



Refokusering av skip i SAR-bilder fra satellitt

—
Atle Onar Knapkog

Refokusering av skip i SAR-bilder fra satellitt

Atle Onar Knapskog

Forsvarets forskningsinstitutt (FFI)

20. desember 2017

Emneord

Satellitter

Syntetisk apertur-radar (SAR)

Invers syntetisk apertur-radar (ISAR)

FFI-rapport

FFI-RAPPORT 17/16692

Prosjektnummer

1361

ISBN

P: 978-82-464-2978-6

E: 978-82-464-2979-3

Godkjent av / Approved by

Øystein Hellen, *forskningsleder*

Johnny Bardal, *avdelingssjef*

Sammen drag

Satellittbasert syntetisk apertur-radar (SAR) er en sensortype som har stor betydning for maritim overvåkning. Bilder med stadig høyere oppløsning har blitt tilgjengelige fra slike systemer, men det har hittil ikke vært mulig å få høy oppløsning og stor sporbredde samtidig. Avbildning av store havområder gjøres med lav oppløsning. Klassifikasjon av fartøyer basert på egenskaper som lengde og bredde krever høyere oppløsning og er dermed lite aktuelt på åpent hav med dagens systemer. Det antas imidlertid at dette vil endre seg i fremtiden.

SAR-prosessering legger til grunn at den avbildede scenen er stasjonær. Bevegelser kan føre til at mål blir forflyttet, forvrengt og defokuseret i bildene, noe som begrenser mulighetene for å trekke ut egenskaper. I denne rapporten blir omfanget av forvrengning og defokusering undersøkt. Videre undersøkes mulighetene for refokusering av skip i SAR-bilder. Rapporten beskriver relevante metoder med autofokus og invers syntetisk apertur-radar (ISAR), og det diskuteres hvilke metoder som kan oppfylle behovene i ulike situasjoner. Dette leder frem mot konklusjoner og anbefalinger om videre aktiviteter.

For store skip er det lineær bevegelse som dominerer. Slik bevegelse kan føre til defokusering, men det fins gode metoder for refokusering av bildene. Mindre skip i stor sjøgang har store og hurtig varierende rotasjonsbevegelser som kan gi både forvrengning og defokusering, og effektene er vanskeligere å håndtere. Dataene samles inn i løpet av kort tid idet satellitten passerer, og det er stor variasjon i fartøyenes bevegelser på avbildningstidspunktet. Algoritmer for refokusering og lignende må derfor være i stand til å håndtere et bredt spekter av bevegelser.

Forvrengning medfører usikkerhet i lengdeestimatene. Et troverdig lengdeestimat forutsetter korrekt skalering av skipet, noe som krever estimering av skipets rotasjonsbevegelse. Defokusering er særlig et problem ved lang integrasjonstid, det vil si høy oppløsning. Ved lavere oppløsning enn ca. 12 meter i C-bånd og 6–7 meter i X-bånd kan vanlig SAR-prosessering forventes å gi stor sannsynlighet for fokuserte bilder av alle skip unntatt mindre fartøyer i stor sjøgang. Tallene må betraktes som foreløpige anslag. Ved høyere oppløsning vil det være behov for refokusering. En adaptiv og stegvis bruk av forskjellige refokuseringsteknikker fremstår som en naturlig fremgangsmåte. Første steg kan være autofokus på små utsnitt av single-look complex (SLC)-bilder. De mest aktuelle algoritmene er Phase Gradient Autofocus (PGA) og beslektede metoder med mer robust faseestimering. Neste steg kan være reversert SAR-prosessering etterfulgt av fokusering med en ISAR-algoritme. En iterativ algoritme med bildekontrast som kostfunksjon for optimaliseringen synes å være et godt valg. Det forventes at disse metodene til sammen vil gi akseptabel fokusering av de fleste skip med moderate bevegelser ved integrasjonstid godt under 1 sekund, og det anbefales at metodene implementeres og testes på ekte SAR-data.

I de mest krevende tilfellene kan det være behov for mer avanserte prosesseringsmetoder basert på reformatering i bølgetallsdomenet eller tid-frekvens-teknikker. En studie av slike metoder anbefales.

Summary

Satellite-based synthetic aperture radar (SAR) is a sensor type of great importance for maritime surveillance. Images with increasingly high resolution have become available from such systems, but it has not yet been possible to obtain high resolution and wide swath at the same time. Imaging of large ocean areas is done with low resolution. Vessel classification based on features such as length and width requires higher resolution and is thus of little relevance on the open ocean with current systems. However, this is expected to change in the future.

SAR processing assumes that the imaged scene is stationary. Motions can cause target displacement, distortion and defocusing in the images. This would limit the possibilities for feature extraction. In this report the extent of distortion and defocusing is investigated. Furthermore, the possibilities for refocusing of ships in SAR images are investigated. Relevant autofocus and inverse synthetic aperture radar (ISAR) methods are described, and a discussion is given on which methods are capable of meeting the needs in various situations. This leads to conclusions and recommendations for further activities.

For large ships, linear motion will dominate. Such motion can lead to defocusing, but adequate methods for refocusing of the images exist. Smaller ships in high sea states will have large and rapidly varying rotational motions which can lead to distortions as well as defocusing, and the effects will be more difficult to handle. The data are collected within a short period of time, and the motions at the time of imaging will vary a lot between vessels. Algorithms for refocusing etc. thus have to handle a wide spectre of motions.

Distortion leads to uncertainty in length estimates. Correct scaling of a ship is a precondition for high confidence in the length estimate. This requires estimation of the ship's rotational motion.

Defocusing is especially a problem with long integration time, which means high resolution. With resolution lower than ca. 12 m in C-band and 6-7 m in X-band, conventional SAR processing can be assumed to give a high probability of focused images of all ships except smaller vessels in high sea states. These numbers must be considered preliminary estimates. With higher resolution refocusing will be required. An adaptive and stepwise utilisation of various refocusing techniques appears as a natural approach. The first step can be autofocus on small segments of single-look complex (SLC) images. The most relevant algorithms are the Phase Gradient Autofocus (PGA) and related methods with more robust phase estimation. The next step could be reversed SAR processing followed by focusing with an ISAR algorithm. An iterative algorithm with image contrast as cost function for the optimisation appears to be a good choice. These methods together are expected to give acceptable focusing of the majority of ships with moderate motions with integration times well below 1 s. Implementing and testing the methods on real SAR data is recommended.

The most challenging cases could require more advanced processing methods based either on re-formatting in the wavenumber domain or time-frequency techniques. A study of such methods is recommended.

Innhold

Sammendrag	3
Summary	4
1 Innledning	7
2 Skip i SAR-bilder	7
2.1 SAR-avbildning av en spreder i bevegelse	8
2.2 Overordnet beskrivelse av skip i SAR-bilder	12
2.2.1 Forflytning	12
2.2.2 Forvrengning	13
2.2.3 Utsmøring	14
2.2.4 Bevegelige deler	15
2.2.5 Sjøreflekser	15
2.3 Fartøysbevegelser	17
2.3.1 Hastighet	17
2.3.2 Teori om fartøyers bevegelser i bølgene	18
2.3.3 Målte og predikterte rotasjonsbevegelser	24
2.4 Forventet omfang av forvrengning og defokusering av skip i SAR-bilder	27
3 SAR-avbildning fra satellitt	31
3.1 Noen aspekter ved SAR-avbildning fra satellitt	31
3.1.1 Særtrekk ved satellittbasert SAR	31
3.1.2 Aktuelle SAR-moduser	32
3.2 SAR-prosessering	34
3.2.1 Grunnleggende teori om SAR-fokusering	34
3.2.2 Bølgetallsdekning og oppløsning	35
3.2.3 SAR-prosesseringsalgoritmer	37
4 Refokusering av bevegelige mål	40
4.1 Autofokusmetoder	41
4.1.1 MD	42
4.1.2 PDA	43
4.1.3 PGA	45
4.1.4 Algoritmer beslektet med PGA for mer robust fasefeilestimering	48

4.1.5	Algoritmer for range-avhengig fasefeil og stripmap SAR	49
4.2	Tradisjonell ISAR	50
4.2.1	Grunnleggende egenskaper ved ISAR-avbildning	50
4.2.2	PPP og andre ikke-parametriske autofokusalgoritmer	52
4.2.3	Kontrastbasert autofokus	54
4.2.4	Andre parametriske autofokusmetoder for ISAR	55
4.2.5	Crossrange-skalerting	56
4.3	ISAR ved svært stor eller ujevn rotasjon	59
4.3.1	Ulike former for defokusering	59
4.3.2	Reformatering i bølgetallsdomenet	60
4.3.3	Tid-frekvens-teknikker	61
5	Diskusjon om refokusering	63
5.1	Behov for fokusering	63
5.2	Mulige algoritmer ved integrasjonstid under ca. 0,2 s	64
5.3	Mulige algoritmer ved ca. 0,2-0,8 s integrasjonstid	65
5.4	Mulige algoritmer ved integrasjonstid over ca. 0,8 s	66
6	Konklusjoner og anbefalinger	66
A	Forkortelser	68
	Referanser	70

1 Innledning

Satellittbasert syntetisk apertur-radar (SAR) er en sensortype av stor betydning for maritim overvåkning. Bilder med stadig høyere oppløsning har blitt tilgjengelige fra slike systemer. Dagens SAR-systemer kan imidlertid ikke tilby samtidig høy oppløsning og stor sporbredde. Høyoppløselig avbildning av skip er begrenset til havneområder og lignende, mens overvåkning av store havområder må gjøres med lav oppløsning. Ekstrahering av egenskaper som lengde og bredde med tanke på klassifikasjon av fartøyer på åpent hav er dermed lite aktuelt med dagens systemer.

Dette vil endre seg i fremtiden. Det foregår mye forskning på såkalt High Resolution Wide Swath (HRWS) SAR. For eksempel har moduser med 3 m oppløsning i et 250 km bredt spor og 5 m oppløsning i et 400 km bredt spor blitt foreslått for fremtidige satellitter som skal overta etter ESAs Sentinel-1-satellitter [1]. En oppløsning i dette området innebærer et visst potensial for karakterisering av skip på havet.

SAR-prosessering legger til grunn at den avbildede scenen er stasjonær. Det er kjent at spredere i bevegelse blir forflyttet og/eller defokusert i bildene og at disse effektene får større betydning med høyere oppløsning. Høyoppløselige SAR-bilder av skip på havet kan derfor ofte forventes å være dårlig egnet for egenskapsuttrekking og klassifikasjon.

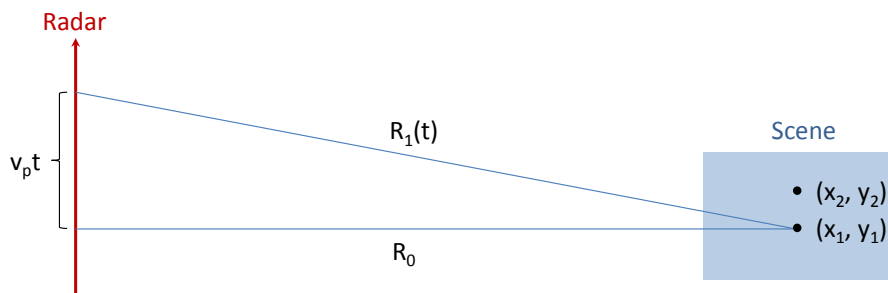
I denne rapporten undersøkes mulighetene for refokusering av skip i SAR-bilder fra satellitt. Kapittel 2 forklarer hvordan skip i bevegelse fremstår i SAR-bilder. Omfanget av forvrengning og defokusering blir undersøkt ved teoretiske betraktninger og analyser av målte fartøysbevegelser. Kapittel 3 gir en overordnet beskrivelse av visse aspekter ved satellittbasert avbildning og SAR-prosessering. Kapittel 4 kartlegger hva som fins av teknikker for å oppnå fokusert avbildning av skip i bevegelse. Relevante autofokus- og invers syntetisk apertur-radar (ISAR)-metoder beskrives. Kapittel 5 diskuterer hva som trengs av refokuseringskapasitet og hvilke metoder som kan oppfylle behovene i ulike situasjoner. Dette leder frem mot konklusjoner og anbefalinger om videre aktiviteter i kapittel 6.

2 Skip i SAR-bilder

Dette kapitlet beskriver hvordan skip i bevegelse fremstår i SAR-bilder og prøver å gi en grunnleggende forståelse av hvorfor. Det munner ut i antakelser om omfanget av forvrengning og defokusering av havgående skip under normale forhold.

2.1 SAR-avbildning av en spreder i bevegelse

Det er ønskelig å anslå hvor stor betydning en spreders bevegelse relativt til en stasjonær scene har for avbildning av sprederen. I forbindelse med satellittbasert SAR blir uttrykkene for avstander og relative hastigheter mellom satellitten og målet kompliserte, blant annet på grunn av jordas rotasjon og form. For den aktuelle problemstillingen kan det imidlertid være hensiktsmessig i første omgang å betrakte en svært forenklet geometri, som vist på Figur 2.1. Her antas flat og stasjonær jord og en scene som ligger i slant-range-planet i en retning 90° på radarens fartsretning. Radaren beveger seg i rett linje med hastigheten v_p .



Figur 2.1 Forenklet SAR-avbildningsgeometri

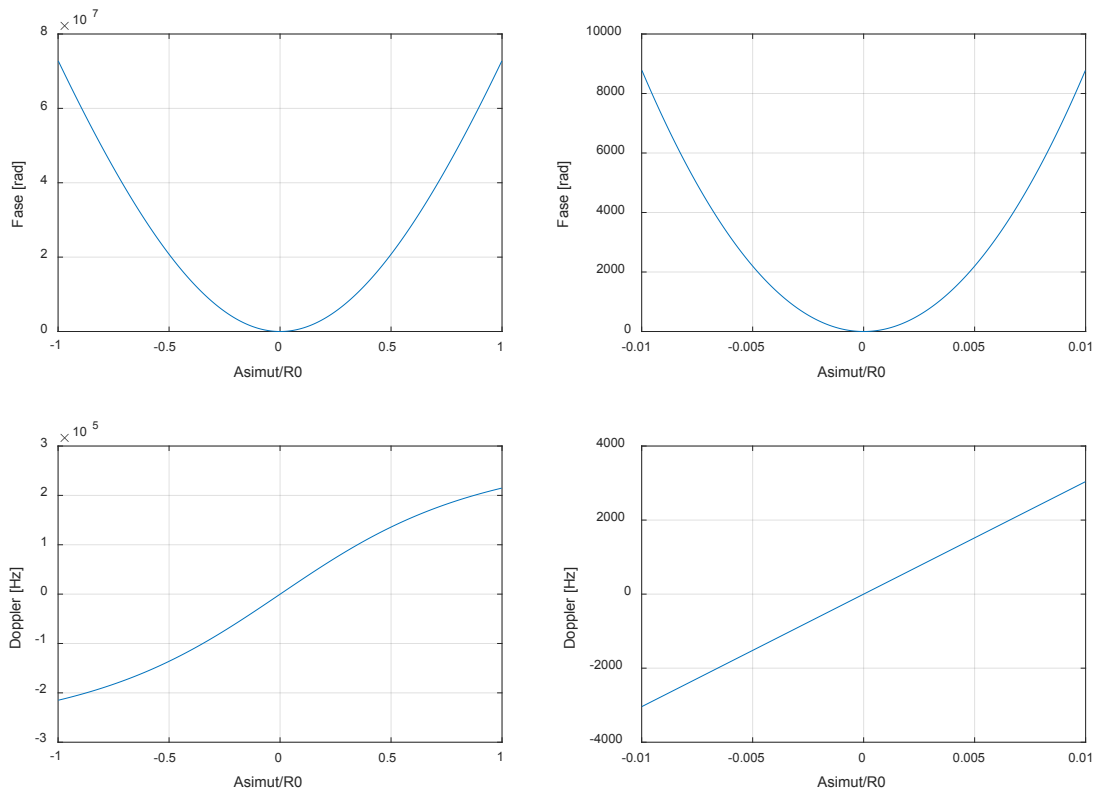
Fasehistorien til det reflekterte signalet fra en spreder i scenen er avgjørende for hvor i bildet sprederen blir plassert og i hvilken grad den blir fokusert. Fasen er proporsjonal med avstanden til sprederen:

$$\phi(t) = \frac{4\pi}{\lambda} R(t) \quad (2.1)$$

Doppler-frekvensen er definert som:

$$f_D = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt} \quad (2.2)$$

Figur 2.2 viser hvordan fasen og Doppler-frekvensen til signalet fra sentrum av scenen varierer med sensorens posisjon langs asimut-aksen. Når radarbeamen står 90° på fartsretningen (det vil si null squint), vil den syntetiske aperturen ha en begrenset utstrekning rundt null asimut. Fasen og Doppler-frekvensen kan her tilnærmes svært godt med henholdsvis en andregradsfunksjon og en lineær funksjon.



Figur 2.2 Fase og Doppler-frekvens som funksjon av sensorens asimut-posisjon. Til høyre et lite utsnitt rundt null av funksjonene til venstre

Vi kan betrakte stasjonære mål i (x_1, y_1) og (x_2, y_2) på Figur 2.1. Hvis vi antar at det første punktet ligger i sentrum av scenen ($x_1 = y_1 = 0$), at $x_2 = 0$, $R_0 \gg y_2$ og bære­bøl­ge­frekvensen er mye høyere enn spredningen av Doppler-skift innenfor scenen, kan faseforskjellen mellom signalene fra de to spredene uttrykkes som:

$$\Delta\phi(t) = \frac{4\pi}{\lambda} (R_1(t) - R_2(t)) = \frac{4\pi}{\lambda} \left(\sqrt{R_0^2 + (v_p t)^2} - \sqrt{R_0^2 + (y_1 - v_p t)^2} \right) \quad (2.3)$$

Vi benytter følgende rekkeutvikling for kvadratroten:

$$\sqrt{1+x} \approx 1 + \frac{1}{2}x \quad (2.4)$$

Dette gir en tilnærming for faseforskjellen:

$$\Delta\phi(t) \approx \frac{4\pi}{\lambda} y_2 \frac{v_p t}{R_0} \quad (2.5)$$

Denne likningen uttrykker altså sammenhengen mellom en stasjonær spreders fasehistorie og plassering i asimut relativt til sentrum av scenen. Sammenhengen mellom to spreders avstand i asimut og forskjell i Doppler-frekvens kan således skrives:

$$\Delta f_D \approx \frac{2v_p}{\lambda R_0} \Delta y \quad (2.6)$$

Vi kan nå la en spreder i sentrum av scenen ha hastighet og akselerasjon i range- og asimut-retning:

$$[x_1(t), y_1(t)] = [v_r t + \frac{1}{2} a_r t^2, v_a t + \frac{1}{2} a_a t^2] \quad (2.7)$$

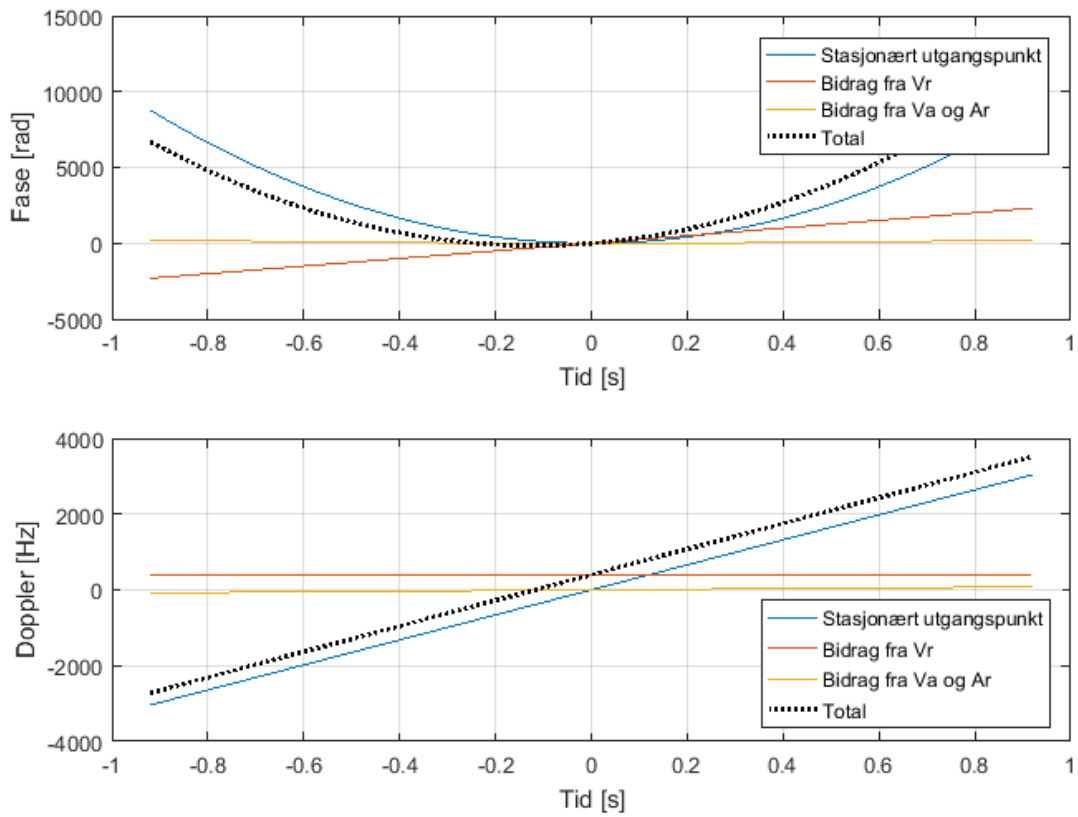
Avstanden til sprederen blir:

$$R_1(t) = \sqrt{\left(R_0 + v_r t + \frac{1}{2} a_r t^2\right)^2 + \left(-v_a t - v_p t - \frac{1}{2} a_a t^2\right)^2} \quad (2.8)$$

Etter rekkeutvikling og stryking av små ledd kan faseforskjellen mellom den bevegelige sprederen og en stasjonær spreder i sentrum av scenen tilnærmes som:

$$\Delta\phi(t) \approx \frac{4\pi}{\lambda} \left[v_r t + \frac{1}{2} a_r t^2 + \frac{v_a v_p}{R_0} t^2 \right] \quad (2.9)$$

De ulike leddene er illustrert på Figur 2.3.



Figur 2.3 Ulike ledd som bidrar til fase- og Doppler-forløp for en spreader med 10 m/s hastighet og 2 m/s² akselerasjon i range-retningen

Faseforskjellen fører til at en bevegelig spreader fremstår på en annen måte i SAR-bildet enn en stasjonær spreader. De tre leddene i likning (2.9) gir henholdsvis asimut-forflytning som følge av range-hastighet, asimut-utsmøring som følge av range-akselerasjon og asimut-utsmøring som følge av asimut-hastighet. Asimut-forflytningen kan finnes ved å sette det første leddet lik uttrykket i likning (2.5). Det gir følgende forflytning:

$$D_a = \frac{v_r R_0}{v_p} \quad (2.10)$$

Effekten av de kvadratiske leddene er litt vanskeligere å beregne. I [2] argumenteres det for at en kvadratisk fasefeil som vi kan kalle ϕ_q innenfor avbildningsintervallet $(-T/2 \leq t \leq T/2)$ fører til en utsmøring i asimut lik:

$$S_a \approx \frac{2\phi_q \lambda R_0}{\pi v_p T} \quad (2.11)$$

Defokusering som følge av range-akselerasjon og asimut-hastighet kan dermed finnes ved å sette de kvadratiske leddene i likning (2.9) inn for ϕ_q i likning (2.11), med $t = T/2$. Det gir:

$$S_a \approx \frac{a_r R_0 T}{v_p} + 2v_a T \quad (2.12)$$

I litteraturen blir litt forskjellige tall lagt til grunn ved utledning av denne defokuseringen, så man kan finne uttrykk som gir noen prosent forskjellige svar [3]. Akselerasjon i asimut-retningen og eventuelle høyere ordens bevegelseskomponenter gir normalt mindre bidrag som vi velger å se bort fra i denne sammenhengen.

2.2 Overordnet beskrivelse av skip i SAR-bilder

Et eksempel på et skip i et høyoppløselig SAR-bilde er vist på Figur 2.4.



Figur 2.4 Cruiseskipet Astor (lengde 175 m) avbildet med TerraSAR-X, 2.0 x 1.7 m oppløsning (range x asimut). Skipet seiler med ca. 12 knops hastighet

En overordnet beskrivelse av de ulike effektene som har betydning for hvordan skip ser ut i slike bilder blir gitt i de neste avsnittene.

2.2.1 Forflytning

Skip med en hastighetskomponent i slant-range-retning vil få en forflytning i asimut-retning i SAR-bilder. Ved å sette inn hastighetskomponenten for typiske skipshastigheter i likning (2.10) ser vi at skip i SAR-bilder fra satellitt kan få en forflytning på flere hundre meter fra sin

egentlige posisjon. For eksempel er skipet på Figur 2.4 forflyttet ca. 200 m mot høyre i bildet. Når kjølvannstriper er synlige i bildene, kan man observere den kjente effekten at selve skipet som regel er forflyttet fra kjølvannet sitt.

2.2.2 Forvrengning

Skip med rotasjonsbevegelse kan få en forvrengning i SAR-bilder. De kan bli strukket ut eller komprimert i asimut-retningen, og formen kan bli forvrent. På en enkel måte kan man si at når et skip ruller i bølgene, har ulike deler av skipet forskjellig hastighet sett fra radaren. De får da ulik forflytning i bildet, og resultatet blir en forvrengning av skipet i SAR-bildet.

Hvordan skipet blir forvrent er bestemt av den effektive rotasjonen sett fra radaren. Når satellitten flyr forbi, vil målets aspektvinkel endre seg gjennom integrasjonstiden. Fra satellitten ser det ut som om skipet har en rotasjonsbevegelse. Hvis skipet ikke ruller i bølgene, blir situasjonen som illustrert til venstre på Figur 2.5. Rotasjonsvektoren for den tilsynelatende rotasjonsbevegelsen kalles ω_z . Den står normalt på både slant-range- og asimut-retningen og har skalarverdi lik:

$$\omega_z \approx \frac{V_p}{R_0} \quad (2.13)$$

Når skipet ligger midt i scenen, kan likning (2.6) skrives:

$$f_D \approx \frac{2}{\lambda} \omega_z y \quad (2.14)$$

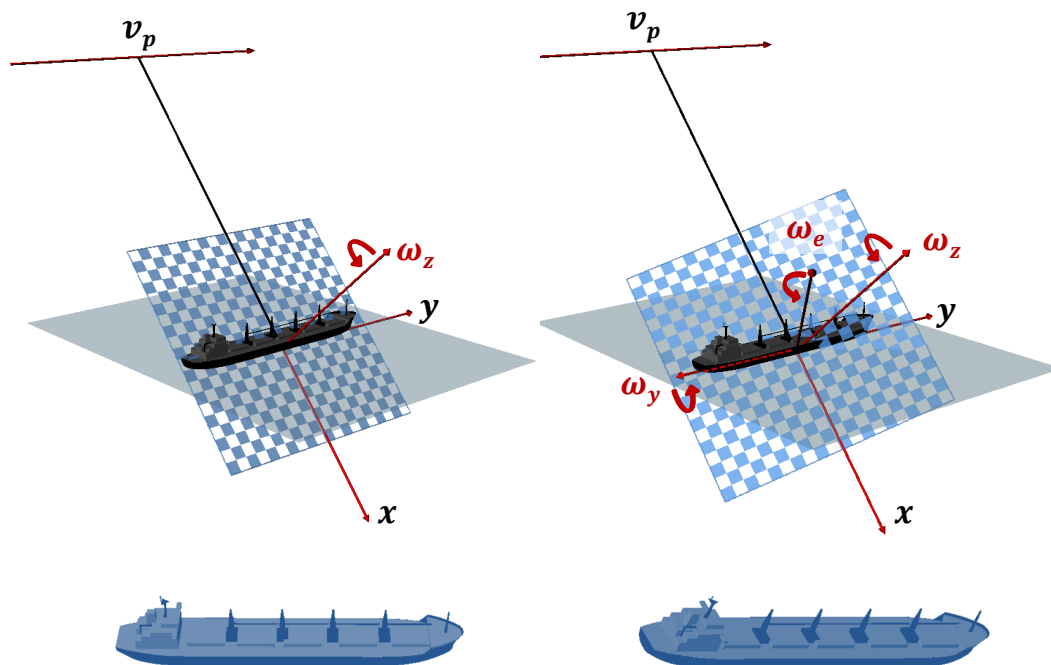
SAR-avbildningen av skipet er en projeksjon av skipets spredere i et bildeplan som spennes ut av slant-range- og Doppler-retningen. For et skip som ikke ruller i bølgene kan denne projeksjonen fra 3 til 2 dimensjoner skrives på følgende måte:

$$\begin{bmatrix} r \\ f_D \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{\lambda} \omega_z & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Hvis skipet ruller i bølgene, blir situasjonen som illustrert til høyre på Figur 2.5. Rotasjon om x-aksen gir ingen Doppler, men bidragene fra rotasjon om z-aksen og y-aksen summeres ved vektoraddisjon til en effektiv rotasjonsvektor ω_e . Bildeplanet står normalt på denne vektoren, og vi finner at projeksjonen av målets spredersposisjoner inn i planet kan skrives:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{r} \\ \mathbf{f}_D \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{\lambda} \omega_z & -\frac{2}{\lambda} \omega_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

I likningene (2.14) til (2.16) er både spredersens posisjon og rotasjonsvektoren tilnærmet med konstante verdier innenfor integrasjonstiden. Likningene gjelder derfor strengt tatt bare når integrasjonstiden går mot null. I virkeligheten vil posisjoner og rotasjonsvektorer endres kontinuerlig, og variasjonen innenfor integrasjonstiden kan da beskrives ved rekkeutviklinger (se 4.2.5). Ettersom rotasjonsvektoren endrer seg hele tiden, endres forvrengningen av målet fra ett utsnitt av den syntetiske aperturen til det neste. Som vi senere kommer inn på kan ujevn rotasjon innenfor integrasjonstiden føre til defokusering.



Figur 2.5 Øverst: Bildeplan for skip uten og med rull-bevegelse. Planet spennes ut av slant-range- og Doppler-aksen (henholdsvis x og y) og står normalt på målets effektive rotasjonsvektor. Rutemønsteret illustrerer oppløsningsceller i range og Doppler. Nederst: De tilhørende projeksjonene av skipet i SAR-bildet

2.2.3 Utsmøring

Fra likning (2.12) fremgår det at en hastighetskomponent langs asimut-retningen og en akselerasjonskomponent langs slant-range-retningen gir utsmøring av sprederne i SAR-bildet. I eksemplet på Figur 2.4 er utsmøringen som følge av asimut-hastighet estimert til 6-7 m, eller ca. 4 oppløsningsceller.

Store skip kan ikke gjøre svært hurtige hastighetsendringer, da det er mye masse i bevegelse. Vi har for eksempel observert fra AIS at danskebåtene og Kiel-ferga øker hastigheten med rundt 1,5 knop/min når de har lagt fra kai og er på vei ut i åpnere farvann. Ut fra dette kan vi gjette på at store fartøyers tyngdepunkt sjelden vil ha en akselerasjonskomponent langs slant-range-retningen på mer enn $0,01 \text{ m/s}^2$ på flat sjø. For store skip kan kontrollerte hastighetsendringer i så fall forventes å spille en rolle for fokuseringen først ved sub-meter oppløsning. For mindre fartøyer må vi kunne forvente hurtigere hastighetsendringer som kan ha betydning for fokuseringen også ved noe lavere oppløsning.

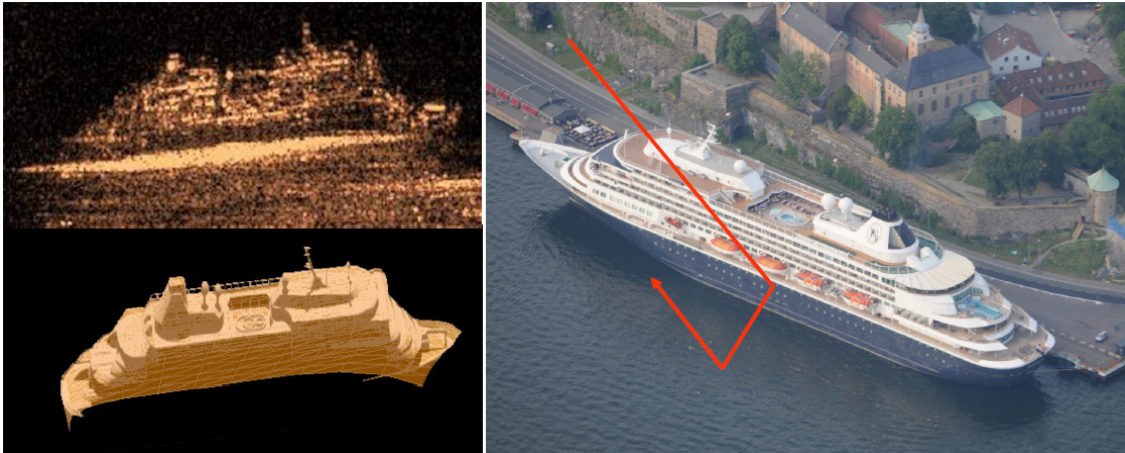
Fartøysbevegelser som skyldes bølgene på havet gir større akselerasjon av sprederne. Særlig vil kraftig rullbevegelse gi betydelige akselerasjoner av sprederne som befinner seg høyt over skipets rotasjonsentrum. Man vil dermed se at masten og de øvre delene av overbygningen er dårligere fokusert enn resten av skipet i høyoppløselige SAR-bilder. Dette blir nærmere behandlet i kapittel 2.3.

2.2.4 Bevegelige deler

Bevegelige deler vil generelt bli ufokuserte i SAR-bilder. På fartøyer gjelder det først og fremst roterende antenner. De mest utpregede eksemplene på dette er de langtrekkende radarene med parabolisk antenne som man finner på mange militære fartøyer av litt eldre årgang. Antennen kan være over 7 m bred, ha en komplisert metallstruktur på baksiden og rotere med 5-15 rpm. De ytre delene vil ha en hastighet og akselerasjon som gir henholdsvis forflytning og utsmøring på opp til flere hundre meter i SAR-bildene. Man kan derfor forvente å observere slike antenner som lange striper i asimut-retningen dersom signal-støy-forholdet er godt nok.

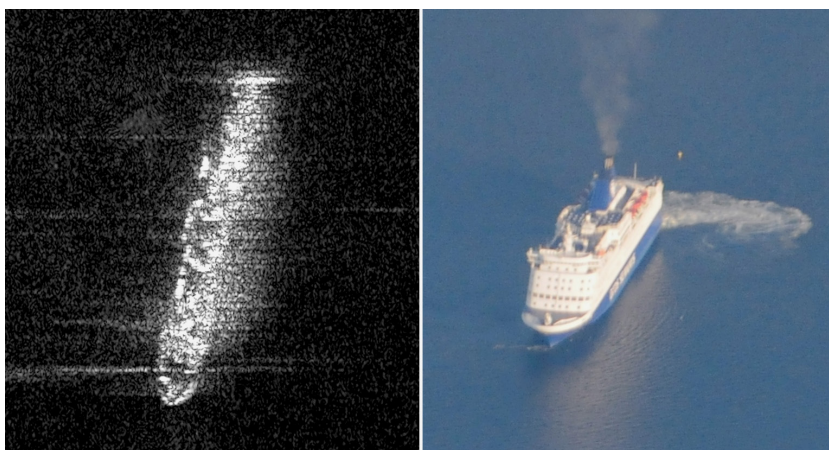
2.2.5 Sjøreflekser

Ofte vil en betydelig del av den tilbakespredte energien fra et skip gå via vannflaten. Dette gjelder i særlig stor grad når skipet er orientert på tvers av range-retningen. Da vil skipssiden og vannflaten danne en stor dihedral-hjørnereflektor som vil vise seg i bildet som en kraftig stripe langs vannlinjen. Et eksempel på dette er vist på Figur 2.6. Tilsvarende sjøreflekser vil gjøre seg gjeldende langs akterenden når skipet ses bakfra og der baugen skjærer vannlinjen når det ses forfra. Sjørefleksen i baugen kan gjerne ses svært tydelig innenfor en bred sektor, se Figur 2.4 og Figur 2.7.



Figur 2.6 Øverst til venstre: TerraSAR-X-bilde av cruiseskipet Prinsendam (lengde 204 m), 1 x 1 m oppløsning. Mye tilbakespredning er konsentrert langs vannlinjen. Nederst til venstre: 3D-modell av fartøyet transformert til samme projeksjon. Den ene siden av modellen er fjernet for å vise hvor vannlinjen går på siden som vender mot radaren. Til høyre fotografi av Prinsendam tatt nær tidspunktet for SAR-avbildningen

Ettersom vannflaten er i bevegelse, fremstår sjørefleksene som bevegelige mål i SAR-bildet. Vi kan tenke oss at energien blir reflektert i en mengde små felter på vannflaten, og disse har hastighetskomponenter i slant-range-retningen som gjerne fordeler seg innenfor \pm noen titalls cm/s. Dette gir striper med en kornete struktur som typisk strekker seg noen titalls meter til hver side i asimut-retningen. Man ser ofte slike striper som strekker seg ut fra spredere langs den siden av skipet som vender mot radaren. Et eksempel er vist på Figur 2.7. I dette tilfellet er det tett med striper, da det er svært mange spredere langs siden (vinduer, rekkverk på det øvre dekket og så videre).



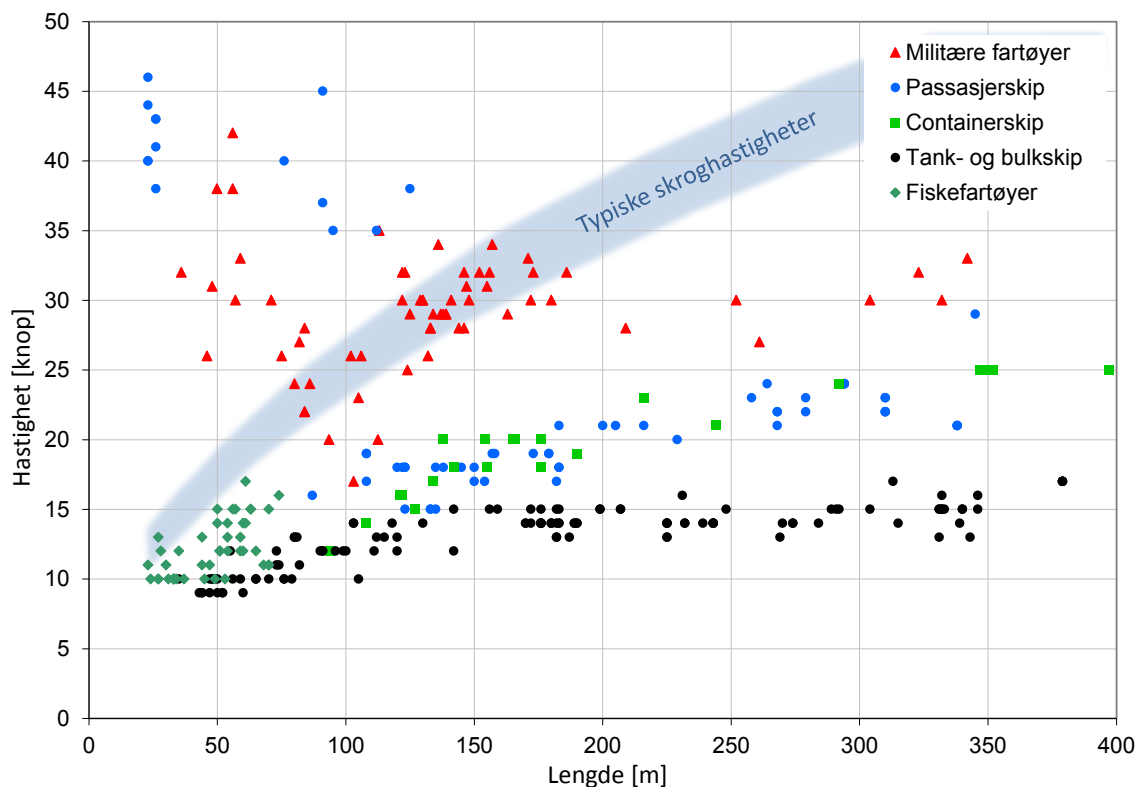
Figur 2.7 Til venstre: SAR-bilde med 1 m oppløsning samlet inn med radaren PicoSAR fra helikopter. Målet er danskebåten Crown Seaways. Til høyre: Omtrent samtidig fotografi fra helikopteret

2.3 Fartøysbevegelser

For å få en bedre forståelse av hva som kan forventes av fartøysbevegelser er det gjort både teoretiske betraktninger og praktiske målinger.

2.3.1 Hastighet

Maksimalhastigheten til et utvalg fartøyer av ulike kategorier er vist i Figur 2.8. For de sivile fartøyene er hastighetene primært hentet fra [4], mens [5] er den viktigste kilden for de militære fartøyene.



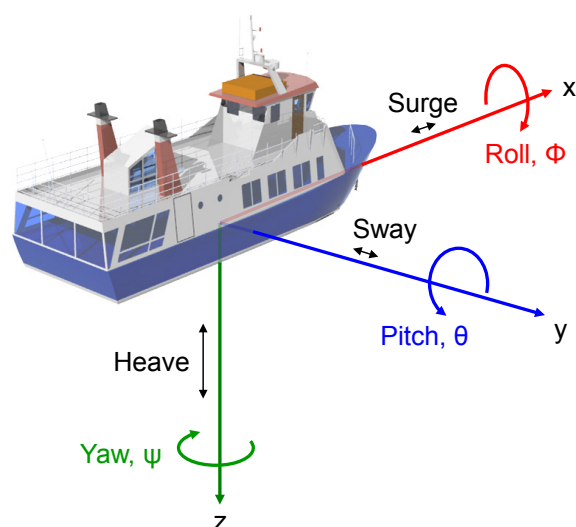
Figur 2.8 Maksimal forventet hastighet for et utvalg fartøyer av ulike kategorier

Et fartøys maksimale hastighet er blant annet avhengig av fartøystype og lengde. For deplasementsskrog (tradisjonelle skrog som fortrenger mye vann) vil bølgedannelsen sette en terskel kalt skroghastigheten, der videre økning av hastigheten vil kreve svært mye mer energi. Dette er en pekepinn for maksimal forventet hastighet for fregatter og lignende fartøystyper. For katamaraner, luftputefartøyer og andre skrog som fortrenger lite vann er forholdene helt annerledes. Slike fartøystyper er i bruk både for passasjertrafikk og militære formål. For eksempel har katamaranen MS Fjord Cat, som går i rute mellom Kristiansand og Hirtshals, en toppfart på ca. 45 knop, mens Skjold-klasse kystkorvetter oppgis å ha en toppfart på 60 knop (utenfor skalaen på Figur 2.8).

Når det gjelder handelsflåten, er hastigheten i stor grad et spørsmål om økonomi. Store containerskip er ofte bygget for hastigheter opp til 20-25 knop, mens tank- og bulkskip typisk seiler i rundt 15 knops hastighet.

2.3.2 Teori om fartøyers bevegelser i bølgene

I dette avsnittet beskrives fartøyers bevegelse i bølgene ut fra teori om skipshydrodynamikk [6-9]. Fartøysbevegelser har i det mest generelle tilfellet 6 frihetsgrader, som vist på Figur 2.9. Det benyttes her engelske navn, da de norske er lite brukt.



Figur 2.9 Koordinatsystem og mulige bevegelser for et fartøy som ruller i bølgene

Når store fartøyer seiler innaskjærs, vil bevegelsene som er forårsaket av bølger ofte være så små at de kan neglisjeres. Man står da igjen med en enkel bevegelse i xy-planet. De eneste rotasjonsbevegelserne er kursendringer, og disse vil være i størrelsesorden milliradianer per sekund. Vi har for eksempel observert at danskebåtene bruker rundt 3 min på å endre kursen 90° når de legger fra kai, noe som tilsvarer en vinkelhastighet på opp mot 10 mrad/s. I rom sjø er situasjonen en annen. Man må ta hensyn til fartøysbevegelserne som skyldes bølger. Sammenhengen mellom sjøtilstand, fartøyets egenskaper og de resulterende bevegelsene er svært komplisert. En måte å beskrive den på er gjennom en transferfunksjon, som vist på Figur 2.10 og uttrykt ved likning (2.17).



Figur 2.10 Sammenheng mellom havbølgespekteret og et fartøys bevegelser

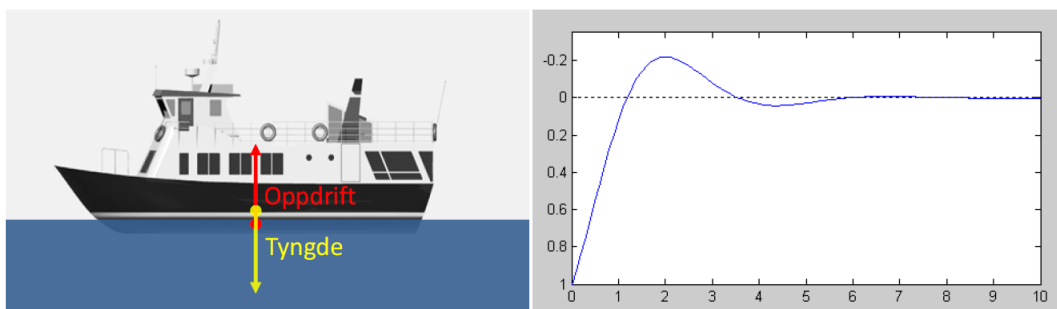
$$S_{xx}(\omega) = |H(\omega)|^2 S_{ff}(\omega) \quad (2.17)$$

Et fartøys transferfunksjon kan variere litt med last etc., men er ellers konstant. Hvis transferfunksjonen var kjent, kunne man blant annet ha gjort simuleringer av fartøyets bevegelser for ulike sjøtilstander. Det vil føre for langt å gi en komplett beskrivelse av hvordan transferfunksjonen kan beregnes. Nedenfor skisseres en løsning ved hjelp av eksempler.

Vi kan først betrakte en fri heave-bevegelse som oppstår når fartøyet gjenvinner likevekten etter å ha vært trykt ned eller løftet opp fra likevektstilstanden. Dette er illustrert på Figur 2.11. Kraftene som virker på fartøyet og de resulterende bevegelsene kan uttrykkes ved følgende bevegelsesligning, som uttrykker Newtons 2. lov for dempede oscillasjoner:

$$(m + A_{33})\ddot{z} + B_{33}\dot{z} + C_{33}z = 0 \quad (2.18)$$

z , \dot{z} og \ddot{z} er fartøyets posisjon, hastighet og akselerasjon i vertikal retning, m er fartøyets masse og A_{33} er en størrelse som kalles tilleggsmasse og som er relatert til vann som akselereres. B_{33} er dempning, som for det meste skyldes at det dannes bølger når fartøyet beveges opp og ned. C_{33} er differansen mellom fartøyets oppdrift og tyngde. Et eksempel på løsning av likningen er vist på Figur 2.11.



Figur 2.11 Fartøy med fri heave-bevegelse. Til høyre eksempel på løsning, $z(t)$

På tilsvarende måte kan vi betrakte en fri roll-bevegelse som oppstår når fartøyet gjenvinner likevektstilstanden etter å ha fått et lite utslag i roll, som illustrert på Figur 2.12.

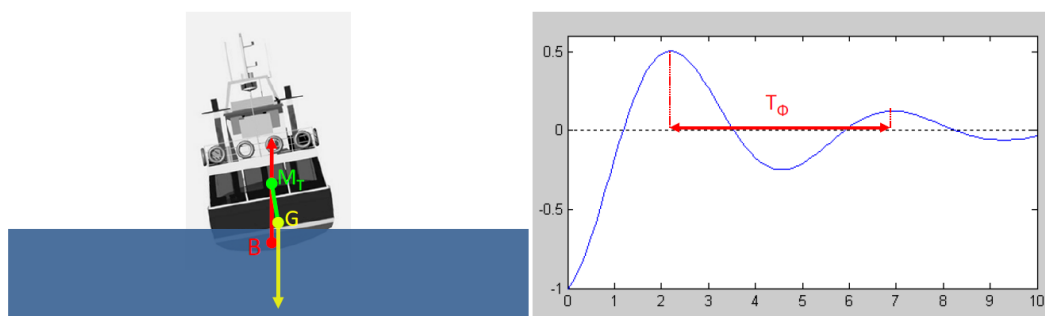
Her er G fartøyets massesenter, B senteret for det fortrenget vannet, og \overline{GM}_T er en størrelse kalt transversal metasentrisk høyde. Denne er bestemt av fartøyets størrelse, type og massefordeling og har en verdi mellom noen titalls cm og noen få meter. Bevegelsesligningen kan skrives

$$(I_{xx} + A_{44})\ddot{\phi} + B_{44}\dot{\phi} + C_{44}\phi = 0 \quad (2.19)$$

der ϕ , $\dot{\phi}$ og $\ddot{\phi}$ er utslag, vinkelhastighet og vinkelakselerasjon for roll-bevegelsen, I_{xx} er fartøyets treghetsmoment om x-aksen, A_{44} er et tillegg som er relatert til vann som akselereres, B_{44} er dempning, som for en stor del skyldes at det oppstår virvler og friksjon når kjølen dras på tvers gjennom vannet. C_{44} kalles gjenopprettende moment og er proporsjonalt med \overline{GM}_T . Et

eksempel på løsning av likningen er vist på Figur 2.12. Fartøyet vil ha en naturlig roll-periode T_ϕ som kan uttrykkes

$$T_\phi \approx \sqrt{\frac{I_{xx} + A_{44}}{C_{44}}} \quad (2.20)$$



Figur 2.12 *Fartøy med fri roll-bevegelse. Til høyre eksempel på løsning, $\phi(t)$*

Bevegelseslikningene for surge, sway, pitch og yaw kan settes opp på lignende måter, og alle ligningene kan slås sammen til følgende uttrykk:

$$[\mathbf{M} + \mathbf{A}]\ddot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{B}\dot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{C}\boldsymbol{\eta} = \mathbf{0} \quad (2.21)$$

$\boldsymbol{\eta} = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$ er utslagene i surge, sway, heave, roll, pitch og yaw, \mathbf{M} er en matrise som inneholder masse og treghetsmomenter om de ulike aksene, \mathbf{A} en matrise som inneholder tilleggsmasser og -momenter, \mathbf{B} inneholder dempningsledd og \mathbf{C} gjenopprettende krefter og momenter. Indeksene til A_{33} , B_{33} , A_{44} og så videre i ligningene ovenfor angir koeffisientenes plassering i matrisene. De ulike bevegelsene er koplet. Særlig er det en sterk kopling mellom heave og pitch og en svakere kopling mellom roll og yaw. Det er i varierende grad mulig å finne gode estimater for koeffisientene i \mathbf{M} , \mathbf{A} , \mathbf{B} og \mathbf{C} . Ofte ender man opp med kompliserte uttrykk som involverer fartøyets massefordeling, formen til skroget under vann, friksjon, virveldannelse eller lignende.

Bevegelseslikningen er gyldig for frie oscillasjoner med små utslag omkring en likevekt. I praksis kan man tenke seg at den beskriver hvordan fartøyet retter seg opp igjen hvis det har fått en liten dytt. Hittil er ikke påtrykk fra bølger tatt med i beregningene. Dette kan gjøres ved å legge til krefter og momenter på høyre side i likningene. Vi kan først anta et kontinuerlig påtrykk av én enkelt sinusformet bølgekomponent. Denne vil sette opp krefter og momenter som vi kan anta vil variere i takt med bølgene. Kraftene i x-, y- og z-retning og momentene om ϕ -, θ - og ψ -aksen kan da skrives $\mathbf{F}\cos(\omega t)$ eller $\text{Re}\{\mathbf{F}e^{-j\omega t}\}$. Bevegelseslikningen blir dermed

$$[\mathbf{M} + \mathbf{A}]\ddot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{B}\dot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{C}\boldsymbol{\eta} = \text{Re}\{\mathbf{F}e^{-j\omega t}\} \quad (2.22)$$

Vi forventer at den påtrykte bølgen vil sette opp bevegelser i fartøyet og at disse bevegelsene blir oscillatoriske med samme periode som bølgen. De forventede løsningene for fartøyets surge, sway, heave, roll, pitch og yaw kan skrives

$$\boldsymbol{\eta} = \boldsymbol{\eta}_0 \cos \omega t = \operatorname{Re}\{\boldsymbol{\eta}_0 e^{-j\omega t}\} \quad (2.23)$$

Bevegelsesligningen kan dermed skrives:

$$[\mathbf{M} + \mathbf{A}](-\omega^2)\boldsymbol{\eta}_0 + \mathbf{B}(-j\omega)\boldsymbol{\eta}_0 + \mathbf{C}\boldsymbol{\eta}_0 = \mathbf{F} \quad (2.24)$$

Fra denne ligningen kan man sette opp uttrykk for fartøyets transferfunksjoner. For å få en illustrasjon på dette kan vi undersøke heave-bevegelsen. Vi antar for enkelhets skyld at det ikke er noen kopling mellom heave og pitch eller noen av de andre bevegelsene. Da har vi kun følgende ledd i bevegelsesligningen for heave:

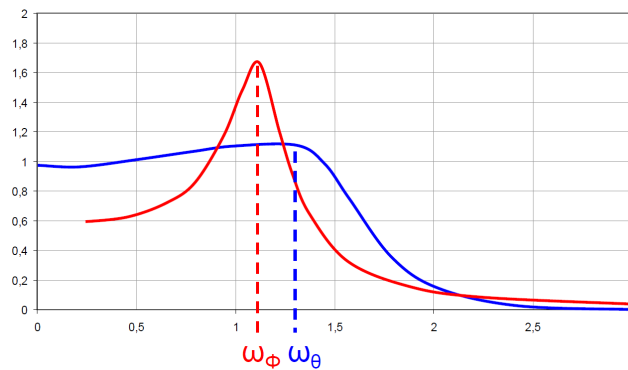
$$-\omega^2(m + A_{33})z_0 - j\omega B_{33}z_0 + C_{33}z_0 = F_3 \quad (2.25)$$

F_3 er kraften som bølgen virker på fartøyet med i z-retning. Denne kraften antas å være proporsjonal med bølgeamplituden: $F_3 = f_3 A$, der A er bølgeamplituden (Må ikke forveksles med matrisen \mathbf{A}). Forholdet mellom amplituden til fartøyets heave-bevegelse, z_0 og bølgeamplituden danner heave-transferfunksjonen:

$$\left| \frac{z_0}{A} \right| = \left| \frac{f_3}{-\omega^2(m + A_{33}) - j\omega B_{33} + C_{33}} \right| \quad (2.26)$$

En slik transferfunksjon vil ha lignende form som eksemplene i Figur 2.13. For lave frekvenser, det vil si lange bølgelengder, er responsen flat. Fartøyet beveger seg opp og ned med samme amplitude som bølgen. Det vil finnes en resonanstopp omkring en spesiell frekvens. Fartøyet vil altså få heave-bevegelser med større amplitude enn bølgen når man treffer den naturlige heave-perioden. Responsen faller raskt av for høyere frekvenser. Det vil si at fartøyet ikke henger med på kortere bølger.

I praksis er det vanskelig å bruke bevegelsesligningene direkte for å finne transferfunksjonene ettersom det kreves omfattende beregninger for å bestemme alle de nødvendige koeffisientene. Programvare for simulering kan benyttes hvis man har en nøyaktig modell av fartøyet, særlig vektfordelingen og formen til skroget under vann. Med mindre kunnskap om fartøyet er det bare mulig å skissere omtrentlige funksjoner basert på empiriske formler og antakelser, som illustrert på Figur 2.13.



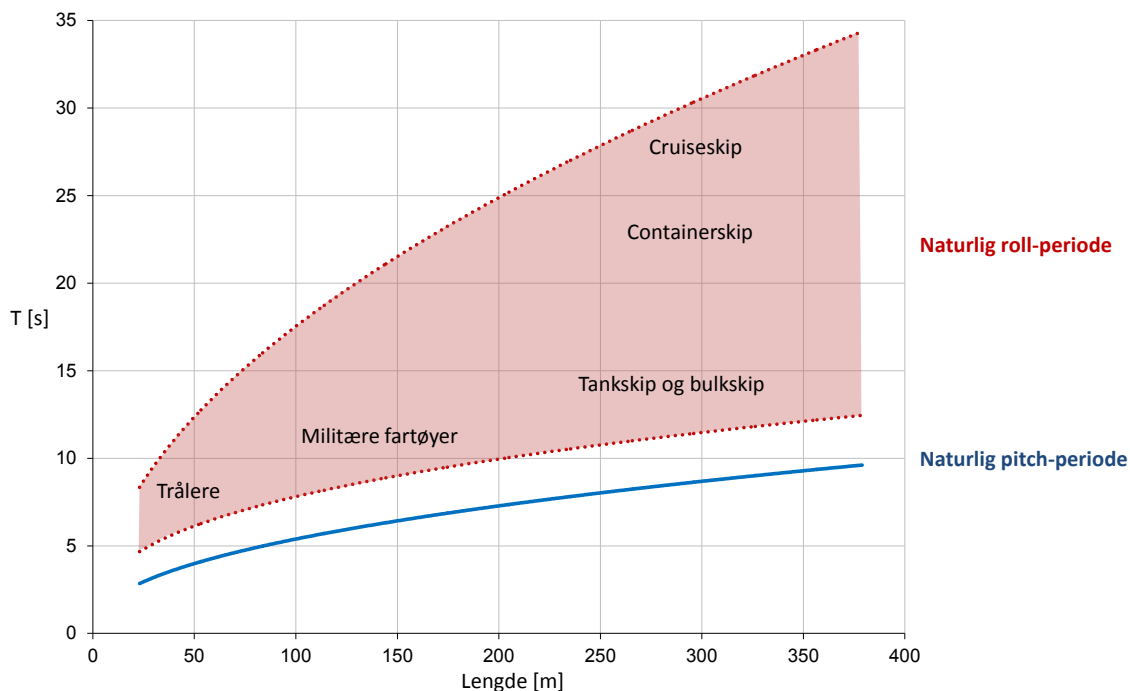
Figur 2.13 Eksempler på transferfunksjoner og naturlige perioder for et fartøys roll-bevegelse (rød) og pitch-bevegelse (blå)

Følgende empiriske formler kan benyttes for henholdsvis naturlig roll- og pitch-periode [9]:

$$T_{\phi} \approx \frac{CB}{\sqrt{GM_T}} \quad (2.27)$$

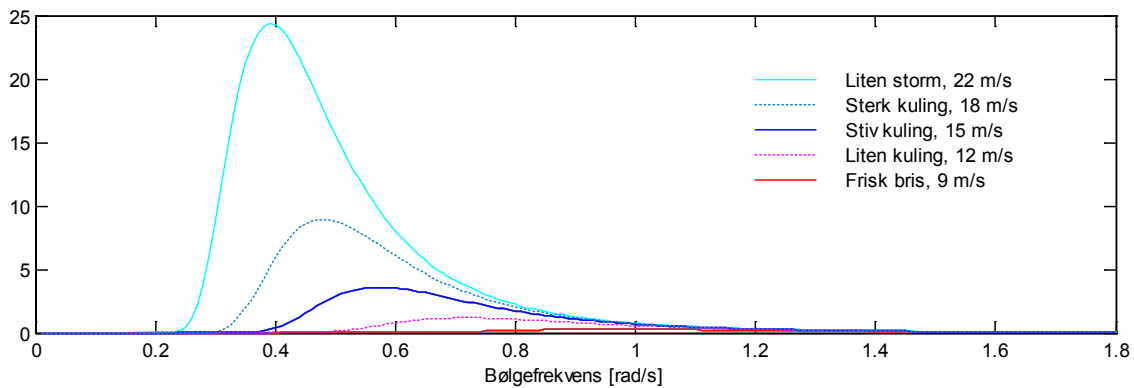
$$T_{\theta} \approx 2,44 + 0,032L_{pp} - 0,000036L_{pp}^2 \quad (2.28)$$

der C er en konstant som typisk ligger rundt 0,8 for alminnelige fartøystyper, B er bredde og L_{pp} er lengde langs vannlinjen. Mange skip har roll-stabilisering. Det medfører at toppen i roll-transferfunksjonen senkes betydelig, men forflyttes lite i frekvens. Disse formlene kan bare benyttes for å gjøre omtrentlige anslag. Særlig vil det være stor usikkerhet knyttet til den naturlige roll-perioden, ettersom den blant annet avhenger av tyngdepunktets høyde. For visse fartøyer, for eksempel containerskip, kan den naturlige roll-perioden endres betydelig av last. Forventet område for ulike fartøyskategoriers naturlige roll- og pitch-perioder er vist på Figur 2.14.



Figur 2.14 Forventet område for ulike fartøyskategoriers naturlige roll- og pitch-perioder

Hvis naturlig roll- og pitchperiode er estimert og transferfunksjonene skisserte, kan likning (2.17) i prinsippet benyttes for prediksjon av et fartøys bevegelser for et gitt havbølgespekter. En enkel tilnærming for spekteret til havbølgene ved ulike vindhastigheter er vist på Figur 2.15. Her forutsettes det fullt utviklet sjø, det vil si at vinden har blåst fra samme retning over et stort havområde over lang tid. I de fleste tilfeller er spekteret mye mer komplisert. Ofte har det to topper, én fra lokal vind og én fra dønninger (swell). Det lokale vindfeltet produserer gjerne mye bølger med korte bølgelengder. Hvis vinden ikke har virket over et stort nok område og lang nok tid til å danne fullt utviklet sjø, er toppen i spekteret forskjøvet mot høyere frekvenser og det er totalt mindre energi i spekteret. Swell er langperiodiske bølger fra værsystemer langt unna. På åpent hav kan store bølger rulle tusenvis av kilometer før de dempes helt ut. Det fins veldig ofte et område med storm eller kuling et eller annet sted på havet, i alle fall i vinterhalvåret. Dermed er ofte bølgespekteret i rom sjø dominert av en swell-komponent med bølgeperiode i området 7-12 s. Bølgespekteret har også en retningsdimensjon. Før innsetting i likning (2.17) må det gjøres modifikasjoner for fartøyet kurs og hastighet i forhold til bølgene.



Figur 2.15 Pierson-Moskowitz havbølgespektre for fullt utviklet sjø ved ulike vindstyrker

Alle de kompliserende faktorene som er nevnt her vanskeliggjør kvantitative prediksjoner av et skips bevegelser ved en bestemt sjøtilstand. Det er imidlertid mulig å gjøre noen praktiske antakelser. Spekteret for roll-bevegelsene vil gjerne være smalt og ligge rundt den naturlige roll-perioden. Utslagene øker med sjøtilstanden, men periodene varierer lite. Et fartøys pitch-perioder vil i stor grad følge de effektive bølgeperiodene som fartøyet observerer når det seiler med en bestemt kurs og hastighet i forhold til bølgene. Det er en forutsetning at bølgene er lange nok. Det kreves typisk bølgelengder større enn 75 % av fartøyets lengde for å gi pitch-bevegelse [8]. Yaw-bevegelsen følger også i stor grad de effektive bølgeperiodene.

De teoretiske betraktningene i dette avsnittet er ikke tilstrekkelige for å gi troverdige tall for størrelsen på fartøysbevegelsene som kan forventes under realistiske forhold. Det er derfor behov for målinger.

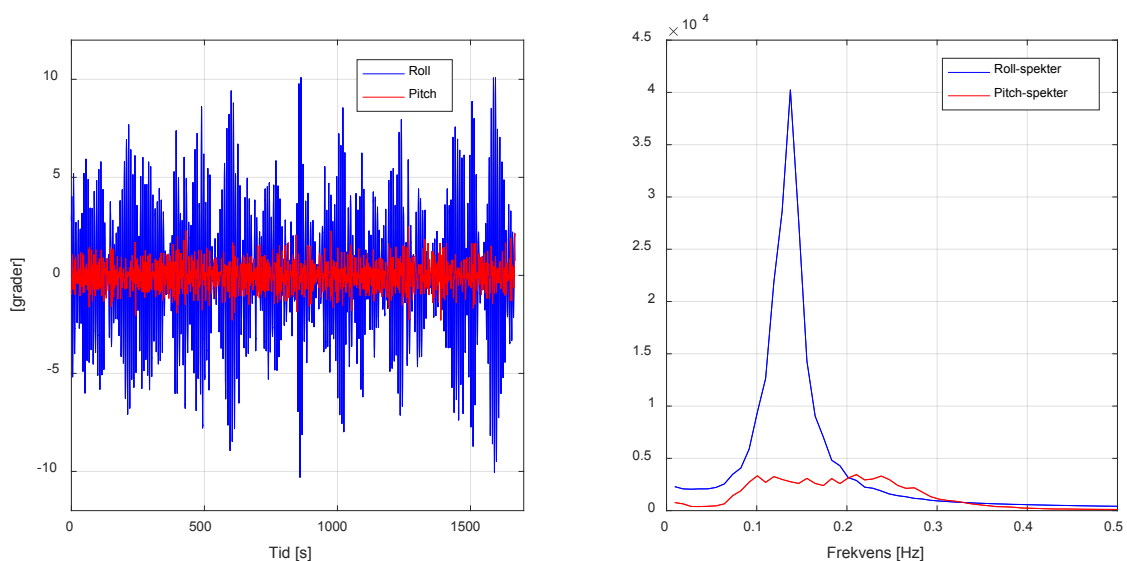
2.3.3 Målte og predikerte rotasjonsbevegelser

FFI har gjort bevegelsesmålinger av enkelte fartøyer. Et av skipene er fergen M/F Skutvik på sambandet Andenes – Gryllefjord, vist på Figur 2.16. Denne fergestrekningen ligger så åpent til for dønninger at vi får en pekepinn om hva som kan forventes av fartøysbevegelser på åpent hav. Skipet har en total lengde på 61,3 m og bredde på 11,2 m. Hastigheten under målingene var ca. 12,5 knop.



Figur 2.16 M/F Skutvik på vei over Andfjorden. Til høyre: Utsikt fra broen når fartøyet har ca. $7,5^\circ$ utslag i roll

Figur 2.17 viser roll- og pitch-bevegelsene i et tidsrom da skipet befant seg langt fra land. Bevegelsen er dominert av roll, med amplitude som varierer fra noen få grader til over 10° og spekter med en markert topp ved $0,137$ Hz, noe som tilsvarer en roll-periode på $7,3$ s. Pitch-spekteret begynner å falle av rundt $0,24$ Hz. Det tilsvarer en naturlig pitch-periode på ca. $4,2$ s, noe som er nær det vi forventer ut fra Likning (2.28).



Figur 2.17 Til venstre: Målte roll- og pitch-bevegelser for M/F Skutvik. Til høyre: Roll- og pitch-spektre estimert ved midling av en serie korte FFT-er gjennom observasjonstiden

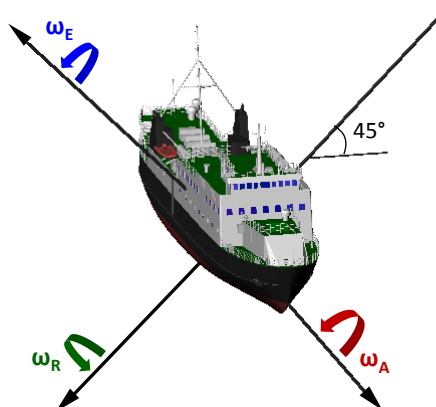
Det finnes havgående fiskefartøyer som er betydelig mindre enn M/F Skutvik, og sjøtilstanden på havet er ofte mye høyere enn under våre målinger. Uten målinger og statistikk er det nærmest umulig å anslå hvor store fartøysbevegelser et SAR-system bør ta høyde for. Vi velger roll-amplitude på 15° som eksempel på store bevegelser for et lite fartøy. Det er også vanskelig å si noe sikkert om hvor store bevegelser som kan forventes for større skip, men i [10] forventes roll-amplituder på opp til $2,5$ - 4° for tankskip og $3,5$ - $7,5^\circ$ for containerskip under normale

forhold. Det kan for øvrig nevnes at dønningene i visse tilfeller kan danne resonans med roll-perioden og føre til svært store utslag hvis fartøyet ikke er roll-stabilisert eller gjør tilpasninger av kurs og hastighet. Skip med relativt kort roll-periode er særlig utsatt for slik resonans. Vi tar ikke hensyn til ekstremtilfeller og velger roll-amplitude på $7,5^\circ$ som eksempel på store bevegelser for et større fartøy. Fartøysparametere benyttet i simuleringer er gitt i Tabell 2.1.

	Eksempel på mindre fartøy	M/F Skutvik	Eksempel på større fartøy
Lengde	30 m	61,3 m	130 m
Hastighet	8 knop	12,5 knop	20 knop
Maks roll-amplitude	15°	10°	$7,5^\circ$
Maks pitch-amplitude	$3,8^\circ$	$2,5^\circ$	$1,9^\circ$
Naturlig roll-periode	6 s	7,3 s	12 s
Posisjonen til et punkt i masten relativt til rotasjonscenteret	$x = 7,5$ m $z = 10$ m	$x = 15$ m $z = 15$ m	$x = 30$ m $z = 25$ m

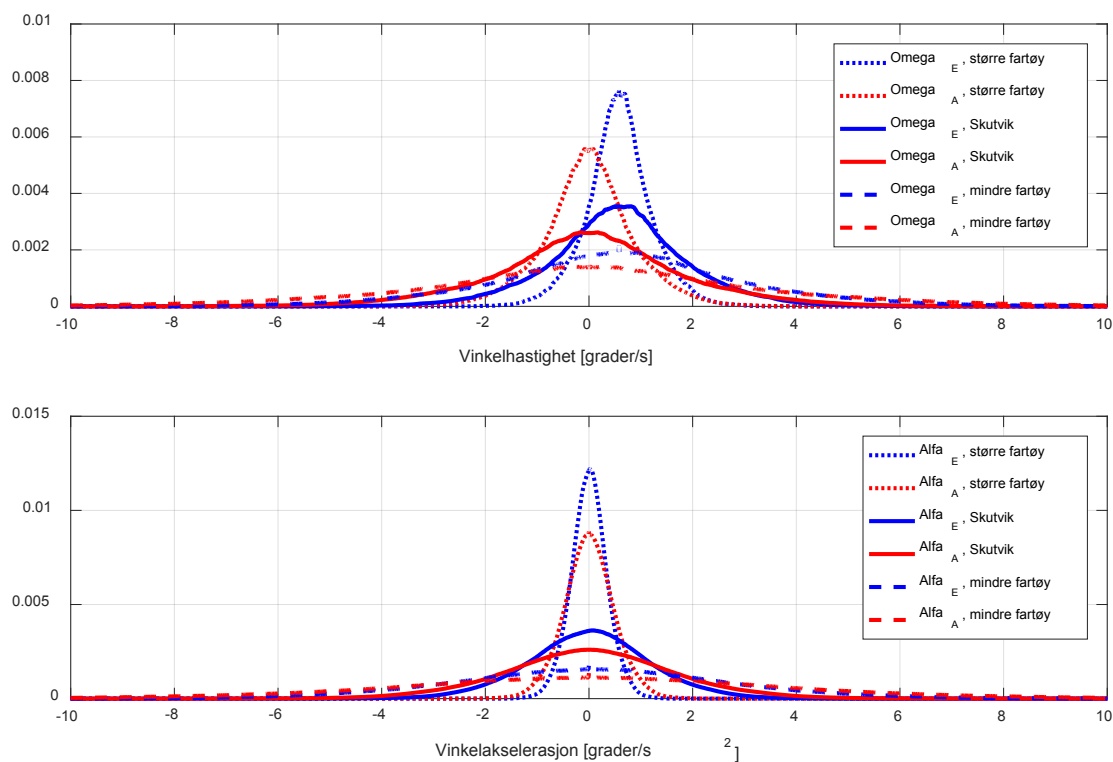
Tabell 2.1 Fartøysparametere benyttet i simuleringer

Det er beregnet hvordan M/F Skutvik sine bevegelser ville blitt observert fra en satellitt i lav jordbane. Elevasjonsvinkelen er satt til 45° , og alle aspektvinkler fra 1° til 360° er gjennomløpt. For alle avbildningsgeometriene er skipets vinkelhastigheter og vinkelakselerasjoner beregnet om tre akser i et koordinatsystem der slant-range-retningen danner en av aksene, se Figur 2.18.



Figur 2.18 Avbildningsgeometri og rotasjonsakser benyttet i simuleringer

Det er funnet sannsynlighetstetthetsfunksjoner for M/F Skutvik sine vinkelhastigheter (ω_E og ω_A) og vinkelakselerasjoner (α_E og α_A). Tilsvarende fordelinger for et større og et mindre fartøy er simulert ved å modifisere rotasjonsbevegelsene til M/F Skutvik. Resultatene er vist på Figur 2.19.



Figur 2.19 Simulerte sannsynlighetstetthetsfunksjoner for vinkelhastigheter (øverst) og vinkelakselerasjoner (nederst) basert på målinger av M/F Skutvik

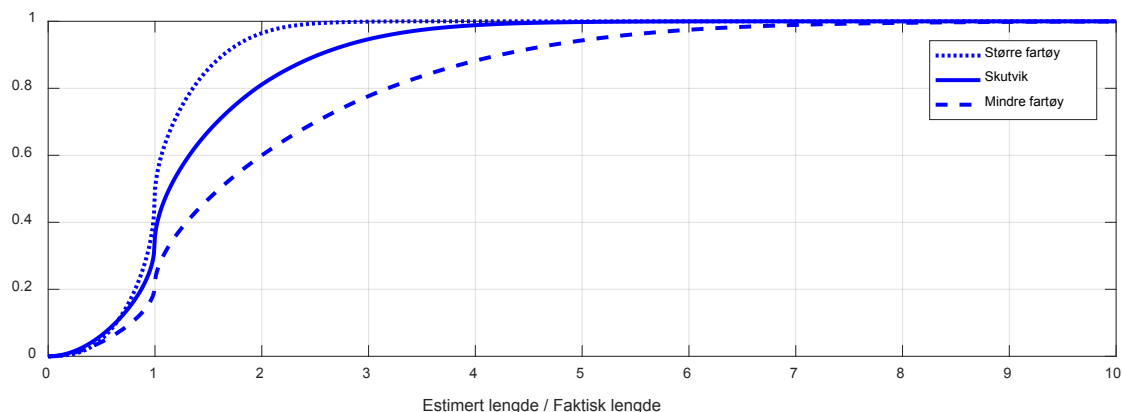
Satellittens bevegelse er opphav til en vinkelhastighetskomponent på $0,58^\circ/\text{s}$. Vi ser at ω_E -fordelingene er sentrert om denne verdien, mens ω_A -fordelingene er sentrert om null.

2.4 Forventet omfang av forvrengning og defokusering av skip i SAR-bilder

De målte og simulerte fartøysbevegelsene gir grunnlag for å estimere omfanget av forvrengning og defokusering i SAR-bildene. Fra Figur 2.19 ser vi at det er betydelig spredning i vinkelhastigheter og -akselerasjoner. Spredning i ω_E betyr først og fremst unøyaktighet i målets asimut-skalering, mens ω_A hovedsakelig gir forvrengning av skipets form.

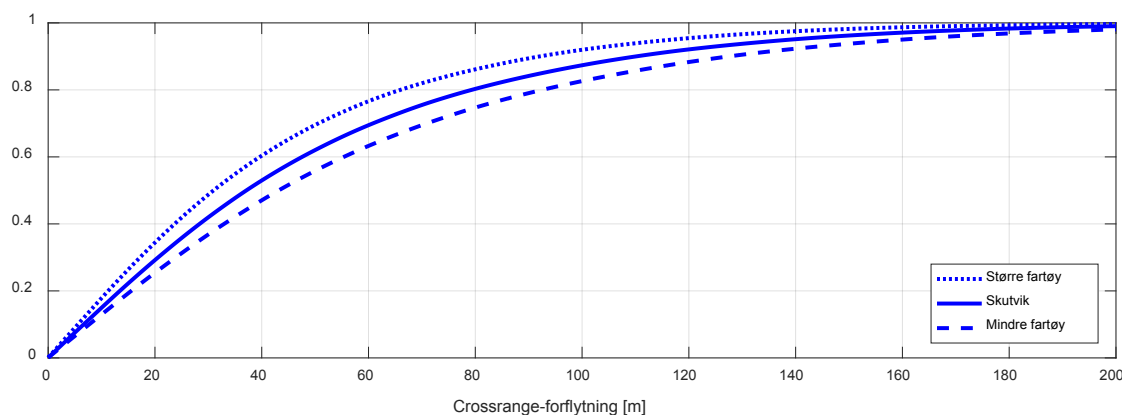
Uten kjennskap til skipets rotasjonsbevegelser blir utstrekningen i bildet (avstanden fra baugen til akterenden) et unøyaktig lengdeestimat. Figur 2.20 viser en simulert kumulativ fordelingsfunksjon for forholdet mellom estimert og faktisk lengde. Resultatene tyder på at skipets lengde i de fleste tilfeller blir overestimert. Medianverdien for estimert lengde er

henholdsvis 100,1 %, 113 % og 160 % av faktisk lengde for et større skip, Skutvik og et mindre skip.



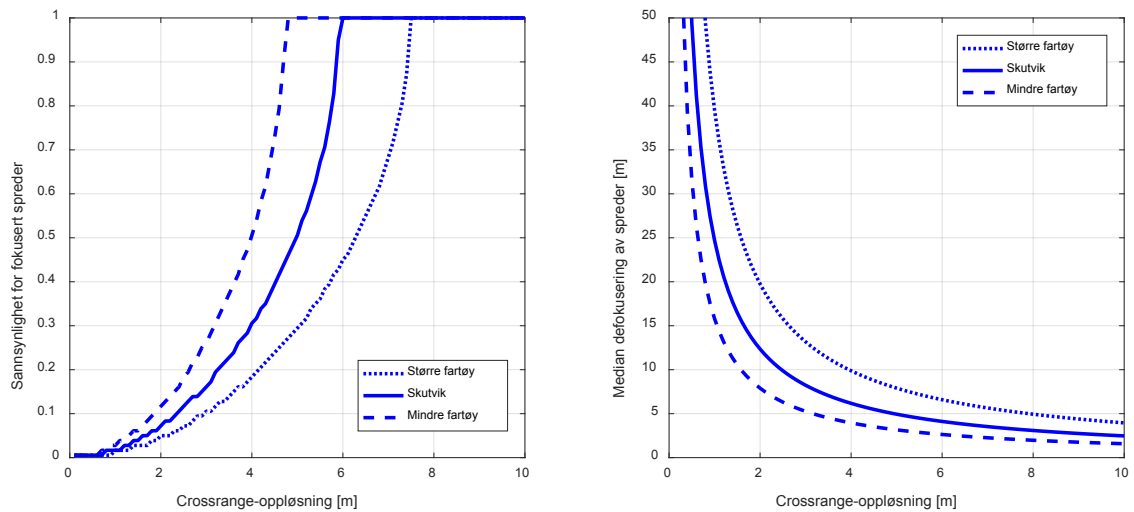
Figur 2.20 Simulert kumulativ fordelingsfunksjon for forholdet mellom estimert og faktisk lengde for skip som ruller i bølgene

Som et mål på fartøyenes forvrengning i bildet benyttes asimut-forflytningen av en spreder i masten. Figur 2.21 viser simulert kumulativ fordelingsfunksjon for forflytningen. Medianverdien er henholdsvis 31 m, 37 m og 43 m for et større skip, Skutvik og et mindre skip.



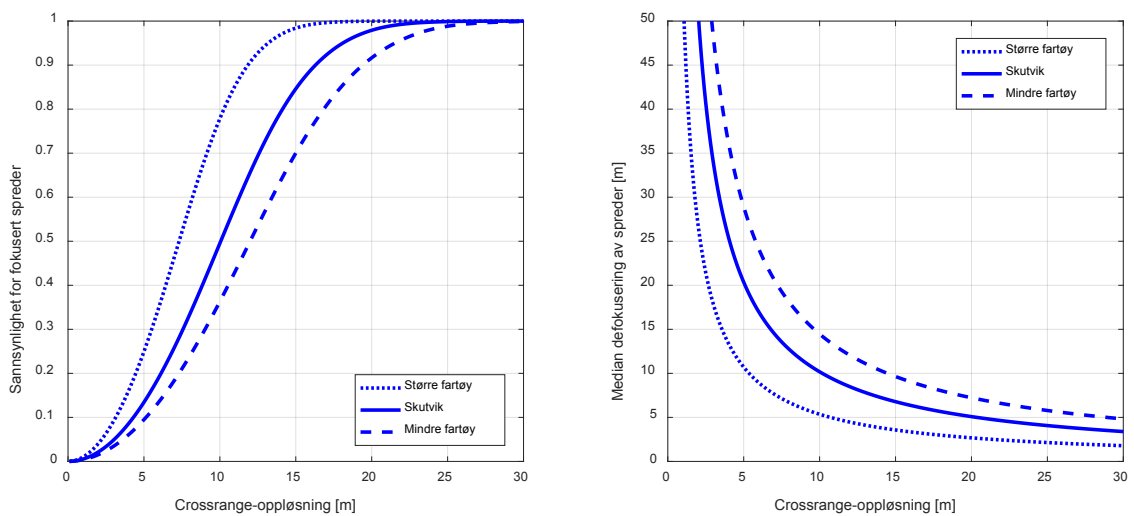
Figur 2.21 Simulert kumulativ fordelingsfunksjon for forflytningen av en spreder i masten på skip som ruller i bølgene

Hastighetskomponenter i asimut-retning og akselerasjonskomponenter i range-retning gir defokusering. Bidraget fra fartøyenes lineære hastighetskomponenter i asimut-retning er vist på Figur 2.22. Rotasjonsbevegelsene er her satt til null. Vi ser at det raskeste skipet blir mest defokuserert.



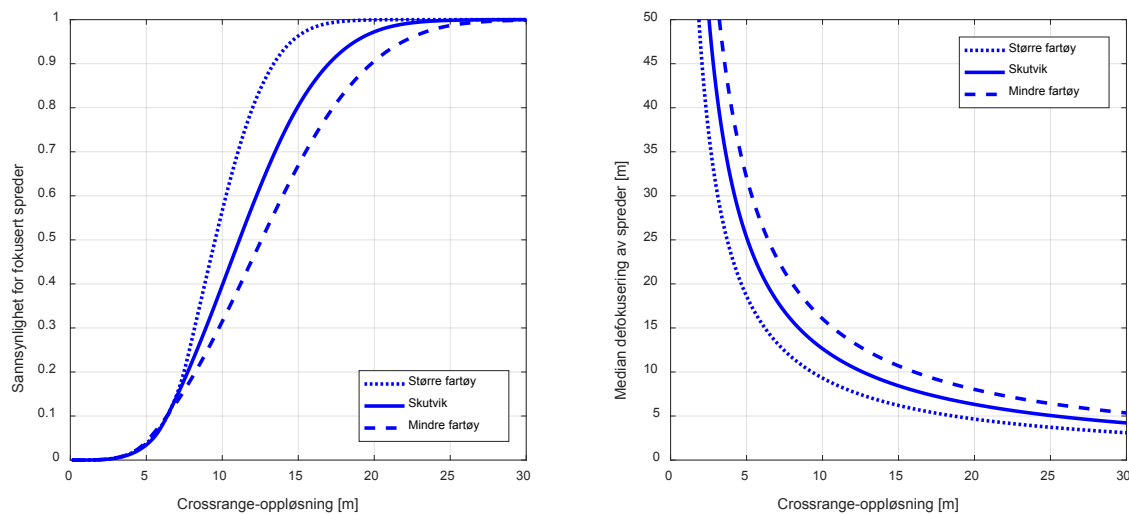
Figur 2.22 Fokusering av skip med lineær hastighet som gitt i Tabell 2.1. Til venstre: sannsynlighet for fokusert spreder som funksjon av crossrange-oppløsning; til høyre: median defokusering av spreder. Skipets hastighet, i dette tilfellet økende med skipets størrelse, er avgjørende for fokuseringen

Akselerasjon i range-retningen som følge av rotasjonsbevegelser gir et bidrag til defokusering som vist på Figur 2.23. Her blir fartøyet med de raskeste rullbevegelsene mest defokuseret.



Figur 2.23 Fokusering av en spreder i masten på skip med rotasjonshastigheter som gitt i Tabell 2.1. Til venstre: sannsynlighet for fokusert spreder som funksjon av crossrange-oppløsning; til høyre: median defokusering av spreder. Defokuseringen øker med rotasjonshastigheten, som her reduseres med skipets størrelse. Defokuseringen ved høy oppløsning er usikker, da rotasjonshastigheten vil variere innenfor integrasjonstiden

Den kombinerte defokuseringen fra både lineær hastighet og rotasjonsbevegelser er vist i Figur 2.24.



Figur 2.24 Fokusering av en spreder i masten på skip med både lineære bevegelser og rotasjonshastigheter som gitt i Tabell 2.1. Til venstre: sannsynlighet for fokusert spreder som funksjon av crossrange-oppløsning; til høyre: median defokusering av spreder. Defokuseringen ved høy oppløsning er usikker, da rotasjonshastigheten vil variere innenfor integrasjonstiden

Simuleringene dekker bare et lite utvalg av situasjoner, men de gir likevel grunnlag for å gjøre noen generelle antakelser:

- I stor sjøgang blir lengdeestimer fra SAR-bilder usikre. Selv for større fartøyer vil en betydelig del av bildene vise unøyaktig lengde. Usikkerheten er størst for fartøyer som stamper mye i bølgene, det vil i praksis si små fartøyer. For disse blir lengden oftest overestimert. Mer nøyaktige lengdeestimer krever estimering av fartøyets rotasjonshastighet.
- Det må forventes en betydelig deformasjon av skip i SAR-bilder. Dette vil være spesielt tydelig når skipets høydeprofil er synlig i bildene, det vil si når skipet er orientert på tvers av range-retningen og observeres fra en høy elevasjonsvinkel. For mindre fartøyer i stor sjøgang kan deformasjonen være større enn skipets lengde. Det bør derfor tas hensyn til denne effekten ved estimering av lengden.
- Fartøysbevegelser fører til defokusering av skip i høyoppløselige SAR-bilder. Det kan forventes at fartøyer som beveger seg i hastigheter som er typiske for store skip på åpent hav begynner å bli defokuserte ved en asimut-oppløsning rundt 6-7 m i liten sjøgang. I stor sjøgang kan spredere i master og lignende vise tegn til defokusering allerede ved 10-15 m oppløsning, men det er usikkert hvor stor praktisk betydning dette har når oppløsningen er så lav.
- For mindre skip er fokuseringen mer avhengig av vær og tilfeldigheter. Ved rundt 20 m oppløsning kan spredere i master og lignende bli defokuserte, og ved 3-4 m oppløsning

er det under alle normale omstendigheter liten sannsynlighet for at et skip på havet er godt fokusert. Ved enda høyere oppløsning øker defokuseringen raskt.

Disse tallene gjelder for satellittbasert avbildning i C-bånd fra rundt 500 km høyde og 45° elevasjonsvinkel. Høyere frekvens gir mindre utfordringer, ettersom integrasjonstidene for en gitt oppløsning reduseres. I X-bånd kunne tallene for oppløsning rundt regnet vært halvert.

3 SAR-avbildning fra satellitt

For å få en bedre forståelse av muligheter og utfordringer ved refokusering av skip som detekteres i SAR-bilder fra satellitt kreves det en del kunnskap både om SAR-prosessering og spesielle forhold knyttet til satellittbasert avbildning. Det forutsettes her at grunnleggende SAR-teori er kjent.

3.1 Noen aspekter ved SAR-avbildning fra satellitt

SAR-avbildning fra satellitt legger en del spesielle føringer for blant annet avbildningsgeometri og aktuelle moduser.

3.1.1 Særtrekk ved satellittbasert SAR

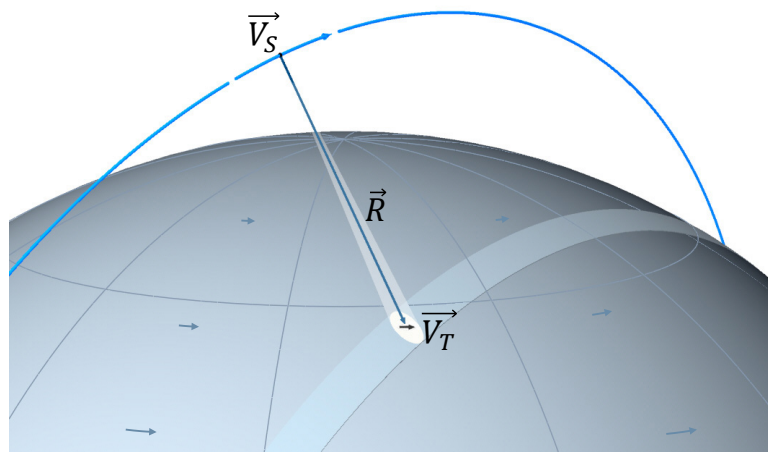
Noen av de viktigste forskjellene mellom satellittbasert og luftbåren SAR gjelder arealdekning og oppløsning, avbildningsgeometri, integrasjonstid og plattformens stabilitet i banen.

Satellittbasert SAR har potensial for avbildning av store arealer, noe som er særlig viktig i forbindelse med maritim overvåkning. Det har hittil vært lite aktuelt å benytte høy oppløsning over åpent hav, ettersom arealdekningen da ville blitt liten. Fra satellitt har fartøyer på havet dermed bare blitt detektert, mens luftbårne systemer har hatt potensial for klassifikasjon og gjenkjenning. Vi må anta at dette kommer til å endre seg i fremtiden. Med nye generasjoner av satellitter vil det bli mulig å avbilde et bredt spor med betydelig høyere oppløsning enn det som er vanlig i dag, og klassifikasjon av skip blir mer aktuelt.

Med satellittbasert SAR avbildes mål typisk fra høye elevasjonsvinkler. Det gir mye layover (tilsynelatende forflytning i ground-range av spredere i større høyde enn omgivelsene), så fartøyers høydeprofil ofte blir synlig i bildet, som i eksempelet på Figur 2.6. Luftbåren SAR gir en mer “top view” projeksjon av målet.

Med SAR-avbildning fra luften kan jordoverflaten antas å være stasjonær, og det kan benyttes en enkel modell for jordkrumningen. Dette gir relativt enkel prosessering. Høyoppløselig SAR-avbildning fra satellitt krever blant annet at de relative avstandene og hastighetene som illustrert

på Figur 3.1 beregnes med stor nøyaktighet. Prosesseringen blir mer komplisert av at det avbildede arealet befinner seg på en dobbeltkrummet flate som roterer om jordaksen.

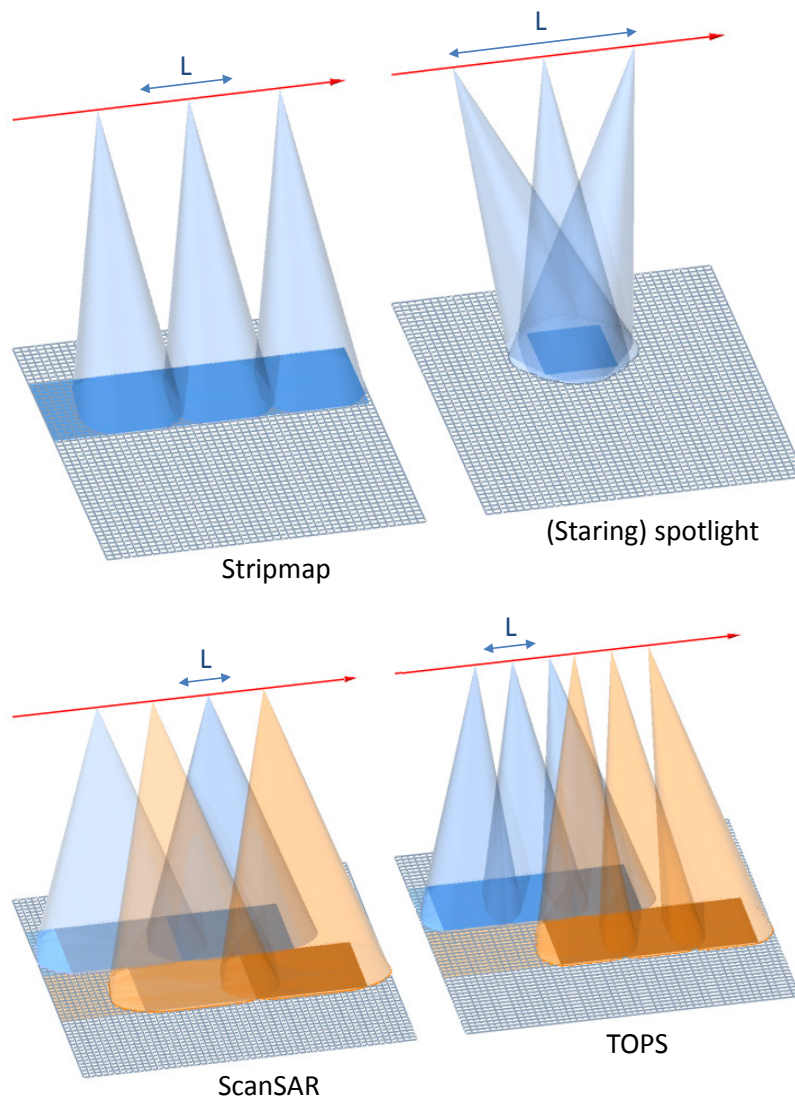


Figur 3.1 Satellittgeometri med avstands- og hastighetsvektorer

Satellittbasert og luftbåren SAR har forskjellige fordeler og ulemper med tanke på å oppnå fokuserte bilder av fartøyer. Kort integrasjonstid og kjent bane er blant fordelene med satellittbasert avbildning. En viktig ulempe er manglende mulighet til å samle inn lengre dataserier av et bestemt mål. Fra luften kan man gjerne samle inn data av et mål i mange titalls sekunder og søke etter et kort tidsrom da målet blir godt fokusert og projiseres i et gunstig bildeplan. Med satellitt må man prøve så godt det lar seg gjøre å lage et fokusert bilde fra dataene som samles inn i løpet av en rask passering.

3.1.2 Aktuelle SAR-moduser

De dominerende modusene i dagens satellittbaserte SAR-systemer er illustrert på Figur 3.2. ScanSAR [11] og TOPS [12] er de viktigste modusene i forbindelse med maritim overvåkning. Disse gir stort dekningsområde på bekostning av lav oppløsning. Det kan forventes at nye moduser for avbildning av brede spor med høyere oppløsning vil bli tatt i bruk i fremtidige systemer. For denne rapportens formål kan de nye modusene for enkelhets skyld betraktes som stripmap- eller ScanSAR-avbildning med flere parallelle spor.



Figur 3.2 *Illustrasjon av aktuelle SAR-moduser. For ScanSAR og TOPS er det her vist to spor i bredden, men det benyttes ofte flere spor. L er den syntetiske aperturens effektive lengde. Figurene viser hovedlobens pekeretning ved noen få tidspunkter, mens det i virkeligheten vil sendes ut tusenvis av pulser innenfor det aktuelle tidsrommet*

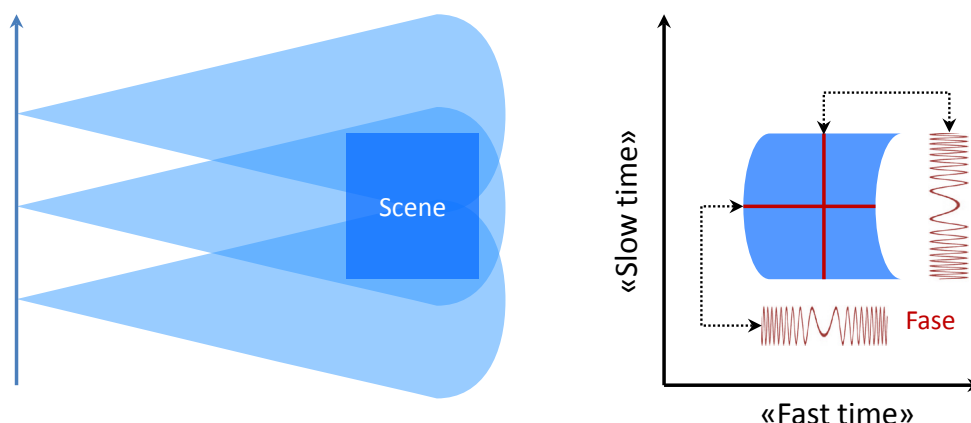
Visse egenskaper ved de ulike modusene er av betydning i forbindelse med refokusering av bevegelige mål. I alle tilfeller gjelder det at refokuseringen må baseres på single-look complex (SLC)-data eller rådata. For ScanSAR og eventuelle andre moduser der pulsene sendes i bursts og radarbeamen flyttes mellom hvert burst, må et refokusert bilde baseres på pulser fra ett burst. I spotlight-modus er hele den avbildede scenen basert på det samme settet av pulser. I de andre modusene har hver asimut-posisjon litt forskjellig datagrunnlag, noe som innebærer større utfordringer for refokuseringen.

3.2 SAR-prosessering

Det gis her en kort introduksjon til SAR-prosessering. Formålet er å lette forståelsen av refokuseringsmetodene som beskrives senere i rapporten.

3.2.1 Grunnleggende teori om SAR-fokusering

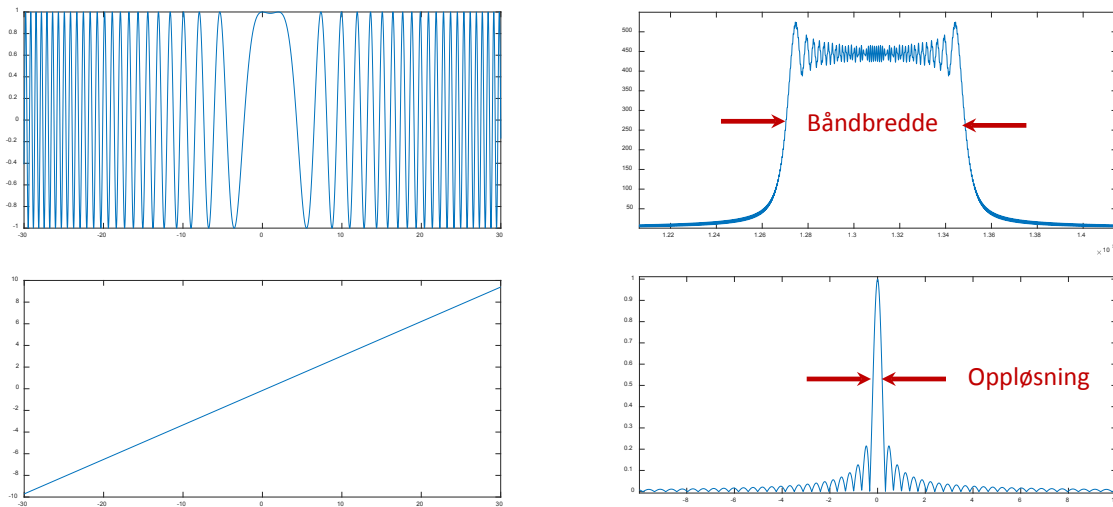
SAR-datainnsamling er illustrert på Figur 3.3.



Figur 3.3 *Illustrasjon av SAR-datainnsamling. Til høyre en enkel skisse av hvor rådataene som dekker én spreder i scenen er plassert i “fast time-slow time”-domenet. Det er her ikke tatt hensyn til sideløber*

Rådataene samles inn i det vi kan kalle “fast time-slow time”-domenet. Pulsenes propagasjon over scenen beskrives i fast time, mens satellittens bevegelse gjennom den syntetiske aperturen beskrives i slow time. Hvis scenen kun inneholdt én enkelt spreder, ville rådataene dannet en punktsprederfunksjon. Denne ville hatt en 2-dimensjonal amplitudfunksjon hovedsakelig gitt av radarens antennediagram og spreders radartverrsnitt og en 2-dimensjonal fasefunksjon hovedsakelig gitt av pulsmodulasjonen og forløpet til avstanden mellom radaren og sprederen. Med chirp-modulerte pulser ville tverrsnitt gjennom fasefunksjonen langs begge dimensjoner hatt tilnærmet chirp-form. Virkelige rådata består av overlappende sprederfunksjoner fra alle spredere i scenen.

All tilbakespredt energi som mottas fra en spreder skal ideelt sett fokuseres i ett punkt. Et sentralt begrep i den sammenheng er kompresjon, som illustrert på Figur 3.4.



Figur 3.4 Øverst t.v.: signalets realdel innenfor en chirp-modulert puls; nederst t.v.: frekvensforløpet gjennom pulsen; øverst t.h.: pulsens frekvensspektrum; nederst t.h.: komprimert puls i tidsdomenet

Kompresjon i fast time (slant range) kan gjøres i tidsdomenet ved konvolusjon av det mottatte signalet med et tilpasset filter. Filterresponsen vil være identisk med den utsendte pulsen. Alternativt kan kompresjonen gjøres i frekvensdomenet. Konvolusjon i tidsdomenet tilsvare multiplikasjon i frekvensdomenet, og kompresjonen kan derfor gjøres mer effektivt i frekvensdomenet. Det mottatte signalet må i så fall Fourier-transformeres før kompresjonen og invers Fourier-transformeres etterpå. Det er kjent at oppløsningen (det vil si bredden av den komprimerte pulsen) er invers proporsjonal med signalets båndbredde.

Ettersom det mottatte signalet fra en spredde har en tilnærmet chirp-formet fasehistorie også i slow time (asimut), kan kompresjon i slow time gjøres på lignende måte som i fast time. Det er også mulig å utføre kompresjon i begge dimensjoner i én operasjon. SAR-prosessering krever generelt mye prosessering, og det er utviklet en rekke algoritmer som balanserer hensynene til hurtighet, nøyaktighet og robusthet i ulike situasjoner.

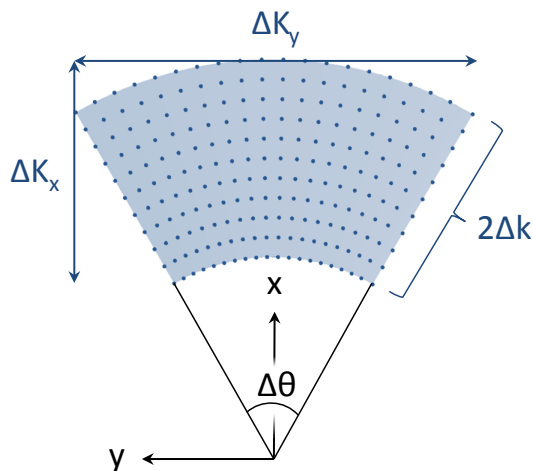
3.2.2 Bølgetallsdekning og oppløsning

Bølgetallsdomenet eller Fourier-domenet introduseres her primært for å belyse utfordringene ved store og ujevne vinkelendringer. Det gir også en mer generell forståelse av oppløsning. Bølgetall er definert som:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} \quad (3.1)$$

Bølgetall er et uttrykk for romlig frekvens. Det angir radianer per meter i et øyeblikksbilde av bølgemønsteret. Bølgetallet varierer med (temporal) frekvens og retning. Variasjonen i bølgetall

i det reflekterte signalet fra en spreder kan skisseres som vist på Figur 3.5. Her er x slant-range-retningen, y er asimut-retningen, og θ angir retningen mot sprederen.



Figur 3.5 Bølgetallsdekning for en spreder. Punktene illustrerer samples

De to størrelsene K_x og K_y er definert på følgende måte:

$$K_x = 2k \cos \theta \quad (3.2)$$

$$K_y = 2k \sin \theta \quad (3.3)$$

2-tallene skyldes at signalet propagerer frem og tilbake over målet.

Det viser seg at variasjonen i bølgetall innenfor integrasjonstiden er avgjørende for sprederens oppløsning i bildet. Vi har følgende sammenheng mellom bølgetallsdekning og oppløsning [13]:

$$\delta_x = \frac{2\pi}{\Delta K_x} \quad (3.4)$$

$$\delta_y = \frac{2\pi}{\Delta K_y} \quad (3.5)$$

δ_x og δ_y angir henholdsvis slant-range- og asimut-oppløsning. Det kan diskuteres om ΔK_x og ΔK_y skal defineres slik at de danner et rektangel som omslutter bølgetallsdekningen, som vist på Figur 3.5, eller om de heller må danne et rektangel innenfor bølgetallsdekningen. Det første alternativet gir høyere oppløsning, men mer sideløber på grunn av manglende data til å fylle ut hele rektangelet [14]. Når vinkelområdet $\Delta\theta$ er lite og båndbredden Δf mye mindre enn bærebølgefrequensen, kan K_x og K_y tilnærmes med det første leddet i rekkeutviklinger:

$$K_x \approx 2k = \frac{4\pi f}{c} \quad (3.6)$$

$$K_y \approx 2k\theta = \frac{4\pi\theta}{\lambda} \quad (3.7)$$

Dette gir de kjente uttrykkene for oppløsning:

$$\delta_x \approx \frac{c}{2\Delta f} \quad (3.8)$$

$$\delta_y \approx \frac{\lambda}{2\Delta\theta} \quad (3.9)$$

Dersom aspektvinkelendringen $\Delta\theta$ i Likning (3.9) byttes ut med en elevasjonsvinkelendring $\Delta\phi$, får man isteden en oppløsning δ_z i elevasjonsretningen. Variasjon i både θ og ϕ mens målet belyses med et koherent signal gir 3-dimensjonal bølgetallsdekning, noe som i prinsippet kan gi en 3-dimensjonal avbildning av målet.

Ved satellittbasert SAR-avbildning av havområder er $\Delta\theta$ som regel under 1° , og forholdet mellom båndbredden og bærebølgefrequensen er maksimalt noen få prosent. Bølgetallsdekningen har da en tilnærmet rektangulær form. Vinkelendringen mellom påfølgende pulser kan antas å være konstant. En slik regulær sampling på et rektangulært grid i bølgetallsdomenet er fordelaktig med tanke på å oppnå fokuserte bilder med enkle algoritmer. Ved avbildning av fartøyer med stor rotasjonsbevegelse kan avvikene fra en rektangulær bølgetallsdekning være betydelige, og vinkelendringen mellom pulsene kan variere på en ukjent måte. Dette er forhold som vanskeliggjør fokuseringen.

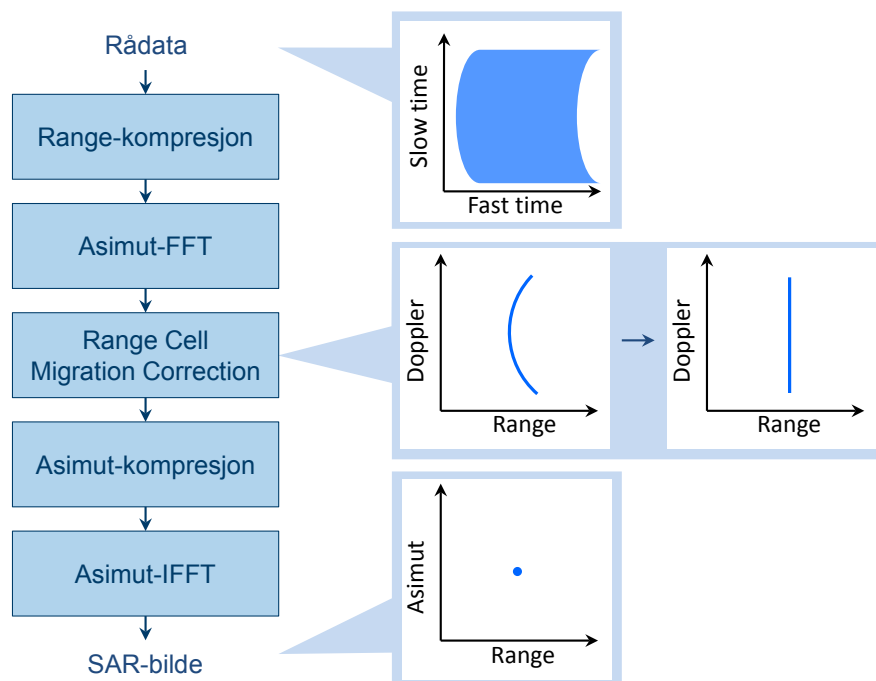
3.2.3 SAR-prosesseringsalgoritmer

SAR-prosesseringsalgoritmer er et omfattende tema som det fins svært mye litteratur om. Vi begrenser oss her til en overordnet oppsummering av noen hovedklasser av algoritmer, i stor grad hentet fra [15].

SAR-prosesseringen kan gjøres helt eller hovedsakelig i tidsdomenet. En viktig tidsdomenemetode kalles back-projection [16]. Den innebærer at man jobber seg gjennom de innsamlede dataene puls for puls og beregner de enkelte pulsenes bidrag i hver piksel i bildet ved interpolasjon. Dette er en generell metode som tillater vilkårlig bølgetallsdekning og avbildningsgeometri. Hovedutfordringen er svært tung prosessering. I tillegg kreves det nøyaktig kjennskap til avbildningsgeometrien. På grunn av prosesseringsmengden er metoden uaktuell i forbindelse med SAR-avbildning av store områder fra satellitt, i det minste med dagens teknologi og i nær fremtid. Metoden brukes typisk i systemer der det må tas hensyn til at radaren følger en bane som har store avvik fra en rett linje, og man har gode estimater for avvikene fra et navigasjonssystem. Dette er en aktuell situasjon med syntetisk aperture sonar

(SAS) og enkelte luftbårne SAR-systemer. Det finnes flere varianter av back-projection som er raskere, men mindre nøyaktige eller generelle enn den opprinnelige metoden, blant annet en algoritme som kalles Fast Factorized Back-Projection (FFBP) [17].

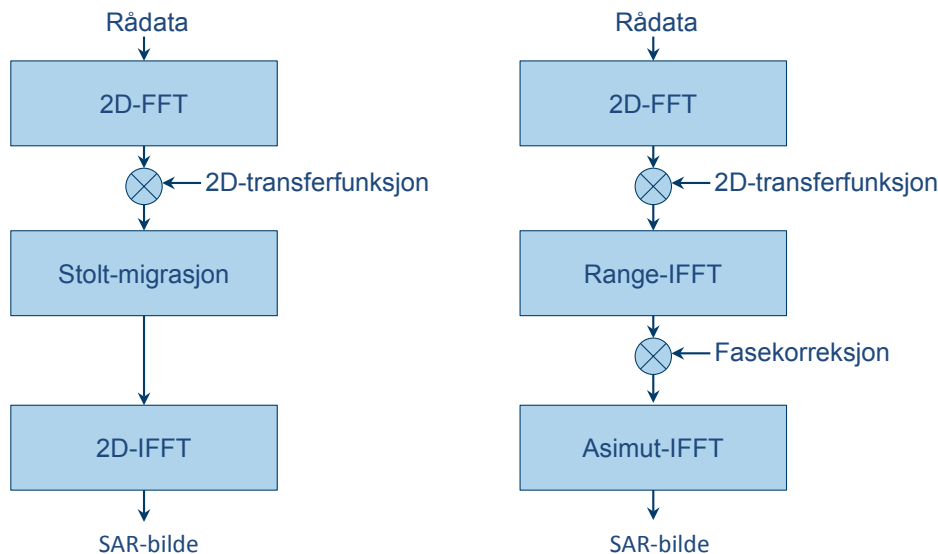
Ved avbildning av store arealer gjøres SAR-prosesseringen hovedsakelig i frekvensdomenet. Den eldste og mest lettfattelige frekvensdomene-metoden kalles Range-Doppler Algorithm (RDA). Hovedtrekkene er skissert på Figur 3.6.



Figur 3.6 Hovedsteg i Range-Doppler Algorithm

En grunnleggende antakelse ved bruk av RDA er at range- og asimut-komprimering kan gjøres i to uavhengige steg. Dette er uproblematisk når bølgetallsdekningen er rektangulær, slik den typisk er ved lavoppløselig SAR-avbildning fra satellitt. Det vil imidlertid introduseres feil hvis range og asimut er koplet, noe som vil være tilfelle for brede antennebeamer eller squint-geometri (Når beamen ikke er rettet 90° på radarens bane). Modifiserte versjoner av RDA er blitt utviklet for å håndtere squint, men ved høy asimut-oppløsning må RDA-basert prosessering anses som mindre egnet.

Hovedstegene i to prosesseringsmetoder velegnet for høyoppløselig stripmap SAR er vist på Figur 3.7.



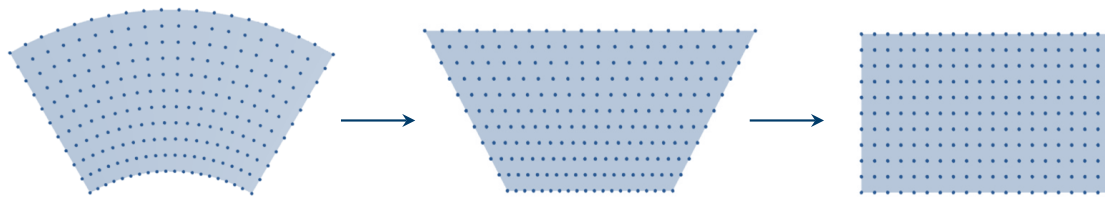
Figur 3.7 Hovedsteg i ω -K-algoritmen (til venstre) og monochromatic wavenumber algorithm (til høyre)

I ω -K-algoritmen gjøres det meste av kompresjonen ved hjelp av en 2D-transferfunksjon i frekvensdomenet. Det tillates range-asimut-kopling, og metoden vil kunne håndtere høy oppløsning og squint. Transferfunksjonen er bare korrekt for én bestemt range. Korreksjon for andre range-verdier gjøres ved hjelp av en 1D-interpolasjon som kalles Stolt-migrasjon. En begrensning ved ω -K-algoritmen er at den i utgangspunktet forutsetter at radaren beveger seg langs en rett linje.

Det er ønskelig å unngå Stolt-migrasjon, da dette trinnet krever relativt mye prosessering og introduserer en del feil. Med en alternativ metode som kalles Monochromatic Wavenumber Algorithm (MWA) er interpolasjonen erstattet av IFFT i range-retningen etterfulgt av en range-avhengig fasekorreksjon som utføres ved multiplikasjoner. Denne fremgangsmåten er benyttet i [18]. Her inngår ingen interpolasjoner eller iterasjoner, noe som blant annet også innebærer at algoritmene kan kjøres eksakt i revers.

En annen algoritme som bør nevnes fordi den har vært mye brukt i forbindelse med satellittbasert SAR er Chirp Scaling Algorithm (CSA). Algoritmen er rask og har ingen interpolasjoner. Den kan imidlertid bare benyttes med chirp-modulerte pulser, og den har begrenset ytelse ved høy oppløsning. Algoritmen kan betraktes som en erstatning for RDA og et mer effektivt alternativ til ω -K ved moderat oppløsning.

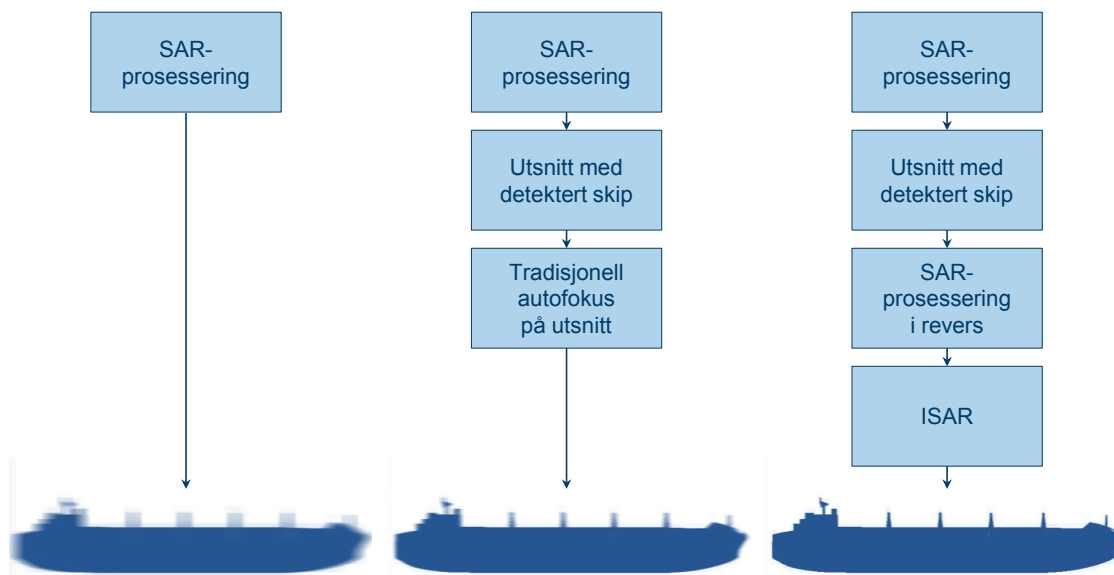
Polar Format Algorithm (PFA) er en algoritme som primært benyttes til prosessering av høyoppløselige spotlight SAR-data fra luftbårne systemer [19;20]. Når aspektvinkelendringen innenfor integrasjonstiden er betydelig, ligger ikke dataene på et rektangulært grid i bølgetallsdomenet. For å kunne benytte FFT istedenfor en mye tyngre digital Fourier-transform (DFT) gjøres 2D-interpolasjon i bølgetallsdomenet, som illustrert på Figur 3.8. Algoritmen krever likevel relativt mye prosessering.



Figur 3.8 Illustrasjon av reformering av dataene i bølgetallsdomenet fra polart til rektangulært grid. En 2D-interpolasjon blir her utført ved hjelp av to 1D-interpolasjoner

4 Refokusering av bevegelige mål

Fokusering av rådataene gjøres i utgangspunktet med en SAR-prosesseringsalgoritme. Med denne prosesseringen blir fartøyer ufokuserte dersom oppløsningen og fartøysbevegelsene overstiger visse grenser. Fra SLC SAR-bilder er det mulig å refokusere skipene. Hovedstrategiene er vist på Figur 4.1.



Figur 4.1 Hovedstrategier for fokusering av skip i bevegelse

Refokuseringen gjøres på et lite bildeutsnitt som omfatter det detekterte skipet. En relativt enkel fremgangsmåte er å benytte en autofokusalgoritme på et SLC-bildeutsnitt. Slike algoritmer er hovedsakelig utviklet for luftbåren SAR, der problemstillingen er at plattformen har en ujevn bevegelse som det må kompenseres for, mens scenen antas å være stasjonær. I forbindelse med

satellittbasert SAR er problemstillingen en annen – at plattformens bevegelse er kjent, mens målet har en ukjent bevegelse som det må kompenseres for. I begge tilfeller handler det om å kompensere for en fasefeil som skyldes ukjent relativ bevegelse mellom sensoren og målet. Når det gjelder større fartøyer med moderate rullbevegelser, kan autofokus antas å ha stort potensial.

Tradisjonelle autofokusmetoder forutsetter at fasefeilen er lik for hele målet. For mål som ruller mye i bølgene vil dette ikke være tilfelle. Mål med rotasjonsbevegelser blir vanligvis prosessert med en algoritme for Invers SAR (ISAR). ISAR-prosessering benytter range-profiler som input, så målet må på forhånd være detektert i SAR-bildet, og SAR-prosesseringen må være kjørt i revers på et lite bildeutsnitt som omfatter målet. Resultatene fra [21] tyder på at det har liten betydning hvilken SAR-algoritme som benyttes til revers prosessering av et lite område. Om for eksempel omega-K er benyttet i den opprinnelige SAR-prosesseringen, kan revers-prosesseringen gjøres med RDA uten store feil. Man finner ikke tilbake til de eksakte rådataene som før SAR-prosesseringen, men det er heller ikke nødvendig i forbindelse med refokusering. Ettersom revers-prosesseringen bare skal gjøres på svært små deler av bildet, er det ikke nødvendig å benytte en frekvensdomene-algoritme. Prosesseringen kan gjøres i tidsdomenet. Man trenger i så fall verdiene for Doppler-sentroide og asimut Doppler-rate i målets posisjon, men ved bruk av SAR-bilder fra eksisterende SAR-satellitter kan disse verdiene finnes fra metadataene.

Hvor avansert ISAR-algoritme det er behov for kommer an på hvor hurtig og ujevn målets rotasjonsbevegelse er. Hvis rotasjonsbevegelsen kan antas å være tilnærmet konstant gjennom hele integrasjonstiden for SAR-bildet, kan det benyttes tradisjonelle ISAR-algoritmer som er grundig beskrevet i litteraturen. Når denne antakelsen ikke er gyldig, trengs det en mye mer kompleks algoritme og tyngre beregninger for å oppnå fokuserte bilder. De ulike fremgangsmåtene er beskrevet i mer detalj i de neste avsnittene.

4.1 Autofokusmetoder

Autofokus innebærer å benytte selve radardataene for å oppnå fokuserte bilder, i motsetning til kun å basere fokuseringen på nøyaktige data om satellittens og jordas bevegelser og så videre. I vårt tilfelle vil ukjente fartøysbevegelser gir opphav til en ukjent fasefeil, og denne kan bare korrigeres ved hjelp av autofokus. Beskrivelsene av autofokusmetoder i dette kapitlet bygger i stor grad på [3] og [22].

Autofokusmetodene kan deles inn i parametriske og ikke-parametriske metoder. De parametriske metodene legger til grunn at fasefeilen kan tilnærmes med et polynom som vist i likning (2.7) til likning (2.9). Polynomets orden velges, og koeffisientene estimeres. Blant de parametriske metodene er mapdrift (MD) og phase difference autofocus (PDA).

Ikke-parametriske metoder estimerer fasefeilen mer direkte uten å gå veien om polynomtilnærming. De vil således være bedre egnet for å fange opp eventuelle høyere ordens fasefeil. Den viktigste ikke-parametriske metoden er Phase Gradient Autofocus (PGA). Denne

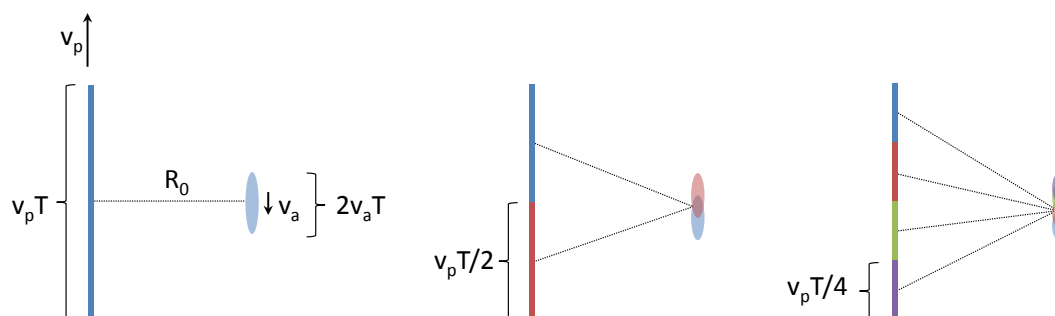
metoden har i de fleste tilfeller der den er anvendbar vist seg å ha bedre ytelse enn parametriske metoder. Særlig for spotlight SAR må PGA anses som en standardmetode.

Prominent Point Processing (PPP) er en annen ikke-parametrisk autofokusalgoritme. Den blir særlig benyttet i forbindelse med Invers Syntetisk Aperture Radar (ISAR) og er beskrevet i avsnitt 4.2.2.

4.1.1 MD

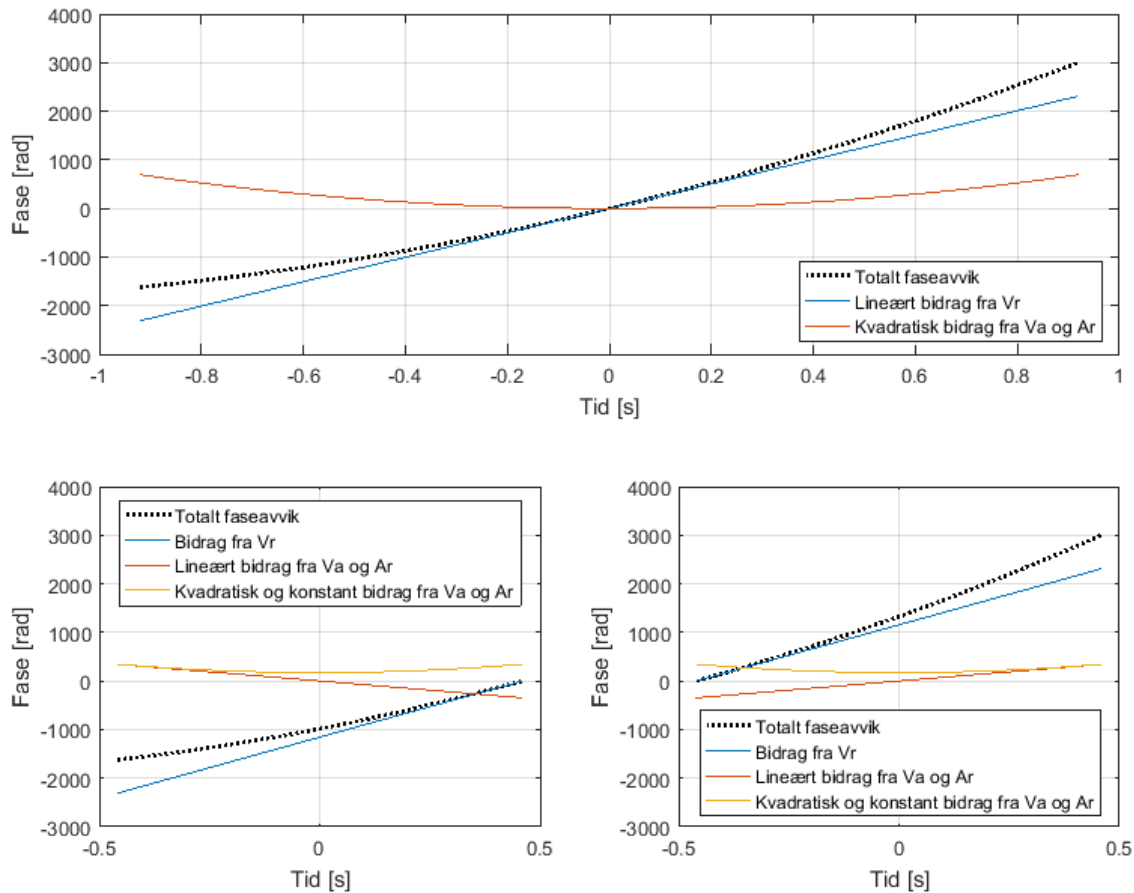
Mapdrift (MD) er en enkel og mye brukt autofokusalgoritme som ble utviklet på 1970-tallet. Den finner et estimat for kvadratisk fasefeil ved å benytte to SAR-bilder dannet ved oppdeling av den syntetiske aperturen i to subaperturer.

En spreder med kvadratisk fasefeil får ulike forflytninger i bildene som dannes fra de to subaperturene. Man kan få et hint om dette ved å betrakte en spreder med konstant hastighet i asimut-retningen, som illustrert på Figur 4.2. Hastigheten har en liten komponent i range-retningen til hver av subaperturene. Dette gir en liten asimut-forflytning i subaperturebildene, og forflytningen har motsatt retning i de to bildene. I tillegg kommer den fysiske forflytningen av sprederen i løpet av tiden sensoren bruker på å fly en subaperture.



Figur 4.2 Illustrasjon av asimut-forflytning i subaperturebilder for en spreder med hastighet parallelt med satellittens bane

Det viser seg at en kvadratisk fasefeil uansett årsak gir asimut-forflytning i subaperturebildene. Dette kan forklares med utgangspunkt i Figur 4.3. Her består faseavviket (som kalles $\Delta\phi$ i likning (2.9)) av et lineært bidrag fra range-hastighet og et kvadratisk bidrag fra asimut-hastighet og range-akselerasjon. Når aperturen deles i to, kan det opprinnelig kvadratiske bidraget fra v_a og a_r dekomponeres i en lineær og en kvadratisk komponent. Mellom disse er det et fast størrelsesforhold. De nye lineære komponentene har motsatt fortegn og gir forflytning i motsatt retning i subaperturebildene.



Figur 4.3 Ulike bidrag til faseforløpet over hele den syntetiske aperturen (øverst) og to subaperturer (nederst)

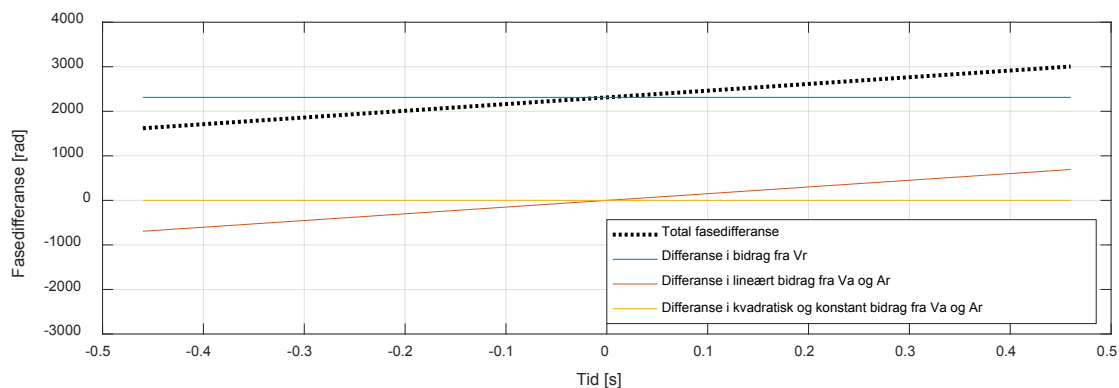
MD-algoritmen tar utgangspunkt i to subaperturebilder og gjør et lite utsnitt av disse. Utsnittene består av et lite antall range-celler der de kraftigste spredene befinner seg. Asimutforskyvningen mellom de to utsnittene blir funnet ved korrelasjon. Det blir korrigert for den kvadratiske fasefeilen som korresponderer med denne avstanden, og bildeutsnittene genereres på nytt. Prosessen bør gjentas i flere iterasjoner før det endelige SAR-bildet dannes, ettersom estimatet som finnes ved korrelasjon er unøyaktig når bildene er svært defokuserte. Når subaperturebildene blir bedre fokusert, kan den gjenstående forskyvningen estimeres mer nøyaktig. Ved tradisjonell bruk av MD-algoritmen er 2-3 iterasjoner ofte tilstrekkelig.

Det finnes en utvidet versjon av MD for estimering av høyere ordens ledd i fasefeilen. Denne baserer seg på oppdeling av aperturen i flere subaperturer og kalles multiple aperture mapdrift (MAM).

4.1.2 PDA

Phase Difference Autofocus (PDA) ble utviklet sent på 1980-tallet som et raskere alternativ til MD. Den gir tilsvarende ytelse som MD uten at iterasjoner er nødvendig. I denne algoritmen

blir et antall range-celler med kraftige spredere valgt, og det blir funnet en fasedifferansefunksjon mellom de to subaperturene for hver range-celle. Fasefunksjonene fra Figur 4.3 gir fasedifferansefunksjoner som vist på Figur 4.4.



Figur 4.4 Ulike bidrag til fasedifferansen mellom signalene fra to subaperturer

Det eneste varierende bidraget til fasedifferansefunksjonen er differansen i den lineære fasekomponenten fra v_a og a_r . Dette er den samme komponenten som gir ulik forflytning av sprederen i subaperturebilder.

Det PDA i praksis gjør er å estimere raten til fasedifferansefunksjonen og benytte den som et mål på den kvadratiske fasefeilen. Algoritmen tar utgangspunkt i range-profilene før asimut-kompresjon. En range-celle i den ene subaperturen multipliseres med den komplekskonjugerte av den tilsvarende range-cellen i den andre subaperturen. Her utnyttes følgende egenskap ved multiplikasjon av komplekse tall på polar form:

$$(A_1 \angle \phi_1)(A_2 \angle \phi_2) = A_1 A_2 \angle \phi_1 + \phi_2 \quad (4.1)$$

Når det ene tallet er komplekskonjugert, får vi:

$$(A_1 \angle \phi_1)(A_2 \angle \phi_2)^* = A_1 A_2 \angle \phi_1 - \phi_2 \quad (4.2)$$

Produktet av signalene fra de to subaperturene blir altså et differansesignal. Fasen til produktet er fasedifferansen mellom de to signalene. Når denne fasedifferansen er lineær, innebærer det at differansesignalet er sinusformet med konstant frekvens. Frekvensen blir estimert fra den Fourier-transformerte til differansesignalet.

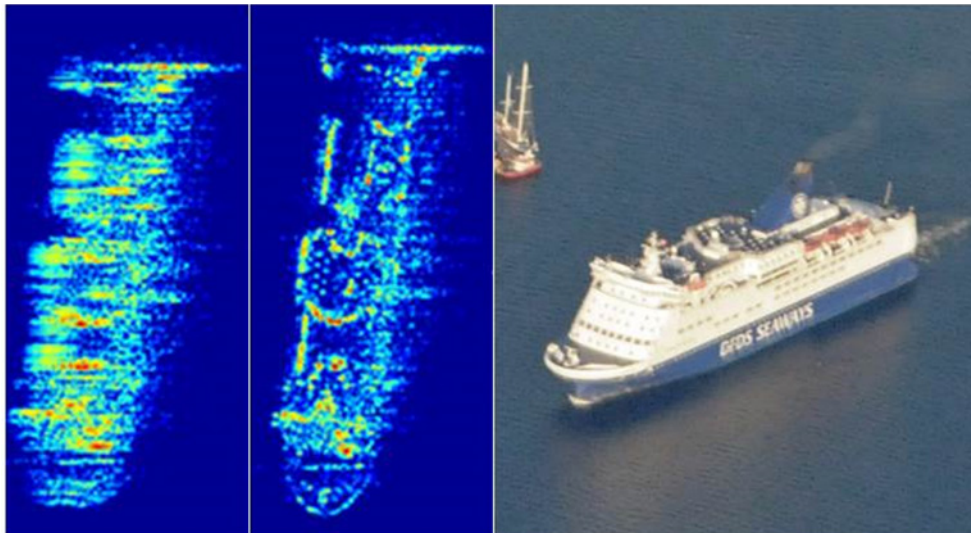
Den Fourier-transformerte til differansesignalet har en klar topp, og toppens plassering er et mål på den kvadratiske fasefeilen. Et godt estimat oppnås ved midling av resultatene for mange range-celler. Det blir korrigert for den kvadratiske fasefeilen, og SAR-bildet blir generert.

En utvidet versjon av PDA for estimering av høyere ordens ledd i fasefeilen baserer seg på oppdeling av aperturen i flere subaperturer og kalles multiple aperture PDA.

4.1.3 PGA

Phase Gradient Autofocus (PGA) er en algoritme som korrigerer for kvadratisk fasefeil og fasefeil av vilkårlig høyere orden [23]. Fra den ble publisert i sin opprinnelige form i 1989 har den vært svært mye benyttet, og det har etter hvert blitt utviklet en rekke forbedringer og varianter.

Utgangspunktet for bruk av autofokus er at man har et SAR-bilde, eller i vårt tilfelle et lite bildeutsnitt, der fasefeil har ført til defokusering. Med PGA finnes et robust estimat for fasefeilens gradient over aperturen, det vil si den deriverte av fasefeilen med hensyn på “slow time”. Denne blir integrert opp til en fasefeil (som funksjon av slow time eller pulsnummer). Etter at fasefeilen er korrigert for, blir dataene prosessert til et nytt SAR-bilde som vil være mye bedre fokusert. Prosessen gjentas i flere iterasjoner, inntil fasefeilen har mindre RMS-verdi enn noen tidels radianer. Et eksempel på resultat ved bruk av PGA er vist på Figur 4.5.

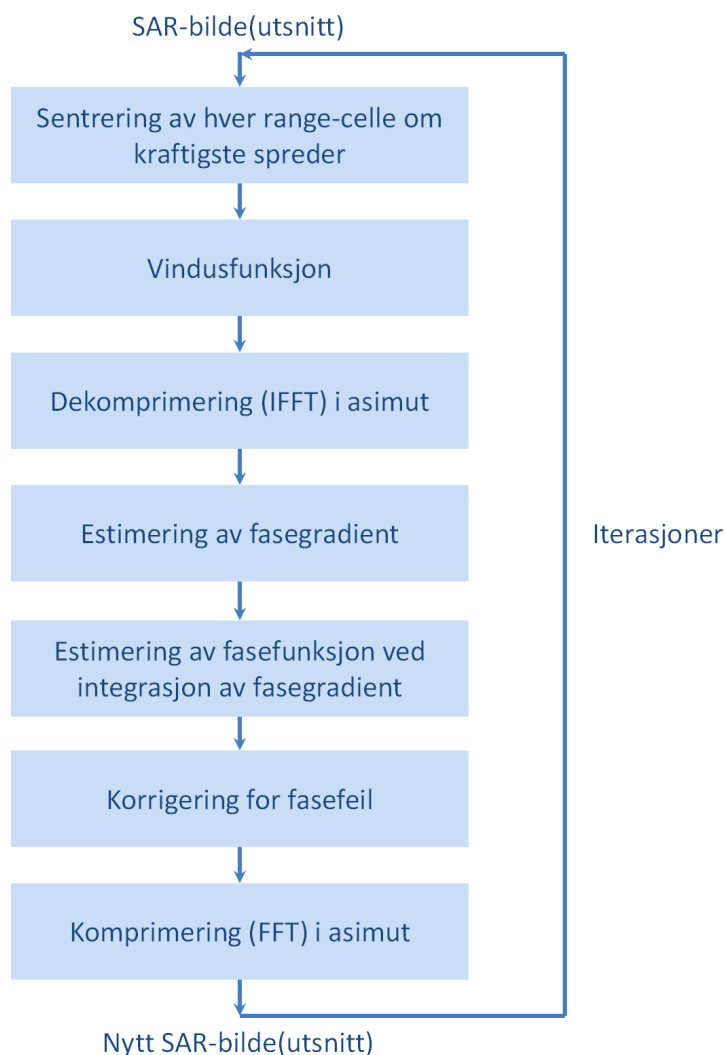


Figur 4.5 SAR-bildeutsnitt av danskebåten Crown Seaways før og etter PGA. Dataene er samlet inn med radarsystemet PicoSAR fra helikopter. I dette tilfellet blir spredene på skipet stort sett fokuserte, mens sjøreflekser forblir ufokuserte. Til høyre: omtrent samtidig fotografi av skipet

Hovedstegene i algoritmen er vist på Figur 4.6. Det viktigste formålet med de første stegene er å øke signal-clutter- og signal-støy-forholdet under den etterfølgende gradient-estimeringen. Første steg er å finne den kraftigste sprederen i hver range-celle og forskyve range-cellen i asimut slik at den kraftigste sprederen havner i midten. Her forutsettes det at alle asimutposisjoner i bildet har samme fasefeilfunksjon. Dette er tilfelle ved avbildning i spotlight-modus, da hele scenen er avbildet med samme aperture. I stripmap-modus må vi begrense oss til et mindre bildeutsnitt.

Det legges en vindusfunksjon over de sentrerte spredene. Vinduet må være minst like bredt som spredernes defokusering, men for å redusere innvirkningen av omkringliggende clutter bør

det ikke være mye bredere. Vindusbredden kan bestemmes automatisk hvis de dominerende sprederne er mye kraftigere enn omgivelsene. Bredden av de defokuserte sprederne kan for eksempel finnes med en terskel 10 dB under spredernes maksimalverdi, og vindusbredden kan settes 50 % større. Defokuseringen antas å være tilnærmet uavhengig av range, og man får således gode estimater ved midling over alle range-celler. Vindusbredden reduseres for hver iterasjon av algoritmen.



Figur 4.6 Hovedsteg i Phase Gradient Autofocus-algoritmen

Vi kan kalle en range-celle i bildet etter bruk av vindusfunksjonen $G_w(\omega)$. Dette er ideelt sett signalet fra én spreder. Signalet dekomprimeres i asimut. Spotlight-bilder er asimut-komprimerte ved hjelp av en Fourier-transform, og sprederen blir således dekomprimert med en invers Fourier-transform. Uten fasefeil ville den invers Fourier-transformerte av en spreder med asimut-posisjon $y=0$ hatt en konstant fase som vi kan kalle ϕ_0 . Fasefeilen $\phi_e(t)$ vil derimot variere gjennom integrasjonstiden. Hvis vi ser bort fra vindusfunksjonens effekt på sprederen, kan det dekomprimerte signalet som funksjon av asimut-tid (“slow time”) skrives:

$$\mathbf{g}_w(t) = a e^{j\phi_0} e^{j\phi_e(t)} \quad (4.3)$$

der a er signalets amplitude. For estimering av $\phi_e(t)$ er det foreslått en rekke forskjellige metoder i litteraturen [22]. I den opprinnelige formuleringen av PGA deriveres likning (4.3):

$$\dot{\mathbf{g}}_w(t) = a e^{j\phi_0} j\dot{\phi}_e e^{j\phi_e(t)} = |\mathbf{g}_w(t)| j\dot{\phi}_e e^{j\phi_e(t)} \quad (4.4)$$

Følgende egenskap ved Fourier-transformen er kjent:

$$\mathfrak{F}\left\{\frac{d}{dt}s(t)\right\} = j\omega S(\omega) \quad (4.5)$$

Ved bruk av denne egenskapen kan $\dot{\mathbf{g}}_{w(t)}$ finnes fra dataene:

$$\dot{\mathbf{g}}_w(t) = \mathfrak{F}^{-1}\{j\omega G(\omega)\} \quad (4.6)$$

Et estimat for fasegradienten fra range-celle n kan finnes ved å løse ut ϕ_e fra likning (4.4):

$$\hat{\phi}_e(n, t) = \frac{\text{Im}[\dot{\mathbf{g}}_w(n, t)\mathbf{g}_w^*(n, t)]}{|\mathbf{g}_w(n, t)|^2} \quad (4.7)$$

Det endelige estimatet for fasegradienten finnes ved midling over N range-celler:

$$\hat{\phi}_e(t) = \frac{\sum_N \text{Im}[\dot{\mathbf{g}}_w(n, t)\mathbf{g}_w^*(n, t)]}{\sum_N |\mathbf{g}_w(n, t)|^2} \quad (4.8)$$

Følgende alternative metode for estimering av fasegradienten blir ofte nevnt i litteraturen: For range-celle n finnes fasedifferansen mellom to påfølgende pulser ($m-1$ og m) langs aperturen ved å benytte egenskapen i likning (4.2):

$$\Delta\hat{\phi}_e(n, m) = \angle\{\mathbf{g}_w(n, m)\mathbf{g}_w^*(n, m-1)\} \quad (4.9)$$

Et robust estimat for fasedifferansen finnes ved midling over alle range-celler. Her gjøres det ved å summere de individuelle differansevektorene (som ideelt skal peke i samme retning) og hente ut fasen til vektorsummen:

$$\Delta\hat{\phi}_e(m) = \angle\left\{\sum_N \mathbf{g}_w(n, m)\mathbf{g}_w^*(n, m-1)\right\} \quad (4.10)$$

Et estimat for fasefeilen ($\hat{\phi}_e(m)$) uttrykt ved pulsnummer eller $\hat{\phi}_e(t)$ uttrykt ved asimut-tid finnes ved å summere opp $\Delta\hat{\phi}_e(m)$ fra likning (4.10), eventuelt integrere opp $\hat{\phi}_e(t)$ fra likning (4.8). Fasen settes gjerne lik 0 i $t=0$.

Det er verdt å merke seg at en lineær fasefeil bare vil gi en konstant offset av fasegradientfunksjonen. PGA er ikke i stand til å estimere og korrigere for en slik fasefeil. Normalt blir en eventuell lineær trend og konstant offset i fasefeilfunksjonen fjernet for å unngå forflytning av bildet.

Ved tradisjonell bruk av PGA er spredene stasjonære, og fasefeilen skyldes sensorens avvik fra en ideell bane. I vårt tilfelle er sensorens bane kjent, og feilen skyldes målets bevegelse. Hvis vi antar at defokuseringen hovedsakelig skyldes bevegelse i asimut-retningen (y), kan et estimat for denne bevegelseskomponenten finnes fra fasefeilfunksjonen:

$$\hat{y}(t) = \frac{\hat{\phi}_e(t)\lambda}{4\pi} \quad (4.11)$$

4.1.4 Algoritmer beslektet med PGA for mer robust fasefeilestimering

Autofokus vil være krevende når signal-clutter- eller signal-støy-forholdet er lavt, og PGA kan da feile eller kreve mange iterasjoner. Flere beslektede algoritmer er blitt utviklet med tanke på høyere ytelse i slike situasjoner, blant annet egenvektorbasert faseestimering [24;25] og weighted least-squares (WLS)-basert faseestimering [26].

Med tradisjonell PGA estimeres fasegradienten på bakgrunn av fasedifferanser mellom påfølgende pulser i henhold til likning (4.9). Det er naturlig å tenke at estimatet kunne blitt mer robust hvis man også inkluderte informasjon om fasedifferansene mellom puls m og $m-2$, m og $m-3$ og så videre. Tanken om å utnytte all denne informasjonen på en best mulig måte leder til egenvektorbasert faseestimering.

En grunnleggende antakelse ved denne metoden er at fasefeilen har et forløp over aperturen som er likt i alle range-celler. Videre modelleres signalet i hver range-celle som én punktspreder med konstant amplitude pluss hvit støy. For puls m i range-celle n kan signalet skrives:

$$\mathbf{g}_{mn} = a_n e^{j\phi_m} + \mathbf{w}_{mn} \quad (4.12)$$

der a er amplitude og w er støy. Fasefunksjonen over aperturen er:

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} e^{j\phi_1} \\ \vdots \\ e^{j\phi_M} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Hele det todimensjonale settet av samples fra M pulser og N range-celler kan skrives:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{g}_{11} & \cdots & \mathbf{g}_{1N} \\ \vdots & & \vdots \\ \mathbf{g}_{M1} & \cdots & \mathbf{g}_{MN} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Man ønsker å finne den fasevektoren \mathbf{v} som gir maksimal sannsynlighet for observasjonene i \mathbf{X} . I [24] utledes en metode for dette. En kovariansmatrise for datasettet kan beregnes på følgende måte:

$$\hat{\mathbf{C}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{x}_n \mathbf{x}_n^H \quad (4.15)$$

\mathbf{x}_n er en vektor med alle samples for range-celle n , og \mathbf{x}_n^H er vektorens konjugert-transponerte. Fasevektoren \mathbf{v} som man ønsker å finne viser seg å være den av $\hat{\mathbf{C}}$ sine egenvektorer som har størst egenverdi. Når fasefeilfunksjonen i \mathbf{v} er korrigert for, kan dataene asimut-komprimeres til et fokusert bilde. Med denne autofokusmetoden er det som regel ikke behov for flere iterasjoner.

Hvis en stor del av målets tilbakespredning kommer fra én dominerende spredner i range-celle n , kan den totale kovariansmatrisen i likning (4.15) tilnærmes med kovariansmatrisen til range-celle n . Egenvektoren \mathbf{v} blir i dette tilfellet den dominerende sprednerens fasefunksjon [25], og resultatet blir det samme som ved bruk av PPP (se avsnitt 4.2.2), der fokuseringen innebærer å korrigere for fasen til én prominent spredner.

Ved bruk av PGA kommer det ønskede signalet fra den kraftigste spredneren i hver range-celle, mens svakere spredere opptrer som uønsket clutter som gir opphav til fasefluktuasjoner. Både med tradisjonell PGA og den egenvektorbaserte metoden beskrevet ovenfor antas det at clutter kan modelleres som Gaussisk hvit støy. Dette er ofte en dårlig tilnærming. I [26] presenteres en metode for WLS-basert faseestimering. Her antas ingen bestemt cluttermodell. Variansen til fasefluktuasjonene forårsaket av clutter estimeres i hver range-celle og benyttes for vektning av range-cellenes bidrag i faseestimatet. Autofokus basert på denne faseestimeringsmetoden har stort potensial ifølge teoretiske betraktninger og viser gode resultater i praksis. Den kan særlig forventes å fungere bedre enn andre metoder i clutter-lignende scener.

4.1.5 Algoritmer for range-avhengig fasefeil og stripmap SAR

Det har blitt gjort en rekke forsøk på å utvikle en PGA-lignende algoritme for situasjoner der fasefeilfunksjonen avhenger av posisjonen i bildet. Dette gjelder generelt for stripmap-bilder av større scener og spesielt når det avbildes et bredt spor fra lav høyde med SAR eller SAS. I forbindelse med SAR-avbildning av skip er ikke bildeutsnittets utstrekning til hinder for bruk av tradisjonell PGA. Problemstillingen er dermed av mindre betydning for vårt formål, og den videre beskrivelsen er begrenset til skissering av hovedtrekk ved de ulike metodene.

En av metodene for utvidelse av PGA til stripmap-avbildning kalles Phase Curvature Autofocus (PCA) [27]. Med stripmap SAR vil spredere med en viss avstand i asimut bli avbildet med ulike aperturer. Etersom PGA ikke har kontroll på lineære faseavvik, vil fasegradientfunksjonene for to delvis overlappende aperturer ikke nødvendigvis henge sammen. Det vil derimot fasekurvaturen, som er den dobbeltderiverte av fasen. PCA estimerer denne og integrerer to ganger. Fremgangsmåten har noen svakheter og er i praksis lite brukt. Blant annet tas det ikke høyde for range-avhengig fasefeil.

I [28;29] foreslås en ny versjon av PGA kalt Phase Weighted Estimation PGA (PWE-PGA). Kjernen for estimering av fasegradienten er forskjellig fra de som er gitt i likning (4.8) og (4.10), og den er utvidet til håndtering av range-avhengig fasefeil. Det foreslås også en fremgangsmåte for stripmap PGA. Her estimeres ikke fasekurvaturen, og man prøver å få en jevn overgang mellom fasegradientfunksjonene til delvis overlappende aperturer ved ganske enkelt å trekke fra middelverdien.

I [30] presenteres en metode kalt Stripmap Phase Gradient Autofocus (SPGA). Den er særlig relevant for SAS-systemer, der sensoren har store avvik fra den planlagte banen. Først blir avvikene i banen estimert ved å utnytte et sett av flere punktspredere i scenen. Deretter gjøres en fokusering som tar hensyn til de estimerte avvikene. Dette er en komplisert prosedyre med mange beregninger.

En relativt enkel metode for PGA på langsgående striper i et stripmap-bilde og kombinasjon av disse stripene til et sammenhengende bilde kalles mosaic PGA (mPGA) [31]. Metoden har en del svakheter, og det er senere blitt utviklet en betydelig forbedret algoritme kalt modified mPGA (mmPGA) [32]. Den nye algoritmen gjør en todimensjonal oppdeling av stripmap-bildet, og det benyttes blant annet korrelasjon for å få de fokuserte utsnittene til å henge sammen på en god måte.

4.2 Tradisjonell ISAR

Invers Syntetisk Aperture Radar (ISAR) er en radarmodus for avbildning av mål med rotasjonsbevegelse. Den benyttes typisk mot skip, fly og objekter i rommet, samt i en kontrollert form ved “turntable”-målinger.

4.2.1 Grunnleggende egenskaper ved ISAR-avbildning

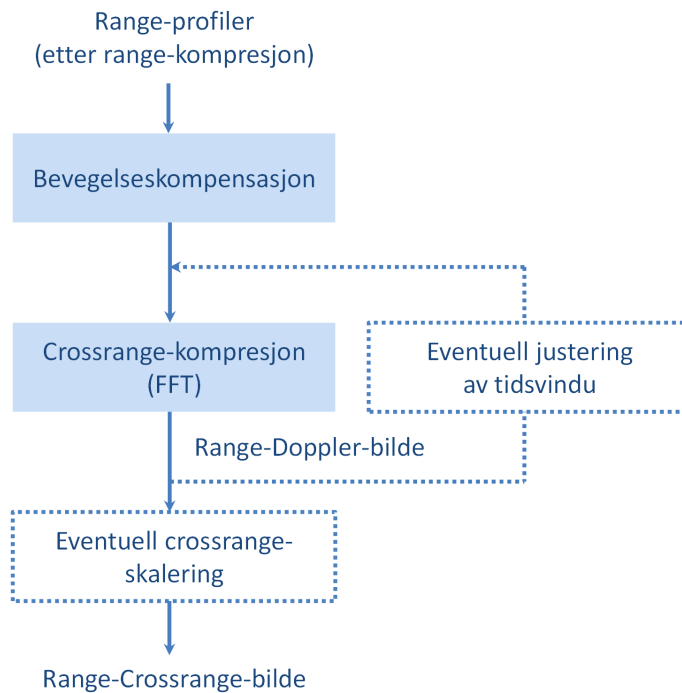
ISAR har en del til felles med spotlight SAR. Ved spotlight-avbildning av et stasjonært mål vil målets aspektvinkel sett fra radaren endre seg i løpet av integrasjonstiden. Med ISAR kan en lignende aspektvinkelendring observeres på grunn av målets egen rotasjon mens det befinner seg i radarbeamen. Men det er også noen viktige forskjeller mellom SAR og ISAR som gjør ISAR-avbildning mer komplisert. Dette gjelder særlig bevegelseskompensasjon og forhold knyttet til ukjent og varierende rotasjon.

De viktigste stegene i en ISAR-prosesseringskjede er skissert på Figur 4.7. Utgangspunktet for ISAR-prosesseringen er som regel range-profiler, det vil si mottatte pulser etter range-kompresjon. Noen velger imidlertid å gjøre bevegelseskompensasjon direkte på de mottatte pulsene og komprimerer i begge dimensjoner med en 2D Fourier-transform etterpå. I vårt tilfelle vil skipene være detektert i et SAR-bilde. For hvert bildeutsnitt som inneholder et skip må det altså gjøres en reversert SAR-prosessering tilbake til range-profilene før ISAR-prosesseringen kan starte.

Bevegelseskompensasjonen er i praksis den største utfordringen ved tradisjonell ISAR-avbildning. For at bildet skal bli fokusert, må det kompenseres for endringen i avstand mellom sensoren og et punkt som kan betraktes som målets rotasjonssenter. Variasjonen i denne avstanden gjennom integrasjonstiden må holdes innenfor en brøkdel av en bølgelengde, det vil si i størrelsesorden 1 cm eller bedre. Med en enkel metode kalt Prominent Point Processing (PPP) er bevegelseskompensasjonen et isolert prosesseringssteg som vist på Figur 4.7. I mer komplekse metoder er stegene tettere integrerte, og bevegelseskompensasjon og crossrange-kompresjon blir en blokk som må gjentas i flere iterasjoner. De ulike metodene er nærmere beskrevet i senere avsnitt.

Oppløsningen i crossrange er gitt av målets aspektvinkelendring i løpet av integrasjonstiden, som beskrevet i 3.2.2. Det er altså ønskelig med størst mulig integrasjonstid. Men ved tradisjonell ISAR-avbildning forutsettes det at målets rotasjonshastighet kan betraktes som konstant gjennom integrasjonstiden. Avvik over et visst nivå vil gi defokusering i bildet. Integrasjonstiden blir derfor en avveining mellom oppløsning og fokusering, og den optimale integrasjonstiden endres kontinuerlig. En enkel måte å håndtere dette på er å benytte en relativt lang integrasjonstid innledningsvis, og deretter prøve seg frem med kortere utsnitt av denne inntil man finner et tidsvindu som gir tilfredsstillende fokusering [33;34]. Mer avanserte metoder for håndtering av ujevn rotasjon blir beskrevet i delkapittel 4.3.

Når målets rotasjonshastighet er ukjent, får man i utgangspunktet et Range-Doppler-bilde der skaleringsfaktoren mellom Doppler-skift og crossrange-posisjon er ukjent. Større eller mindre effektiv rotasjonshastighet enn antatt gir strekking eller sammentrekning av målet i Doppler-retningen. Metoder for estimering av skaleringsfaktoren er beskrevet i 4.2.5.



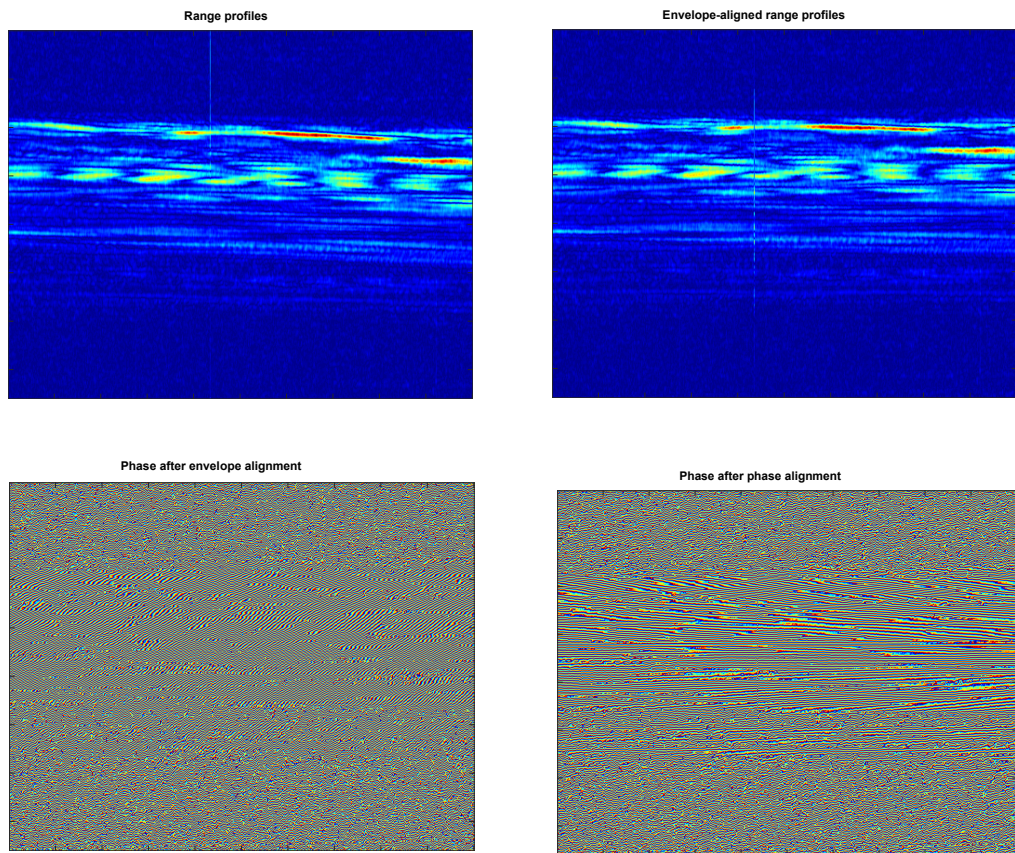
Figur 4.7 Hovedsteg i en metode for ISAR-prosessering

4.2.2 PPP og andre ikke-parametriske autofokusalgoritmer

Prominent Point Processing (PPP) er en enkel autofokusalgoritme som har vært mye brukt i forbindelse med ISAR. Idéen med PPP er å finne en spreder som fortrinnsvis kan følges gjennom hele integrasjonstiden, tvinge denne sprederens avstand til å være konstant og justere range-profilene i henhold til dette [3;35]. Den valgte sprederen vil da fungere som et rotasjonssenter og bli optimalt fokusert i bildet. For alle andre spredere vil rotasjonen relativt til det aktuelle punktet bestemme deres Doppler-posisjon i bildet i forhold til punktet.

De viktigste stegene i algoritmen kan beskrives med utgangspunkt i eksempelet på Figur 4.8 og Figur 4.9. Før bevegelseskompensasjonen er en oppsamling av range-profilene fordelaktig. Det må så finnes en stabil spreder. Dette kan enklest gjøres hvis range-profilene er opplinjert, det vil si at målets bevegelse er grovt estimert og korrigert for, så sprederen befinner seg i samme range-celle gjennom hele integrasjonstiden. Grovjusteringen kan for eksempel gjøres basert på range-profilenes tyngdepunkt eller envelope.

At den prominente sprederen ligger innenfor samme range-celle er langt fra tilstrekkelig for at bildet skal bli fokusert. Range-oppløsningen kan være i størrelsesorden meter, mens god fokusering forutsetter at variasjonen er mindre enn ca. 1 cm. Opplinjeringen av range-profilene finjusteres derfor slik at den prominente sprederens fase blir konstant gjennom integrasjonsintervallet.



Figur 4.8 Øverst t.v.: Range-profiler av skipet Sule Viking, samlet inn med PicoSAR; øverst t.h.: Range-profiler etter grovjustering basert på envelope; nederst t.v.: Fase etter grovjustering; nederst t.h.: fase etter finjustering basert på en stabil spredde

Etter finjustering av range-profilene gjøres crossrange-kompresjon vanligvis ved hjelp av en FFT. Selv om det vil være noen detaljer å ta stilling til i en praktisk implementasjon, for eksempel vindusfunksjoner og nullfylling, er dette steget nokså ukomplisert.



Figur 4.9 ISAR-bilde fra 0,5 s integrasjonstid og fotografi av skipet Sule Viking

PPP er generelt en lite robust autofokusmetode. Ofte er det vanskelig å finne et prominent punkt som er tilstrekkelig stabilt. Spredere er gjerne sterkt vinkelavhengige, og ofte befinner det seg flere spredere med sammenlignbart radartverrsnitt innenfor samme range-celle, så tilbakespredningen fra cellen blir et hurtig varierende interferensmønster. Det siste er særlig en utfordring når store mål med mange spredere er orientert på tvers av range-retningen.

PPP kan utvides til å følge flere spredere gjennom integrasjonstiden. Dette kalles Multiple PPP. To spredere er i teorien tilstrekkelig for å estimere en varierende rotasjonshastighet, og tre spredere kan gi tilstrekkelig informasjon for estimering av skaleringsfaktoren i cross-range [3]. Ettersom det ofte er vanskelig å finne én stabil spreder på aktuelle mål, vil en algoritme som trenger flere stabile spredere dessverre ha liten praktisk nytteverdi.

Det mest utfordrende steget i PPP er den siste finjusteringen basert på fase. Hvis sprederen ikke er tilstrekkelig stabil, bryter fasekorrigeringen sammen, og bildet blir mye dårligere fokusert. I slike tilfeller har det blitt oppnådd bedre resultater med en metode som finner et maximum-likelihood-estimat for range-forskjellen fra én puls til den neste gjennom integrasjonstiden [36]. PGA og de mer robuste faseestimeringsteknikkene som ble beskrevet i 4.1.4 kan også være alternativer.

4.2.3 Kontrastbasert autofokus

Kontrasten i et bilde kan benyttes som et mål på graden av fokusering. I et godt fokusert ISAR-bilde vil det meste av energien være konsentrert i de enkelte spredere på målet, og kontrasten er dermed høy. Kontrasten i et SAR/ISAR-bilde defineres som forholdet mellom bildeintensitetens standardavvik og middelvei, eller:

$$IC = \frac{\sqrt{(I - \bar{I})^2}}{\bar{I}} \quad (4.16)$$

der I er intensiteten eller effekten i bildet, det vil si kvadratet av signalamplituden. En fremgangsmåte for å oppnå best mulig fokusering er å prosessere frem bildet gjentatte ganger i en iterativ prosess der kontrasten maksimeres [37]. For hver iterasjon må et sett av parametere endres.

Parametriske autofokusmetoder for ISAR legger til grunn at variasjonen i avstand mellom radaren og målets tyngdepunkt (eller et annet punkt som kan fungere som rotasjonssentrum) kan tilnærmes med en rekkeutvikling med få ledd innenfor integrasjonstiden for et ISAR-bilde:

$$R(t) \approx \alpha + \beta t + \frac{\gamma}{2} t^2 \dots \quad (4.17)$$

Antakelsene om fartøysbevegelser i avsnitt 2.2.3 tilsier at et andregradspolynom vil være tilstrekkelig for vårt formål i de aller fleste tilfeller. Man må altså finne den kombinasjonen av β

og γ som maksimerer bildekontrasten. Til dette trengs metoder for å finne gode startverdier og en iterativ algoritme for den videre optimaliseringen.

I [37] benyttes enkle metoder for å finne startverdiene. Målets radiale hastighetskomponent β finnes fra den lineære trenden som observeres i range-profilene (se øverst til venstre på Figur 4.8). Denne estimeres ved hjelp av Radon-transformen. Maksimalpunktet i Radon-transformen angir den dominerende retningen. For γ har man innledningsvis ikke noe estimat, men prøver først systematisk en mengde verdier innenfor et gitt intervall, prosesserer frem ISAR-bilder og velger den verdien som gir høyest kontrast.

For den videre finjusteringen av β og γ benyttes en klassisk optimaliseringsalgoritme. Nelder-Mead-metoden [38] har vært brukt, men også andre alternativer er nevnt [34]. Med Nelder-Mead-metoden kan en funksjons maksimal- eller minimalverdi finnes uten at funksjonen må deriveres. Det benyttes et simplex, som er en “n-dimensjonal trekant”, det vil si en trekant (3 noder) i et 2-dimensjonalt rom, et tetraeder (4 noder) i 3 dimensjoner og så videre. I vårt tilfelle, der funksjonen $IC(\beta, \gamma)$ skal maksimeres, benyttes 3 noder. For hvert steg i søket beregnes funksjonens verdi i de 3 nodene, og noden med lavest verdi flyttes i henhold til visse regler. Trekanten vil etter hvert krympe inn mot et maksimalpunkt. Funksjonen kan ha lokale maksimalpunkter, men gode startverdier gjør sjansen mindre for at optimaliseringen feiler.

Dette har vist seg å være en robust metode som gir godt fokuserte ISAR-bilder mye oftere enn PPP og PGA. Den krever imidlertid mye prosessering, gjerne i størrelsesorden 10 ganger så mye som PPP og PGA [37;39].

4.2.4 Andre parametriske autofokusmetoder for ISAR

Det er nærliggende å tenke at den kontrastbaserte autofokusmetoden beskrevet i forrige avsnitt har potensial for forbedringer. Bedre startverdier, særlig for γ , kunne trolig spart mange iterasjoner. Det er også grunn til å vurdere om den valgte kostfunksjonen er det beste målet på fokuseringsgraden i et ISAR-bilde.

Estimering av startverdiene β og γ er nært beslektet med estimering av Doppler-sentroide (f_{DC}) og Doppler-rate (f_{DR}) i forbindelse med satellittbasert SAR-avbildning. Ved SAR-avbildning av en stasjonær scene vil endringen i avstand mellom satellitten og målet kun være gitt av satellittens bevegelse og jordrotasjonen. Med rekkeutvikling av avstanden som i likning (4.17) vil β og γ angi henholdsvis $\frac{\lambda}{2}f_{DC}$ og $\frac{\lambda}{2}f_{DR}$. Ved ISAR-avbildning er disse størrelsene endret av målets bevegelse.

I [40;41] presenteres en metode for refokusering av bevegelige mål i satellitt-SAR-bilder basert på estimering av β og γ . En rekke metoder for estimering av f_{DC} er beskrevet i litteraturen, blant annet [42;43], og slike metoder benyttes av [40] på et lite bildeutsnitt for å estimere β . Med dagens satellitter er imidlertid estimering av β unødvendig, da f_{DC} er gitt i metadataene for SLC-bilder. Den varierer betydelig over scenen og er gitt som polynom over range (og asimut for store scener). Også f_{DR} er gitt i metadataene for satellittbilder og kan benyttes for å angi en startverdi for γ , men denne verdien trenger et tillegg hvis målet er i bevegelse. I [40] estimeres γ

med en variant av MD, som er en iterativ algoritme (se 4.1.1). Trolig kunne PDA gitt en minst like god startverdi uten iterasjoner (se 4.1.2). Denne fremgangsmåten for ISAR-fokusering har vist sammenlignbare resultater som IC-basert fokusering, noe som tyder på at man kan komme nær toppunktet for IC-funksjonen på første iterasjon ved å finne bedre startverdier for parameterne.

Kontrast er bare ett av flere mulige mål på fokuseringsgraden i et bilde. Entropi er et alternativ. Den kan beregnes på følgende måte:

$$IE = -\sum_i \sum_j \frac{I_{ij}^2}{I^2} \ln\left(\frac{I_{ij}^2}{I^2}\right) \quad (4.18)$$

der I er intensitet. Entropien reduseres med økende fokusering. Man må altså finne et minimalpunkt for IE på tilsvarende måte som ved maksimering av IC. Det ser ut til at det i praksis har liten betydning hvilken av de to kostfunksjonene som velges. Forskjellene mellom de resulterende ISAR-bildene er små, men noen resultater tyder på at IC har en liten fordel i et større utvalg av tilfeller [37;39].

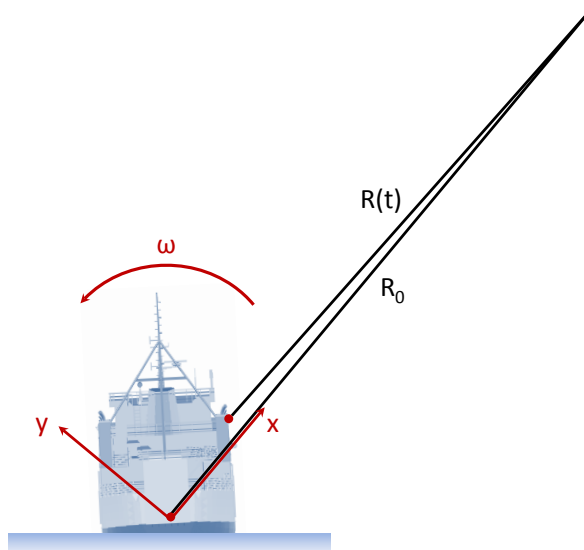
4.2.5 Crossrange-skalering

SAR-avbildning legger til grunn at forholdet mellom Doppler-skift og asimut-avstander er som gitt i likning (2.6). Stasjonære mål vil da få riktig crossrange-skalering, mens mål som er smurt ut i bildet på grunn av lineær bevegelse må autofokuseres for å få riktig utstrekning. Rotasjonsbevegelser vil generelt føre til feil crossrange-skalering. Det er derfor ønskelig å estimere målets effektive rotasjon, så skaleringen kan korrigeres.

I enkelte tilfeller kan det tenkes at et fartøys projeksjon i et SAR- eller ISAR-bilde kan finnes ved bildeanalyse. Hvis det er mulig å identifisere fysiske strukturer som man vet er parallelle med skipets x-, y- og z-akse, for eksempel skrogets lengdeakse, akterenden og mastene, kan disse strukturenes retninger i bildet angi skipets projeksjon i bildeplanet og dermed crossrange-skaleringsfaktoren [44]. En rekke betingelser må imidlertid være oppfylt for at dette skal være mulig, blant annet høy oppløsning og gunstig avbildningsgeometri. Det fremstår derfor som urealistisk å finne en robust, automatisk algoritme basert på denne fremgangsmåten.

Det har blitt foreslått en rekke ulike algoritmer for mer robust estimering av målets effektive rotasjon. Disse fordeler seg stort sett på to hovedstrategier: estimering av Doppler-chirp-rate og estimering av transformasjonen mellom to subaperturebilder. Algoritmene er nokså kompliserte, med mange steg og bruk av matematiske transformasjoner eller andre spesielle signalbehandlingsteknikker. Det vil føre for langt å gjennomgå de ulike metodene i detalj her, men noen hovedtrekk skisseres.

Avbildningsgeometrien er vist på Figur 4.10. I virkeligheten vil rotasjonshastigheten ω variere med skipets bevegelser i bølgene, men det antas her at den er konstant innenfor integrasjonstiden for et bilde.



Figur 4.10 Avbildningsgeometri for ISAR

Avstanden til et punkt (x,y) på målet kan skrives:

$$R(t) \approx R_0 - x \cos(\omega t) - y \sin(\omega t) \quad (4.19)$$

Følgende tilnærminger kan benyttes ved små vinkler:

$$\cos(\omega t) \approx 1 - \frac{(\omega t)^2}{2} \quad (4.20)$$

$$\sin(\omega t) \approx \omega t \quad (4.21)$$

En beregning av Doppler-frekvensen basert på Likning (2.1) og (2.2) gir dermed følgende uttrykk:

$$f_D(t) \approx -\frac{2y\omega}{\lambda} + \frac{2x\omega^2}{\lambda} t \quad (4.22)$$

Doppler-frekvensen kan altså tilnærmes med en chirp-form innenfor integrasjonsintervallet. Leddet $2x\omega^2/\lambda$ kalles chirp-raten.

I [45] estimeres målets rotasjonshastighet på grunnlag av estimator for chirp-raten fra et antall spredere på målet. Estimering av chirp-raten byr på mange praktiske utfordringer. Det ville vært relativt ukomplisert hvis hver range-celle bare inneholdt én ideell spredder. Men virkelige data som i eksemplet nederst til høyre på Figur 4.8 er dårlig egnet for estimering av de enkelte spredernes faseforløp over aperturen. Et utvalg av spredere blir funnet i ISAR-bildet ved hjelp av segmentering. For hvert av disse små bildeutsnittene blir det funnet en polynomtilnærming til faseforløpet ved en iterativ algoritme som maksimerer kontrasten. Denne fremgangsmåten har

vist gode resultater i forbindelse med crossrange-skalering av skip. Men den har visse svakheter. Den vil blant annet ha problemer med dårlig signal-støy-nivå og mål med få distinkte spredere.

De senere årene har det vært rikt med publikasjoner fra Kina og Sør-Korea om estimering av et måls rotasjon basert på transformasjonen mellom to subaperturebilder. Den grunnleggende idéen er at integrasjonstiden kan deles opp i subaperturer, at et punkt (x,y) på målet blir projisert inn i ISAR-bildeplanet i punktet (r_1, f_{D1}) i subaperturebilde 1 og (r_2, f_{D2}) i subaperturebilde 2, og at relasjonen mellom disse punktene kan beskrives ved en transformasjonsmatrise \mathbf{H} med elementer gitt av målets rotasjon:

$$\begin{bmatrix} r_2 \\ f_{D2} \end{bmatrix} = \mathbf{H}(\omega) \begin{bmatrix} r_1 \\ f_{D1} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Man ønsker å finne et robust estimat for \mathbf{H} som grunnlag for estimering av ω og dermed også crossrange-skaleringsfaktoren. I [46] transformeres subaperturebilde 1 i henhold til en gitt ω , og resultatet korreleres med det ekte subaperturebilde 2. Den verdien av ω som gir størst korrelasjon antas å være den korrekte.

En svakhet ved bruk av korrelasjon for dette formålet er følsomhet for endringer i spredene. Spredere er ofte svært vinkelavhengige og kan gi varierende tilbakespredning innenfor integrasjonstiden. I [47] gjøres ikke korrelasjonen direkte på bildedataene, men på en transformert form av dataene fremkommet ved Fourier-transformasjon og mapping til et annet koordinatsystem. Resultatet fra korrelasjonen benyttes som startverdi for en finjustering ved hjelp av Nelder-Mead-metoden.

I [48] ekstraheres en mengde punkter i de to subaperturebildene ved hjelp av algoritmene Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) [49] og Speeded Up Robust Features (SURF) [50]. Dette vil typisk være hjørner og andre punkter relatert til variasjon av gradienten omkring en spreder. Det benyttes en spesiell algoritme for matching av punkter i de to bildene. Resultatet av denne registreringen gir grunnlag for en nøyaktig estimering av transformasjonen mellom de to subaperturebildene. Metoden har vist seg å gi presis crossrange-skalering av reelle ISAR-data og ser særlig ut til å være robust mot dårlig signal-støy-forhold.

En annen algoritme basert på punkter i bildene er foreslått i [51]. Algoritmen Features from Accelerated Segment Test (FAST) [52] benyttes for ekstrahering av en mengde hjørnepunkter i de to subaperturebildene. Det gjøres ingen matching av individuelle punkter. I stedet blir prinsipalkomponentanalyse (PCA) benyttet for å finne retningene med størst variasjon i datasettet, og disse brukes i en iterativ algoritme for estimering av transformasjonen mellom subaperturebildene. En av styrkene til denne metoden er stor hastighet.

4.3 ISAR ved svært stor eller ujevn rotasjon

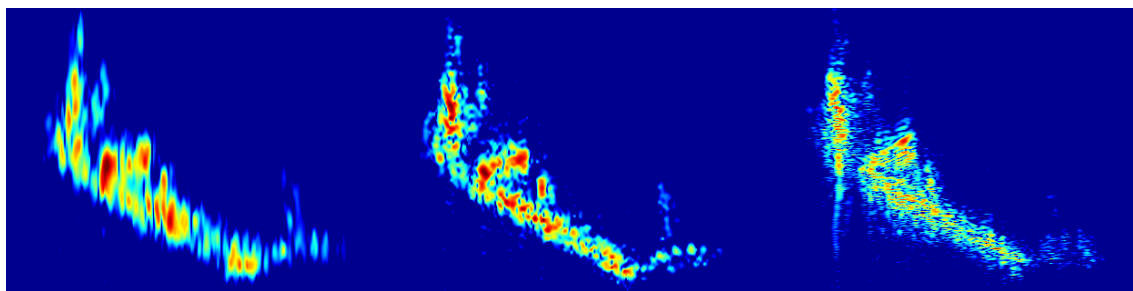
Høyoppløselig ISAR-avbildning er generelt krevende, og utfordringene øker når målets bevegelser er svært store eller ujevne. Det kreves da avanserte prosesseringsteknikker for å oppnå fokuserte bilder.

4.3.1 Ulike former for defokusering

Høyoppløselige ISAR-bilder kan bli ufokuserte til tross for god bevegelseskompensasjon. Det er særlig tre årsaker til dette, og disse gir ulik vanskelighetsgrad for fokuseringen: Bevegelsene kan være for store til at Range-Doppler-tilnærmingen er gyldig, rotasjonshastigheten kan endres innenfor integrasjonstiden, og bevegelsen kan være sammensatt, så den effektive rotasjonsvektoren endrer retning.

Range-Doppler-tilnærmingen er ugyldig hvis rotasjonsbevegelsene er så store at spredere migrerer mellom flere Doppler- eller range-celler innenfor integrasjonstiden. Dette vil gi en defokusering som øker med avstanden fra rotasjonssenteret. Som beskrevet i de neste avsnittene fins det brukbare metoder for å håndtere denne effekten så lenge rotasjonsvektoren har konstant størrelse og retning.

Utfordringene øker et nivå hvis rotasjonsvektoren har konstant retning, men varierende størrelse. Dette er en vanlig situasjon ved avbildning av skip med stasjonære radarsystemer og luftbårne systemer. Rotasjonsbevegelsene til større fartøyer er ofte dominert av en roll-bevegelse med periode på i størrelsesorden 10 s, og vi observerer da gjerne dårligere fokusering når integrasjonstiden blir lengre enn ca. 1 s fordi rotasjonshastigheten endres mye innenfor dette tidsrommet. Et eksempel på avbildning med ulike integrasjonstider er vist på Figur 4.11. Med denne formen for defokusering vil man av og til kunne se tegn på at skaleringsfaktoren i cross-range har endret seg innenfor integrasjonstiden.



Figur 4.11 Eksempler på ulik integrasjonstid – fra venstre 0,25 s, 1 s og 4 s

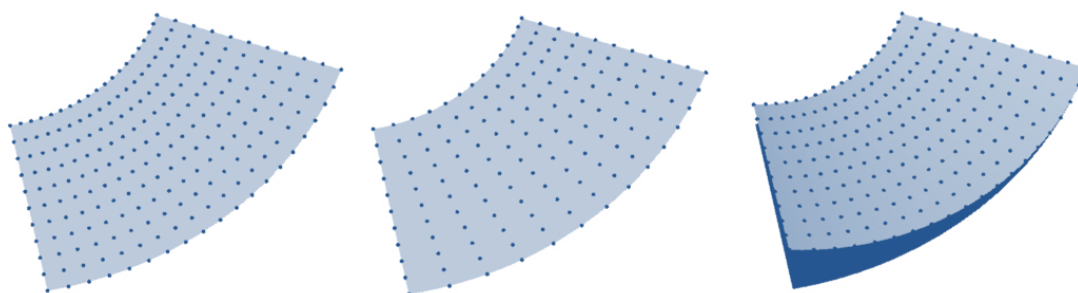
Den vanskeligste situasjonen å håndtere er rotasjon med varierende retning [53]. Slik sammensatt bevegelse vil man dessverre måtte forvente ved avbildning av skip fra satellitt. Vinkelendringen som skyldes satellittens bevegelse vil være en konstant rotasjonskomponent, mens kraftige roll-bevegelser gir en tidsvarierende rotasjonskomponent som endrer den

effektive rotasjonsvektorens retning. ISAR-bildeplanet endres innenfor integrasjonstiden, og det vil kunne se ut som om bildet består av flere lag med ulike projeksjoner av målet.

I alle disse tilfellene vil den mest lettvinde måten å håndtere fokuseringsproblemene på være å benytte kortere integrasjonstid. Man må i så fall gjøre et kompromiss mellom oppløsning og fokusering. Lengre integrasjonstid krever avanserte metoder. Disse kan enten være basert på reformatering i bølgetallsdomenet eller tid-frekvens-teknikker, eller muligens en kombinasjon av begge strategier.

4.3.2 Reformatering i bølgetallsdomenet

Crossrange-kompresjon av ISAR-data gjøres vanligvis ved hjelp av FFT. En forutsetning for denne transformasjonen er at datapunktene ligger med fast avstand i et kartesisk koordinatsystem. I virkeligheten vil dataene i bølgetallsdomenet ligge i et polart eller sfærisk grid, og samplingsavstanden kan være ujevn, som illustrert på Figur 4.12.



Figur 4.12 Illustrasjon av bølgetallsdekningen ved ISAR-avbildning i ulike situasjoner. Fra venstre: Konstant rotasjon om én akse, akselererende rotasjon om én akse og endring av den effektive rotasjonsvektorens retning (Se også Figur 3.5)

Hvis rotasjonen er stor, men konstant, er det naturlig å basere prosesseringen på polar reformatering. Dette er en vanlig fremgangsmåte i forbindelse med spotlight SAR. Metoden forutsetter imidlertid at rotasjonshastigheten ω er kjent, noe den i utgangspunktet ikke er ved ISAR-avbildning. ω kan estimeres ved hjelp av teknikker beskrevet i 4.2.5. Det er også mulig å starte med en unøyaktig verdi og justere estimatet i en iterativ prosess der et bilde eller bildeutsnitt prosesseres frem gjentatte ganger, og for eksempel bildekontrast benyttes som kostfunksjon for å optimalisere fokuseringen [54].

Hvis rotasjonshastigheten varierer, men den effektive rotasjonsvektoren har konstant retning, ligger samplene i bølgetallsdomenet ujevnt fordelt i vinkel, men i samme plan. Korrekt reformatering krever da et estimat for $\omega(t)$, gjerne de to første leddene i en rekkeutvikling. Det er mulig å tenke seg en fremgangsmåte der startverdier finnes fra subaperturebilder ved hjelp av metodene beskrevet i 4.2.5 og parameterne deretter optimaliseres i en omfattende prosess med mange iterasjoner. Dette vil kreve svært mye prosessering, men for fokusering av noen få krevende mål i et stort SAR-bilde kan det tenkes at fremgangsmåten er aktuell.

Hvis rotasjonen endrer retning, ligger samplene i bølgetallsdomenet på en krum flate [55]. En projeksjon til et plan vil introdusere unøyaktigheter. Bedre nøyaktighet krever kjennskap til vinkelhastigheten og eventuelt vinkelakselerasjonen i begge dimensjoner og bruk av 3D-Fourier-transformasjon. Resultatet vil i så fall være en 3D-ISAR-avbildning med god oppløsning i 2 dimensjoner og dårlig oppløsning i den tredje, og et snitt gjennom denne vil være et fokusert ISAR-bilde. En slik fremgangsmåte kan benyttes ved turntable-målinger, der vinkelhastighetene er kjente. Estimering av parameterne fra data av ikke-kooperative mål fremstår som urealistisk.

4.3.3 Tid-frekvens-teknikker

En grunnleggende utfordring ved ISAR-avbildning av mål med stor eller ujevn rotasjonsbevegelse er at tradisjonell FFT-basert prosessering leder til en avveining mellom crossrange-oppløsning og fokuseringsgrad. En strategi for å oppnå forbedringer på dette punktet er bruk av tid-frekvens (TF)-teknikker. TF-teknikker generelt er et stort tema som det fins egne lærebøker om, blant annet [56]. Siden midten av 1990-tallet har det kommet en stor mengde publikasjoner om TF-teknikker i forbindelse med ISAR-prosessering. Særlig har kinesiske forskere publisert mye innenfor dette feltet de senere årene. For å få oversikt over fagfeltet burde det vært gjort en grundig litteraturstudie som omfattet flere titalls artikler. Det har ikke vært gjort i denne omgang, så det gis bare en kort introduksjon til temaet.

I noen sammenhenger er en ren tidsbeskrivelse av et signal mest hensiktsmessig. For eksempel kan en kort puls plasseres med presisjon på tidsaksen, mens frekvensinnholdet strekker seg over en stor bredde. I andre sammenhenger er det mer naturlig å velge en ren frekvensbeskrivelse, som tilsvarer at signalet uttrykkes som en sum av sinusfunksjoner med uendelig utstrekning i tid. Dette gjelder typisk for langvarige signaler med liten tidsvariasjon. For mange virkelige signaler er det vanskelig å få frem de karakteristiske egenskapene uten en samtidig beskrivelse i både tid og frekvens. Et eksempel er signaler som består av tidsvarierende frekvenskomponenter. Høy oppløsning i både tids- og frekvens-dimensjonen er ønskelig.

Mange forskjellige matematiske transformere kan benyttes for å transformere et signal fra en ren tid- eller frekvensbeskrivelse til en kombinert TF-form. Short-time Fourier Transform (STFT) er et enkelt eksempel. Her blir et tidssignal $x(t)$ transformert til den kombinerte formen $X(\tau, f)$ på følgende måte:

$$X(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) w(t - \tau) e^{-j2\pi ft} dt \quad (4.24)$$

$w(t)$ er en vindusfunksjon. Ved valg av vindusbredde gjøres en avveining mellom oppløsning i tid og frekvens. Man oppnår altså ikke høy oppløsning samtidig i både tid og frekvens. Denne transformen kan således betraktes som en målestokk som de egentlige TF-teknikkene kan sammenlignes med.

En transform som er mye brukt i forbindelse med TF-prosessering er Wigner-Ville-fordelingen (WVD):

$$W_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-2\pi f \tau} d\tau \quad (4.25)$$

Mens Fourier-transformen er lineær, er WVD en kvadratisk funksjon. Det innebærer at et signal bestående av flere komponenter, for eksempel en lineær kombinasjon av flere chirp-signaler, får kryssledd som gir interferens. En variant som kalles smoothed pseudo Wigner-Ville-fordelingen (SPWVD) har følgende form [57]:

$$SPW_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) \int_{-\infty}^{\infty} g(s-t) x\left(s + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(s - \frac{\tau}{2}\right) ds e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (4.26)$$

Her er filterfunksjonene $g(t)$ og $h(t)$ inkludert for å redusere interferensen. Det gjøres en avveining mellom frekvensoppløsning og interferens. Hvis det er nødvendig å filtrere bort all interferensen, blir oppløsningen som ved bruk av STFT. Men i mange tilfeller vil signalet ha en gunstig form som gir akseptabelt interferensnivå selv om oppløsningen forbedres mye i forhold til ved bruk av STFT. Metoden har vist seg å ha et potensial i forbindelse med ISAR-avbildning [58;59]. Den er særlig egnet når signalet i hver range-celle har et Doppler-forløp som kan modelleres som en lineær chirp.

En annen aktuell transform er Local Polynomial Fourier Transform (LPFT) [60]:

$$LPFT(t, \omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t + \tau) w(\tau) e^{-j\omega_1 \tau - j\omega_2 \frac{\tau^2}{2} - j\omega_3 \frac{\tau^3}{6} + \dots} d\tau \quad (4.27)$$

$w(\tau)$ er en vindusfunksjon. Denne transformen har gunstige egenskaper når signalet kan modelleres som én enkelt chirp. En lineær chirp kan skrives:

$$x(\tau) = A e^{j\left(\alpha_1 \tau + \alpha_2 \frac{\tau^2}{2}\right)} \quad (4.28)$$

der A er amplituden. En andre ordens LPFT av signalet vil ha maksimum når $\omega_1 = \alpha_1$ og $\omega_2 = \alpha_2$, og dette kan utnyttes for å estimere parameterne i signalets fasefunksjon. I forbindelse med ISAR-avbildning har LPFT potensial for mye bedre crossrange-oppløsning enn STFT, og det forekommer ikke interferens av den typen som oppstår ved bruk av WVD. Det er imidlertid betydelige utfordringer knyttet til reelle data, der range-cellene har forskjellige faseforløp og enkelte range-celler har signalkomponenter fra flere spredere. En LPFT-basert ISAR-algoritme blir derfor relativt komplisert.

De nevnte transformene er et utvalg av en rekke matematiske transformasjoner som har vært foreslått i forbindelse med ISAR-avbildning. Diverse andre spesielle signalbehandlingsmetoder, som for

eksempel CLEAN-algoritmen [61], inngår også i en del av ISAR-algortimene. Til sammen har man da en mengde ulike metoder med forskjellige styrker og svakheter med hensyn på oppløsning, robusthet, prosesseringstid og så videre. For avbildning av mål med relativt enkle manøvrer, der signalets fase innenfor integrasjonstiden kan modelleres som en kvadratisk funksjon (Doppler-frekvensen er en lineær chirp), er det blant annet foreslått metoder basert på fractional Fourier-transform [62], modifisert Wigner-Ville-fordeling [63], stretch keystone Wigner-fordeling [64] og en ny fordeling kalt Lvs fordeling [65]. Hvis målet gjør større eller mer kompliserte manøvrer, bør fasen isteden modelleres som en kubisk funksjon. Dette krever enda mer avanserte algoritmer, og listen med aktuelle metoder er lengre og omfatter blant annet fremgangsmåtene foreslått i [66-72].

5 Diskusjon om refokusering

De foregående kapitlene har prøvd å avklare i hvilken grad skip blir ufokuserte i SAR-bilder og hva som fins av teknikker for å oppnå fokusert avbildning. Det gjenstår å vurdere hva som kan være en hensiktsmessig vei videre i håndtering av disse utfordringene. I den forbindelse er det naturlig å se nærmere på hva som trengs av refokuseringskapasitet og hvilke metoder som kan oppfylle disse behovene i ulike situasjoner. Diskusjonene i dette kapitlet har til formål å lede frem mot konkrete anbefalinger om videre aktiviteter.

5.1 Behov for fokusering

Avhengig av oppløsning kan SAR-bilder ha et potensial for deteksjon, klassifikasjon og gjenkjenning av fartøyer. I alle tilfeller er det en fordel om bildene er godt fokuserte, men hvor god fokuseringen trenger å være avhenger av formålet med avbildningen.

I forbindelse med skipsdeteksjon er litt defokusering sjelden et problem. Men hvis målets radartverrsnitt ligger nær deteksjonsterskelen, vil det være en ulempe om de dominerende spredene smøres ut over flere oppløsningsceller. Ut fra fartøyskarakteristikkene og simuleringene i kapittel 2 kan vi anta at dette særlig vil være en aktuell problemstilling ved avbildning av små, hurtige fartøyer. Dessverre kan refokusering vanskelig gjøres i blinde, det vil si før mål er detektert. Dersom tilstrekkelig prosesseringskraft er tilgjengelig, er det imidlertid mulig å tenke seg refokusering som del av en deteksjonsalgoritme beslektet med “track before detect”-algoritmer. For eksempel kan deteksjonsterskelen senkes, så flere mål og falske alarmer slipper gjennom første deteksjonstrinn. For disse må det i så fall gjøres en ny prosessering der ulike hypoteser testes, blant annet om de er fartøyer med stor hastighetskomponent i asimutretningen.

Hvis egenskaper som lengde, bredde og hastighet kan ekstraheres, er det et potensial for klassifikasjon av fartøyene. Egenskapsuttrekking stiller krav til både oppløsning og fokuseringsgrad. For at høyere oppløsning skal gi mer nøyaktige lengdeestimer må bildene være fokuserte. Resultatene i kapittel 2.4 viser at behovet for refokusering øker med oppløsningen. For nøyaktig estimering av fartøyets lengde kreves det i tillegg at rotasjonshastigheten estimeres, særlig for mindre fartøyer.

SAR/ISAR-avbildning velegnet for skipsklassifikasjon vil trolig kreve god fokusering av de fleste spredene på skipet, inkludert de som ligger langt fra rotasjonssenteret. For hvert skip gjøres det bare en kort datainnsamling idet satellitten passerer, og det må forventes stor variasjon i bevegelsene på avbildningstidspunktet fra skip til skip. En robust refokuseringsalgoritme bør dermed være i stand til å håndtere så mye bevegelser som havgående fartøyer kan forventes å ha innenfor aktuelle integrasjonstider. Kravene er strengere enn med luftbåren SAR/ISAR, der det kan søkes etter et gunstig avbildningstidspunkt innenfor et lengre tidsrom med datainnsamling. Til gjengjeld har man typisk mer tid tilgjengelig til prosessering av hvert bilde med satellittbasert SAR, så tyngre algoritmer kan benyttes.

I de neste avsnittene anser vi at prosesseringen er tilfredsstillende når sannsynligheten for god fokusering er stor for alle skip med unntak av en del mindre fartøyer i stor sjøgang. Kravene blir ikke tallfestet, da vi ikke har statistikk for fartøysbevegelser på havet og det er ukjent hvor mye usikkerhet algoritmer for egenskapsuttrekking og skipsklassifikasjon tåler. Hvis det skulle vise seg at mer defokusering kan tillates, blir det mindre behov for de mest avanserte metodene som foreslås.

5.2 Mulige algoritmer ved integrasjonstid under ca. 0,2 s

Simuleringene i kapittel 2.4 indikerer at vanlig SAR-prosessering gir tilfredsstillende fokusering ved oppløsning lavere enn ca. 12 m. Dette gjelder C-bånd SAR fra en satellitt i rundt 500 km høyde. Oppløsningen tilsvarer en integrasjonstid på rundt 0,2 s for et SLC-bilde. Utfordringene øker med integrasjonstiden, som kan uttrykkes på følgende måte ut fra Likning (3.9):

$$T \approx \frac{R\lambda}{2\delta_a v_p} \quad (5.1)$$

R er slant-range, δ_a er asimut-oppløsning og v_p er satellittens hastighet. Høyere frekvens tillater vanlig SAR-prosessering med høyere oppløsning. I X-bånd kan den være 6-7 m. Med større banehøyde må oppløsningen være lavere.

Så kort integrasjonstid som 0,2 s er ikke uvanlig i ScanSAR- og TOPS-modus, men man har da gjerne flere looks. I så fall kan det inkluderes en algoritme for å måle graden av fokusering og eventuelt forkaste looks som ikke oppfyller kravet. En lettvent måte å håndtere mål med spesielt krevende bevegelser på er å benytte kun et utsnitt av den tilgjengelige integrasjonstiden. Dette innebærer som tidligere nevnt en avveining mellom oppløsning og fokusering.

5.3 Mulige algoritmer ved ca. 0,2-0,8 s integrasjonstid

I dette området kan det forventes stor variasjon i fokuseringsgraden til skip i SAR-bilder fra satellitt. Med 0,2 s integrasjonstid vil de aller fleste fartøyer bli fokuserte. Med 0,8 s integrasjonstid blir nesten ingen fartøyer godt fokuserte ved bruk av vanlig SAR-prosessering. Disse integrasjonstidene tilsvarer crossrange-oppløsning på henholdsvis ca. 12 m og 3 m i C-bånd ved avbildning av skip uten rotasjonsbevegelse. I X-bånd tilsvarer det ca. 6-7 m og ca. 1,5-2 m. Rask rotasjonsbevegelse korter ned den nødvendige integrasjonstiden for samme oppløsning.

En adaptiv og stegvis bruk av forskjellige refokuseringsteknikker fremstår her som en naturlig fremgangsmåte. Det trengs et mål på hvor godt fartøyene er fokusert, for eksempel bildekontrast eller en kombinasjon av flere parametere som beskriver bildekvaliteten. Når én fokuseringsmetode gir utilfredsstillende resultat, bør en mer avansert teknikk prøves.

Bildet er i utgangspunktet dannet ved hjelp av ren SAR-prosessering. Store skip med hastighet langs ground-range-retningen kan da forventes å være fokuserte, mens de fleste andre fartøyer trenger refokusering. Første refokuseringssteg kan være PGA eller en mer robust PGA-lignende autofokusalgoritme. En slik algoritme vil være velegnet for å fjerne defokusering som skyldes rettlinjert bevegelse (se Figur 2.22) og noe mindre egnet til fjerning av bidrag fra rotasjonsbevegelser (se Figur 2.23). I scener med neglisjerbare dønninger kan alle havgående fartøyer forventes å være fokuserte etter dette prosesseringssteget.

Fartøyer med betydelige rotasjonsbevegelser kan best fokuseres med ISAR-prosessering. På et lite utsnitt av SLC-bildet må SAR-prosesseringen kjøres i revers og dataene fokuseres på nytt med en ISAR-algoritme. Med satellittbasert avbildning er robusthet svært viktig. Algoritmen må gi et brukbart resultat i de aller fleste tilfeller. Ut fra resultatene i litteraturen fremstår en iterativ ISAR-algoritme med kontrastbasert optimalisering som et fornuftig valg ved moderat oppløsning. Gode initialverdier kan trolig finnes ved hjelp av PDA eller en annen autofokusalgoritme.

Lengdeestimering fra et ISAR-bilde krever at bildet er crossrange-skalert, bortsett fra når vinkelen mellom skipets orientering og ground-range-retningen er liten. Skaleringsfaktoren er bestemt av skipets rotasjonshastighet, så det trengs en algoritme for estimering av denne.

Tradisjonelle ISAR-algoritmer er utilstrekkelige for høyoppløselig avbildning av skip med særlig store eller kompliserte rotasjonsbevegelser. Med økende oppløsning forventes det en hyppigere forekomst av fartøyer med utilfredsstillende fokusering. Den mest lettvinde måten å håndtere dette på vil være å benytte en algoritme som gjør en avveining mellom oppløsning og fokusering og finner det beste utsnittet av integrasjonstiden. To mer avanserte fremgangsmåter bør også vurderes: Bruk av TF-metoder og reformatering i bølgetallsdomenet på bakgrunn av et estimat av rotasjonsbevegelsen.

Alle fremgangsmåtene som foreslås i dette avsnittet er beskrevet i litteraturen. Tradisjonelle og relativt enkle metoder kan forventes å gi tilfredsstillende fokusering av de fleste havgående skip. For disse metodene vil det være naturlig å gå direkte videre med implementasjon og testing på ekte data. De avanserte metodene som trengs i de mest krevende tilfellene må undersøkes næyere før man kan fastslå hvilke algoritmer det vil være hensiktsmessig å implementere.

5.4 Mulige algoritmer ved integrasjonstid over ca. 0,8 s

Integrasjonstider fra ca. 0,8 s og oppover tilsvarer en crossrange-oppløsning på ca. 3 m og bedre i C-bånd og ca. 1,5-2 m i X-bånd ved avbildning fra satellitt mot skip uten rotasjonsbevegelse. Rask rotasjonsbevegelse korter ned den nødvendige integrasjonstiden for samme oppløsning. Med så lang integrasjonstid kan man i praksis se bort fra at vanlig SAR-prosessering skal gi god fokusering av skip på havet. Som beskrevet i forrige avsnitt, trengs det en adaptiv og stegvis bruk av refokuseringsteknikker. Det vil oftere være behov for avanserte metoder, men vi har ikke nok statistikker og analyseresultater til å si noe om hvor ofte.

En robust PGA-lignende autofokusalgoritme kan være velegnet mot større fartøyer i rolig sjø. Tradisjonell ISAR-prosessering, for eksempel med kontrastbasert optimalisering, vil være egnet for håndtering av moderate rullbevegelser. En hovedutfordring vil være at man generelt ikke kan regne med konstant rotasjonshastighet i så lang tid. Avgrensning av integrasjonstiden til et kort tidsvindu med tilnærmet konstant rotasjonshastighet er en nærliggende mulighet, men vil ofte innebære at man ofrer mye av den potensielle oppløsningen.

For å kunne utnytte en større del av den tilgjengelige integrasjonstiden mot skip med betydelige rullbevegelser er det ønskelig med algoritmer for estimering av rotasjonen og reformatering i bølgetallsdomenet. Alternativt bør TF-metoder vurderes. I de mest krevende tilfellene, der bildeplanet endres i løpet av integrasjonstiden, kan reformatering i ett plan gi utilfredsstillende resultater. Det synes da vanskelig å komme utenom bruk av avanserte TF-metoder. Det er usikkert om noen av de publiserte metodene kan brukes direkte for vårt formål, eller om det er mer hensiktsmessig å utvikle en tilpasset algoritme som for eksempel kombinerer flere metoder. Å finne en robust og effektiv fremgangsmåte for refokusering og egenskapsuttrekking fra høyoppløselige SAR-data vil altså kreve en mer omfattende studie.

6 Konklusjoner og anbefalinger

SAR-prosessering legger til grunn at den avbildede scenen er stasjonær. Fartøyer i bevegelse kan bli forflyttet, forvrengt og defokusert i bildene. I tillegg til disse effektene av fartøysbevegelser kan det på og omkring fartøyer observeres ufokusert energi som skyldes

tilbakespredning via en urolig vannflate og i enkelte tilfeller bevegelige deler som for eksempel roterende antenner.

For store skip vil bevegelseeffektene primært være resultat av skipets lineære bevegelse. Mindre fartøyer i stor sjøgang vil ha betydelige og hurtig varierende rotasjonsbevegelser, som regel dominert av en karakteristisk rullbevegelse om skipets lengdeakse. Ofte kan rotasjonsbevegelsene være hovedkilden til forvrengning og defokusering av skipene.

En viktig konsekvens av forvrengning vil være at lengdeestimer blir usikre. Et troverdig lengdeestimat vil kreve crossrange-skalerting basert på et estimat for skipets rotasjonsbevegelse.

Enkle simuleringer med utgangspunkt i målte fartøysbevegelser indikerer at mindre fartøyer i stor sjøgang vil begynne å vise tegn til defokusering i SAR-bilder fra satellitt ved rundt 20 m oppløsning i C-bånd. For større skip kan enkelte deler bli defokuserte ved 10-15 m oppløsning, mens hele skipet typisk kan forventes å bli defokusert ved ca. 6-7 m oppløsning. Ved 3-4 m oppløsning vil det i alle tilfeller være liten sannsynlighet for god fokusering av skip på havet. Utfordringene reduseres med frekvensen, så i X-bånd kan disse tallene rundt regnet halveres.

Det er mulig å refokusere fartøyer som blir utilfredsstillende fokusert i det opprinnelige SAR-bildet. En mengde teknikker som kan være relevante i den forbindelse er beskrevet i litteraturen. Etersom alle de tilgjengelige dataene av et skip blir samlet inn i løpet av et kort tidsrom idet satellitten passerer, er det av stor betydning å finne en algoritme som sjelden feiler totalt, men gir brukbare resultater i de fleste tilfeller. Behovet for avanserte metoder øker med høyere oppløsning, mindre fartøyer og større sjøgang. En adaptiv og stegvis bruk av forskjellige refokuseringsteknikker fremstår derfor som en naturlig fremgangsmåte.

Hvis vi anser prosesseringen for å være tilfredsstillende når sannsynligheten for fokusering er stor for alle skip unntatt noen mindre fartøyer i stor sjøgang, forventes vanlig SAR-prosessering å være tilstrekkelig ved lavere oppløsning enn ca. 12 m i C-bånd og 6-7 m i X-bånd. Tallene må betraktes som foreløpige anslag. Ved høyere oppløsning bør de detekterte fartøyene testes mot et mål på fokusering, for eksempel bildekontrast eller et mer sammensatt kvalitetsmål, og fartøyer som ikke oppfyller kravet bør refokuseres.

Autofokus på et lite utsnitt av SLC-bildet vil være et naturlig første refokuseringssteg. De mest aktuelle algoritmene er PGA og beslektede metoder med mer robust faseestimering basert på egenvektorer eller vektning på bakgrunn av clutter og støy. Neste steg kan være å kjøre SAR-prosesseringen i revers og fokusere dataene på nytt med en ISAR-algoritme. En iterativ algoritme med bildekontrast som kostfunksjon for optimaliseringen synes å være et godt valg når robusthet er et krav. Det forventes at disse metodene til sammen vil gi akseptabel fokusering av de fleste skip med moderate bevegelser ved integrasjonstid godt under 1 s.

For de mest krevende tilfellene trengs det mer avanserte prosesseringsmetoder. Uten statistikk for fartøysbevegelser og mer omfattende simuleringer kan vi ikke tallfeste hvor stor andel av skipene på havet dette vil gjelde ved ulike oppløsninger. Men en første antakelse er at det vil

være et reelt behov for slike teknikker når integrasjonstiden nærmer seg 1 s, det vil si ved oppløsning rundt 3 m i C-bånd og 1,5-2 m i X-bånd.

Analysene leder til følgende anbefalinger:

- Et sett av algoritmer som kan forventes å danne grunnstammen i et refokuseringssystem for moderat oppløsning bør implementeres og testes på innsamlede data. Dette vil inkludere en robust autofokusalgoritme beslektet med PGA og en iterativ, kontrastbasert ISAR-algoritme.
- Det må finnes et godt kvalitetsmål på fokuseringen og en metode for å veie oppløsning mot fokusering og finne det beste utsnittet av den tilgjengelige integrasjonstiden.
- Crossrange-skalering bør undersøkes nøyere. Her fins det flere alternative fremgangsmåter som må vurderes før en eventuell implementasjon og testing.
- Egenskapsuttrekking fra SAR/ISAR-data bør undersøkes. Robust estimering av blant annet lengde og hastighet er ønskelig.
- Det bør gjøres en mer omfattende studie av avanserte ISAR-metoder for høy oppløsning. Det er ønskelig å få en nærmere avklaring av behovet og en oversikt over hvilke metoder det kan være hensiktsmessig å benytte. Dette inkluderer metoder for estimering av rotasjonsbevegelser og reformatering i bølgetallsdomenet, samt tid-frekvens-teknikker.

A Forkortelser

CSA	Chirp Scaling Algorithm
DFT	Digital Fourier Transform
FAST	Features from Accelerated Segment Test
FFBP	Fast Factorized Back-Projection
FFT	Fast Fourier Transform
HRWS	High Resolution Wide Swath
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform

ISAR	Inverse Synthetic Aperture Radar
LPFT	Local Polynomial Fourier Transform
MAM	Multi Aperture Mapdrift
MD	Mapdrift
mmPGA	Modified Mosaic Phase Gradient Autofocus
mPGA	Mosaic Phase Gradient Autofocus
MWA	Monochromatic Wavenumber Algorithm
PCA	Phase Curvature Autofocus
PCA	Principal Component Analysis
PDA	Phase Difference Autofocus
PFA	Polar Format Algorithm
PGA	Phase Gradient Autofocus
PPP	Prominent Point Processing
PWE-PGA	Phase Weighted Estimation Phase Gradient Autofocus
RDA	Range-Doppler Algorithm
SAR	Synthetic Aperture Radar
SAS	Synthetic Aperture Sonar
SIFT	Scale-Invariant Feature Transform
SLC	Single-Look Complex
SPGA	Stripmap Phase Gradient Autofocus
SPWVD	Smoothed Pseudo Wigner-Ville Distribution
STFT	Short-Time Fourier Transform
SURF	Speeded Up Robust Features

TF	Time-Frequency
TOPS	Terrain Observation by Progressive Scans
WLS	Weighted Least-Squares
WVD	Wigner-Ville Distribution

Referanser

- [1] Paco López-Dekker, Maria Sanjuan-Ferrer, Marianonietta Zonno, Marwan Younis, Stefan Baumgartner, and Antonio Gabriele, "Application-level performance and trade-offs for the post-Sentinel HRWS SAR System," *Proc. 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR)*, 2016.
- [2] J.R.Fienup, "Detecting Moving Targets in SAR Imagery by Focusing," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 37, no. 3 2001.
- [3] Walter G.Carrara, Ron S.Goodman, and Ronald M.Majewski, *Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms* Artech House, 1995.
- [4] *Illustrert norsk skippsliste: Handelsflåten. Del 1* Shipping Publications, 2003.
- [5] *IHS Jane's Fighting Ships* Jane's Information Group, 2012.
- [6] E.M.Lewandowski, *The dynamics of marine craft* World Scientific Publishing, 2004.
- [7] A.Sørensen, *Marine Cybernetics Lecture Notes* Department of Marine Technology, NTNU, 2005.
- [8] J.P.Comstock, *Principle of Naval Architecture* The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1967.
- [9] A.W.Doerry, "Ship Dynamics for Maritime ISAR Imaging," Sandia National Laboratories, 2008.
- [10] Gudrun K.Høye, Torkild Eriksen, Aleksander Lyngvi, Bjørn Narheim, and Terje Wahl, "NSAT-1: Nye momenter vedrørende kooperative overvåkningssystemer, flerfrekvent sensor samt havbølgers innvirkning på deteksjon og dekning," FFI/RAPPORT-2001/05878, 2001.

-
-
- [11] Richard K. Moore, John P. Claassen, and Y. H. Lin, "Scanning Spaceborne Synthetic Aperture Radar with Integrated Radiometer," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 17, no. 3 1981.
- [12] Francesco De Zan and Andrea Monti Guarnieri, "TOPSAR: Terrain Observation by Progressive Scans," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 44, no. 9 2006.
- [13] J. David C. Munson, James Dennis O'Brien, and W. Kenneth Jenkins, "A Tomographic Formulation of Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar," *Proceedings of the IEEE*, vol. 71, no. 8 1983.
- [14] Curtis D. Knittle, Neall E. Doren, and Charles V. Jakowatz, "A Comparison of Spotlight Synthetic Aperture Radar Image Formation Techniques," Sandia National Laboratories, SAND96-2460, 1996.
- [15] Pasquale Imperatore, Antonio Pepe, and Riccardo Lanari, "Spaceborne Synthetic Aperture Radar Data Focusing on Multicore-Based Architectures," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 54, no. 8 2016.
- [16] Michael Israel Duersch, "Backprojection for Synthetic Aperture Radar," Brigham Young University - Provo, All Theses and Dissertations, 4060, 2013.
- [17] Lars M. H. Ulander, Hans Hellsten, and Gunnar Stenström, "Synthetic-Aperture Radar Processing Using Fast Factorized Back-Projection," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 39, no. 3 2003.
- [18] Knut Eldhuset, "A New Fourth-Order Processing Algorithm for Spaceborne SAR," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 34, no. 3 1998.
- [19] Jack L. Walker, "Range-Doppler Imaging of Rotating Objects," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-16, no. 1 1980.
- [20] Armin W. Doerry, "Basics of Polar-Format Algorithm for Processing Synthetic Aperture Radar Images," Sandia National Laboratories, SAND2012-3369, 2012.
- [21] M. Martorella, E. Giusti, F. Berizzi, A. Bacci, and E. Dalle Mese, "ISAR based technique for refocusing non-cooperative targets in SAR images," *IET Radar, Sonar and Navigation*, vol. 6, no. 5 2012.
- [22] Hayden J. Callow, "Signal Processing for Synthetic Aperture Sonar Image Enhancement," University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, PhD thesis, 2003.
- [23] D. E. Wahl, P. H. Eichel, D. C. Ghiglia, and C. V. Jakowatz Jr., "Phase Gradient Autofocus - A Robust Tool for High Resolution SAR Phase Correction," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 30, no. 3 1994.
- [24] Charles V. Jakowatz Jr. and Daniel E. Wahl, "Eigenvector method for maximum-likelihood estimation of phase errors in synthetic-aperture-radar imagery," *Journal of the Optical Society of America*, vol. 10, no. 12 1993.

-
- [25] Zhishun She, R.E.Boger, and D.A.Gray, "An eigenvector approach for inverse synthetic aperture radar (ISAR) motion compensation and imaging," *Proc. 1997 IEEE TENCON - Speech and Image Technologies for Computing and Telecommunications*, 1997.
- [26] Wei Ye, Tat Soon Yeo, and Zheng Bao, "Weighted Least-Squares Estimation of Phase Errors for SAR/ISAR Autofocus," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 37, no. 5 1999.
- [27] D.E.Wahl, C.V.Jakowatz Jr., P.A.Thompson, and D.C.Ghiglia, "New Approach to Strip-Map SAR Autofocus," *Proc. Sixth IEEE Digital Signal Processing Workshop*, 1994.
- [28] James S.Bates, "The Phase Gradient Autofocus Algorithm with Range Dependent Stripmap SAR," Brigham Young University - Provo, All Theses and Dissertations, Paper 68, 2003.
- [29] Douglas G.Thompson, James S.Bates, David V.Arnold, David G.Long, and Adam Robertson, "Range Dependent Phase Gradient Autofocus," *Proc. 1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'98)*, 1998.
- [30] H.J.Callow, M.P.Hayes, and P.T.Gough, "Stripmap Phase Gradient Autofocus," *Proc. IEEE OCEANS 2003 Conference*, 2003.
- [31] Jr. William W.Bonifant, "Interferometric Synthetic Aperture Sonar Processing," Georgia Institute of Technology, MS Thesis, 1999.
- [32] Stefan Leier, Martin Kronig, and Abdelhak M.Zoubir, "A modified version of the mosaic phase gradient autofocus," *Proc. 21st European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2013)*, 2013.
- [33] M.Martorella, F.Berizzi, and E.Dalle Mese, "Time-Frame Selection for Optimal ISAR Image Reconstruction," *Proc. 5th European Conference of Synthetic Aperture Radar (EUSAR)*, 2004.
- [34] Marco Martorella, "Introduction to Inverse Synthetic Aperture Radar," IEEE International Radar Conference (Radar 2010) Tutorial Notes, 2010.
- [35] Trygve Sparr, Erik Korsbakken, and Svein-Erik Hamran, "Radaravbildning av mål i bevegelse (ISAR) - teori, metoder og signalprosessering," FFI-RAPPORT 00/02608, 2000.
- [36] T.Berger and S.E.Hamran, "An efficient scaled maximum likelihood algorithm for translational motion estimation in ISAR imaging," *Proc. 2010 IEEE Radar Conference*, 2010.
- [37] M.Martorella, F.Berizzi, and B.Haywood, "Contrast maximisation based technique for 2-D ISAR autofocusing," *IEE Proc. Radar, Sonar and Navigation*, vol. 152, no. 4 2005.
- [38] J.A.Nelder and R.Mead, "A simplex method for function minimization," *The Computer Journal*, vol. 7, no. 4 1965.

-
-
- [39] F.Berizzi, M.Martorella, B.Haywood, E.Dalle Mese, and Silvia Bruscoli, "A Survey on ISAR Autofocusing Techniques," *Proc. 2004 International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2004.
- [40] Carlo Noviello, "Techniques for Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging and monitoring of Deformation with Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar," Università degli Studi di Napoli "Federico II", Tesi di Dottorato, 2015.
- [41] Carlo Noviello, Gianfranco Fornaro, Marco Martorella, and Diego Reale, "ISAR add-on for focusing moving targets in very high resolution spaceborne SAR data," *Proc. 2014 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2014.
- [42] Søren Nørvang Madsen, "Estimating the Doppler centroid of SAR data," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 25, no. 2 1989.
- [43] Fuk-Kwok Li, Daniel N.Held, John C.Curlander, and Chialin Wu, "Doppler Parameter Estimation for Spaceborne Synthetic-Aperture Radars," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE-23, no. 1 1985.
- [44] Debora Pastina and Chiara Spina, "A new technique for optimum formation and scaling of ship target ISAR images," *Proc. 5th European Conference of Synthetic Aperture Radar (EUSAR)*, 2004.
- [45] Marco Martorella, "Novel Approach for ISAR Image Cross-Range Scaling," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 44, no. 1 2008.
- [46] Chun-Mao Yeh, Jia Xu, Ying-Ning Peng, and Y.H.Lin, "Cross-Range Scaling for ISAR Based on Image Rotation Correlation," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 6, no. 3 2009.
- [47] Sang-Hong Park, Hyo-Tae Kim, and Kyung-Tae Kim, "Cross-Range Scaling Algorithm for ISAR Images Using 2-D Fourier Transform and Polar Mapping," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, no. 2 2011.
- [48] Zhiwei Xu, Lei Zhang, and Mengdao Xing, "Precise Cross-Range Scaling for ISAR Images Using Feature Registration," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 11, no. 10 2014.
- [49] David G.Lowe, "Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints," *International Journal of Computer Vision*, vol. 60, no. 2 2004.
- [50] Herbert Bay, Andreas Ess, Tinne Tuytelaars, and Luc Van Gool, "Speeded-Up Robust Features (SURF)," *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 110, no. 3 2008.
- [51] Min-Seok Kang, Ji-Hoon Bae, Byung-Soo Kang, and Kyung-Tae Kim, "ISAR Cross-Range Scaling Using Iterative Processing via Principal Component Analysis and Bisection Algorithm," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 64, no. 15 2016.
- [52] Edward Rosten and Tom Drummond, "Machine Learning for High-Speed Corner Detection," *Proc. European Conference on Computer Vision - ECCV 2006*, 2006.

-
-
- [53] Victor C.Chen and Ronald Lipps, "ISAR Imaging of Small Craft With Roll, Pitch and Yaw Analysis," *Proc. IEEE International Radar Conference*, 2000.
- [54] T.Berger, S.E.Hamran, and T.Sparr, "Estimation of rotation in ISAR imaging based on local sharpness measure," *Proc. IEEE Radar Conference, RADAR '08*, 2008.
- [55] Victor C.Chen, Ronald Lipps, and Maitland Bottoms, "Advanced Synthetic Aperture Radar Imaging and Feature Analysis," *Proc. International Radar Conference*, 2003.
- [56] Victor C.Chen and Hao Ling, *Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis* Artech House, 2002.
- [57] F.Hlawatsch and G.F.Boudreaux-Bartels, "Linear and Quadratic Time-Frequency Signal Representations," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 9, no. 2 1992.
- [58] T.Sparr, "ISAR - Radar Imaging of Targets with Complicated Motion," *Proc. 2004 International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2004.
- [59] F.Berizzi, E.Dalle Mese, M.Diani, and M.Martorella, "High-Resolution ISAR Imaging of Maneuvering Targets by Means of the Range Instantaneous Doppler Technique: Modeling and Performance Analysis," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 10, no. 12 2001.
- [60] Igor Djurovic, Thayananthan Thayaparan, and Ljubisa Stankovic, "Adaptive Local Polynomial Fourier Transform in ISAR," *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, vol. 2006 2006.
- [61] J.A.Högbom, "Aperture Synthesis with a Non-Regular Distribution of Interferometer Baselines," *Astronomy and Astrophysics Supplement*, vol. 15, no. 3 1974.
- [62] Brett Borden, "The fractional Fourier transform and ISAR imaging," *Inverse Problems*, vol. 16, no. 2 2000.
- [63] M.Xing, R.Wu, Y.Li, and Z.Bao, "New ISAR imaging algorithm based on modified Wigner-Ville distribution," *IET Radar, Sonar and Navigation*, vol. 3, no. 1 2009.
- [64] Xiaolei Lv, Mengdao Xing, Chunru Wan, and Shouhong Zhang, "ISAR Imaging of Maneuvering Targets Based on the Range Centroid Doppler Technique," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 19, no. 1 2010.
- [65] Xiaolei Lv, Guoan Bi, Chunru Wan, and Mengdao Xing, "Lv's Distribution: Principle, Implementation, Properties, and Performance," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 59, no. 8 2011.
- [66] Liang Wu, Xizhang Wei, Degui Yang, Hongqiang Wang, and Wiang Li, "ISAR Imaging of Targets With Complex Motion Based on Discrete Chirp Fourier Transform for Cubic Chirps," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, no. 10 2012.

-
-
- [67] Yong Wang and Yi-Cheng Jiang, "ISAR Imaging of Ship Target with Complex Motion Based on New Approach of Parameters Estimation for Polynomial Phase Signal," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2011, 2011.
- [68] Y.Li, R.Wu, M.Xing, and Z.Bao, "Inverse synthetic aperture radar imaging of ship target with complex motion," *IET Radar, Sonar and Navigation*, vol. 2, no. 6, 2008.
- [69] Xia Bai, Ran Tao, Zhijiao Wang, and Yue Wang, "ISAR Imaging of a Ship Target Based on Parameter Estimation of Multicomponent Quadratic Frequency-Modulated Signals," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 52, no. 2, 2014.
- [70] G.Zhao-Zhao, L.Ya-Chao, X.Meng-Dao, W.Genyuan, Z.Shou-Hong, and B.Zheng, "ISAR imaging of manoeuvring targets with the range instantaneous chirp rate technique," *IET Radar, Sonar and Navigation*, vol. 3, no. 5, 2009.
- [71] Yong Wang and Ying-Ning Peng, "Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging of Maneuvering Target Based on the Product Generalized Cubic Phase Function," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 8, no. 5, 2011.
- [72] Jibin Zheng, Tao Su, Wentao Zhu, Long Zhang, Zheng Liu, and Qing Huo Liu, "ISAR Imaging of Nonuniformly Rotating Target Based on a Fast Parameter Estimation Algorithm of Cubic Phase Signal," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 53, no. 9, 2015.

About FFI

The Norwegian Defence Research Establishment (FFI) was founded 11th of April 1946. It is organised as an administrative agency subordinate to the Ministry of Defence.

FFI's MISSION

FFI is the prime institution responsible for defence related research in Norway. Its principal mission is to carry out research and development to meet the requirements of the Armed Forces. FFI has the role of chief adviser to the political and military leadership. In particular, the institute shall focus on aspects of the development in science and technology that can influence our security policy or defence planning.

FFI's VISION

FFI turns knowledge and ideas into an efficient defence.

FFI's CHARACTERISTICS

Creative, daring, broad-minded and responsible.

Om FFI

Forsvarets forskningsinstitutt ble etablert 11. april 1946. Instituttet er organisert som et forvaltningsorgan med særskilte fullmakter underlagt Forsvarsdepartementet.

FFI's FORMÅL

Forsvarets forskningsinstitutt er Forsvarets sentrale forskningsinstitusjon og har som formål å drive forskning og utvikling for Forsvarets behov. Videre er FFI rådgiver overfor Forsvarets strategiske ledelse. Spesielt skal instituttet følge opp trekk ved vitenskapelig og militærteknisk utvikling som kan påvirke forutsetningene for sikkerhetspolitikken eller forsvarsplanleggingen.

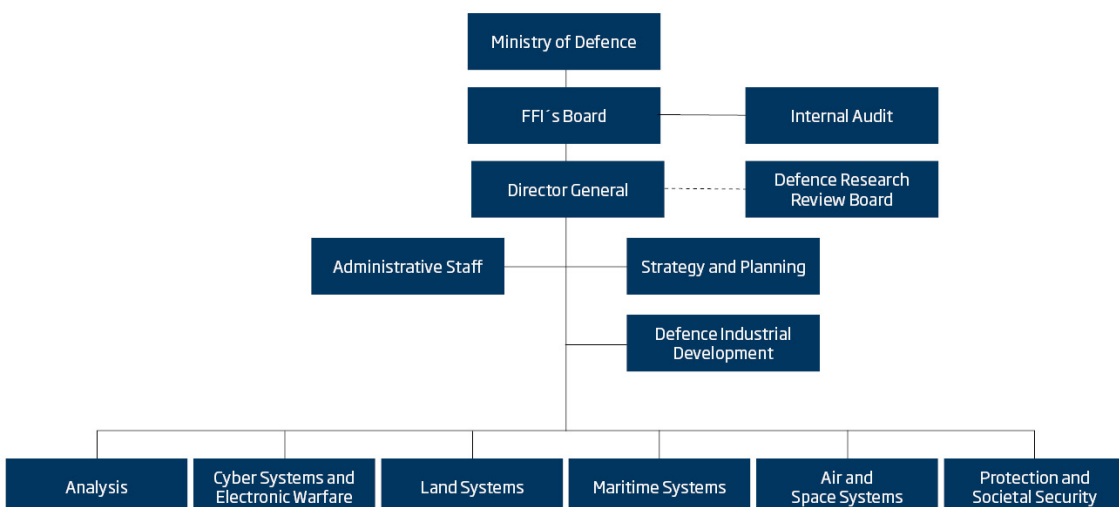
FFI's VISJON

FFI gjør kunnskap og ideer til et effektivt forsvar.

FFI's VERDIER

Skapende, drivende, vidsynt og ansvarlig.

FFI's organisation



Forsvarets forskningsinstitutt
Postboks 25
2027 Kjeller

Besøksadresse:
Instituttveien 20
2007 Kjeller

Telefon: 63 80 70 00
Telefaks: 63 80 71 15
Epost: ffi@ffi.no

Norwegian Defence Research Establishment (FFI)
P.O. Box 25
NO-2027 Kjeller

Office address:
Instituttveien 20
N-2007 Kjeller

Telephone: +47 63 80 70 00
Telefax: +47 63 80 71 15
Email: ffi@ffi.no