Pintos gruppe på SACLANTCEN (37).

Med referanse til Figur 2-6 foreslår vi integrasjon av INS og DPCA mikronavigasjon for SAS-prosessering og AUV navigasjon på følgende måte:

DPCA som aiding sensor:

- Grov interferometrisk estimat av slant-range planet til hvert valgte intervall på basis av broadside faset array fra hvert ping.
- DPCA sway estimat for hvert range intervall (se appendiks i (38) for detaljer om DPCA beregning). Dette er et ping til ping estimat, og tidspunktet (som skal brukes i EKF) kan interpoleres for å få sammenfallende tid med grov interferometri.
- DPCA surge på basis av alle slant-range plan.

Dette gir en sway-måling for hver slant-range retning i tillegg til en måling av surge for hvert ping. Dette kan enten behandles som en aiding sensor for hvert slant-range plan, eller så kan hastighet i x,y,z (relativt til AUV) med tilhørende nøyaktighet beregnes, på lik linje med DVL.



Figur 2-6 Integrasjon av DPCA mikronavigasjon i treghetsnavigasjon

Mulige problemer er feil av typen kalibrasjonsfeil eller refraksjonseffekter i vannmassene. Dette er feil som er korrelert for alle slant-range. DPCA estimert hastighet er allerede implementert som aiding sensor i NavLab og testet på InSAS 2000 data.

Aided INS navigasjon:

- DPCA og grov interferometri beregnes i sanntid, eventuelt i redusert oppløsning dersom prosessorkraften er for liten, på BSP (se neste kapittel).
- DVL, trykk, kompass og DPCA (evt også posisjon DGPS+HiPAP) som aiding sensorer.
- Sanntids navigasjonsprosessering (NavP).
- Postprosessert KF smoothed trajektorie (39). Smoothing reduserer feilen og fjerner høyfrekvent støy på posisjonsestimaten (som kan være ufordelaktig for SAS stråleforming).

Syntetisk aperture navigasjon:

Navigasjon for SAS stråleforming kan gjøres på flere måter:

1. DPCA surge og sway i slant-range samt aided INS yaw projisert i slant-range for å beregne posisjon og orientering til sonar for hvert ping. Hvert slant-range intervall behandles uavhengig som for DPCA navigasjon alene (38). Dette løser problemet med begrenset syntetisk aperture (og derved asimetrisert oppløsning) på grunn av DPCA yaw nøyaktighet. Det reduserer også kravet om stor overlappfaktor α . Denne teknikken er allerede demonstrert på InSAS 2000 data, og har økt sidescan til SAS Q-faktor til 40 (ref samtaler med Pinto).
2. Smoothed KF posisjon og orientering for hvert ping. DPCA brukes som aiding sensor. Dette krever at fluktuasjoner i propagasjonsmediet er neglisjerbare og at treghetsnavigasjonssystemet har god nok nøyaktighet. Dette har tidligere vært antatt umulig (14), men da uten DPCA som aiding sensor. Denne metoden har potensiale til å gi et bedre estimat av far-

kostens faktiske bevegelse siden DPCA vil redusere den kvadratiske driften i INS-systemet, mens INS reduserer den integrerte feilen i DPCA sway (random walk).

Man kan også tenke seg en sammensmelting av de to nevnte teknikkene ved at aided INS danner basis for posisjon og orientering (metode 2) for hvert ping. I tillegg gjøres en kompensasjon for hurtige variasjoner på basis av DPCA sway, for å kompensere for fluktuasjoner og sideveis forflytning i sub-bølgelengde skala. På den måten reduseres den akkumulerte feilen (stor-skala feil langs den syntetiske aperturen), samt at nøyaktigheten til DPCA bibeholdes (fin-skala feil).

Hvordan mikronavigasjon (DPCA) og makronavigasjon (aided INS) mest effektivt kan kombineres er fortsatt uklart. Kravet for at SAS beamforming skal produsere et fokusert bilde er at relativ posisjonsnøyaktighet innenfor en syntetisk aperture er bedre enn 1/16-bølgelengde. Dette tilsvarer bedre enn 1 mm relativ posisjonsnøyaktighet innenfor 35 m for et typisk scenario for SENSOTEKs SAS-system (se de neste kapitlene). Dette er umulig å oppnå for aided INS alene, og har vært svært vanskelig å oppnå for DPCA navigasjon (spesielt lengden på den syntetiske aperture). Eksempelvis benytter Jim Christoff's gruppe på CSS (Coastal Systems Station, Panama City, Florida) en postprosesseringsteknikk for å redusere akkumulert feil fra DPCA yaw estimat, basert på iterativ korrigerende av trajektorie, SAS beamforming og estimering av SAS bilde-utsmøring (20).

2.5 SAS-prosessering

2.5.1 Beamforming

SAS beamforming består av å sette sammen data fra alle mottakere fra alle ping langs en syntetisk aperture, til et fokusert bilde. Dette kan gjøres på flere måter. Peter Gough's gruppe fra University of Canterbury på New Zealand gir en god oversikt i (5), (22) og (40). Se også Franceschetti og Lanari (18), Soumekh (23) og Carrara et al (44). Her tar vi for oss 3 aktuelle metoder:

1. Time Domain Correlation (TDC)

TDC er basert på tilbakepropagasjon av det pulskopprimerte signal fra hver mottaker (i hvert ping) til hver eneste oppløsningscelle i scenen som skal avbildes. Denne teknikken kalles også tilbakepropagasjon (backprojection), eksakt metode, delay-and-sum og er også ekvivalent til Kirchhoff-migrasjon i seismikk (41). TDC er den eneste beamformingteknikken som håndterer vilkårlig (men kjent) posisjon langs den syntetiske aperture. Alle andre teknikker er basert på antagelser, f.eks. at den syntetiske aperture er lineær, og at samplingen er ekvidistant. Uheldigvis er også TDC den mest beregningsintensive, noe som gjør den lite egnet for sanntidsprosessering. Det finnes imidlertid en rask utgave (fast backprojection) som anvendes for flybåren lavfrekvent bredbånds-SAR (42). TDC anvendes av en rekke miljøer som driver prototyping av SAS-systemer, deriblant Pinto's gruppe på SLC.

2. Bølgetallsalgoritmen

Bølgetallsalgoritmen er en rask og elegant fokuseringsteknikk basert på en FFT langs kjøreretning og en ikke-lineær transform i bølgetallsdomene. Metoden krever imidlertid interpolasjon av data i bølgetallsdomene fra polare koordinater til kartesiske koordinater. Denne teknikken kalles også Range Migration Algorithm (RMA) og Stolt migrasjon i

seismikken (hvor den har sitt opphav) (54). Teknikken anvendes blant annet av DTI i prosesseringen av Raytheon/DARPA SAS data (16). Bølgetallsalgoritmen har problemet med at samplingen må være ekvidistant i kjøreretning. Dette problemet blir ytterligere komplisert for multi-element mottakere. Dette løser DTI ved å resample/interpolere data i en preprosessering før fokusering (43). I tillegg antas posisjonsavviket på tvers av kjøreretning å være lite, både i slant-range planet og normalt på slant-range planet (out-of-plane) (45). Det finnes ingen måte å korrigere for stort avvik fra lineær bevegelse hverken for bølgetallsalgoritmen eller Chirp Scaling algoritmen. Da må TDC som er en full tredimensjonal teknikk benyttes.

3. Chirp Scaling

Chirp Scaling algoritmen er en forbedret bølgetallsmetode uten interpolasjon som benytter at den utsendte puls er en chirp (Lineær Frekvens Modulasjon, LFM). Navnet kommer av at den benytter scaling/shifting egenskapene til chirp-er. Denne teknikken er den mest populære i moderne SAR-systemer. David Hawkins lanserer sin egen Accelerated Chirp-Scaling (ACS) (22) som er en mere beregningseffektiv utgave. CSS benytter ACS i sanntidsprosesseringen på sitt LF/HF SAS-system (20). Chirp scaling algoritmen har samme problem som RMA med at along-track samplingen må være ekvidistant. Dette løser CSS ved dynamisk justering av sende-tidspunkt på basis av estimat av plattform-hastighet fra en DVL (ikke konstant PRI men konstant avstand mellom hvert ping).

TDC og Chirp Scaling representerer på en måte ytterpunktene av syntetisk aperture prosessering. TDC er enklest å implementere og tregest å kjøre. Chirp Scaling er mest komplisert å implementere, og raskest å kjøre.

2.5.2 Autofokus

Autofokus er fellesnevner for teknikker som prøver å fjerne ukompensert bevegelsesfeil på basis av det syntetisk aperture beamformede bildet. Merk at autofokus også brukes i litteraturen på datadrevet (akustisk) navigasjon, noe som også inkluderer DPCA. I denne rapporten skiller vi mellom bevegelseskompensasjon (inneholdt DPCA) og autofokus.

Det finnes en rekke forskjellige autofokusteknikker fra SAR-litteraturen (44). En teknikk som er prøvd for SAS-systemer er Phase Gradient Autofocus (PGA). Dette er imidlertid en teknikk som er utviklet for spot-mode SAR-systemer, med smal beambredde og smal båndbredde (45) (22), der range migrasjon antas å være mindre enn en oppløsningscelle.

Det finnes et antall avarter av PGA som er tilpasset SAS-systemer (spesielt for bred stråle). Phase Curvature Autofocus (PCA) for strip-map syntetisk aperture operasjon begrenser seg til smalbåndssystemer (høy Q-faktor), men feiler for bredbåndssystemer (22) (43). Phase Matching Autofocus (PMA) er en teknikk fra Peter Gough's gruppe som prøver å løse problemene med PCA (46). DTI har også sin egen PGA som er modifisert for strip-map operasjon (47). Et annet alternativ som er lansert er å dele opp SAS-scenen i biter (striper), og anvende PGA på hver bit, også kalt Mosaic PGA (MPGA) (48). Ved å anvende de overnevnte varianter av PGA blir SAS-bildet forbedret, og det virker som de amerikanske miljøene gjennomført bruker PGA.

2.6 SAS-operasjon

Det finnes flere operasjonelle moder for SAR/SAS-systemer. Vi lister kun de vi ønsker å benytte på SENSOTEK SAS-systemet her. I kapittel 6 skisserer vi alternative operasjonsmoder. For en god oversikt over forskjellige operasjonsmoder, se (22).

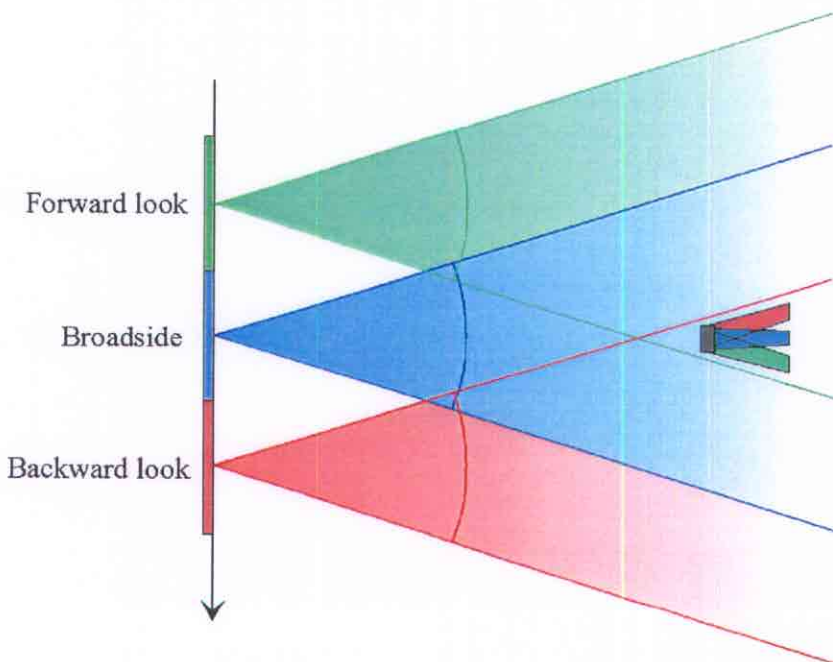
En mye brukt teknikk for flybårne SAR-systemer er spot-mode (eller spotlight mode), der sender/mottaker styres i asimut mot en flekk underveis langs den syntetiske aperture (44) (45). Selv om dette enkelt kan implementeres på SENSOTEK SAS-systemet, siden designet inneholder en todimensjonal faset array sender, (se neste kapittel), anses dette ikke som interessant, i alle fall i nåværende tenkte bruk.

2.6.1 Strip-map mode

Strip-map mode består av at AUV-en kjører langs en trajektorie, og SAS-systemet kartlegger en stripe ved siden av hele trajektorien, som skissert i Figur 2-1. Dette er den tradisjonelle måten SAS blir brukt på i alle kjente SAS-systemer fra litteraturen. Dersom TDC benyttes til bilde-dannelse, kan lengden på anvendt syntetisk aperture justeres adaptivt som funksjon av avstand for å gi maksimal asimut oppløsning i hele bildet. En systemparameter som må bestemmes, er maksimal asimut oppløsning som er bestemt av horisontal strålebredde for senderen. Denne bør være smalest mulig, for å maksimalisere sender-gain.

2.6.2 Multi-look eller multi-aspekt mode

I multi-look mode eller multi-aspekt mode deles den totale mulige syntetiske aperturen opp i deler som skissert i Figur 2-7. Den horisontale strålebredden overlapper for alle deler, slik at et og samme område på scenen blir belyst av hver av delene. For N deler, eller N "look" ($N = 3$ i figuren), kan N uavhengige fokuserte bilder dannes, hver med $1/N$ av maksimal asimut oppløsning. Disse N uavhengige bildene kan kombineres på forskjellige måter:



Figur 2-7 Multi-look mode

- **Speckle reduksjon**

Man kan midle alle bildene inkoherent for å redusere speckle eller sterke refleksjoner fra koherent summasjon av mange reflektorer innen en oppløsningscelle. Speckle er et stort problem i SAR bilder (45), og multi-look prosessering er en tradisjonell teknikk for å redusere dette problemet. Multi-look for speckle reduksjon er også prøvd på CSS' LFSAS (20). Deres konklusjon er at speckle reduksjon er svært ønskelig spesielt for objekt deteksjon og klassifisering av typen minejakt. Sterkt tilstedeværende speckle reduserer effektiviteten til en operatør eller automatiske deteksjons- og klassifikasjons-algoritmer. En alternativ metode for å redusere støy i syntetisk aperture bilder, er å fokusere bildet i full oppløsning for så å glatte bildet (med et lavpass filter). Dette krever imidlertid at bevegelskompensasjon er god nok til at man klarer å oppnå et fokusert bilde på basis av full syntetisk aperture.

- **Skygge**

Ved å belyse et objekt på havbunnen fra forskjellige aspektvinkler, vil objektet kaste forskjellige skygge i de respektive retningene som vist i Figur 2-7 (21). Disse forskjellige skyggene kan da brukes til å gi et estimat av tredimensjonal form på objektet. Multi-aspekt SAS anses som viktig i deteksjon og klassifisering av objekter på havbunnen. Dersom systemet har bathymetrisk kapasitet, som et interferometrisk SAS-system eller et multistråle ekkolodd, faller delvis poenget bort med bruk av skygge for 3D bildedannelse av objekter. Skygge er imidlertid viktig (uavhengig av multiple aspektvinkler) for deteksjon av objekter.

- **Interferometri**

Flere uavhengige koherente bilder av samme scene kan benyttes for å redusere antall ambiguiteter i fase unwrapping av full oppløsning interferometrisk SAS. Dette er ekvivalent til flere pass over samme scene og along-track interferometri (32).

- **Bevegelskompensasjon**

Første steg i multi-look prosessering er koregistrering av alle look. Det vil si at relativ posisjon og orientering mellom alle de fokuserte bildene estimeres, typisk ved hjelp av krysskorrelasjoner (32). Dette er generelt komplisert for multi-aspekt SAS på grunn av ukompensert bevegelsesfeil (20). Imidlertid gir dette en mulighet for å estimere relativ posisjonsfeil mellom de forskjellige syntetiske aperturene, som igjen kan brukes i navigasjon.

3 DESIGN AV SENSOTEK SAS

I dette kapitlet skisserer vi arbeidsgruppens forslag til design av SENSOTEK SAS-system. Ytelse i form av oppløsning tas opp i neste kapittel, og ytelse i form av dekningsgrad beskrives i kapittel 5. Følsomhet, deteksjonsevne og navigasjonsevne tas ikke opp i denne rapporten.

3.1 Frekvensområde

Designfrekvens er $f = 100$ kHz. Dette tilsvarer en bølgelengde på $\lambda = 1.5$ cm. Den totale båndbredden til transducerne er uklar. To mulige valg er:

- 70 - 100 kHz bånd er garantert. Dette gir følgende parametre:

$f_c = 85$ kHz	senterfrekvens
$B = 30$ kHz	båndbredde
$Q = 2.83$	Q-faktor, $Q = f/B$
$\lambda = 1.76$ cm	bølgelengde for senterfrekvens
$\lambda = 1.50$ cm	bølgelengde for maksimalfrekvens

- 60 - 110 kHz bånd kan være mulig å få til. Dette gir følgende parametre:

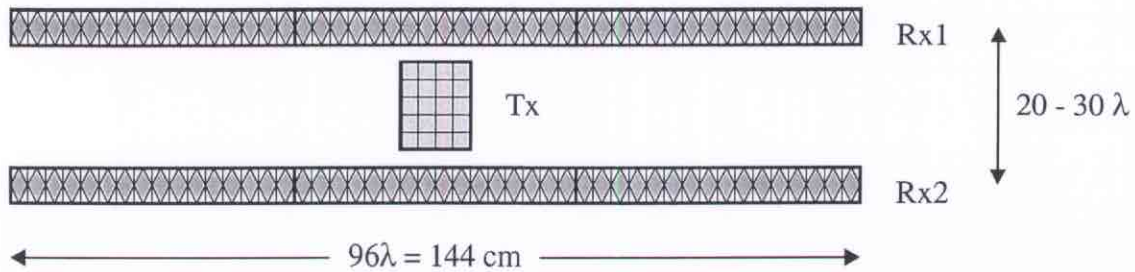
$f_c = 85$ kHz	senterfrekvens
$B = 50$ kHz	båndbredde
$Q = 1.7$	Q-faktor, $Q = f/B$
$\lambda = 1.76$ cm	bølgelengde for senterfrekvens
$\lambda = 1.36$ cm	bølgelengde for maksimalfrekvens

Absorpsjon av akustiske bølger i havet er svært frekvensavhengig. Absorpsjon gitt i dB / km for 200 m dyp, 35 ppt saltholdighet og pH = 8 er (beregnet fra formler hentet fra (53)):

T [deg C]	60 kHz	85 kHz	110 kHz	200 kHz
4	17.8	23.9	28.6	43.4
10	19.1	28.1	35.3	53.0
15	18.6	29.9	39.7	63.8

Merk at 200 kHz er kun tatt med for sammenligning. Vi ser at det er betydelig forskjell på øvre og nedre grense for mulige utsendte frekvenser.

3.2 Transducere



Figur 3-1 Sender og mottaker konfigurasjon

Sender og mottaker er basert på nye bredbåndskeramiske transducere. Hver av elementene kan i prinsippet både sende og motta, men vi har valgt å separere sender fra mottaker for å forenkle elektronikken. Figur 3-1 viser en oversikt over sender og mottakerarray og plassert i forhold til hverandre. Rutemønsteret er kun ment som en skisse og skal ikke tas bokstavelig.

Sender

- Senderenheten består av et todimensjonalt array som har følgende egenskaper:
- Fasestyling i elevasjon. Strålen må kunne styres avhengig av farkostens høyde relativt til sonar swath.
- Valgfri strålebredde i elevasjon fra $5^\circ - 40^\circ$.
- Valgfri strålebredde i asimut fra $15^\circ - 60^\circ$.
- Defokusering både i asimut og elevasjon for å oppnå bred beam og høy utsendt effekt.

Antall elementer i asimut og elevasjon er ikke bestemt ennå, og er heller ikke kritisk. En mulig arraystørrelse er:

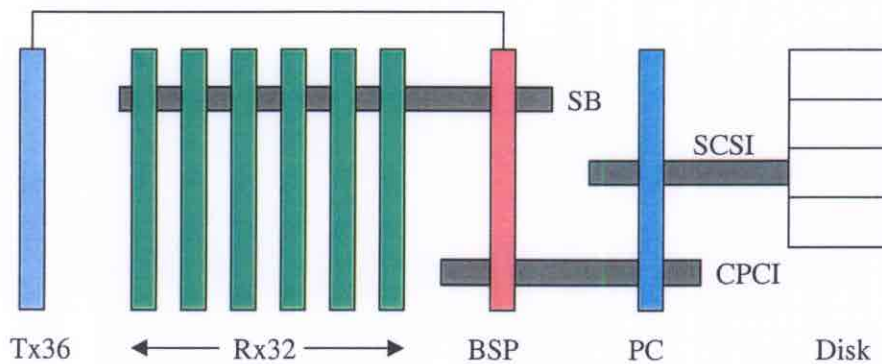
- 4.5λ horisontalt, tilsvarende 12.7° maksimal vinkelopløsning.
- 16λ vertikalt, tilsvarende 4° maksimal vinkelopløsning.

Mottaker

Mottakeren består av følgende (se Figur 3-1):

- To fullengde Rx array i kjøreretning med lengde $96\lambda = 144$ cm. Lengden er valgt ut fra maksimal tillatt lengde på HUGIN.
- Vertikal avstand mellom mottakerarrayene $20\lambda - 30\lambda$ (maksimum tillatt på HUGIN).
- 96 elementer pr mottakerarray, eller λ horisontal avstand mellom elementene.
- Horisontal beambredde: 60° , tilsvarende λ horisontal utstrekning av elementene.
- Vertikal beambredde: ca 40° , tilsvarende $3/2\lambda$ vertikal utstrekning av elementene.
- Vertikal tiltvinkel på hele systemet på ca 25° , slik at åpningsvinkelen for mottakeren er fra $5^\circ - 45^\circ$ relativt til horisontalplanet (se kapittel 5).

3.3 Elektronikk



Figur 3-2 Elektronikk

Figur 3-2 viser en oversikt over elektronikken, bestående av følgende:

- 6 Rx32 mottaker kort til sammen for begge mottakerarray.
- 1 Tx36 sender kort for fasestyrt sender. Flere kort kan benyttes dersom vi har behov for flere kanaler for å oppnå ønsket fleksibilitet i fasestyring, eller mere utsendt effekt. Hver kanal har kapasitet til å levere 10 W.
- BSP med 9 c67-brikker for sanntidsprosessering. VI tenker oss faset array prosessering, grov interferometri og DPCA surge og sway estimat for sanntidsnavigasjon.
- PC kort.
- Disk array for lagring av data.

Effektforbruket er 0.4 W pr mottaker, til sammen 80 W for 192 kanaler. BSP kortet bruker mellom 50 og 100 W. Senderen har lite energiforbruk i forhold til mottaker og BSP på grunn av kort pulslengde i forhold til PRI (duty-cycle).

4 OPPLØSNING

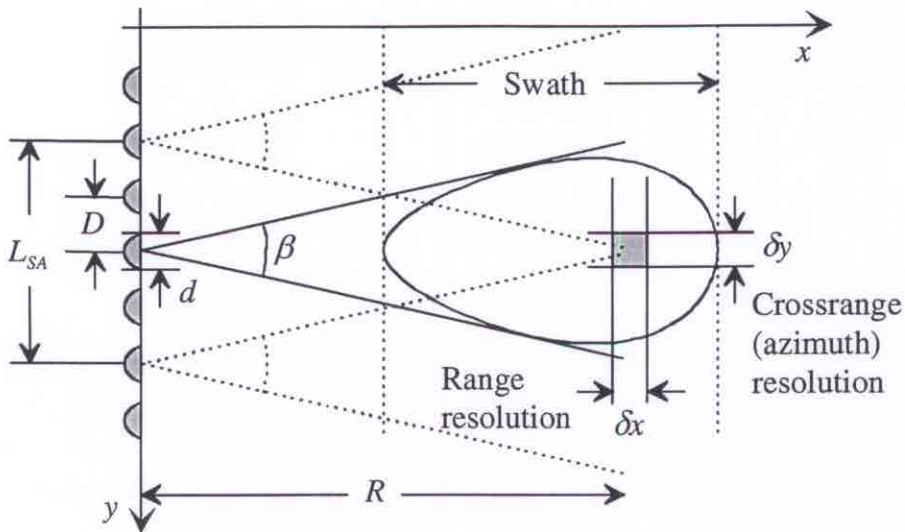
Teoretisk oppløsning til et SAS-system er gitt av båndbredde og sender/mottaker utstrekning i kjøreretning. Figur 4-1 illustrerer avstandsoppløsning δx og asimut oppløsning δy i det akustiske planet (slant-range). For beregning av avstandsoppløsning på havbunnen, må innfallsvinkelen tas med. Den maksimale teoretiske oppløsningen er gitt som

$$\delta x = \frac{c}{2B}, \quad \delta y = \frac{d}{2} \quad (4.1)$$

der d er lengden på et mottakerelement i kjøreretning. Dersom senderstrålen i asimut β er smalere enn åpningvinkelen til et mottakerelement, vil maksimal asimut oppløsning være gitt som

$$\delta y = \frac{\lambda}{2\beta}. \quad (4.2)$$

Merk at β nå tilsvarer en sender med utstrekning $d_x = \lambda / \beta$ som er mindre enn den fysiske utstrekningen, siden vi defokuserer senderen.



Figur 4-1 avstand og asimut oppløsning

4.1 Teoretisk oppløsning

Den teoretiske oppløsning δx , δy tilsvarer maksimal oppløsning uten anvendelse av tapering (13 dB til første sidelobe). For undertrykking av sidelobes må signalene taperes både i range og asimut. Dette gir oppløsning ~ 1.3 oppgitt verdi. Teoretisk oppløsning er (oppgitt i ca verdier):

$$\begin{aligned}
 d &= \lambda &= 1.5 \text{ cm} \\
 \beta &= \lambda / d = 1 &= 60^\circ \\
 L_{SA} &= R / 0.866 & \text{(maksimal syntetisk Aperture lengde)} \\
 \delta y &= d / 2 &= 0.75 \text{ cm (full SA)} \\
 \delta y &= d &= 1.5 \text{ cm (dtx = 2d, halv SA)} \\
 \delta x &= &2.5 \text{ cm for } B = 30 \text{ kHz} \\
 \delta x &= &1.5 \text{ cm for } B = 50 \text{ kHz}
 \end{aligned}$$

4.2 Praktisk asimut oppløsning

Syntetisk aperture lengde L_{SA} er gitt ut i fra minste asimut åpningsvinkel og avstand

$$L_{SA} = 2R \tan(\beta / 2) \quad (4.3)$$

Asimut oppløsning i avstand R er gitt ut i fra lengden på syntetisk aperture. For små vinkler er oppløsningen

$$\delta y' = \frac{\lambda R}{2L_{SA}} \quad (4.4)$$

Den praktisk oppnåelige lengde på L_{SA} er begrenset av bevegelseskompensasjon og mikronavigasjon, og er derfor ikke triviell å predikere. Her er noen eksempler for avstand $R = 100$ m:

β	δy [cm]	L_{SA} [m]	Q
10°	4.5	17	23
20°	2.3	35	47
30°	1.5	54	71
60°	0.8	115	154

Q er reell aperture til syntetisk aperture asimut oppløsning forbedringsfaktor gitt som $Q \approx 2R\beta/L$. Q er sidescan sonar til SAS forbedringsfaktor.

4.3 Datamengde

Samplingsfrekvens per mottaker for signalet mikset til basisbånd er oversamlingsfaktor x Nyquist frekvens (båndbredde x 2). Dette gir en datamengde per tid på samplingsfrekvens x 2 byte x antall mottakere.

Videre gis eksempler på 2 forskjellige båndbredder og 2 forskjellige oversamlingsfaktorer for 2 fullengde Rx arrays med 96 mottakere:

$B = 30$ kHz, ingen oversampling: 22 MB/s eller 77 GB / time.
 $B = 30$ kHz, 1.5 x oversampling: 33 MB/s eller 116 GB / time.
 $B = 50$ kHz, ingen oversampling: 37 MB/s eller 128 GB / time.
 $B = 50$ kHz, 1.5 x oversampling: 55 MB/s eller 193 GB / time.

5 DEKNINGSGRAD

Dekningsgraden er gitt av lengden av mottaker i kjøretretning L , farkostens hastighet v og overlappfaktor α (se kapittel 2). Fra ligning (2.3) og (2.4) kan vi enkelt beregne størrelsen på stripen (swath) i slant-range, ut i fra hastighet og lengde på mottaker

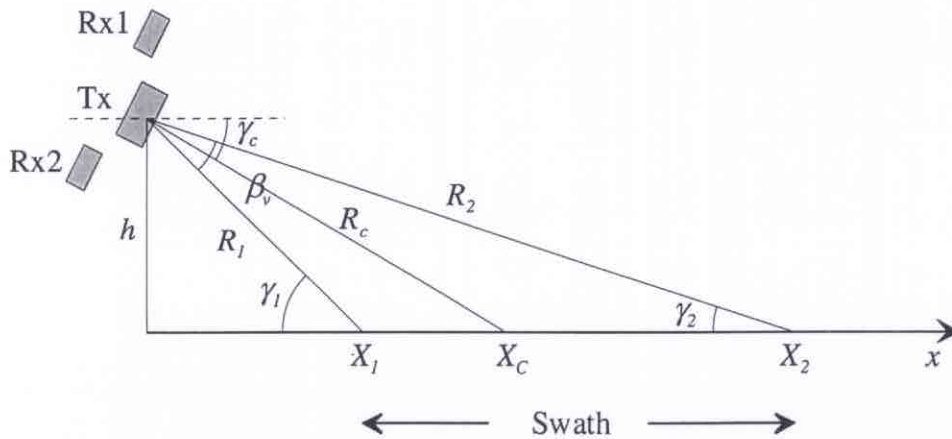
$$swath = \frac{Lc}{4\alpha v_{max}} = 375 \frac{L}{\alpha v_{max}} . \quad (5.1)$$

Arealdekning i slant-range er swath multiplisert med plattformhastighet

$$Arealdekning = swath \times v = 375 \frac{L}{\alpha} \left[m^2 / s \right] , \quad (5.2)$$

arealdekningen er uavhengig av hastighet. Typisk forventes det at maksimal projeksjon av slant-range til range gir evnen til å kartlegge fra 1/8 til maksimum avstand av swath (55). For mottaker lengde $L = 1.5$ m gir dette følgende areal dekningsrate på havbunnen

$$DR \approx 490 / \alpha \left[m^2 / s \right] . \quad (5.3)$$



Figur 5-1 Vertikal oversikt over slant-range (R) og range (X)

Figur 5-1 skisserer relasjon mellom det akustiske planet (slant-range, oppgitt som R), og avstand (range) på havbunnen (oppgitt som X). Videre gis tre konkrete eksempler på sporbredde i forhold til hastighet og vinkler for valgt lengde av mottaker $L = 1.5$ m. I alle eksemplene har vi antatt at multiple ping ikke kan være i vannet samtidig (ikke sending og mottak samtidig).

5.1 Case 1: Maksimal avstand $R_2 = 375$ m

Parameter	Verdi	Forklaring
R_2	= 375 m	Største avstand i det akustiske planet
h	= 50 m	Høyde
X_1	= 50 m	Minste avstand på bunnen
γ_1	= 45°	Største grazing vinkel (nærmest)
γ_2	= $\text{asin}(h/R_2) = 7.7^\circ$	Minste grazing vinkel (lengst unna)
X_2	= $R_2 \cos(\gamma_2) = 372$ m	Største avstand på bunnen
$X_2 - X_1$	= 322 m	Sporbredde (swath) på bunnen
$X_2 - X_1 - 2 X_1$	= 222 m	Sporbredde - blindsoner for tosidig system
β_v	= $\gamma_1 - \gamma_2 = 37.3^\circ$	Vertikal strålebredde
γ_c	= $(\gamma_1 + \gamma_2)/2 = 26.3^\circ$	Tiltvinkel
X_c	= $h / \tan(26.3) = 101$ m	Avstand til senter av strålen
PRI	= 0.5 s	Pulsrepetisjonsintervall
v_{max}	= 1.5 m/s	Maksimal hastighet ($\alpha = 1$)
v_{opt}	= 0.75 m/s	Optimal hastighet for DPCA ($\alpha = 2$)

Dette eksemplet representerer maksimal swath man kan oppnå med SENSOTEK SAS-systemet. Vi ser at swath = 322 m, som er meget akseptabelt. For overlappfaktor $\alpha = 2$, blir hastigheten imidlertid 0.75 m/s, som er for lavt. Studier antyder imidlertid at integrering av aided INS og DPCA fører til at overlappfaktor rundt $\alpha = 1.1 - 1.2$ kan være mulig (ref samtaler med Pinto). Hastigheten blir da rundt 1.25 m/s, noe som er i nærheten av nedre grense for normal AUV operasjon.

5.2 Case 2: Hastighet $v_{opt} = 2.0$ m/s

Parameter	Verdi	Forklaring
v_{opt} =	2 m/s	Hastighet for $\alpha = 2$
R_2 =	141 m	Største avstand i det akustiske planet
h =	30 m	Høyde
X_1 =	30 m	Minste avstand på bunnen
γ_1 =	45°	Største grazing vinkel (nærmest)
$\gamma_2 = \text{asin}(h/R_2)$ =	12.3°	Minste grazing vinkel (lengst unna)
$X_2 = R_2 \cos(\gamma_2)$ =	137 m	Største avstand på bunnen
$X_2 - X_1$ =	107 m	Sporbredde (swath) på bunnen
$X_2 - X_1 - 2 X_1$ =	46 m	Sporbredde - blindsoner for tosidig system
$\beta_v = \gamma_1 - \gamma_2$ =	32.7°	Vertikal strålebredde
$\gamma_c = (\gamma_1 + \gamma_2)/2$ =	28.3°	Tiltvinkel
$X_c = h / \tan(28.3)$ =	55 m	Avstand til senter av strålen
PRI =	0.19 s	Pulsrepetisjonsintervall
v_{max} =	4 m/s	Maksimal hastighet ($\alpha = 1$)

I dette eksemplet velger vi 2 m/s for overlappfaktor $\alpha = 2$. Da blir swath = 107 m. Dette representerer det mest pessimistiske anslaget for sporbredde for SAS-systemet.

5.3 Case 3: Hastighet $v_{max} = 2.0$ m/s

Parameter	Verdi	Forklaring
v_{max} =	2 m/s	Maksimal hastighet ($\alpha = 1$)
h =	40 m	Høyde
X_1 =	40 m	Minste avstand på bunnen
γ_1 =	45°	Største grazing vinkel (nærmest)
$\gamma_2 = \text{asin}(h/R_2)$ =	8.2°	Minste grazing vinkel (lengst unna)
$X_2 = R_2 \cos(\gamma_2)$ =	278 m	Største avstand på bunnen
$X_2 - X_1$ =	238 m	Sporbredde (swath) på bunnen
$X_2 - X_1 - 2 X_1$ =	158 m	Blindsoner for tosidig system
$\beta_v = \gamma_1 - \gamma_2$ =	36.8°	Vertikal strålebredde
$\gamma_c = (\gamma_1 + \gamma_2)/2$ =	26.6°	Tiltvinkel
$X_c = h / \tan(26.6)$ =	80 m	Avstand til senter av strålen
PRI =	0.375 s	Pulsrepetisjonsintervall
v_{opt} =	1 m/s	Hastighet for $\alpha = 2$

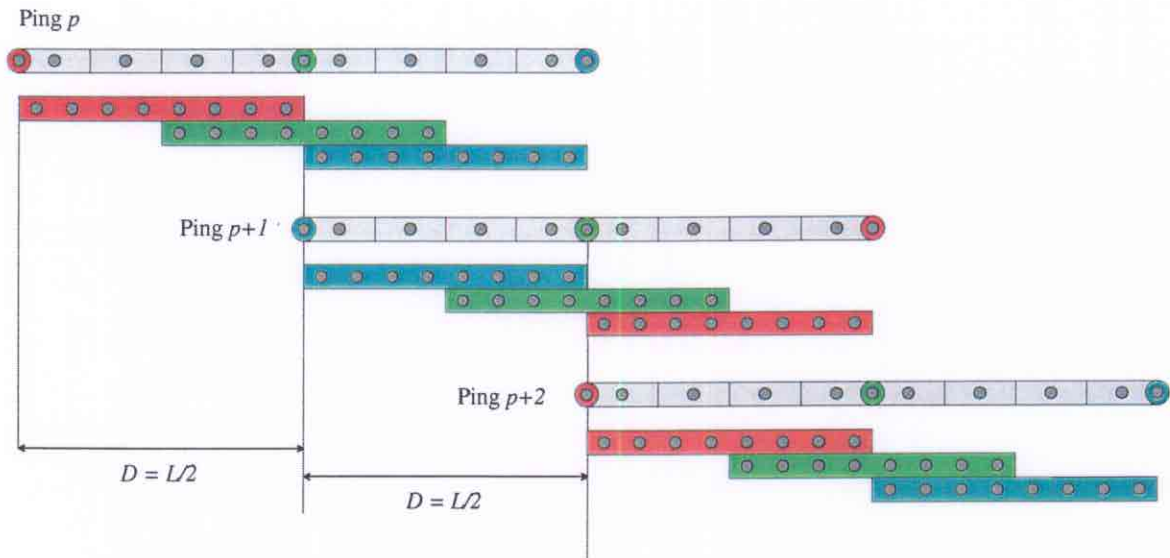
Dette eksemplet representerer den maksimale grensen for sporbredde multiplisert med hastighet ($\alpha = 1$). Det vil si at for denne sporbredden gir en hastighet på 2 m/s ingen overlapp og derved ingen mulighet for DPCA for bevegelseskompensasjon.

For alle tre case ser vi at tiltvinkelen er rundt 25° . I monteringen av sonarsystemet på HUGIN I ønsker vi derfor at sender- og mottakerarrayene tiltes tilsvarende i forhold til horisontalplanet.

6 ALTERNATIVE KONSEPTER

I tillegg til teknikkene og konseptene som er skissert i kapittel 2, finnes det alternative teknikker spesielt for å øke plattform hastighet (eller redusere kravet for lang mottaker i kjøreretning).

6.1 Ping-pong SAS



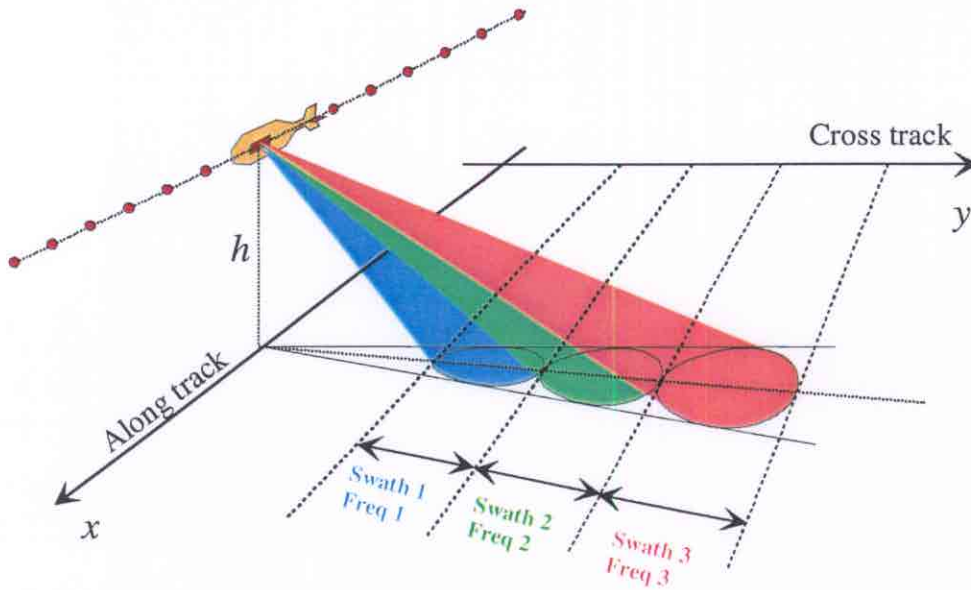
Figur 6-1 Ping-pong SAS konsept

Et stort problem med DPCA mikronavigasjon alene er at større overlappfaktor α gir bedre estimat av posisjon og orientering, og typiske verdier man har prøvd er fra $\alpha = 2$ til $\alpha = 4$ (se delkapittel 2.2). Større overlappfaktor gir mindre dekningsrate (swath multiplisert med hastighet), og derved dårligere ytelse. En mulig måte å unngå dette problemet er å introdusere flere sendere i forskjellig posisjon og sende i såkalt ping-pong mønster (49) (50) (6). Prinsippet er som følger (se Figur 6-1):

- Anta tre forskjellige senderposisjoner, merket med sirkler i figuren.
- Videre deles båndbredden i tre deler, henholdsvis rød, grønn og blå i figuren.
- For ping p , sendes frekvens blå frekvens fra fremre sender.
- for ping $p+1$, sender blå frekvens fra bakre sender. Dersom hastigheten er lik maksimalhastigheten (dvs at avstand fra ping til ping er $L/2$), vil fasesenterantennene (merket med heltrukne fargede linjer) for blå frekvens ha fullt overlapp.
- Tilsvarende for rød frekvens blir det fullt overlapp mellom ping $p+1$ og ping $p+2$.
- Grønn frekvens brukes til avbildning og må sendes fra samme sender hvert ping. I dette tilfellet har vi skissert grønn frekvens i midten, men den kan sendes ut fra en vilkårlig sender (for eksempel fremre sender). Rød og blå frekvens kan ikke brukes til avbildning.

Denne teknikken bruker deler av båndbredden til full DPCA på full hastighet, og deler av båndbredden til avbildning. Det ble gjennomført flere ping-pong run under InSAS 2000 (34). Det er imidlertid et fundamentalt problem med denne teknikken. Med flere romlig separerte sendere introduseres sender yaw som ny parameter i systemet. For DPCA mikronavigasjon alene, betyr det at to forskjellige yaw skal bestemmes fra et yaw estimat. Dette problemet gjør det uklart om ping-pong faktisk virker (ref samtaler med Marc Pinto).

6.2 Multi-swath SAS



Figur 6-2 Multi-swath oversikt

En alternativ teknikk for å øke plattform hastighet er å øke antall swath (eller spor), og benytte forskjellige frekvensområder i hvert spor, som skissert i Figur 6-2. I hvert spor må da samplingskravet være oppfylt (se forrige kapittel), noe som gjør at N spor gir N ganger mulig hastighet. Denne teknikken benyttes for SAR-systemer, men da med styrbar sender og mottaker i elevasjon og samme frekvensområde for alle swath (18). Hensikten her er ikke bare høy plattform hastighet, men også høyt antennegain. Teknikken kalles scan-mode SAR i motsetning til spot-mode SAR der antennen styres i asimut.

Et problem med denne teknikken er at for å unngå blindsoner mellom hvert spor, må sonaren være i stand til motta under sending (mottak av andre frekvensbånd enn det som sendes). Dersom lengden på hvert swath er lik vil PRI være lik for alle frekvenser, og sending vil være synkron (ikke samtidig). Lengden på blindsonen, eller tiden man må motta samtidig som det sendes, er lik pulslengden.

6.3 Multiple pulser

Dersom minste avstand til havbunnen er stor i forhold til swath i slant-range $R_1 \gg R_2 - R_1$ (se Figur 5-1), kan multiple pulser i vannet benyttes. Samplingskravet langs den syntetiske aperture (eller kravet til PRI) er da relatert til swath som i ligning (2.3). For at dette konseptet skal virke må avstanden til bunnen estimeres slik at flertydighetene i slant-range kan løses ut. Dette er standard operasjonsmetode for alle satellittbårne SAR-systemer (56). Eksempelvis har ERS-1 midlere avstand til footprintet på 842 km, som tilsvarer 5.6 ms i toveis gangtid, og PRI = 0.59 ms. Dette gir 9.5 samtidige radarpulser.

I undervannsanvendelser kan dette tenkes å være en mulig SAS operasjonsmode dersom høyden over bunnen er stor, for eksempel hvis SAS-systemet er skrogmontert på et overflateskip. Det er enkelt å unngå mottak under sending ved å tilpasse swath posisjon til PRI (noe som gjøres på satellittbårne SAR-systemer, eksempelvis ERS-1).

6.4 Pulskoding

Ved å kode pulser med ortogonale koder (såkalt pulstagging) kan flere pulser belyse sporet samtidig selv om swath er stort i forhold til minste avstand til havbunnen. De kodede pulsene må ha smal autokorrelasjon (god oppløsning) og minimal krysskorrelasjon (lite krysstale). Begrensningen i det dynamiske område blir da signal til krysstale, siden sonaren må sende og motta samtidig.

Typiske slike koder finnes i kommunikasjonsteorien og kan både legges på pulsen som fase-modulasjon eller frekvensmodulasjon. Denne teknikken benyttes blant annet til samtidig måling av begge polarisasjoner for radar (51). Peter Gough har utredet pulskoding for sonar generelt (ikke SAS) (52). Hugh Griffiths lister dette som en mulig metode for SAS (8). I henhold til Griffiths prøvde de dette ut, og fant at krysstale mellom slike koder øker forholdsvis mye for forskjellig Dopplerskift for de forskjellige pulsene. Forskjellig Dopplerskift oppstår når flere reflektorer finnes i footprintet, så de forkastet denne teknikken. Peter Gough har også sett på denne teknikken for noen år siden og forkastet den på grunn av krysstale. Gough mente (ref samtaler) at de siste års utvikling innen mobilkommunikasjon har fremskaffet mere Doppler-resistente koder innen spredt-spektrum teknikker, så pulskoding som metode kan være mulig i fremtidige SAS anvendelser.

Litteratur

- (1) Wernli R (2001): The Commercialisation of AUV's: Who's leading the pack, *Hydro International* **5**, 4, May 2001.
- (2) Chance T C, Kleiner A S, Northcutt J G (2000): The HUGIN 3000 AUV, *Sea Technology* **41**, 12, December 2000.
- (3) Hagen P E, Størkersen N J, Vestgård K (1999): HUGIN - Use of UUV Technology in Marine Applications, *Proceedings of IEEE Oceans 99, Seattle, WA, USA, september 1999*.
- (4) NATO (2000): Maritime Warfare / Mine Counter Measures (MW/MCM) (MO2015), RTO Technical Report 37 (NATO CONFIDENTIAL).
- (5) Gough P T, Hawkins D W (1997): Imaging Algorithms for a Strip-Map Synthetic Aperture Sonar: Minimizing the Effects of Aperture Errors and Aperture Undersampling, *IEEE J. Oceanic Eng.* **22**, 1, 27-39.
- (6) Pinto M A, Fioravanti S, Bovio E (1998): Multiple-element synthetic aperture sonar design. Saclantcen note.
- (7) Cutrona L J (1975): Comparison of sonar systems performance achievable using synthetic aperture techniques with the performance achievable by more conventional means, *J. Acoust. Soc. Am.* **58**, 2, 336-348.
- (8) Griffiths H D, Rafik T A, Meng Z, Cowan C F N, Shafeeu H, Anthony D K (1997): Interferometric Synthetic Aperture Sonar for High-Resolution 3-D Mapping of the Seabed, *IEE Proc. Radar, Sonar Navig.* **144**, 2, 96-103.
- (9) Lockwood G R, Li P-C, O'Donnell M, Foster F S (1996): Optimizing the radiation pattern of sparse periodic linear arrays, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr.* **43**, 1, 7-14.
- (10) Pinto M A, Fioravanti S, Bovio E (1998): Accuracy of synthetic aperture sonar using a displaced phase center antenna, Saclantcen memorandum SM-352.
- (11) Billon D, Fohanno F (1998): Theoretical performance and experimental results for synthetic aperture sonar self-calibration, Proc. Oceans 98, Nice, 965-970.
- (12) Bellettini A, Pinto M A (2000): Theoretical Accuracy of Synthetic Aperture Sonar Micro-navigation using a Displaced Phase Center Antenna, *submitted to IEEE J. Oceanic Eng.*
- (13) Raven R S (1978): Electronic stabilization for displaced phase centers, US Patent, 4,244,036.
- (14) Sheriff R W (1992): Synthetic aperture beamforming with automatic phase compensation for high frequency sonars, *Proceedings of the 1992 Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology, IEEE*, 236-245.
- (15) Billon D (2000): Interferometric synthetic aperture sonar: Design and performance issues, *Proc. 5th European Conference on Underwater Acoustics*, 419-424.



- (16) Marx D, Nelson M, Chang E, Gillespie W, Putney A, Warman K (2000): An Introduction to Synthetic Aperture Sonar, *IEEE Signal Processing Workshop on Statistical Signal and Array Processing*, 717-721.
- (17) Klemm R (1998): *Space-Time Adaptive Processing: Principles and Applications*, IEE, London.
- (18) Franceschetti G, Lanari R (1999): *Synthetic Aperture Radar Processing*, CRC Press.
- (19) Pinto M A, Bellettini A, Fioravanti S, Chapman S, Bugler D R, Perrot Y, Hetet A (1999): Experimental Investigations into High Frequency Sonar Systems, *Proceedings of IEEE Oceans 1999*, Seattle, WA, USA, september 1999, 916-922.
- (20) Fernandez J E, Christoff J T (2000): Multi-Aspect Synthetic Aperture Sonar, *Proceedings of IEEE Oceans 2000*, Providence, RI, USA, 177-180.
- (21) Bellettini A, Pinto M (2000): Experimental Results of a 100 kHz Multi-Aspect Synthetic Aperture Sonar, *5 ièmes Journées d'Etudes Acoustique Sous-Marine, Brest, France*.
- (22) Hawkins D W (1996): *Synthetic Aperture Imaging Algorithms: with application to wide bandwidth sonar*, Ph. D. thesis, Univ of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- (23) Soumekh M (1999): *Synthetic Aperture Radar Signal Processing*, Wiley-Interscience.
- (24) Hammerstad E, Pøhner F (1990): Ultra-wide swath deep sea interferometric multibeam echo sounder with sea bottom imaging system, *Proceedings of IEEE Oceans 90, Washington DC, US*, 63-68.
- (25) (1981): Special Issue on Time Delay Estimation, *IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Processing ASSP-29*, 3.
- (26) Shippey G, Kröling O (1997): Swath Bathymetry and SAS Autofocus using a Chirp Source, *Proc. High Frequency Acoustics in Shallow Water*, NATO SACLANTCEN, Lerici, Italy, July 1997, 483-491.
- (27) Pinto M, Hollett R, Bellettini A, Edwards J (2000): Results of Wideband Interferometric Synthetic Aperture Sonar Experiments, *5-ièmes Journées d'Etudes Acoustique Sous-Marine, Brest, France, november 2000*.
- (28) Lurton X (2000): Swath Bathymetry using Phase Difference: Theoretical Analysis of Acoustical Measurement Precision, *IEEE J. Oceanic. Eng.* **25**, 3, 351-363.
- (29) Tin G, Jang D (1996): Uncertainties of Differential Phase Estimation Associated with Interferometric Sonars, *IEEE J. Oceanic Eng.* **21**, 1, 53-63.
- (30) Shippey G, Ulriksen P, Liu Q (1998): Wideband Swath Bathymetry, SAS Autofocus and Underwater Navigation Fixes: Three related problems in Echo/Image Correlation, *Proc IAC/IEE Sonar Signal Processing Conference, Weymouth, december 1998*.
- (31) Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, Li F K, Madsen S N, Rodriguez E, Goldstein R M (2000): Synthetic Aperture Radar Interferometry, *Proc IEEE* **88**, 3, 333-382.
- (32) Lanari R (2000): *Airborne SAR Remote Sensing*, Course material, Barcelona, nov 2000.

- (33) Mandt M, Gade K, Jalving B (2001): Integrating DGPS-USBL position measurements with inertial navigation in the HUGIN 3000 AUV, *Proc. 8th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, Saint Petersburg, Russia, May 2001*.
- (34) Wang L (2000): SACLANTCEN Cruise report Project 03-G InSAS 2000.
- (35) Hansen R E, Gade K (2001): Deltakelse i InSAS 2000 eksperimentet, Elba, november 2000, FFI/REISERAPPORT-2001/00470, ugradert
- (36) Gade K (1997): Integrering av treghetsnavigasjon i en autonom undervannsfarkost, FFI/RAPPORT-97/03179, ugradert
- (37) Hansen R E, Gade K, Pinto M (2001): Integration of DPCA Micronavigation and Inertial Navigation for AUV based SAS, submitted to *Oceans 2001 MTS/IEEE*, Honolulu, HI, november 2001.
- (38) Hansen R E (2000): Besøk hos SACLANTCEN JRP Mine Detection and Classification oktober 2000, FFI/REISERAPPORT-2000/05449, ugradert
- (39) Gade K, Jalving B (1998): An Aided Navigation Post Processing Filter for Detailed Seabed Mapping UUVs, *Proceedings from AUV '98*, Cambridge, MA, USA.
- (40) Gough P T, Hawkins D W (1997): Unified Framework for Modern Synthetic Aperture Imaging Algorithms, *Int. J. Imaging Systems and Technology* **8**, 4, 343-358.
- (41) Gazdag J, Sguazzero P (1984): Migration of Seismic Data, *Proc IEEE* **72**, 10, 1302-1315.
- (42) Hellsten H, Ulander L M H (2000): Airborne Array Aperture UWB UHF Radar - Motivation and System Considerations, *IEEE AES Systems Magazine*, may 2000, 35-45.
- (43) Pat J (2000): Synthetic Aperture Sonar Image Reconstruction using a Multiple-Receiver Towfish, MSc thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- (44) Carrara W G, Goodman R S, Majewski R M (1995): Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms, Artech house.
- (45) Jakowatz J C V, Wahl D E, Ghiglia D C, Thompson P A (1996): Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach, Kluwer Academic Publishers.
- (46) Gough P, Hayes M, Callow H J (2000): Strip-Map Path Correction using Phase Matching Autofocus, *Proc 5th European Conference on Underwater Acoustics*, 413-418.
- (47) Chatham R E, Nelson M A, Chang E (2000): Results from the DARPA and ONR synthetic aperture sonar programs, *Proceedings of SPIE 2000, Orlando, FL, USA*, 422-430.
- (48) Bonifant Jr W W, Richards M A, McClellan J H (2000): Interferometric height estimation of the seafloor via synthetic aperture sonar in the presence of motion errors, *IEE Proc. Radar, Sonar, Navig.* **147**, 6, 322-330.
- (49) Billon D (1998): Synthetic Aperture Sonar for High Resolution Imaging and Bathymetry, *Proceedings of Oceanology International, 1998*, 315-324.

- (50) Pinto M A (1997): Use of Frequency and Transmitter Location Diversities for Ambiguity Suppression in Synthetic Aperture Sonar Systems, *Proceedings of IEEE Oceans 97*, 363-368.
- (51) Giuli D, Fossi M, Facheris L (1993): Radar target scattering matrix measurement through orthogonal signals, *IEE Proceedings F* **140**, 4, 233-242.
- (52) Gough P (1996): Coded Waveforms for Sonars, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- (53) Medwin M, Clay C S (1998): Fundamentals of Acoustical Oceanography, Academic Press, Boston.
- (54) Stolt R H (1978): Migration by Fourier Transform, *Geophysics* **49**, 1, 23-48.
- (55) Hagen P E, Hansen R E, Gade K, Hammerstad E (2001): Interferometric Synthetic Aperture Sonar for AUV Based Mine Hunting: The SENSOTEK project, submitted to *Unmanned Systems 2001*, Baltimore MD, USA, July-August 2001.
- (56) Wahl T, Jørgensen R (1994): Radarsatellitter, kurskompendium for UNIK.

FORDELINGSLISTE

FFIBM
Dato: 20 juni 2001

RAPPORTTYPE (KRYSS AV) <input checked="" type="checkbox"/> RAPP <input type="checkbox"/> NOTAT <input type="checkbox"/> RR	RAPPORT NR. 2001/03193	REFERANSE FFIBM/808/116	RAPPORTENS DATO 20 juni 2001
RAPPORTENS BESKYTTELSESGRAD UGRADERT		ANTALL EKS UTSTEDT 52	ANTALL SIDER 34
RAPPORTENS TITTEL SENSOTEK interferometrisk syntetisk aperture sonar for HUGIN AUV		FORFATTER(E) HANSEN Roy Edgar	
FORDELING GODKJENT AV FORSKNINGSSJEF: 		FORDELING GODKJENT AV AVDELINGSSJEF: 	

EKSTERN FORDELING
INTERN FORDELING

ANTALL	EKS NR	TIL	ANTALL	EKS NR	TIL
1		KNM Tordenskjold	14		FFI-Bibl
1		KL Jon Arild Strandnæs	1		Adm direktør/stabssjef
			1		FFIE
1		MARINSP/MFI	1		FFISYS
1		v/ KL Stig Nilsen	1		FFIBM
			1		Jan Ivar Botnan, BM
1		FO/E	1		Nils Størkersen, BM
1		v/ KL Kjetil Hogstad	1		Per Espen Hagen, BM
			1		Øivind Midtgaard, BM
1		Kongsberg Simrad AS	1		Petter Lågstad, BM
		v/ Erik Hammerstad	1		Ove Hagen, BM
1		v/ Karstein Vestgård	1		Bjørn Hugsted, BM
1		v/ Kjell Nilsen	1		Stig Asle Synnes, BM
1		v/ Tore Werner Hansen	1		Jens Hovem, BM
1		v/ Bjørnar Langli	1		Tor Knudsen, S
		Boks 111, 3191 Horten	1		Bjørn Jalving, E
			1		Kenneth Gade, E
1		Simrad AS	1		Trygve Sparr, E
		v/ Håvard Nes	1		Svein-Erik Hamran, E
1		v/ Geir Helge Sandsmark	1		Terje Wahl, E
1		v/ Even Borten Lunde	1		Dan Johan Weydahl
1		v/ Bjarte Berntsen	1		Roy Edgar Hansen, BM
		Boks 111, 3191 Horten	2		
					FFI-veven
1		Sverre Holm			
		Institutt for Informatikk			
		Universitetet i Oslo			
		Boks 1080, 0316 Oslo			

FFI-K1

Retningslinjer for fordeling og forsendelse er gitt i Oraklet, Bind I, Bestemmelser om publikasjoner for Forsvarets forskningsinstitutt, pkt 2 og 5. Benytt ny side om nødvendig.

