

Forutsetninger og metoder for klassifisering av skip i ISAR-bilder

Atle Onar Knapskog

Forsvarets forskningsinstitutt/Norwegian Defence Research Establishment (FFI)

18. februar 2008

FFI-rapport 2008/00432

1059

ISBN 978-82-464-1326-6

Emneord

Radar

Radar - SAR

Klassifikasjon

Godkjent av

Terje Johnsen

Prosjektleder

Johnny Bardal

Avdelingssjef

Sammendrag

Syntetisk Aperture Radar (SAR) og Invers Syntetisk Aperture Radar (ISAR) er teknikker for høyoppløselig avbildning. Denne rapporten ser på mulighetene for å utvikle og ta i bruk et system for automatisk klassifikasjon av skip i SAR- og ISAR-bilder.

Rapporten gir først en grunnleggende innføring i SAR- og ISAR-avbildning av skip. SAR-avbildning benyttes mot stasjonære mål, og er aktuelt mot skip som ligger til kai eller for anker i stille sjø. ISAR benyttes mot mål i bevegelse. Skipets bevegelser bestemmer i stor grad bildeplan, oppløsning og mulighetene for å få fokuserte bilder. Disse sammenhengene blir beskrevet. Bildene som kommer ut av en ISAR-prosessor vi ikke har kontroll med er ikke nødvendigvis optimale. Rapporten skisserer noen metoder som kan benyttes for å tilpasse bildedannelsen til forholdene, og dermed få bilder som er bedre egnet for klassifikasjon.

For at et klassifikasjonssystem skal kunne tas videre fra forskningsstadiet til operativ bruk, må det oppfylle visse krav til bl.a. detaljert klassifikasjon, maksimal feilrate og robusthet. Videre må det være praktisk mulig å bygge opp en tilstrekkelig omfattende fartøysdatabase. Vi har undersøkt hvilken informasjon som kan trekkes ut av SAR- og ISAR-data, og i hvilken grad den gir mulighet for diskriminering mellom fartøysklasser. Egenskaper relatert til fartøyenes dimensjoner og form har et visst potensial, men er relativt lite robust overfor målets orientering og bevegelser. Egenskaper relatert til tilbakespredningen har trolig større potensial og robusthet. Hvis klassifikasjonssystemet baseres på dimensjoner og form, kan skipsdatabasen bestå av 3D-modeller som enkelt kan bygges med utgangspunkt i fotografier. Klassifikasjon basert på fordelingen av tilbakespredning forutsetter en signaturdatabase. Det vil i så fall kreve omfattende datainnsamling, noe som er en utfordring å få gjennomført i praksis.

Rapporten skisserer flere mulige systemer for klassifikasjon av skip med SAR og ISAR. For ISAR ville man trolig oppnådd høyest ytelse ved å benytte et bredt utvalg av egenskaper som inkluderte både dimensjoner, silhuett og fordeling av tilbakespredning. I første omgang er en enklere metode basert på sammenligning av målets silhuett med silhuetter fra 3D-modeller blitt implementert og testet. Resultatene for to datasett er gitt i rapporten. Et fartøy på 33.5m blir klassifisert med relativt høy treffprosent, mens en båt på 10.5m i all hovedsak blir klassifisert som ukjent mål. Treningsdataene omfatter 16 fartøysklasser. Disse resultatene indikerer at metoden har et potensial for klassifikasjon av skip når formen til fartøyet kommer tydelig frem på ISAR-bildene. Det er imidlertid usikkert hvilken ytelse den ville hatt i en mer realistisk situasjon med et stort antall klasser og mer varierende kvalitet på bildene. Det trengs flere eksperimenter med reelle data for å vurdere potensialet til metodene vi har utviklet og bestemme retning for den videre utviklingen.

English summary

Synthetic Aperture Radar (SAR) and Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) are techniques for high-resolution imaging. This report considers the possibilities of developing and bringing into operation a system for automatic classification of ships in SAR and ISAR images.

The report first gives a basic introduction to SAR and ISAR imaging. SAR imaging is used against stationary targets. It is relevant for imaging of ships in harbor. ISAR is used against moving targets. The motion of the ship largely determines the image projection plane, resolution and the possibilities of focused images. These relations are described in the report. Images from an ISAR processor that we have no insight into are not necessarily optimal. We outline some methods that can be used for adapting the image formation process to the conditions, and thus obtaining images suitable for target classification.

For a classification system to be taken from the experimental stage and further into operation, it has to meet certain requirements. That may include requirements for the level of detailed classification, maximum error rate and robustness. In addition, building a sufficient ship database must be achievable. We have examined what information SAR and ISAR data can reveal about the targets, and to what extent this information can be used for discriminating between ship classes. Features related to the ships' dimensions and shapes have some potential, but they have relatively low robustness to the effects of different target orientations and motions. Features related to the backscattering may have higher potential and robustness. If the classification system is based on dimensions and shape, a ship database containing simple 3D models is sufficient. The models can be built from photographs. Classification based on the distribution of backscattering requires a database of radar signatures. In that case extensive data collection is needed, which is a practical challenge.

The report outlines several possible systems for ship classification using SAR and ISAR. For ISAR the highest performance would probably be achieved by exploiting a wide range of features, including the dimensions, silhouette and the distribution of backscattering. As a starting point a simpler method has been implemented and tested. The method is based on the comparison of target silhouettes with a training set of silhouettes produced from 3D models. Experimental results for two data sets are given in the report. For a vessel with a length of 33.5m, a relatively high level of correct classification is achieved. A small boat is mainly classified as unknown target. The training set includes 16 classes. These results indicate that the method has a potential for ship classification if the shape of the vessel is clearly visible in the ISAR images. The performance in a more realistic scenario with a large number of classes and varying image quality is however unknown. More experiments with real data are necessary in order to assess the potential of the current methods and plot the course of future development.

Innhold

1	Innledning	7
2	SAR- og ISAR-avbildning av skip	7
2.1	SAR-avbildning av skip	7
2.2	ISAR-avbildning av skip	8
2.2.1	ISAR bildeplan	8
2.2.2	Forventet oppløsning	13
2.2.3	Metoder for avbildning	14
3	Forutsetninger for et klassifikasjonssystem	17
3.1	Krav til et system for klassifikasjon av skip	17
3.2	Egenskaper som kan benyttes for klassifikasjon	19
3.2.1	Lengde og bredde	19
3.2.2	Silhuett	20
3.2.3	Andre egenskaper ekstrahert fra formen til fartøyet	21
3.2.4	Fordeling av tilbakespredning i fartøyets radarsignatur	21
3.2.5	Andre egenskaper	23
3.3	Muligheter for skipsdatabaser	23
3.3.1	Modelldatabase	23
3.3.2	Signaturdatabase	25
4	Metoder for klassifikasjon av skip	25
4.1	Klassifikasjon av skip i SAR-bilder	25
4.2	Klassifikasjon av skip i ISAR-bilder	26
4.2.1	Bruk av fartøyenes dimensjoner og form	26
4.2.2	Bruk av fordelingen av tilbakespredning i fartøyenes radarsignaturer	29
5	Test av klassifikasjonsmetode	29
6	Konklusjoner	30
	Referanser	32

1 Innledning

Syntetisk Aperture Radar (SAR) og Invers Syntetisk Aperture Radar (ISAR) er teknikker for høyoppløselig avbildning. SAR benyttes fortrinnsvis mot stasjonære mål og ISAR mot mål i bevegelse. Disse radarmodusene har potensial for klassifikasjon av fartøyer. Det kan gjøres ved at en operatør analyserer bildene visuelt. Vi tror imidlertid at et automatisk klassifikasjonssystem ville vært et nyttig hjelpemiddel for operatøren og bidratt til større effektivitet.

Denne rapporten ser på mulighetene for å utvikle og ta i bruk et system for automatisk klassifikasjon av skip i SAR- og ISAR-bilder. Hovedvekten er lagt på ISAR, ettersom skip er bevegelige mål. Klassifikasjon av skip som ligger i ro i havneområder kan også være en aktuell problemstilling, og det er derfor også inkludert noen vurderinger for SAR. Rapporten behandler temaene på generelt grunnlag og er ikke knyttet opp mot konkrete sensorer og bruksområder.

Kapittel 2 gir en grunnleggende innføring i SAR- og ISAR-avbildning av skip. Det forsøker særlig å gi en forståelse av skipets bevegelse sin betydning for avbildningen. Kapittel 3 gjennomgår noen av forutsetningene for realisering av et operativt klassifikasjonssystem. Det ser bl.a. på om egenskaper som kan trekkes ut fra dataene har tilstrekkelig potensial for klassifikasjon og hvorvidt det lar seg gjøre å bygge opp en omfattende skipsdatabase. Kapittel 4 beskriver mulige klassifikasjonssystemer, og spesielt en metode som er implementert. Noen resultater fra testing av den implementerte algoritmen er gitt i kapittel 5, før kapittel 6 avslutter med konklusjoner.

2 SAR- og ISAR-avbildning av skip

For å kunne utvikle klassifikasjonsmetoder for SAR og ISAR-bilder, er det nødvendig å kjenne til de karakteristiske trekkene ved slike data. SAR og ISAR har noen egenskaper som skiller seg klart fra avbildning med optiske og andre bildedannende sensorer, og som gjør at bildetolkningsmetoder for fotografier o.l. i liten grad kan overføres til SAR- og ISAR-bilder. Dette kapitlet forklarer hva som bestemmer bildeplanet, oppløsningen og mulighetene for å få fokuserte bilder. Betydningen av målets bevegelse blir særlig vektlagt. Noe av det som beskrives er kun anvendbart hvis man har tilgang på rådata fra sensoren, men det gir en forståelse av enkelte muligheter og begrensninger ved ISAR-avbildning.

2.1 SAR-avbildning av skip

SAR-bilder viser fartøyene i en tilnærmet top-view projeksjon. Skalaen på begge aksene er kjent. Man kan altså lese av lengden og bredden til skipene, mens høydeprofilen ikke vil være synlig. Høydeinformasjon er tilgjengelig fra interferometriske SAR-systemer, men dette er en spesiell type sensorer som ikke blir behandlet i denne rapporten. Intensiteten i bildene er gitt av tilbakespredt energi fra målet. Man får typisk mye tilbakespredning fra hjørner og sammensatte metallstrukturer og lite fra glatte flater som reflekterer energien bort, slik som dekk og sidene på

skroget. Hvilke deler av skipet som gir mye tilbakespredning og hvilke som ligger i skyggen varierer sterkt med vinkelen det observeres fra. Tilbakespredningen er vanskelig å prediktere, ettersom små strukturer kan få stor betydning.

SAR-avbildning forutsetter i utgangspunktet at målet er stasjonært. Konsekvensen av bevegelse er utsmøring og/eller forflytning av målet i bildet. Avbildning med høyere oppløsning stiller strengere krav til at målet er i ro. Dette fordi bevegelsene til målet blir større relativt til oppløsningscellene, og fordi høy oppløsning krever en lengre syntetisk aperture. Det tar lengre tid for sensorplattformen å fly en lengre aperture, særlig fra lang avstand, og innenfor denne tiden må målet ha tilstrekkelig liten bevegelse og plattformens navigasjonssystem må måle bevegelsen med tilstrekkelig nøyaktighet. I praksis kan man av og til få fokuserte bilder med lav oppløsning av store fartøyer i rolig sjø når de ligger for anker eller har jevn bevegelse radielt i forhold til radaren. Skip som ligger til kai vil kunne avbildes også med høyere oppløsning.

2.2 ISAR-avbildning av skip

ISAR-bilder viser ulike projeksjoner av målet avhengig av bevegelsen. Skalaen er kjent i range-retning, men ukjent i crossrange. Tilbakespredning og skygge avhenger av aspektvinkel og innfallsvinkel på samme måte som for SAR-avbildning.

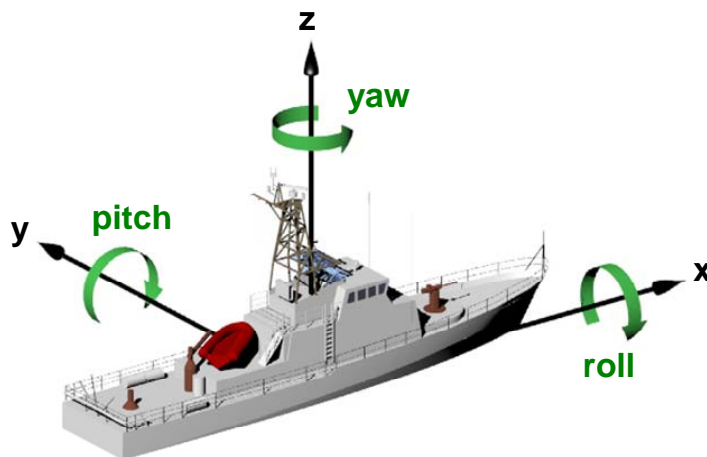
2.2.1 ISAR bildeplan

ISAR-bilder kan betraktes som en avbildning av målet i et koordinatsystem med avstand (range) og Doppler langs aksene. Range-aksen følger siktelinja fra radaren. Doppler-skift er gitt av instantan hastighet mot sensoren. Forskjellene i Doppler-skift mellom ulike deler av målet er bestemt av målets rotasjon. Under bildedannelsen kompenserer man for den radielle bevegelsen mellom sensoren og målets rotasjonssenter, og man står igjen med følgende Doppler-skift (1):

$$f_D = \frac{2f}{c}(\mathbf{v} \cdot \mathbf{R}) \quad (2.1)$$

der \mathbf{v} er hastighetsvektor pga rotasjon og \mathbf{R} er enhetsvektoren i retning mot radaren.

Et skip kan beskrives i et koordinatsystem som vist på Figur 2.1.



Figur 2.1 Skip med rotasjon om tre akser

Skipet har en vilkårlig rotasjonsbevegelse som kan dekomponeres i roll, pitch og yaw. (I denne rapporten har vi valgt å benytte de engelske betegnelsene fremfor de norske som er rull, stamp og giring.) På Figur 2.1 er roll definert som rotasjon om x-aksen. Vinkelhastigheten til roll-bevegelsen kan kalles ω_x . Pitch er rotasjon om y-aksen med vinkelhastighet ω_y . Yaw er rotasjon om z-aksen med vinkelhastighet ω_z .

Vi kan først anta at skipet på Figur 2.1 avbildes med en radar plassert på x-aksen langt bak skipet. Hastighet mot radaren gir positivt Doppler-skift. Man ser at roll-komponenten i dette tilfellet ikke gir Doppler-skift. Doppler som skyldes pitch-komponenten blir:

$$f_{D,pitch} = \frac{2f}{c} \omega_y (-z) \quad (2.2)$$

Doppler som skyldes yaw-komponenten blir:

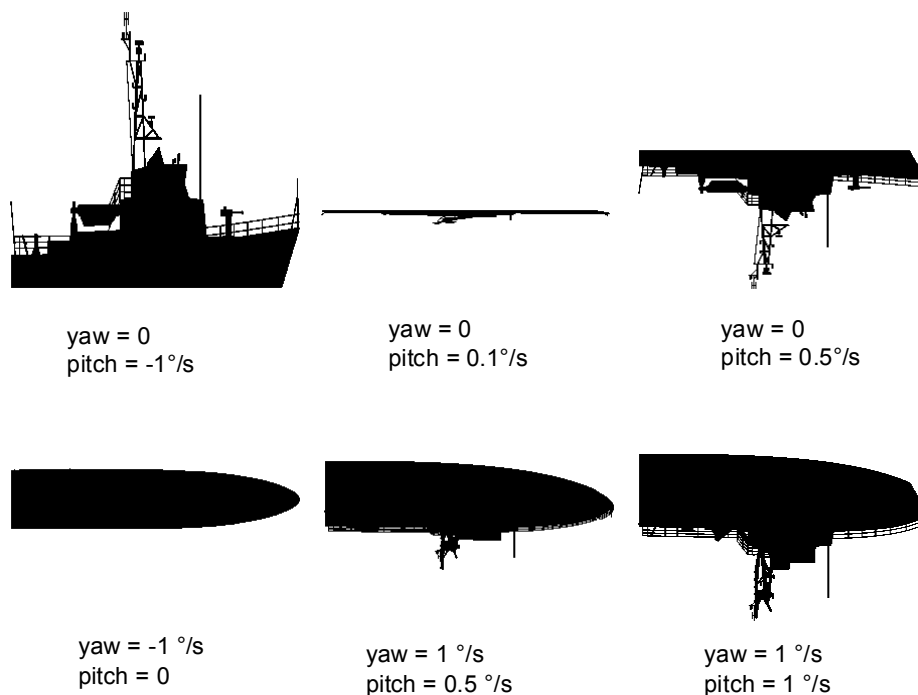
$$f_{D,yaw} = \frac{2f}{c} \omega_z y \quad (2.3)$$

Det totale Doppler-skiftet blir summen av disse komponentene. Det betyr at man i dette tilfellet kan skrive transformasjonen fra spredernes xyz-koordinater til range-Doppler-koordinater på følgende måte:

$$\begin{bmatrix} R \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2f}{c} \omega_z & -\frac{2f}{c} \omega_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

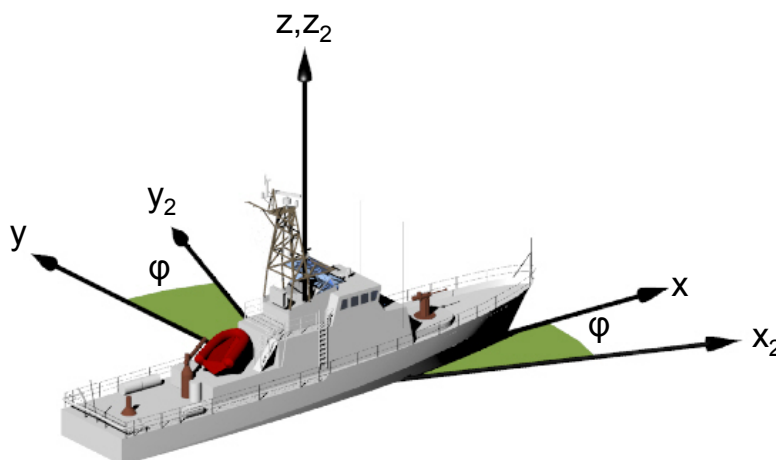
Hvis skipet kun har pitch-bevegelse, resulterer disse likningene i en projeksjon som viser høydeprofilen til skipet, som illustrert på øverste rad på Figur 2.2. Det må understrekes at skissene på figuren ikke sier noe om hvor man vil få tilbakespredning og skygge. Hvis skipet kun

har yaw-bevegelse, får man top-view-bilder som nederst til venstre på Figur 2.2. Med både pitch- og yaw-bevegelse blir avbildningen en kombinasjon av profil- og plankomponent. Generelt kan skipets roll-, pitch- og yaw-bevegelser variere uavhengig og gi en mengde ulike projeksjoner.



Figur 2.2 Range-Doppler-projeksjoner (Range horisontalt og Doppler vertikalt) av et fartøy med 0° aspektvinkel, 0° elevasjonsvinkel og ulike rotasjonsbevegelser

Uttrykkene for projeksjonene blir mer kompliserte når radaren plasseres i en vilkårlig posisjon. Vi må da rotere koordinatsystemene. Hvis radaren er plassert i xy -planet, kan vi definere et nytt koordinatsystem ($x_2 y_2 z_2$) som er rotert om z -aksen slik at x_2 -retningen faller sammen med radarens range-retning. Vinkelen mellom x -aksen og x_2 -aksen er aspektvinkelen φ , som også blir vinkelen mellom y og y_2 . Dette er vist på Figur 2.3.



Figur 2.3 Koordinatsystem rotert om z -aksen

Transformasjonen av koordinater fra koodinatsystemet $(x \ y \ z)$ til $(x_2 \ y_2 \ z_2)$ blir:

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Dette kan være en gyldig tilnærming hvis sensorplattformen flyr i svært lav høyde eller langt fra målet, så elevasjonsvinkelen er nær null. Ellers må vi ta hensyn til at radaren er plassert i en høyde over havet og har en elevasjonsvinkel α sett fra skipet. Da innføres et nytt koordinatsystem $(x_3 \ y_3 \ z_3)$ som er rotert om y_2 -aksen slik at x_3 -retningen blir radarens slant-range-retning.

Transformasjonen av koordinater fra $(x \ y \ z)$ til $(x_3 \ y_3 \ z_3)$ blir:

$$\begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

På tilsvarende måte transformeres skipets roll, pitch og yaw til rotasjonskomponenter om x_3 -, y_3 -, og z_3 -aksen:

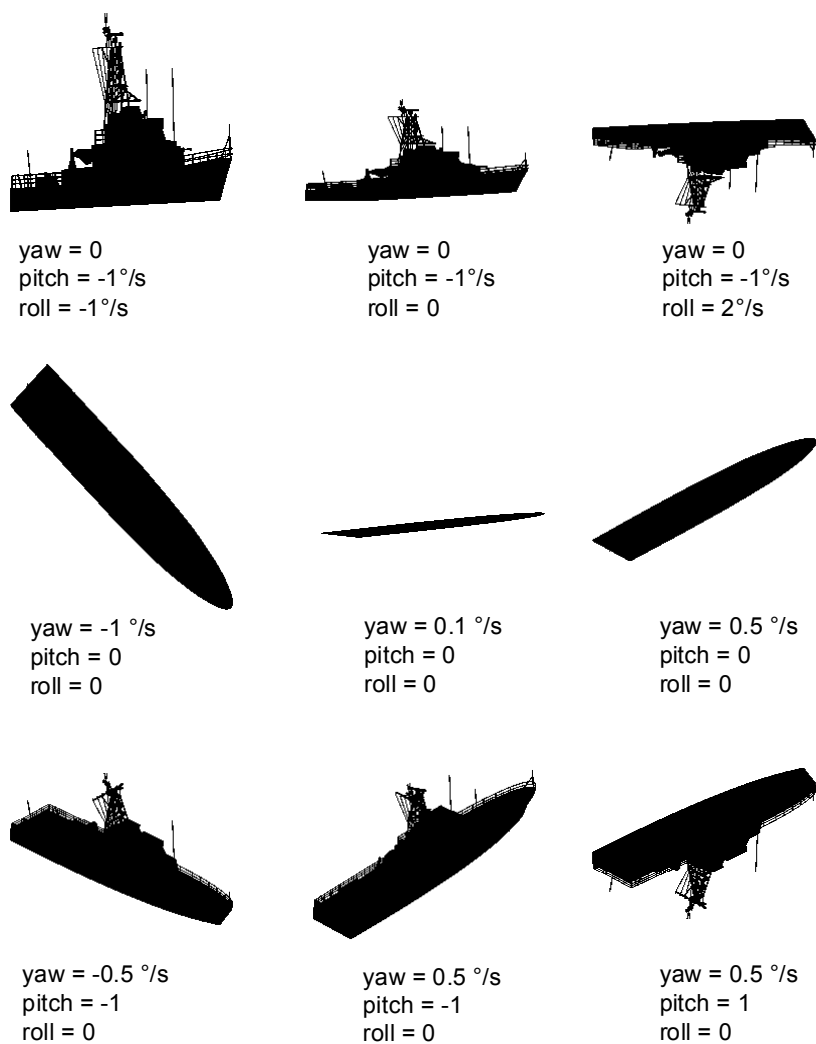
Feil! Bokmerke er ikke definert.

$$\begin{bmatrix} \omega_{x3} \\ \omega_{y3} \\ \omega_{z3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

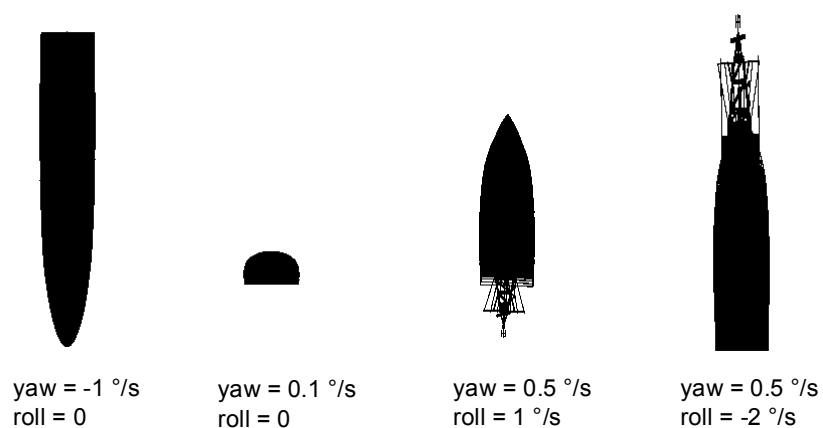
Bildeplanet for ISAR-avbildningen kan finnes på samme måte som Likning (2.4).

$$\begin{bmatrix} R \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2f}{c} \omega_{z3} & -\frac{2f}{c} \omega_{y3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Et lite utvalg med typiske projeksjoner er vist på Figur 2.4. Profilkomponenten er gitt av en kombinasjon av roll og pitch, og vil variere mellom positive og negative utslag i takt med bølgene. Plankomponenten er bestemt av yaw-bevegelsen. Skipets lengdeakse sin orientering i bildet er også i stor grad bestemt av yaw. Når skipet observeres bakfra eller forfra, vil lengdeaksen ligge fast som på Figur 2.2. Etter hvert som aspektvinkelen øker, vil lengdeaksen bli mer følsom for yaw-bevegelsen og typisk ha store svinginger. Når skipet observeres rett fra siden, vil lengdeaksen kunne peke vekselvis i positiv og negativ Doppler-retning, og profilkomponenten vil kun være bestemt av roll-bevegelsen, som illustrert på Figur 2.5.



Figur 2.4 Range-Doppler-prosjeksjoner av et fartøy med 45° aspektvinkel, 2° elevasjonsvinkel og ulike rotasjonsbevegelser



Figur 2.5 Range-Doppler-prosjeksjoner av et fartøy med 90° aspektvinkel, 2° elevasjonsvinkel og ulike rotasjonsbevegelser

2.2.2 Forventet oppløsning

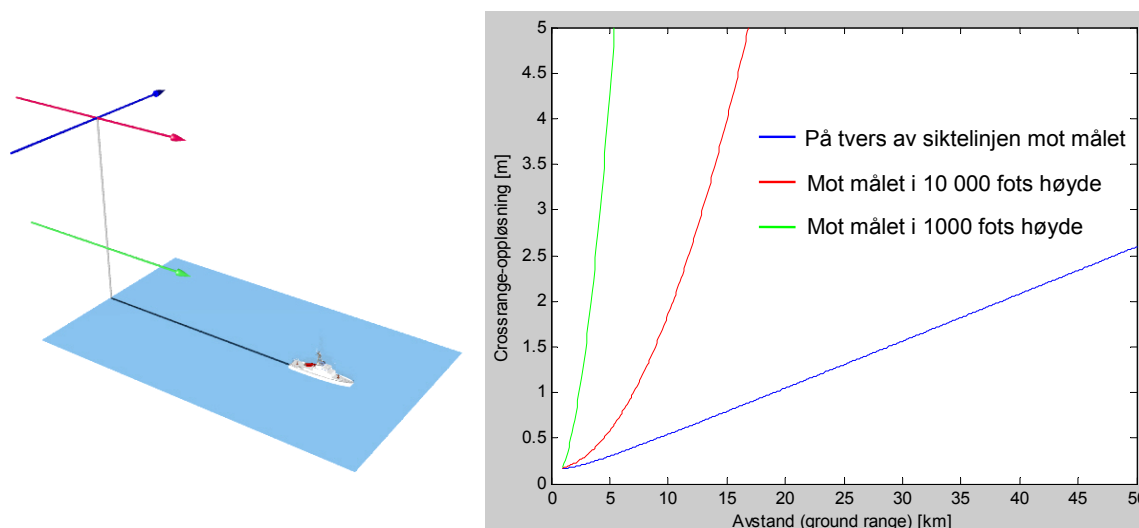
Den nominelle oppløsningen i slant-range er gitt av radarens båndbredde:

$$\Delta r_s = \frac{c}{2\beta} \quad (2.9)$$

der c er lyshastigheten og β er båndbredden. Oppløsning i crossrange er relatert til målets aspektvinkelendring innenfor integrasjonstiden som danner grunnlaget for bildet (1):

$$\Delta r_c = \frac{1}{2} \frac{\lambda}{\omega T} = \frac{1}{2} \frac{\lambda}{\psi} \quad (2.10)$$

der λ er radarens bølgelengde, ω er målets rotasjonshastighet og ψ er aspektvinkelendringen innenfor integrasjonstiden T . Vinkelendringen er en kombinasjon av bidrag fra sensorens bevegelse i forhold til fartøyet og fartøyets egne rotasjonsbevegelser. Hvis man antar at radaren opererer i x-bånd, sensorplattformen beveger seg i 300 knops hastighet, målet ligger helt i ro og integrasjonstiden er 2s, blir crossrange-oppløsningen som vist på Figur 2.6



Figur 2.6 Til venstre retninger for flybaner. Til høyre crossrange-oppløsning som følge av sensorens bevegelser

Man får et top-view-bilde hvis man flyr på tvers av siktelinjen mot målet og et side-view-bilde hvis man flyr mot målet. Eksemplet gir en indikasjon på størrelsesorden for det bidraget som skyldes sensorens bevegelser. Dette bidraget får mindre betydning når målet observeres på lengre avstand og når det benyttes kortere integrasjonstider. Hvis man f.eks benytter en integrasjonstid på 0.5s, blir oppløsningen en faktor 4 dårligere enn vist på Figur 2.6. Fra en avstand på 50 km får man dermed i beste fall en crossrange-oppløsning på 10m mot et stasjonært mål. I praksis betyr dette at fartøyer som ruller lite i bølgene vil bli avbildet i en projeksjon som i hovedsak er top-view, og at avstanden bør være relativt liten for å få god oppløsning.

Rotasjonsbevegelsene som skyldes bølgene kan naturligvis være svært varierende. Tabell 2.1 angir de maksimale utslagene man kan forvente under normale forhold (2), og Figur 2.7 illustrerer noen utslag i pitch for et lite fartøy.

	Maksimal roll-amplitude	Maksimal pitch-amplitude
Fiskefartøy	7.5 – 10°	2.5 – 3.5°
Supplyskip	5 – 7.5°	2 – 3.5°
Tankskip	2.5 – 4°	0.5 – 1°

Tabell 2.1 Maksimal forventet roll og pitch for ulike skips kategorier



Figur 2.7 Eksempel på fartøy med $\pm 1^\circ$, $\pm 2^\circ$ og $\pm 4^\circ$ pitch-utslag

For å få ISAR-bilder som i størst mulig grad viser høydeprofilen, ønsker man at fartøyet har stor pitch-bevegelse. Ut fra Tabell 2.1 kan man maksimalt oppnå en crossrange-oppløsning på 13-18cm i side-view-bilder av fiskefartøyer og 45-90cm for tankskip. Dette forutsetter imidlertid at man klarer å integrere opp alt mellom maksimalt negativt og maksimalt positivt utslag til ett bilde. Det virker altfor optimistisk. Det er mer trolig at rotasjonsbevegelsen er tilstrekkelig jevn bare innenfor mindre deler av bølgeperioden. Vi kan derfor gjette på at side-view-bilder av mindre fartøyer i praksis kan ha oppløsning på noen titalls cm under gunstige forhold, mens det for store skip er snakk om meter.

Bølgene på havet er som regel en kombinasjon av dønninger (swell) fra værsystemer langt unna og bølger generert av mer lokal vind. Midlet over lang tid utgjør dønninger det meste av energien. Målinger fra et utvalg posisjoner i Nordsjøen og Norskehavet gir en gjennomsnittlig bølgehøyde på ca 2.3m for dønninger og ca 1.5m for vindbølger (3). Til sammen måler man en signifikant bølgehøyde på i gjennomsnitt ca 2.7m. Det er svært stor variasjon, men det meste av tiden er bølgehøyden på åpent hav mellom 1 og 5m. Dønningene har typiske perioder mellom 7.5 og 11s, mens vindbølgene ofte er kortere, gjerne mellom 2.5 og 8s. Man kan anta at store skip har en jevn bevegelse som hovedsakelig er påvirket av de langperiodiske dønningene. For ISAR-avbildning kan det være naturlig å prøve integrasjonstider på et par sekunder. Mindre fiskefartøyer kan ha en mer uregelmessig bevegelse, og da bør man kanskje redusere integrasjonstidene til noen få tidels sekunder.

2.2.3 Metoder for avbildning

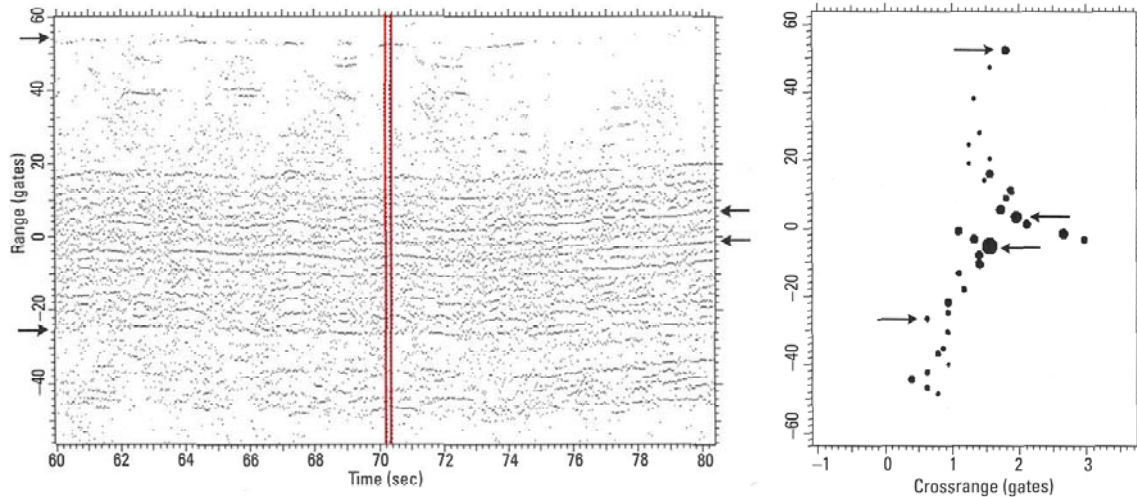
Det er vanskelig å implementere en robust og effektiv prosess for ISAR-avbildning av skip. I praksis får man gjerne bildesekvenser der enkelte bilder er dårligere fokusert enn andre. Den delen av prosessen som er forbundet med størst utfordring er kompensasjon av målets bevegelse.

Denne rapporten går ikke i detalj inn på metoder for bevegelseskompensasjon, men bare nevner noen aktuelle teknikker.

Bevegelseskompensasjonen består av to hovedsteg. Først justeres range-profilene i avstand slik at spredene er i samme avstandscelle fra profil til profil. Deretter justeres fasen slik at et punkt på målet har null Doppler gjennom integrasjonstiden. Dette blir det punktet som målet roterer rundt. Det vanskeligste steget er å rette opp fasen. Her kan man benytte ulike autofokusteknikker. En teknikk som er enkel å implementere kalles Prominent Point Processing (PPP) og baserer seg på at fasen til én isolert spredere kan settes som referanse gjennom hele intervaller. Den kan gi bra resultat i mange tilfeller, men er generelt lite robust. Multiple Scatterer Algorithm (MSA) og Phase-Gradient Algorithm (PGA) er litt mer sofistikerte, men bygger på antakelsen om at det finnes tydelige, ikke-interfererende spredere. Andre metoder, f.eks. basert på kontrast i bildet eller entropi, kan gi økt robusthet på bekostning av mye tyngre prosessering.

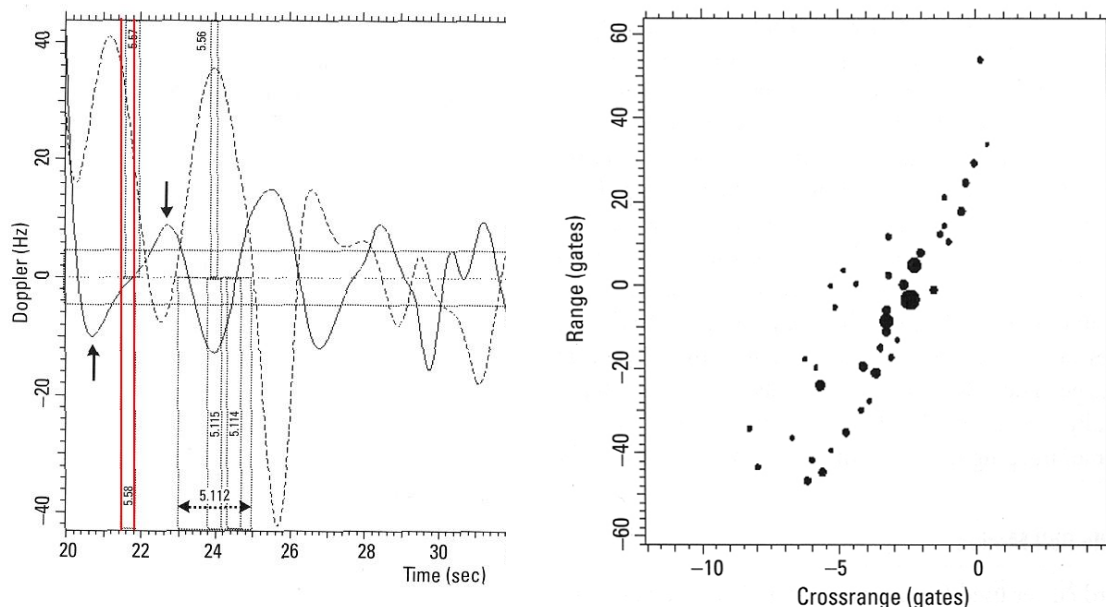
En ISAR bildesekvens kan lages ved å gå stegvis gjennom dataene og la et fast antall pulser danne grunnlaget for hvert bilde. En forutsetning for å få et fokusert bilde er at bevegelseskompensasjonen er vellykket gjennom integrasjonstiden. Det kan være vanskelig å sette en passende integrasjonstid på forhånd, ettersom et fartøy noen ganger kan ha jevn bevegelse i mange sekunder, mens man andre ganger observerer raskt skiftende bevegelser. Ifølge (4) bør man først analysere dataene for å se hvor lange integrasjonstider som kan benyttes til enhver tid. Hvis målet har så komplisert bevegelse at man bare kan få vellykket bevegelseskompensasjon i veldig korte intervaller, må man ta til takke med den reduserte crossrange-oppløsningen man da får. Det er bedre enn å bruke lengre intervaller med ufokuserte bilder som resultat.

I (4) skisseres en metode som i noen tilfeller kan benyttes for å finne gode top-view- og side-view-bilder. I stedet for å generere en bildesekvens og deretter lete etter gode bilder ved hjelp av bildebehandlingsmetoder, kan man finne tidspunktene som gir best top-view og side-view ved å analysere dataene før bildedannelse. Når man plotter range-profilene, vil man gjerne se en del spredere som kan følges over lengre tid. Man kan først lage et foreløpig ISAR-bilde på et sted i sekvensen der flere spredere er tydelige. Så velger man to par av spredere som kan følges over tid i range-profilene og lar seg identifisere i bildet, se Figur 2.8. Det første paret består av to spredere med stor avstand i range. Det kan f.eks. være et punkt nær baugen og et nær akterenden til skipet. Det andre paret har stor avstand i Doppler, men relativt liten avstand i range. Det kan være punkter på mast og overbygning.

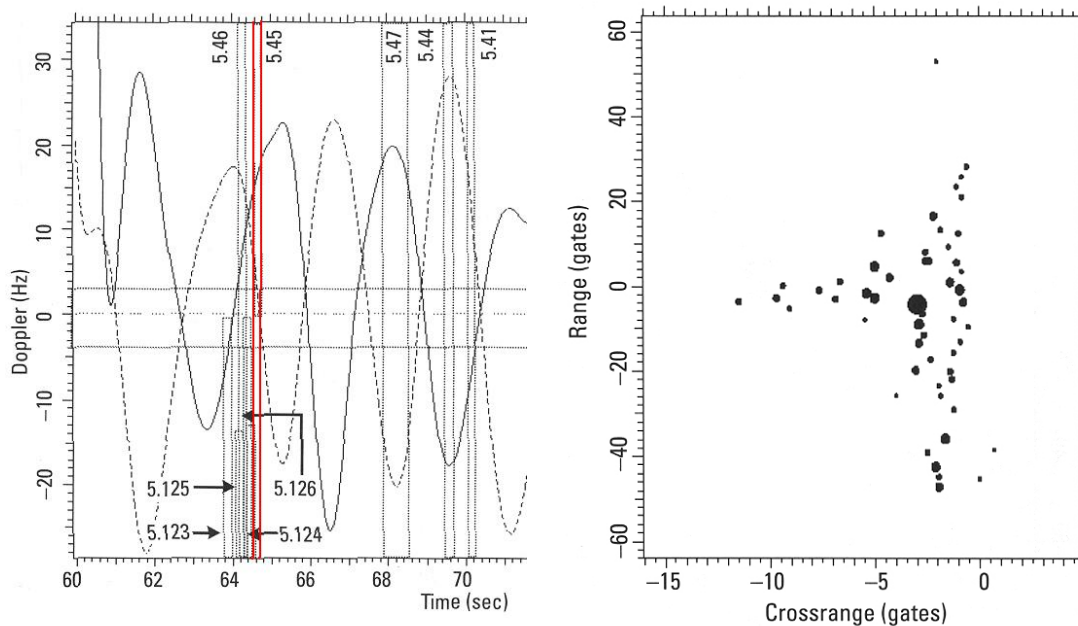


Figur 2.8 Til venstre range-profiler gjennom 20 sekunder. Fire spredere er markert med piler. Til høyre ISAR-bilde fra intervallet mellom de røde linjene, med de samme sprederne markert med piler

Fra det første spredereparet kan man beskrive yaw på følgende måte: Den ene spreders fase settes som referanse, og man måler den andre spreders faseforandringer og dermed Dopplerskift. Denne forskjellen i Doppler mellom de to sprederne kan kalles yaw-Doppler. Roll/pitch-Doppler finnes på tilsvarende måte ved hjelp av det andre spredereparet. Man plottet yaw-Doppler og roll/pitch-Doppler som funksjon av tid og finner tidspunkter der den ene er nær null og den andre har stort utslag. Ingen roll/pitch og betydelig yaw gir top-view-bilder (se Figur 2.9), mens ingen yaw og betydelig roll/pitch gir side-view (se Figur 2.10).



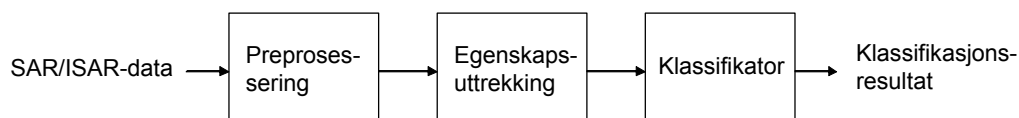
Figur 2.9 Til venstre yaw-Doppler (stiplet) og roll/pitch-Doppler (heltrukket linje). Til høyre ISAR-bilde fra intervallet mellom de røde linjene



Figur 2.10 Til venstre yaw-Doppler (stiplet) og roll/pitch-Doppler (heltrukket linje). Til høyre ISAR-bilde fra intervallet mellom de røde linjene

3 Forutsetninger for et klassifasjonssystem

Et klassifasjonssystem kan generelt fremstilles som vist på Figur 3.1. SAR- eller ISAR-dataene gjennomgår først preprosessering. Deretter blir et sett av egenskaper ved målet ekstrahert. Disse egenskapene føres videre til en klassifikator som er trent på kjente klasser.



Figur 3.1 Overordnet skisse av et klassifasjonssystem

Dette kapitlet gjennomgår faktorer som avgjør om det er mulig å realisere et operativt system for klassifasjon av skip. Det diskuterer noen av kravene som stilles til et slikt system, hvorvidt egenskapene som kan trekkes ut av dataene har potensial for klassifasjon og om det er mulig å bygge opp en skipsdatabase som kan gi tilstrekkelig treningsgrunnlag for klassifikatoren. Det kan velges mellom en rekke klassifikatorer som er kjent fra litteratur om mønstergjenkjenning og ikke nærmere beskrevet i denne rapporten.

3.1 Krav til et system for klassifasjon av skip

En grunnleggende forutsetning for å innføre et system for automatisk målgjenkjenning er at systemet har operativ nytteverdi. Det er ikke tenkt å erstatte en operatør, men å være et nyttig hjelpemiddel for operatøren. Sensorer med SAR/ISAR-kapasitet mot sjømål kan tenkes brukt i

ulike roller. De konkrete bruksområdene vil ha stor betydning for hvilke krav og ønsker man har til blant annet:

- Graden av detaljert klassifikasjon
- Hvor stor tiltro man må kunne ha til klassifikasjonsresultatene
- Responstid
- Robusthet med hensyn på målets orientering og bevegelser
- Hvorvidt klassifikasjonen må gjøres på grunnlag av SAR/ISAR-dataene alene eller i kombinasjon med andre radardata eller informasjon fra andre sensorer

Med klassifikasjon mener vi normalt å bestemme fartøysklasse, f.eks. at et skip tilhører Nordkapp-klasse kystvaktfartøy og ikke Svalbard eller noen annen klasse. Hvis man kan skille mellom de enkelte fartøyene som tilhører samme klasse, f.eks. KV Nordkapp og KV Senja, kalles det identifikasjon. Vi forventer ikke at identifikasjon innenfor klasser av tilnærmet like fartøyer er mulig ved hjelp av ISAR. Klassifikasjon vil også være en stor utfordring når det fins mange lignende klasser. Det er grunn til å forvente relativt lav treffprosent og høy feilrate hvis man forsøker detaljert klassifikasjon innenfor kategorier som bulkskip, forsyningskip, fabrikktrålere og ringnotfartøyer. I slike tilfeller kan det være mer hensiktsmessig å slå sammen mange skip med lignende form og størrelse til større klasser. Ambisjonsnivået for detaljert klassifikasjon må ses i sammenheng med kravet til feilrate.

Klassifikasjonsresultatene vil alltid være beheftet med en viss usikkerhet. Generelt vil større mengder treningsdata av god kvalitet føre til bedre resultater. Valget av klassifikator har også en viss betydning. Noen klassifikatorer svarer alltid med en klasse som finnes i treningssettet, og kan ikke erklære ukjent mål. Andre indikerer hvor stor likhet det er mellom målet og klassene i treningssettet, og det kan settes en terskel for ukjent mål. En slik indikasjon på hvor stor tiltro man kan ha til resultatet er nyttig. Til en viss grad kan man gjøre en avveining mellom høy gjenkjenningssrate og lav feilrate. For enkelte formål er den aksepterte feilraten tilnærmet lik null. Da må man forvente at en stor andel av målene blir erklært ukjente. Hvis man slakker på kravet til feilrate, blir flere mål tilordnet kjente klasser.

ISAR-avbildning gjøres ved å belyse målet en viss tid, gjerne noen titalls sekunder. For et operativt system vil det være et rimelig krav at klassifikasjonsresultatene foreligger i nær sann tid. Mye tung prosessering kan gjøres tilstrekkelig raskt ved hjelp av implementasjon i et effektivt programmeringsspråk og kraftig maskinvare. Imidlertid vil potensialet for klassifikasjon variere med målets orientering og bevegelser i forhold til sensoren. For å oppnå sikrere klassifikasjonsresultater, vil det trolig ofte være nødvendig å fly slik at målet observeres fra en annen vinkel og gjøre nye avbildninger på et senere tidspunkt.

Man må ha realistiske forventninger til et enkelt klassifikasjonssystem som utnytter noen få egenskaper ved målet og baserer seg på en skipsdatabase som er bygget opp med enkle hjelpemidler. Det er mulig at det bare vil gi gode klassifikasjonsresultater av og til. Sannsynligvis er det lite robust overfor ugunstige orienteringer og bevegelser hos målet. Økt robusthet krever at

en større del av informasjonen i dataene utnyttes, og en mye mer omfattende database med treningsdata. Her må det vurderes hva som er praktisk mulig å realisere.

Selv om det skulle vise seg at ISAR alene ikke oppfyller kravene man har til klassifikasjon eller identifikasjon, er det mulig at ISAR kan gi viktige bidrag som sammen med annen informasjon oppfyller kravene. Klassifikasjon blir betydelig enklere hvis man har tilleggsinformasjon om målets orientering, gjerne fra målfølgning med en annen radarmodus. I en eventuell multisensor klassifikasjonsløsning er det naturlig å tenke seg fusjon med Electronic Support Measures (ESM), og kanskje også infrarød (IR), optisk og hyperspektral avbildning innenfor disse sensorenes rekkevidder.

3.2 Egenskaper som kan benyttes for klassifikasjon

Klassifikasjon forutsetter at det finnes egenskaper som er målbare med radaren og som har evne til å diskriminere mellom fartøysklasser. Noen mulige egenskaper kan være:

- Lengde og bredde
- Silhuett
- Andre egenskaper som er ekstrahert fra formen til fartøyet
- Egenskaper som beskriver fordelingen av tilbakespredning i fartøyets radarsignatur
- Polarimetriske egenskaper, hvis det benyttes en polarimetrisk sensor
- Fartøyets hastighet, hvis denne blir målt

Det må understrekes at denne listen ikke gir noen komplett oversikt. Det bør antakelig gjøres en større jobb med å undersøke mulige egenskaper. I artikler om automatisk gjenkjenning av kjøretøyer med SAR er det beskrevet en rekke geometriske, radiometriske og andre egenskaper som muligens kan være relevante i forbindelse med klassifikasjon av skip i havneområder avbildet med SAR. De fleste har trolig liten relevans for ISAR på grunn av det varierende bildeplanet. Kanskje kan det være hensiktsmessig å gjøre mer omfattende preprosessering eller transformasjoner av ISAR-bildene for å kunne hente ut brukbare egenskaper.

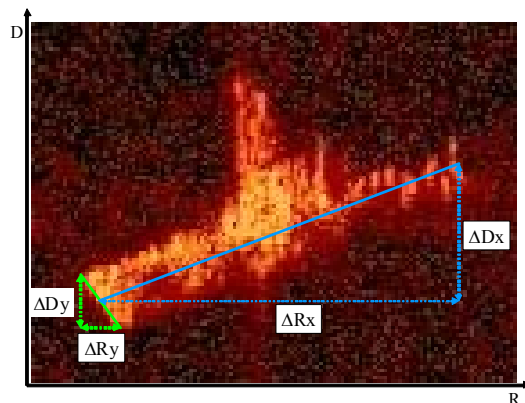
3.2.1 Lengde og bredde

Lengde er en egenskap som har stor nytteverdi for klassifikasjon, særlig for større skip. Evnen til å diskriminere mellom fartøysklasser blir mindre når man betrakter relativt små mål, ettersom det da finnes svært mange klasser med nesten lik lengde. Det er viktig å være oppmerksom på at skygge kan føre til at deler av målet ikke er synlig og lengdeestimatene blir systematisk for korte. Dette gjelder særlig når målet observeres fra lave innfallsvinkler rett bakfra eller forfra.

Fra SAR-bilder er det enkelt å måle lengden til skip som ligger til kai. Fra ISAR-bilder av fartøyer i bevegelse kan man i utgangspunktet bare finne målets utstrekning i range-retning. For å estimere den virkelige lengden trengs det informasjon om målets orientering, gjerne fra målfølgning med en annen radarmodus. Hvis man ikke har tilleggsinformasjon om målets orientering, kan man i noen tilfeller estimere orienteringen og dermed lengden fra ISAR-bildene, men dette er i praksis svært usikkert. I (5) utledes følgende uttrykk for aspektvinkelen:

$$\varphi \approx \tan^{-1} \left(\pm \sqrt{-\frac{\Delta R_y \Delta D_x}{\Delta R_x \Delta D_y}} \right) \quad (3.1)$$

Størrelsene som inngår i uttrykket er definert på Figur 3.2. Både lengdeaksen og tverraksen til fartøyet må altså estimeres fra bildet med stor nøyaktighet. Tilnærmingen er gyldig når bildene har tilnærmet top-view-projeksjon og innfallsvinkelen er lav.



Figur 3.2 Lengdeakse og tverrakse i et ISAR-bilde av et fartøy

Bredde kan estimeres og benyttes på samme måte som lengde, men nytteverdien er generelt mindre. Ettersom bredden er mindre enn lengden, måles den med større relativ usikkerhet. Ofte er det mindre forskjell på breddene enn lengdene til ulike skip, og bredden har da mindre evne til diskriminering.

3.2.2 Silhuett

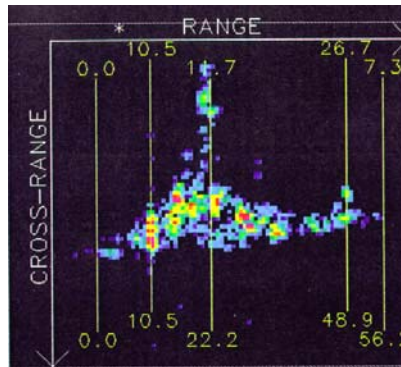
Silhuetten har et betydelig potensial for diskriminering mellom ulike skipstyper. For store fartøyer kan man lett skille mellom f eks lasteskip, krigsskip og cruiseskip ut fra form og plassering av overbygning og master. En nærmere analyse av silhuetten gir mer detaljert klassifikasjon. Når det gjelder mindre fartøyer, er det mange lignende klasser, og mulighetene for detaljert klassifikasjon er mindre.

For at silhuetten skal kunne bestemmes, må radaren for det første ha tilstrekkelig oppløsning i forhold til målets dimensjoner. Det må minst være noen titalls oppløsningsceller over målet. Hvis silhuettene skal sammenlignes med modeller, er det også en forutsetning at de delene av målet som definerer formen gir tilbakespredning. Enkelte deler mangler kraftige spredere, slik at målet får en annen form på ISAR-bilder enn på optiske bilder og 3D-modeller. Dette har størst betydning for små mål.

Som beskrevet i kapittel 2 er man avhengig av et gunstig bildeplan for at silhuetten skal komme tydelig frem i ISAR-bildene. Fartøyene må ha tilstrekkelig pitch/roll-bevegelse samt en orientering som ikke er på tvers av radarens range-retning. I praksis innebærer dette at klassifikasjon basert på silhuett vil ha svært varierende suksessrate, og det vil virke best mot fartøyer som ikke er for små og heller ikke så store at de beveger seg lite i bølgene.

3.2.3 Andre egenskaper ekstrahert fra formen til fartøyet

Istedenfor å bruke silhuetten direkte, kan man trekke ut mindre biter av informasjon og bruke disse som egenskaper i klassifikasjonsprosessen. Dette kan blant annet være posisjonene til master, overbygning og dekk, som illustrert på Figur 3.3. En av fordelene med dette er at forholdet mellom disse størrelsene og fartøyets lengde i stor grad er invariant med hensyn på aspektvinkelen. En annen fordel er at det er lett å lage treningssett. Derimot vil det trolig ofte være vanskelig å finne de korrekte posisjonene i ISAR-bilder av varierende kvalitet.



Figur 3.3 Posisjoner for ulike deler av fartøyet ekstrahert fra et side-view ISAR-bilde

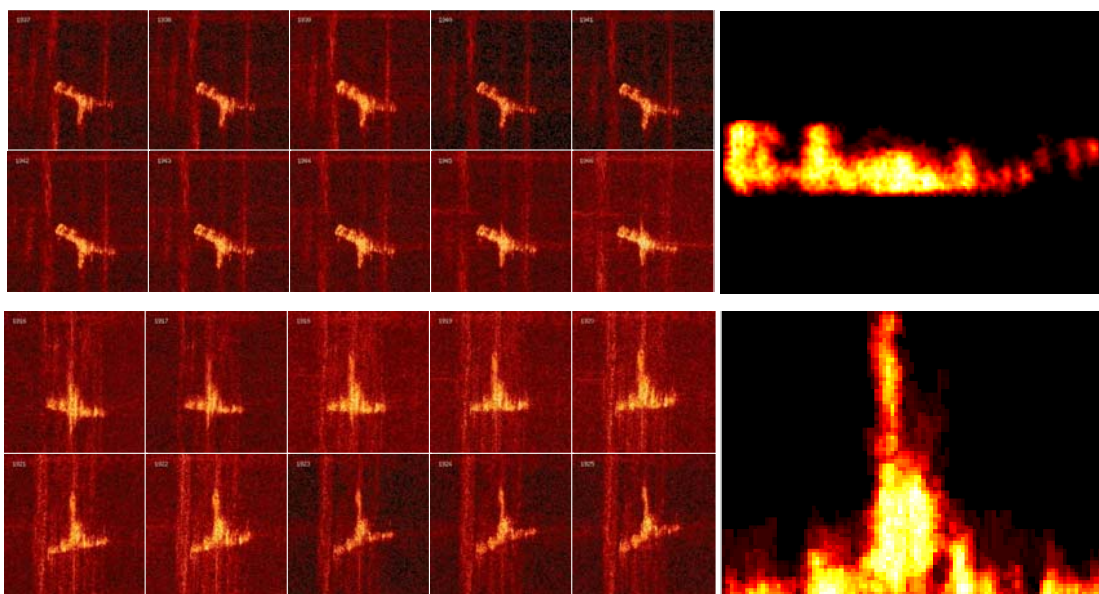
Fra SAR- eller ISAR-bilder er det også mulig å trekke ut en rekke egenskaper som beskriver deler av fartøyet, f.eks. om baugen er spiss eller buet, om masten er en enkel eller mer kompleks struktur osv. Dette vil en trent operatør kunne oppfatte, mens det vil være krevende å utvikle robuste og effektive metoder for automatisk analyse.

3.2.4 Fordeling av tilbakespredning i fartøyets radarsignatur

Den 2-dimensjonale fordelingen av tilbakespredning som danner fartøyets radarsignatur inneholder mer informasjon om målet enn silhuetten og de andre egenskapene som er nevnt i de foregående avsnittene. Av den grunn må man anta at den også har større potensial for diskriminering mellom fartøysklasser. Både i SAR- og ISAR-bilder kan man visuelt se forskjeller mellom ulike mål. I noen tilfeller er det mulig å observere karakteristiske trekk som form og plassering for visse deler av fartøyet, omriss av dekk og overbygning osv. Dette er informasjon som en trent operatør kan dra nytte av, men som i praksis er komplisert å utnytte med et automatisk system. Man kan anta at det også fins mye annen informasjon som automatiske metoder kan trekke ut like godt eller bedre enn en operatør.

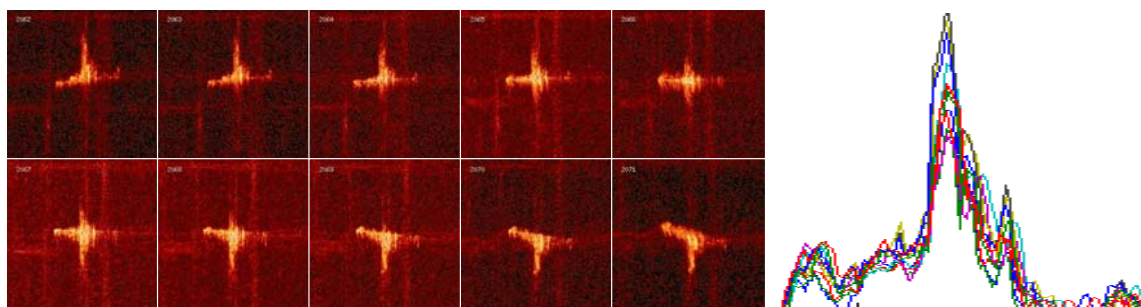
En av de store utfordringene er at radarsignaturene varierer svært mye med vinkelen de observeres fra. De er også følsomme for små forandringer ved målet, som plasseringen av utstyr på dekk. Dette innebærer at man enten må finne egenskaper som varierer lite og som er karakteristiske for den bestemte fartøysklassen, eller så har man behov for en svært omfattende signaturlatabase. For bevegelige mål som avbildes med ISAR, gjør dessuten det varierende bildeplanet det vanskelig å relatere spredningsposisjoner i bildet til bestemte koordinater på målet. Det er enklest med rene top-view-bilder der spredningene kan posisjoneres i horisontalplanet og side-view-bilder for posisjonering i vertikalplanet.

Figur 3.4 illustrerer en mulig metode for å trekke ut egenskaper som beskriver hovedtrekkene ved radarsignaturen i en sekvens av ISAR-bilder. Fra bilder som er tilnærmet top-view kan man estimere sidekantene på skroget og hente ut det som ligger mellom disse. Dette som vi kan kalle plankomponenten blir transformert slik at lengdeaksen er horisontal og tverraksen vertikal, og resamplet til en standard utstrekning. Profilkomponenten kan finnes på en lignende måte fra side-view-bilder. Midlere plankomponent og profilkomponent fremhever de delene av fartøyet som gir stabilt stor tilbakespredning når fartøyet observeres fra de aktuelle vinklene. Slike transformerte bilder kan være enklere å benytte i et klassifikasjonssystem enn originale bilder, men det er viktig å være klar over at noe av informasjonen i de opprinnelige bildene er gått tapt.



Figur 3.4 Øverst midlere plankomponent, nederst midlere profilkomponent, hver basert på 10 ISAR-bilder

En metode som er enklere, men som reduserer informasjonen mer drastisk, er å summere pikselverdiene til målet langs Doppler-retningen (6). Dette gir en 1-dimensjonal profil som beskriver hvor på målet det er flest kraftige spredere. Profilen vil være en egenskap som er relativt robust og enkel å bruke. Den påvirkes lite av målets bevegelse, som vist på Figur 3.5, men den er avhengig av aspektvinkelen.



Figur 3.5 Profiler dannet ved summering av pikselverdiene langs Doppler-retningen i ISAR-bilder med ulikt bildeplan

3.2.5 Andre egenskaper

Noen radarsystemer har kapasitet til å innhente mer informasjon om målet, som polarimetriske egenskaper, hastighet og mikro-Doppler. Polarimetri er et felt som må studeres nærmere hvis vi ser for oss operativ bruk av en fullpolarimetrisk sensor. I denne rapporten er det utelatt.

Hastighet er en egenskap som kan ha nytteverdi i forbindelse med klassifikasjon og som ofte er enkel å måle. Når det måles en høy hastighet, kan alle skip som har lavere topphastighet utelukkes. F eks vil mange militære fartøyer kunne observeres med høyere hastighet enn de aller fleste andre skip av samme størrelse.

Hvis målet har bevegelige deler, vil disse ha en annen Doppler-signatur enn resten av målet. Man kan f eks se at roterende antenner gir refleksjoner med stor spredning i Doppler. Posisjonene til roterende antenner kan dermed benyttes som en egenskap for klassifikasjon.

3.3 Muligheter for skipsdatabaser

En database som omfatter alle fartøysklassene man skal kunne skille mellom er en forutsetning for klassifikasjon. Mulighetene for å bygge opp en slik database kan være avgjørende for om et klassifikasjonssystem tas videre fra forskningsstadiet til operativ bruk. Ideelt sett ønsker man en skipsdatabase som er lite ressurskrevende å bygge opp, som er under nasjonal kontroll og enkel å oppdatere ved behov, og som inneholder den informasjonen som trengs for å muliggjøre robust og effektiv klassifikasjon. I virkeligheten må de ulike behovene veies mot hverandre.

Et viktig spørsmål er om det trengs målte radarsignaturer, eller om det er tilstrekkelig med modeller som er laget på bakgrunn av fotografier. Klassifikasjon basert på dimensjoner og form er mulig med en modelldatabase, mens de mer robuste egenskapene som er beskrevet i 3.2.4 forutsetter trening på signaturer.

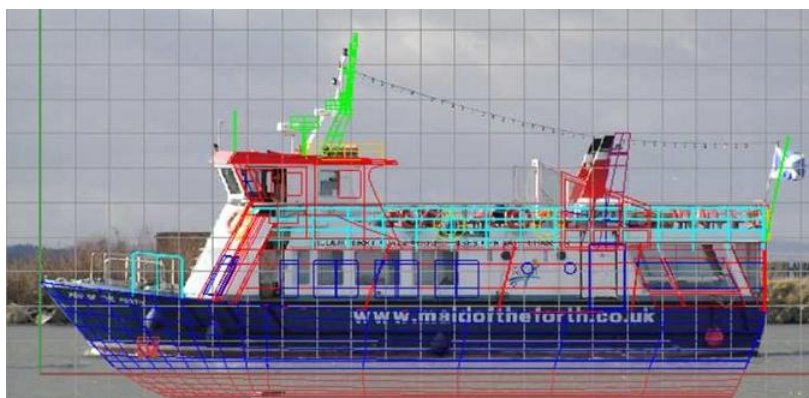
3.3.1 Modelldatabase

For å produsere svært detaljerte og nøyaktige 3D-modeller kreves det omfattende målinger av fartøyene. Dette er ikke mulig for fartøyer vi ikke selv har kontroll over. Enklere 3D-modeller kan lages ved hjelp av kommersiell programvare basert på fotografier eller linjetegninger som viser fartøyenes form, samt kjennskap til dimensjonene. Noen slike modeller er vist på Figur 3.6. Man må beregne 2-4 arbeidsdager for å lage en modell med denne graden av detaljer og nøyaktighet.



Figur 3.6 3D-modeller bygget med utgangspunkt i fotografier ved hjelp av programvaren Rhinoceros

Nøyaktigheten vil være avhengig av kvaliteten på bildene og om de er tatt fra gunstige vinkler. Et eksempel er vist på Figur 3.7. Denne modellen er bygget fra bilder av lav kvalitet funnet på Internett. Når den sammenlignes med et bedre fotografi, ser formen riktig ut i grove trekk, men enkelte deler av modellen er plassert feil. Unøyaktigheten tilsvarer ca 5 % av dimensjonene til fartøyet. Dette er trolig representativt for den nøyaktigheten man vil få når utgangspunktet er fotografier fra tilfeldige vinkler. Det må understrekes at dette ikke er i nærheten av den nøyaktigheten som normalt kreves for prediksjon av tilbakespredning. For å avgjøre hvilke krav som skal stilles til detaljgrad og nøyaktighet trengs det flere eksperimenter. I utgangspunktet må vi anta at det er viktig å få med de strukturene på fartøyet som gir betydelig tilbakespredning, mens detaljer som ikke har betydning for radarsignaturen med fordel kan utelates.



Figur 3.7 3D-modell lagt oppå fotografi av det samme fartøyet

Det er mulig å skaffe noe informasjon og fotografier av varierende kvalitet for en stor del av fartøysklassene som ferdes på havet. Lloyd's Register of Ships har informasjon om over 80 000 fartøyer, og dekker det meste av verdens handelsflåte over 100 BRT. Illustrert Norsk Skipsliste

dekker nordiske handels- og fiskefartøyer. Militære fartøyer er beskrevet i Jane's Fighting Ships. I tillegg vil Kystvakten ha god kjennskap til den havgående fiskeflåten og andre skip som ferdes i norske havområder. Rent teknisk er det derfor ikke noe i veien for å bygge opp en omfattende database med modeller av tilsvarende kvalitet som på Figur 3.6. Det vil imidlertid være en svært stor oppgave, da man kan anslå i størrelsesorden 100 modeller per årsverk med effektiv modellering. En nærmest komplett database med mange tusen modeller virker derfor ikke realistisk. Kanskje kunne det vært aktuelt å inkludere opp til et hundretalls prioriterte fartøysklasser og et representativt utvalg av mer ordinære fiskefartøyer, lasteskip og lignende.

3.3.2 Signaturdatabase

En database med radarsignaturer er i prinsippet enkel å bygge opp over tid ved å ta vare på det meste som produseres av SAR- og ISAR-bilder. Det vil imidlertid være svært krevende å bygge opp en tilstrekkelig komplett database over alle relevante fartøysklasser. Det trengs målinger fra mange ulike vinkler for hvert fartøy, så helst burde man ha flydd en eller flere runder rundt hvert eneste skip som ferdes i de aktuelle havområdene. Selv om en database hadde blitt oppdatert daglig med nye målinger, ville den i lang tid vært så ufullstendig at den hadde begrenset operativ nytteverdi.

Et realistisk ambisjonsnivå kan være å først konsentrere innsatsen om et mindre antall prioriterte fartøysklasser, og gjerne utvide mer tilfeldig med andre skip etter hvert. Når man observerer et fartøy som det er av interesse å holde under oppsikt, kan man legge det inn i databasen med tanke på gjenkjenning ved senere anledninger. Det vil være store utfordringer ved å benytte en svært ufullstendig database, bl.a. faren for at ukjente mål blir feilaktig tilordnet kjente klasser. Man må derfor ikke ha for store forventninger til ytelsen av et klassifikasjonssystem basert på en slik database i en tidlig fase.

En nærliggende tanke er å komplettere databasen av målte signaturer med simuleringer. I utgangspunktet er 3D-modeller bygget fra fotografier langt unna den nøyaktigheten som kreves for brukbar prediksjon av tilbakespredning. Det bør imidlertid undersøkes med eksperimenter om denne antakelsen er riktig.

4 Metoder for klassifikasjon av skip

I forrige kapittel ble det beskrevet forskjellige egenskaper som kan benyttes for klassifikasjon av skip, og hvilken informasjon en skipsdatabase kan inneholde. Dette kapitlet ser nærmere på metoder for å trekke ut egenskapene fra SAR- og ISAR-bildene, lage treningsdata fra skipsdatabasen og sette det hele sammen til et klassifikasjonssystem.

4.1 Klassifikasjon av skip i SAR-bilder

For klassifikasjon av mål i SAR-bilder henvises det til (7). Noen momenter som har betydning for klassifikasjon av større fartøyer er nevnt i dette avsnittet.

En klassifikasjonsprosess for skip i SAR-bilder vil typisk omfatte preprosessering, egenskapsuttrekking og klassifikator, som tidligere skissert på Figur 3.1.

Før egenskapsuttrekkingen må skipet detekteres i bildet. Dette kan gjøres med en Constant False-Alarm Rate (CFAR)-detektor hvis skipet ligger for anker et stykke fra land, mens det vil være en utfordring å oppnå robust segmentering av bilder som viser havneområder med skip som ligger til kai. Da trengs det gjerne en rekke bildebehandlingsfunksjoner i tillegg.

Egenskaper relatert til dimensjoner og form kan benyttes i et enkelt klassifikasjonssystem der treningssettet er laget fra 3D-modeller eller enda enklere beskrivelser av fartøysklassene. Et slikt system vil ikke ha potensial for detaljert klassifikasjon av skip i SAR-bilder, bare en inndeling i kategorier av fartøyer med omtrent samme størrelse og overordnet form på skroget. For mer detaljert klassifikasjon må det i tillegg benyttes egenskaper relatert til tilbakespredning, og dermed også et treningssett av radarsignaturer fra alle mulige aspektvinkler.

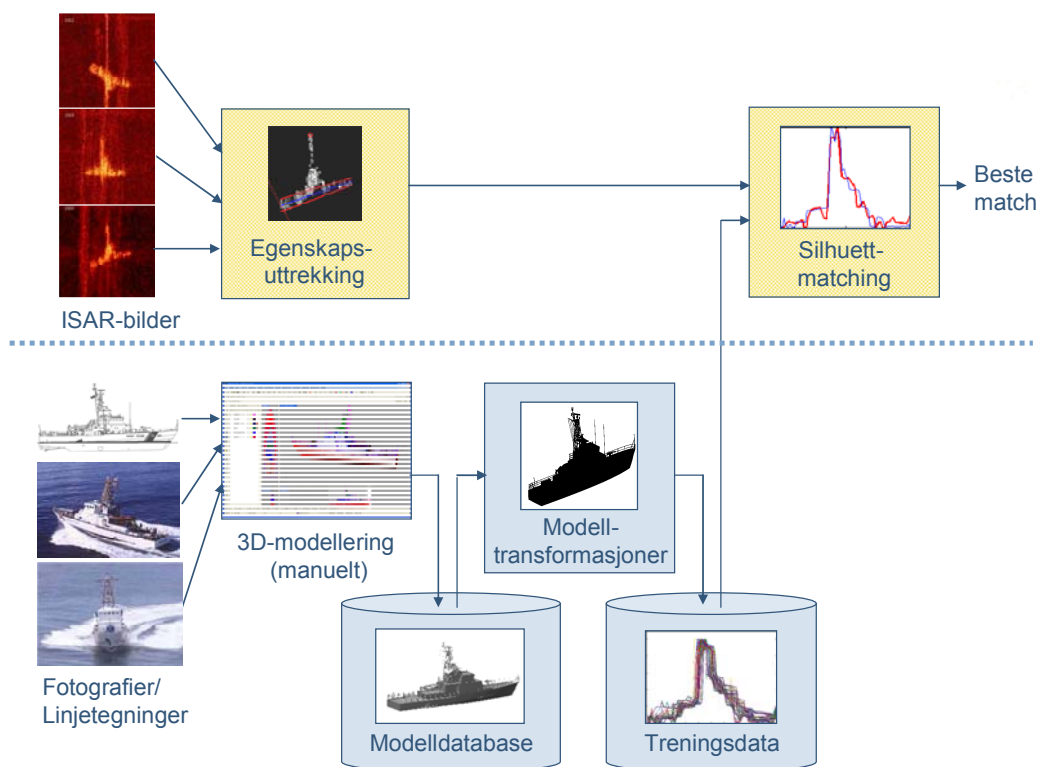
For å trekke ut lengde, bredde og eventuelle andre egenskaper som beskriver formen til skroget, er det naturlig først å estimere fartøyets orientering. En mulig metode for dette er ved bruk av Radon-transformen. Når orienteringen er kjent, er det relativt enkelt å finne lengde og bredde. Sidekantene på skroget kan estimeres ved kurvetilpasning. Hvilke konkrete egenskaper relatert til tilbakespredning som bør inngå i et klassifikasjonssystem, og metoder for å ekstrahere disse, er et mer omfattende tema som ikke er nøye undersøkt ennå.

4.2 Klassifikasjon av skip i ISAR-bilder

Klassifikasjon av skip i ISAR-bilder basert på form og et treningssett laget fra 3D-modeller er særlig aktuelt hvis det ikke er mulig eller hensiktsmessig å skaffe et treningssett av målte signaturer. Klassifikasjon på bakgrunn av tilbakespredning vil være aktuelt hvis en signaturdatabase er tilgjengelig. For å oppnå høyest mulig ytelse, ville det trolig vært best å benytte et bredt utvalg av egenskaper som inkluderte både dimensjoner, silhuett og fordeling av tilbakespredning. Det vil si en kombinasjon av egenskapene som benyttes i de to følgende avsnittene.

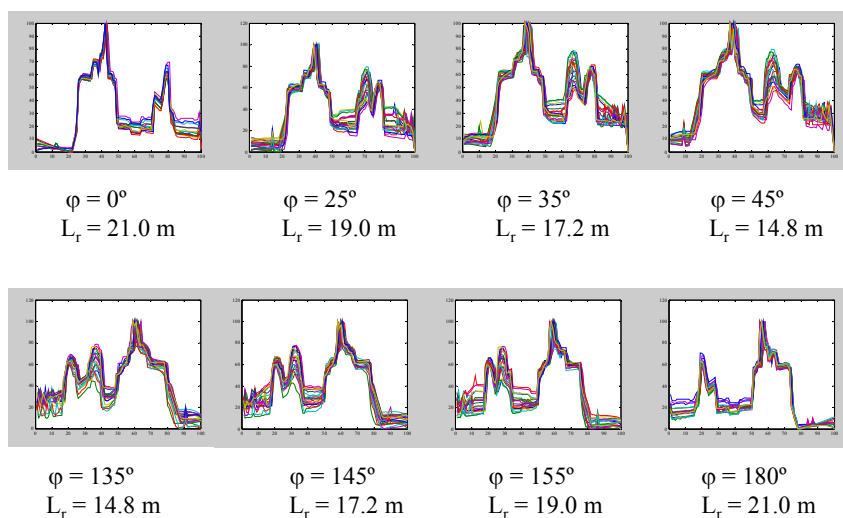
4.2.1 Bruk av fartøyenes dimensjoner og form

Det kan tenkes forskjellige fremgangsmåter for å danne et klassifikasjonssystem basert på lengde, silhuett og ev. andre egenskaper relatert til fartøyenes dimensjoner og form. Som en første demonstrator har vi valgt å implementere metoden som er illustrert på Figur 4.1.



Figur 4.1 Blokkdiagram for implementert klassifikasjonsalgoritme. Blokkene over den stiplede linjen er selve klassifikasjonsprosessen, mens blokkene under linjen er produksjon av treningsdata som er utført på forhånd

Treningsdataene er et sett av silhuetter for hver modell. Silhuettene er dannet ved at modellene først transformeres til mange forskjellige projeksjoner ved hjelp av likningene (2.6) - (2.8). Projeksjonene dekker et utvalg av aktuelle aspektvinkler, elevasjonsvinkler og rotasjonsrater for fartøyene. Silhuettene til projeksjonene blir ekstrahert, og for å gjøre sammenligning enklere blir de strukket så de har samme lengdeakse og høyde. Figur 4.2 viser silhuettene som utgjør treningssettet for en klasse.

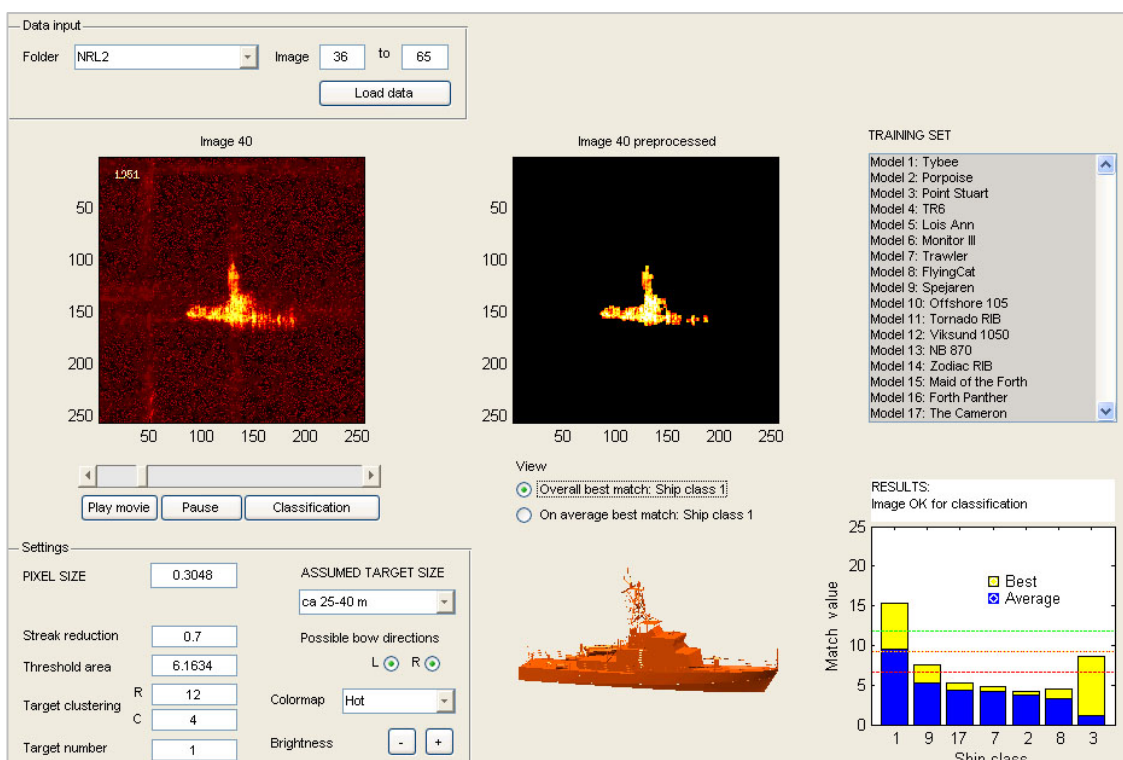


Figur 4.2 Treningsdata for en fartøysklasse. φ er aspektvinkelen og L_r er utstrekningen i range-retning

Klassifikasjonsprosessen starter med preprosessering og egenskapsuttrekking fra ISAR-bildene. Bildene blir først segmentert, som i dette tilfellet innebærer at målet blir skilt ut fra omkringliggende clutter og støy. Deretter gjøres en første vurdering av om bildet egner seg for videre analyse. Målets orientering i bildet estimeres vha. Radon-transformen, og bildet forkastes hvis målet har en orientering som gjør at det trolig er lite nyttig informasjon i silhuetten. I de godkjente bildene blir lengdeaksen og sidekantene til skipet estimert ved hjelp av kurvetilpasning, og silhuetten blir ekstrahert. Hvis profilkomponenten er svært liten eller mye mindre enn plankomponenten, blir silhuetten forkastet som uegnet for klassifikasjon. Godkjente silhuetter går videre til sammenligning med treningssettet.

Dimensjonene til målet avgjør hvilke deler av treningssettet som er relevante. Kun treningssilhuetter med en lengde som tilsvarer målets utstrekning i range-retning er aktuelle. Hvis man f.eks hadde estimert målets utstrekning til 19m, ville det kun vært nødvendig å teste treningssilhuettene med $\varphi = 25^\circ$ og 155° på Figur 4.2. Silhuetter fra modeller som er for små eller for store blir ikke testet. Hvis man hadde hatt track-informasjon og kjent den faktiske orienteringen og lengden til målet, ville søket blitt snevret inn til et mye mindre antall kandidater.

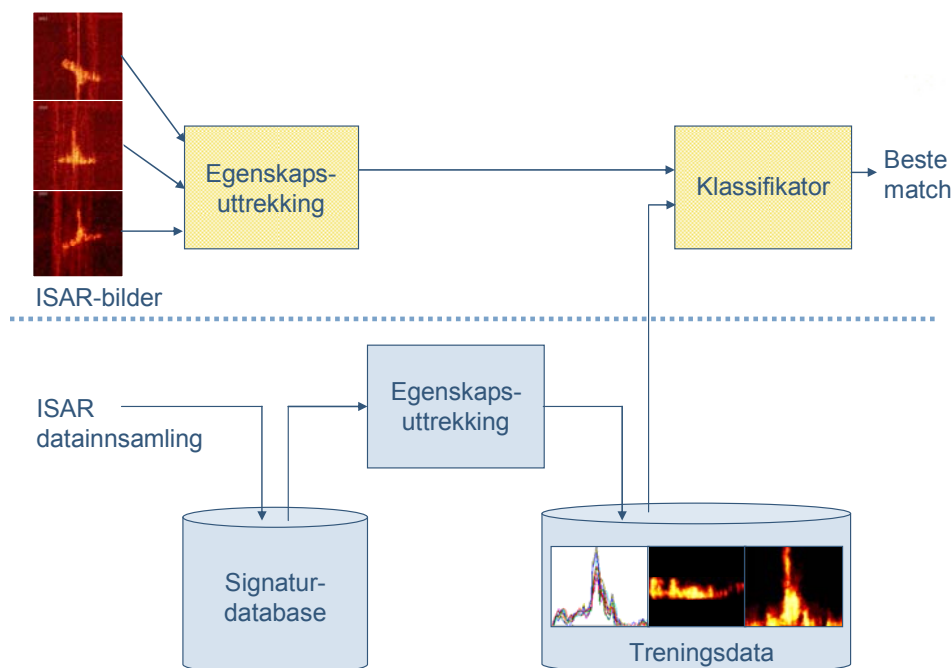
Silhuetter fra et antall ISAR-bilder blir sammenlignet med de relevante treningssilhuettene, og klassifikatoren finner det paret av test- og treningssilhuett som totalt sett ligner mest. Brukeren kan også få presentert et mål på likheten mellom det observerte fartøyet og hver av klassene i treningssettet. Det implementerte brukergrensesnittet med et eksempel på vellykket klassifikasjon er vist på Figur 4.3.



Figur 4.3 Brukergrensesnitt fra klassifikasjonsprogram med korrekt klassifisert fartøy

4.2.2 Bruk av fordelingen av tilbakespredning i fartøyenes radarsignaturer

Et mulig klassifikasjonssystem basert på egenskapene som er beskrevet i avsnitt 3.2.4 er illustrert i Figur 4.4.



Figur 4.4 Blokkskjema for mulig klassifikasjonsalgoritme. Blokkene over den stiplede linjen er selve klassifikasjonsprosessen, mens blokkene under linjen er produksjon av treningsdata som er utført på forhånd

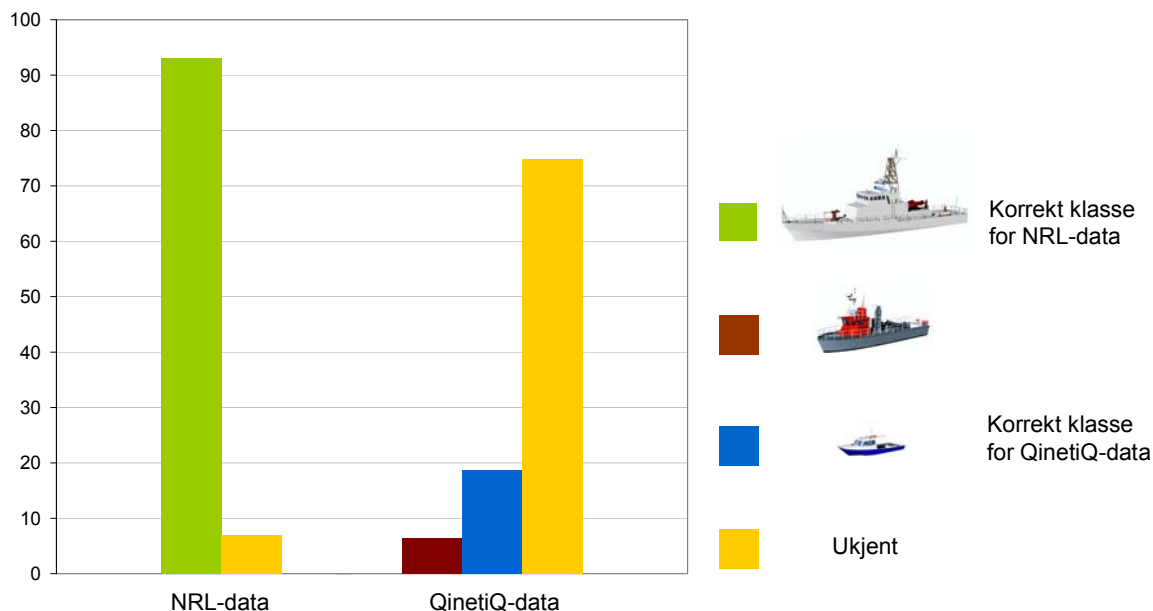
En enkel variant kan være å benytte profiler av summerte pikselverdier som treningsdata. Da vil egenskapsuttrekking og sammenligning av profiler ha mye til felles med de tilsvarende funksjonene for silhuetter som er beskrevet i forrige avsnitt. Hvis 2-dimensjonale signaturer skal benyttes, må egenskapsuttrekkingen inkludere en pålitelig metode for å avgjøre om projeksjonen er top-view eller side-view, og eventuelt transformasjon av plan- og profilkomponenter til standard orientering og utstrekning.

Dimensjonene til målet, orienteringen og bildeplanet avgjør hvilke deler av treningsdataene som er relevante. Det vil være svært nyttig å ha tilleggsinformasjon fra målfølging om orienteringen til fartøyet. Da kan søket avgrenses til fartøysklasser med lignende størrelse avbildet fra omtrent samme vinkel. Top-view og side-view treningssignaturer er relevante for testing av ISAR-bilder med tilsvarende projeksjoner. Hva som er en hensiktsmessig metode for selve klassifikatoren er foreløpig ukjent.

5 Test av klassifikasjonsmetode

Den implementerte klassifikasjonsmetoden basert på silhuett-matching har blitt testet på to ugraderte datasett. Det første datasettet kommer fra Naval Research Laboratory (NRL), USA. Det består av 200 ISAR-bilder med 30cm oppløsning og viser et amerikansk kystvaktfartøy med

lengde 33.5m. ISAR-bildene som er vist i denne rapporten er hovedsakelig hentet fra dette settet. Det andre datasettet er levert av QinetiQ i Storbritannia. Det består av til sammen 234 bilder med 33cm oppløsning og viser en liten dykkerbåt med lengde 10.5m. Som treningssett benyttes 160 silhuetter for hver av de 16 modellene som er vist på Figur 3.6. Når ISAR-bildene testes i blokker på 15 bilder om gangen, blir resultatene som vist på Figur 5.1. En mer utfyllende beskrivelse av eksperimentet og resultatene er gitt i (8).



Figur 5.1 Klassifikasjonsresultater for to sett med ISAR-bilder som testes i blokker på 15

Resultatene gir en første indikasjon på potensialet til denne metoden. Datasettet fra NRL representerer bilder av god kvalitet med gunstige bildeplan, og det beste resultatet vi har oppnådd er 92.7 % korrekt klassifikasjon. Dette virker lovende, men det må sies at fartøysdatabasen er svært liten. Bildene fra QinetiQ er mye mer utfordrende, med bare ca 30 eller færre oppløsningsceller over målet, varierende aspektvinkel og i perioder mindre vellykket fokusering. Resultatene indikerer at metoden ikke er anvendbar på dette datasettet. Det trengs omfattende testing for å bestemme potensialet i en mer realistisk situasjon med en stor fartøysdatabase og mer typiske ISAR-bilder.

6 Konklusjoner

I denne rapporten har vi sett på mulighetene for å realisere et system for automatisk klassifikasjon av skip i SAR- og ISAR-bilder. Det er viktig at bildene er av god kvalitet og velegnet for dette formålet. Skipets bevegelse har stor betydning for bildeplan, oppløsning og mulighetene for å få fokuserte bilder. Bildene som kommer ut av en ISAR-prosessor vi ikke har kontroll med er ikke nødvendigvis optimale. Med tilgang på rådata fra sensoren ville det vært mulig å tilpasse billedannelsen til forholdene, og dermed fått bilder som var best mulig egnet for klassifikasjon.

For at et klassifikasjonssystem skal kunne tas videre fra forskningsstadiet til operativ bruk, må det oppfylle visse krav til ytelse, og det må være basert på en fartøysdatabase som er praktisk mulig å bygge opp. For enkelte formål kan det tenkes at kravene til klassifikasjon eller identifikasjon vil være så strenge at det ikke er mulig å oppfylle dem kun ved hjelp av SAR/ISAR, men at denne sensoren kan gi viktige bidrag i en multisensor klassifikasjonsløsning sammen med f.eks. ESM.

En forutsetning for klassifikasjon er at det finnes informasjon som kan trekkes ut fra SAR- eller ISAR-dataene og som har potensial for diskriminering mellom fartøysklasser. Egenskaper relatert til fartøyenes dimensjoner og form har et visst potensial, men er relativt lite robust overfor målets orientering og bevegelser. Egenskaper relatert til tilbakespredningen har trolig større potensial og robusthet. Hvis klassifikasjonssystemet baseres på dimensjoner og form, kan skipsdatabasen bestå av 3D-modeller som er bygget med utgangspunkt i fotografier. Klassifikasjon basert på fordelingen av tilbakespredning forutsetter en signaturdatabase. Det vil i så fall kreve svært omfattende datainnsamling, noe som kan vise seg vanskelig å gjennomføre i praksis.

Det kan velges mellom flere mulige strategier for et klassifikasjonssystem. En metode basert på sammenligning av målets silhuett med silhuetter fra 3D-modeller er blitt implementert. De første testresultatene med en liten fartøysdatabase indikerer at metoden har et potensial for klassifikasjon når formen til fartøyet kommer tydelig frem på ISAR-bildene. Det er imidlertid usikkert hvilken ytelse den ville hatt i en mer realistisk situasjon med et stort antall klasser og mer varierende kvalitet på bildene. Det trengs flere eksperimenter med reelle data for å vurdere potensialet til metodene vi har utviklet og bestemme retning for den videre utviklingen.

Referanser

- (1) Donald R. Wehner (1994): High-Resolution Radar, Artech House, Norwood.
- (2) Gudrun Høye, Torkild Eriksen, Aleksander Lyngvi, Bjørn Narheim, Terje Wahl (2001): NSAT-1: nye momenter vedrørende kooperative overvåkningssystemer, flerfrekvent sensor samt havbølgers innvirkning på deteksjon og dekning, FFI/RAPPORT-2001/05878.
- (3) Sergey K. Gulev, Lutz Hasse (1999): Changes of wind waves in the North Atlantic over the last 30 years, *International Journal of Climatology* **19**, 1091-1117.
- (4) August W. Rihaczek, Stephen J. Hershkowitz (2000). Theory and practice of radar target identification, Artech House, Norwood.
- (5) Atle O. Knapskog (2003): Klassifisering av skip ved bruk av ISAR, FFI/RAPPORT-2003/00812.
- (6) V. Gouaillier, L. Gagnon (1997): Ship Silhouette Recognition Using Principal Components Analysis, *SPIE Proceedings* **3164**, 59-69.
- (7) Nina Ødegaard (2008): Klassifikasjon i SAR-bilder ved bruk av ulike preprosesserings teknikker og klassifikatorer, FFI/RAPPORT-2008/00443.
- (8) A. O. Knapskog (2006): Automatic Classification of Small Ships in ISAR Images Using 3D Models and Silhouette Matching, *Proceedings of 6th European Conference on Synthetic Aperture Radar*