



FFI-RAPPORT

18/01885

Radardeteksjon av UAV under interferens fra vindturbiner

Erlend Finden
Terje Johnsen
Børge Torvik

Radardeteksjon av UAV under interferens fra vindturbiner

Erlend Finden
Terje Johnsen
Børge Torvik

Emneord

Radar
Vindkraft
UAV (Unmanned Aerial Vehicle)
Droner

FFI-rapport

18/01885

Prosjektnummer

5049

ISBN

P: 978-82-464-3108-6

E: 978-82-464-3109-3

Godkjenner

Børge Torvik, *forskningsleder*

Trygve Sparr, *Forsknings sjef*

Dokumentet er elektronisk godkjent og har derfor ikke håndskreven signatur.

Opphavsrett

© Forsvarets forskningsinstitutt (FFI). Publikasjonen kan siteres fritt med kildehenvisning.

(U) Sammendrag

Økt nasjonal vindkraftutbygging har ført til nye konsesjonssøknader der Forsvaret er en viktig høringsinstans. For Forsvaret er det derfor relevant med mer kunnskap om hvordan vindturbiner påvirker radarytelse. Denne rapporten retter seg spesielt inn mot påvirkning på bakkebasert radar og ser nærmere på problemene knyttet til deteksjon av små UAV-er (unmanned aerial vehicles) i nærheten av vindturbiner. To hypoteser om slik påvirkning blir testet, både ved teoretisk analyse og ved målinger av vindturbiner med radar i S-bånd. På grunn av restriksjoner ble målinger av en UAV gjort utenfor vindparken, og disse dataene ble sammenstilt med dataene fra vindturbinmålingene. Valg av UAV som mål var mest rasjonelt med tanke på ressursbruk, men begrenser ikke resultatene til kun å gjelde for denne måltypen.

Den første hypotesen er at en UAV kan detekteres mellom turbinene når det er tilstrekkelig avstand og tilstrekkelig antall asimutceller mellom dem. Det er ikke mulig å bekrefte denne hypotesen generelt fordi dette er avhengig av turbinplassering og radarparametere. Men for vårt måleoppsett, der radaren sto noen få kilometer fra turbinene og med utsendt båndbredde på 5 MHz, har vi imidlertid vist at det er mulig å detektere en liten UAV mellom dem. Resultatene våre indikerer at det kan være mulig å detektere UAV-er mellom turbinene forutsatt at visse betingelser er oppfylt.

Den andre hypotesen sier at det er et problem å fastslå om en radardeteksjon er forårsaket av en vindturbin eller en UAV dersom de to er i samme avstand og asimutcelle. Vi har sett nærmere på forskjellen mellom ekko skapt av turbinblad og ekko skapt av UAV ved å måle turbinblad med og uten dopplerskift, og sammenstilt disse målingene med målinger av UAV-en. Disse undersøkelsene har styrket hypotesen. Det var vanskelig å skille mellom en deteksjon forårsaket av en UAV og en deteksjon forårsaket av et turbinblad. I noen tilfeller ble dessuten UAV-en maskert av turbinbladet.

Den andre hypotesen sier videre at det er mulig å klassifisere turbinblad og UAV med radar dersom de er i samme avstand og asimutcelle. Vi har undersøkt tre ulike metoder for en slik klassifisering og gjennomført forsøk som kan bekrefte dette. Resultatene våre har styrket den andre hypotesen ved at vi har demonstrert at teknologi i enkelte målescenarioer vil kunne klassifisere UAV og turbinblad.

(U) Summary

This report considers the problems associated with ground based radar detection of small Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in the vicinity of wind turbines. Two hypotheses are tested by both theoretical analysis and radar measurements in S-band at a Norwegian wind farm. Due to UAV flight restrictions in the wind farm area, a measurement of an UAV was done at a different site. Finally, the two datasets were combined.

The first hypothesis claims that radar detection of a target should be possible in range and azimuth-cells between the cells occupied by turbines. Due to differences in turbine deployment and the fact that the size of the cells depend on system specific parameters as bandwidth and wavelength, it was not possible to verify this hypothesis in general. However, at our measurement scenario with the radar at a few kilometers distance from the wind farm, and transmitting a 5 MHz bandwidth waveform in S-band, we found that this is likely to succeed.

The second hypothesis deals with radar echoes coming from range and azimuth cells where a wind turbine is always present and a target may be present alongside the turbine. The hypothesis claims that in this case it will be hard to distinguish between a radar detection caused by a real target and a radar detection caused by a wind turbine blade. Furthermore, the hypothesis claims that radar classification of an UAV and a wind turbine blade is possible. By presenting theory and analyzing the two datasets, we find the second hypothesis strengthened.

Innhold

Sammendrag	3
Summary	4
1 Introduksjon	7
1.1 Vindturbiner og mikrobølger	7
1.2 Hypoteser	8
2 Metode	9
2.1 Hypotese 1 – deteksjoner i mellom turbiner	9
2.2 Hypotese 2 – deteksjon nær turbiner	11
2.2.1 Metode 2a) – skille bevegelig mål fra statisk clutter	11
2.2.2 Metode 2b) – unngå tidsrom der vindturbinblader påvirker	11
2.2.3 Metode 2c) – unngå dopplerhastigheter der vindturbinblader påvirker	12
2.2.4 Metode 2d) – studerer forskjellen mellom UAV og turbinblad	13
2.2.5 Metode 2e) – studerer UAV sammen med turbinblad	13
2.2.6 Betydning av CPI	14
2.3 Målinger	15
2.4 Signalbehandling	16
3 Resultater	18
3.1 Hypotese 1 – deteksjoner i mellom turbiner	18
3.2 Hypotese 2 – deteksjon nær turbiner	22
3.2.1 Metode 2a) – skille bevegelig mål fra statisk clutter	22
3.2.2 Metode 2b) – unngå tidsrom der vindturbinblader påvirker	24
3.2.3 Metode 2c) – unngå dopplerhastigheter der vindturbinblader påvirker	26
3.2.4 Metode 2d) – studerer forskjellen mellom UAV og turbinblad	26
3.2.5 Metode 2e) – studerer UAV sammen med turbinblad	33
3.2.6 Betydning av CPI	34
4 Konklusjon	36
Referanser	38
Vedlegg	
A Ordlister	39



1 Introduksjon

Økt nasjonal vindkraftutbygging og nye konsesjonssøknader der Forsvaret er høringsinstans underbygger viktigheten av økt kunnskap om de potensielle konsekvenser vindturbiner har for radarytelse. Denne rapporten retter seg mot påvirkning på bakkebasert radar. Den mest dramatiske metoden for å hindre påvirkning på radar fra vindparker er å definere et volum rundt hele vindparken der hverken interferens eller mål er synlige for radaroperatør (range azimuth gating [1]). I denne rapporten viser vi hva slags problemstillinger en må jobbe med dersom en ønsker å opprettholde deteksjon av mål også innad i områder med vindturbiner.

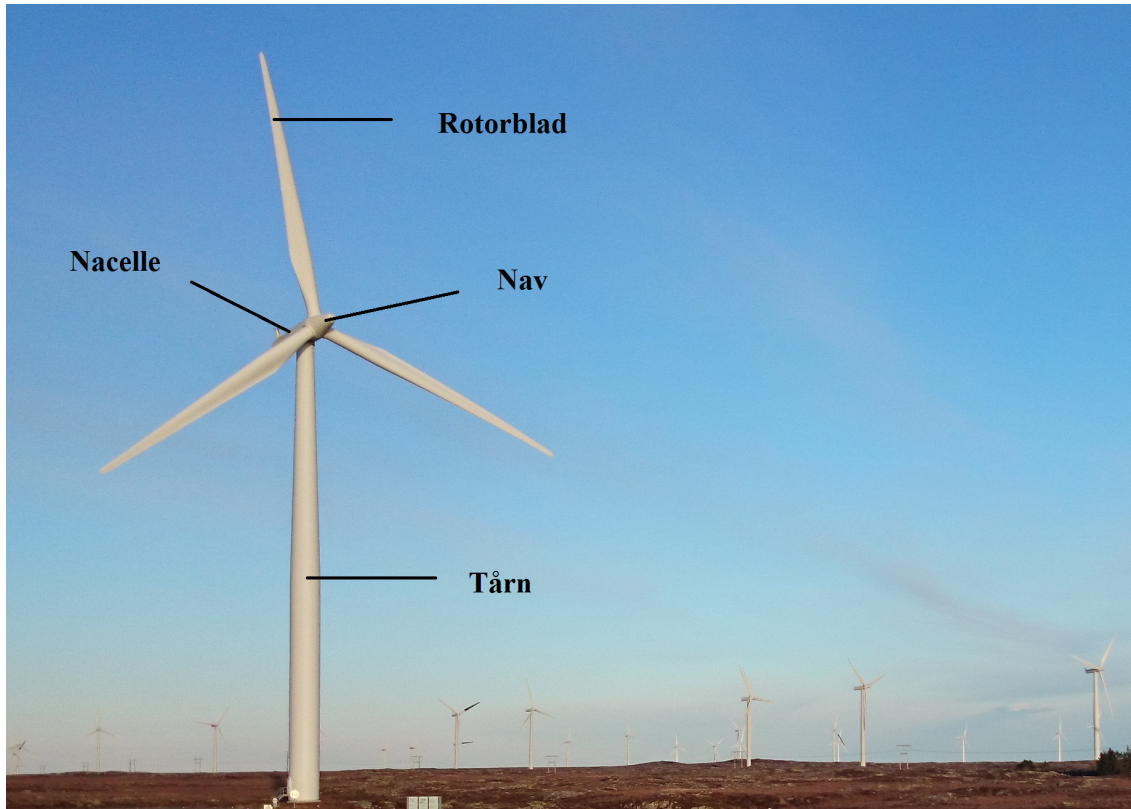
Det finnes lite litteratur om deteksjon av mål nær vindturbiner. Derfor ble en liten UAV målt på med S-bånd puls-doppler radar. Ideelt sett ville vi ha flydd UAV-en inne i en vindpark, men på grunn av sikkerhetsrestriksjoner valgte vi å gjøre målinger av den i et annet område og senere fusjonere datasettet med et datasett fra målinger vi gjorde med samme sensor inne i Smøla vindpark. Teknisk sett dekket UAV-en de behovene vi trengte i målingene. Samtidig gav den fleksibilitet under forsøket og var lite ressurskrevende å bruke både med tanke på økonomi og prioritet i forhold til en militær plattform.

Rapporten er bygget opp som følger. I dette kapittelet fremsettes det to hypoteser som formulerer konkrete problemstillinger. Deretter går vi igjennom relevant teori i metodekapittelet, før beskrivelse av måleoppsettet og signalbehandlingen presenteres. I resultatkapittelet presenteres resultatene fra målingene. Rapporten avsluttes med konklusjoner.

1.1 Vindturbiner og mikrobølger

Figur 1.1 viser delene i en typisk vindturbin. Tårnet og navet består vanligvis av metall som gir høy refleksivitet, mens turbinbladene ofte er laget av komposittmateriale som har mindre refleksivitet. Turbinbladene kan imidlertid inneholde lynavledere som bidrar til å øke radartversnittet [2]. I litteraturen er det beskrevet flere målinger og beregninger av radartversnitt for ulike turbiner. Blant annet ble det maksimale radartversnittet i L og S-bånd for en 1.5 MW GE-turbin med 34 m bladlengde og 70 m tårnhøyde både målt og beregnet til å være mellom 30 og 40 dBsm [3]. De Wind [4] målte det maksimale radartversnittet for en Sinovel SL3000/113-HH90 3 MW-turbin i S-bånd til å være 45 dBsm. Denne turbintypen har en tårnhøyde på 90 m og 57 m bladlengde. Radartversnittsmålingen i [4] er imidlertid ikke målt i fjernfelt. Sammen utgjør tårn og nav de største bidragene til radartversnittet, der tårnet er beregnet til å utgjøre 75% av dette i følge [5]. Samme beregning finner at turbinbladene kan stå for 15% av totalt radartversnitt. Turbinbladenes tangentielle hastighet er omkring 0–90 m/s fra rotasjonssenter til bladtippet [2, 5]. Turbinbladene og navets bevegelse skaper dopplerskift som er detekterbare ved utslag i puls-doppler prosessering. Dopplerskiftene er høyest i aspektvinkler som gir turbinbladene høyest relativ hastighet mot radar [2, 4]. Bevegelse som gir endring i radartversnitt med tiden kan tilsynelatende gi dopplerskift uten at en relativ hastighet er involvert, såkalt amplitudemodulasjon. I praksis vil ren amplitudemodulasjon svært sjelden oppstå i dette tilfellet da radar må ligge på en linje som sammenfaller med rotasjonsaksen til turbinbladene, slik at turbinbladene roterer i planet normalt på denne aksen. Årsaken til dopplerskiftene vil derfor trolig være en kombinasjon av at summen av spredere har en relativ hastighet mot radar og at

radartversnittet endres med tiden. Eldre turbiner har ofte fast rotasjonshastighet, mens for nyere turbiner er det vanlig med variabel rotasjonshastighet.



Figur 1.1 Bilde av turbin fra Smøla vindpark. Disse turbinene har en tårnhøyde på 70 m.

1.2 Hypoteser

Problemstillingene vi undersøker er formulert ved to hypoteser. Før hypotesene presenteres definerer vi begrepet *lokalt* som vi bruker om effekter som skjer i de oppløsningceller i avstand, asimut og elevasjon som er påvirket av turbiner. De to hypotesene er som følger:

1. Ikke-lokale deteksjoner kan gjøres inne i vindparken mellom turbiner da det er et tilstrekkelig antall avstand og/eller asimutceller mellom turbinene.
2. Et problem ved deteksjon lokalt i vindparker er å fastslå om et radarekko er forårsaket av et faktisk mål eller et vindturbinblad. Avansert teknologi vil lokalt kunne klassifisere turbinblad og mål eller utelukke turbinblader ved andre metoder.

2 Metode

I dette kapitlet presenteres teorien som brukes for å besvare de to hypotesene. For hypotese 1 gjøres det beregninger av oppløsningceller der disse vurderes opp mot turbinplassering. For hypotese 2 går vi igjennom metoder for å utelukke at et ekko skyldes turbinblader. Vi viser betydningen ulike systemparametere har i disse sammenhengene.

2.1 Hypotese 1 – deteksjoner i mellom turbiner

For å teste hypotese 1 må det undersøkes om radarens avstand og asimutoppløsning vil gi tilstrekkelig antall oppløsningceller mellom de cellene som er påvirket av turbiner. Dette er blant annet avhengig av turbinplassering. Antall avstandsceller mellom turbinene avhenger av båndbredden på bølgeformen og radiell avstand mellom turbinene i forhold til radar. Antall asimutceller mellom turbinene er avhengig av vinkel mellom turbinene (med radar i senter) sett i forhold til asimutoppløsningen som avhenger av antenneparametere og bølgelengden. Målets radartverrsnitt relativt til turbinens vil også spille inn på grunn av sideløber som går utover de veldefinerte 3-dB oppløsningcellene for to like sterke mål. Det kan også induseres effekter av turbiner ved “multipath”. Dette betyr spredning fra turbiner som går via bakken eller andre turbiner (eller begge) før bølgene går tilbake til radar. Konsekvensen av dette er at refleksjoner kommer inn ved andre avstander og vinkler i tillegg til refleksjonene direkte fra turbinene. Multipath er påvist betydelig påvirkning på S-bånd værradar der vindparken ligger mindre enn 10 km fra radar [2]. Avbøyingseffekter forårsaket av endret lufttetthet kan også forekomme. Disse to effektene forfølges ikke her. Noen meter bak turbinene vil det være en skyggesone der refleksjoner fra et mål til radar vil være dempet. På grunn av bølgeegenskaper strekker skyggesonene seg kun noen meter bak hver turbin før de har liten betydning. Skyggesonens utstrekning er avhengig av diameter og form på turbinens tårn og bølgelengden. Siden denne effekten på typiske frekvensbånd brukt i bakkebaserte langtrekkende radarer antas å være av begrenset betydning faller den utenfor omfanget av denne rapporten, men leseren henvises til [6] for detaljert utredning av dette temaet.

For å få et eksempel på avstanden mellom turbinene i en faktisk vindpark har vi brukt et satellittbilde fra Google Earth i figur 2.1 hvor noen få av turbinene ved Smøla vindpark er synlige. I dette tilfellet er det ca. 270 m mellom turbinene på bildet. Vi har ikke studert hva som er typiske avstander mellom turbiner i norske vindparker, men antar dette er terrengavhengig. I havvindparker kan turbinene ligge som mer strukturerte punkter på “nett”, slik som ved Horns Rev i Nordsjøen [7]. Ved et tenkt eksempel der turbiner ligger på en sirkel med radar i senter med 270 m buelengde mellom seg viser tabell 2.1 antall turbiner innenfor en asimutoppløsningcelle for ulik avstand mellom radar og turbiner. Antall mulige turbiner innenfor en asimutoppløsningcelle øker med avstand til radar og asimutoppløsningen.



Figur 2.1 Et satellittbilde fra Google Earth viser noen av turbinene i Smøla vindpark. Det er på bildet ca. 270 m i mellom hver turbin.

Tabell 2.1 Antall turbiner innenfor en asimutopløsningscelle dersom turbinene ligger på en sirkel med 270 m buelengde mellom seg og radar i senter.

Avstand til vindturbiner	2 km	5 km	10 km	25 km	30 km
Asimutopløsning					
1°	1	1	2	3	3
2°	1	2	2	4	5
4°	2	2	4	7	9
6°	2	3	5	11	13
8°	2	4	6	14	17

En S-båndradar med 3 m aperture vil ha en omtrentlig åpningsvinkel på 2°. Ved denne geometrien viser tabell 2.1 at en slik radar som har 30 km avstand til turbinene vil kunne belyse 5 turbiner per asimutopløsningscelle. Flere turbiner kan bidra om de ligger i sideløber som ikke undertrykkes nok. Signalnivået vil da være lavere enn for de som ligger i hovedloben, men med det potensielt høye radartversnittet kan dette nivået allikevel være signifikant og høyere enn f.eks. en UAV.

Dersom turbinene i motsatt fall ligger på en radiell linje ut fra radar innenfor en asimutopløsningscelle vil båndbredden bestemme antall avstandsceller mellom turbinene.

I praksis vil turbinposisjon i forhold til radar være en blanding av disse to ytterpunktene. Vi merker oss at økt avstand (ut til radarhorisont) vil kunne gi flere turbiner per asimutopløsning, men at avstandsopløsningen ikke avhenger av avstand. Ved lang avstand vil selv ikke fin asimutopløsning hindre mange turbiner å komme inn i beamen. Videre undersøkelser av om det er rom for deteksjoner av mål mellom turbinene krever oversikt for den aktuelle vindpark der turbinposisjoner kan sammenlignes med radarposisjon. Dette blir en vurderingssak for hver enkelt vindpark og hypotesen

kan ikke besvares generelt.

I kapittel 3 tester vi hypotesen med radar-måledata fra Smøla vindpark.

2.2 Hypotese 2 – deteksjon nær turbiner

I hypotese 2 ser vi på tilfellet der en UAV ligger i samme avstand -og asimutcelle som en vindturbin. Det hevdes i hypotesen at det da er et problem å fastslå om et radarekko er skapt av et mål eller av et turbinblad. Videre hevdes det at en kan klassifisere turbinblad og mål eller utelukke turbinblader ved andre metoder. Vi har kun undersøkt tilfellet der en turbin har samme avstand og asimut som en UAV. Ved flere turbiner innenfor samme avstand og asimut vil deteksjon og klassifikasjon av UAV og turbiner være vanskeligere. I dette kapittelet vil vi se på teori for å skille disse to typene mål. I kapittel 3 vil det vises målinger av dette tilfellet. For at en UAV skal kunne detekteres i dette tilfellet betinges følgende:

2.2.1 Metode 2a) – skille bevegelig mål fra statisk clutter

Siden vi antar at radaren utnytter puls-doppler prosessering, vil hastighetsforskjeller relativt til radar gi mulighet for å skille bevegelige mål fra statisk clutter. Målets signalnivå må imidlertid overstige eller komme utenfor sidelobene til det statiske vindturbinclutteret som brer seg ut fra null-doppler. Det statiske clutteret kan ved tilstrekkelig dynamisk område i mottaker (som ikke antas å være et problem gitt flere km avstand mellom radar og turbin [8]), filtreres ut [2]. Å filtrere saktegående mål ut fra dette statiske bidraget setter imidlertid føringer på lengden av koherent prosesseringsintervall (CPI) og bølgelengden λ , gitt en bølgeform. Vi nevner at å øke CPI vil tilsvare å integrere flere pulser for en gitt puls-repetisjonsfrekvens (PRF). Økt CPI gjør det lettere å skille saktegående mål fra statisk clutter. Det samme gjør kortere bølgelengde. Dersom målet kommer gjennom denne filtreringsprosessen er neste problem å skille det fra vindturbinbladens utslag i doppler. Ulike metoder for å klassifisere turbinblad og mål eller utelukke turbinblad som ekko er beskrevet i metode 2b)-2e).

2.2.2 Metode 2b) – unngå tidsrom der vindturbinblader påvirker

En metode for å fastslå at et ekko ikke skyldes et turbinblad er å unngå turbinbladens påvirkning i tidsdomenet som foreslått i [2]. Det vil senere i rapporten bli vist at det for hver turbin er lengre tidsperioder (i et radarperspektiv) der turbinblader gir lite utslag i doppler. Dette er forårsaket av at turbinbladene har høyest radartversnitt og høyest dopplerskift når de står vinkelrett mot radar [2]. Ved bruk av roterende radar vil en observasjonstid som inneholder spredning fra et turbinblad med dopplerskift sannsynligvis inntreffe sporadisk. Rotasjonen av turbinbladene antas periodisk da turbinene over kortere tidsintervaller har stabil rotasjonstid, men antas å ha ulik fase fra turbin til turbin. Dermed kan en trolig ikke samordne radarens rotasjon med vindturbinen. Med avansert teknologi vil en imidlertid kunne unngå perioder hvor det er dopplerskift i ekkoet fra vindturbinene for å detektere mål uforstyrret. Dette vil kreve informasjon til radar om status på rotasjon for hver enkelt turbin. Dersom radaren kan gjøre en tid-frekvensanalyse av hver turbinposisjon er det mulig

å legge inn en sjekk av turbinbladenes rotasjonsfrekvens. Deretter å kunne si om det var sannsynlig at det var et turbinblad som skapte et tilsynelatende mål. En ikke-roterende radar som kontinuerlig overvåker vindparken vil sannsynligvis kunne velge ut slike “stille” perioder. Rent teknisk kan det kanskje løses ved å sende en bred beam i asimut, og bruke digital beamforming på mottak for å overvåke rotasjonsfrekvensen på de ulike turbinene og syntetisere beamer i retninger der en ikke har dopplerskift fra turbinbladene. Ved flere turbiner innenfor samme oppløsningcelle reduseres tidsrommene der det ikke er dopplerskift fra turbinbladene. Tilgjengelig oppløsning i avstand/asimut må derfor kontrolleres opp mot turbinposisjoner for en vurdering av gjennomførbarheten.

2.2.3 Metode 2c) – unngå dopplerhastigheter der vindturbinblader påvirker

Mål innenfor et gitt hastighetspenn vil kunne skilles sikkert fra turbinbladene. For mål som har en relativ hastighet mot radar høyere enn den maksimale tangentielle hastigheten turbinbladet kan oppnå, vil tilstrekkelig høy PRF muliggjøre entydig deteksjon. Dette er aktuelt for mål med hastighet høyere enn ca. $|\pm 100|$ m/s relativt til radar. Vi viser her et eksempel på hva slags konsekvenser PRF har på radarytelsen.

Entydig dopplerfrekvens f_{Du} avhenger av PRF og er gitt ved

$$f_{Du} = \pm \frac{PRF}{2} \quad (2.1)$$

Siden dopplerfrekvensen f_D avhenger av bølgelengden λ og hastigheten relativt til radar v [9] ved

$$f_D = -\frac{2v}{\lambda} \quad (2.2)$$

kan vi beregne den entydige hastigheten v_u som følger

$$v_u = \frac{\lambda f_{Du}}{2} = \frac{c f_{Du}}{2 f_c} = \pm \frac{c PRF}{4 f_c} = \pm \frac{\lambda PRF}{4} \quad (2.3)$$

Her er c lyshastigheten og f_c er bærefrekvensen (vi brukte relasjonen $\lambda = c/f_c$). I tabell 2.2 er entydig hastighet v_u beregnet for flere PRF-er i utvalgte radarbånd.

Tabell 2.2 Entydig dopplerhastighet ved noen PRF-er for utvalgte radarbånd.

	PRF	1 kHz	4 kHz	10 kHz
f_c				
L: 1.2 GHz		63 m/s	250 m/s	625 m/s
S: 3.25 GHz		23 m/s	92 m/s	231 m/s
C: 6 GHz		13 m/s	50 m/s	125 m/s
X: 10 GHz		7.5 m/s	30 m/s	75 m/s

Som det fremgår av tabell 2.2 vil en i L-bånd med 4 kHz PRF kunne entydig bestemme relativ hastighet opp til 250 m/s, altså uforstyrret mellom ca. 100 m/s og 250 m/s (gitt at mottatt effekt fra målet overstiger sidelover fra turbinblader som brer seg ut i doppler). I S-bånd må vi imidlertid opp i over 10 kHz PRF for å få samme entydig hastighet.

I motsetning til entydig dopplerfrekvens f_{Du} som er proporsjonal med PRF, er entydig avstand R_u omvendt proporsjonal med PRF, i.e.

$$R_u = \frac{c}{2PRF} \quad (2.4)$$

R_u er vist for noen PRF-er i tabell 2.3. Vi merker oss at 4 og 10 kHz PRF som gir rom for deteksjon

Tabell 2.3 Entydig avstand R_u for noen PRF-er.

PRF	500 Hz	1 kHz	4 kHz	10 kHz
R_u	300 km	150 km	37.5 km	15 km

utenfor dopplerutbredelsen til turbinene medfører lav entydig rekkevidde for radaren i henholdsvis L og S-bånd. Dersom denne metoden skal brukes og høyere rekkevidde er et krav kreves derfor dedikert PRF mot turbinene (dersom turbinene er innenfor entydig avstand) eller veksling i PRF (staggered PRF) som øker R_u og opprettholder en viss v_u .

Til nå har vi fokusert på områder i avstand, asimut, tid eller doppler der turbinbladene ikke påvirker radar. De neste metodene tar for seg problemer der en ikke vet om et turbinblad eller et mål skapte radarekko, eller der en må håndtere turbinblader samtidig og sammen med målet.

2.2.4 Metode 2d) – studerer forskjellen mellom UAV og turbinblad

Vi studerer her tilfellet der UAV-en er i samme avstand og asimutcelle som turbinen og turbinbladet ikke gir dopplerskift og holder dette opp mot turbinen alene der turbinbladet gir dopplerskift. Slik kan vi se på forskjellen mellom ekko skapt av turbinblad og UAV. I kapittel 3 viser vi avstand-dopplerbilder fra disse situasjonene ved ulike systemparametere. Vi undersøker der avstand-dopplerbilder av turbinen alene i flere tidspunkter som gir ulike dopplerskift og ulikt radartversnitt på grunn av turbinbladenes orientering som endres med tiden. Vi sammenligner så med to datasett som er kombinert slik at en UAV blir summert inn sammen med turbinen. Vi studerer også hvordan parametere som PRF, CPI og båndbredde påvirker de prosesserte resultatene. Redusert båndbredde B gir mindre energi beskrevet ved likningen

$$G_p = B \cdot CPI \quad (2.5)$$

der G_p er prosesseringsvinning. Når båndbredden blir mindre blir imidlertid også avstandsopløsningen grovere, og det er det vi i dette arbeidet er mest interessert i å se effekten av.

2.2.5 Metode 2e) – studerer UAV sammen med turbinblad

Vi studerer her tilfellet der UAV-en er i samme avstand og asimutcelle som turbinen i det turbinbladet gir dopplerskift, slik at både UAV og turbinblad gir utslag i doppler samtidig. Vi ønsker å se hvordan avstand-dopplerbilder ser ut i disse tilfellene. Spredning fra turbinblader vil kunne maskere målet eller målet er vanskelig å skille fra ekkoene skapt av turbinblader. Ved folding av turbinblader kan de skape flere mål med ulike dopplerhastigheter. Får en inn flere turbiner i samme avstand -og asimutopløsningscelle, vil dette ytterligere komplisere. Vi vil i kapittel 3 se på avstand-dopplerbilder fra denne situasjonen ved ulike systemparametere.

2.2.6 Betydning av CPI

I metodene 2a), 2d) og 2e) ønsker vi å se hvilken betydning CPI har for å skille mål fra turbinblader. Bruk av lang CPI vil kunne komme i konflikt med metode 2b) som søker å unngå tidsrom der vindturbinblader påvirker fordi økt CPI redusere tidsvindueene der det ikke er dopplerskift fra turbinbladene. En radar med mulighet for bruk av fleksibel CPI åpner for å bruke mer tid på å belyse vindparken (på bekostning av andre sektorer). For roterende radar kan dette gjøres enten ved å bremse eller stoppe rotasjon, eller ved å styre beamen i asimut dersom beamforming i asimut er mulig. Lengre CPI resulterer i finere (Rayleigh-)doppleropløsning Δf_D gitt ved [9]

$$\Delta f_D = \frac{PRF}{M} = \frac{1}{CPI} \quad (2.6)$$

der M er antall pulser som adderes i dopplerprosessering og ingen vindusfunksjon er lagt på. Finere doppleropløsning fører til at det blir flere dopplerceller mellom det statiske clutteret sentrert rundt 0 Hz dopplerfrekvens og et mål med en gitt dopplerfrekvens. Dette kan ha betydning for om målet kommer ut av hovedloben og over sidelobene til det statiske clutteret. Lang CPI kan også dekorrelere raske mål og mål med akselerasjon og øke signalnivået på saktegående mål med stabil hastighet. Vi kan uttrykke likning 2.6 i form av hastighetsopløsning Δv_D ved å sette inn for likning 2.2

$$\Delta v_D = \frac{\Delta f_D \lambda}{2} = \frac{\lambda}{2 CPI} \quad (2.7)$$

Ulike CPI-er er brukt i signalbehandlingen, som er presentert i kapittel 3. For en roterende 2D-radar med asimut-oppløsning på 1° og 10 s rotasjonstid får en observasjonstid (CPI) på maksimalt 28 ms. Dette er noe forenklet ved at vi antar en fast observasjonstid for alle pulser i alle elevasjoner. En lavere CPI som 8 ms antas å være representativt for enkelte 3D-radarer med tilsvarende asimutopløsning, siden flere beamer da sendes i elevasjon for hver asimutposisjon. Det kan også være 3D-radarer som beholder høy observasjonstid ved asimutposisjonene ved å sende en bred beam i elevasjon og gjøre mottak med digital beamforming som kan parallelliseres.

2.3 Målinger

Interferens skapt av vindturbiner er komplekst å simulere. For å få tilgang på radar-rådata på lavt nivå ble det gjort målinger med FFIs eksperimentelle radar BirdRAD. Målingene ble gjort ved Smøla vindpark og belyste vindturbiner i en vinkel som gav turbinbladene nær maksimal relativ hastighet mot radaren. Et kamera montert i samme retning som antennene viser noen av vindturbinene som er målt i figur 2.2.



Figur 2.2 **Venstre bilde:** UAV-en som er belyst. Heliumsfylt kalibreringskule er også synlig på bildet.
Høyre bilde: Vindturbinene som er belyst på Smøla.

Målinger av en UAV ble gjort på et annet sted for å unngå å operere en UAV i en vindpark. UAV-en ble sendt opp ca. 500 m fra radaren, vist i venstre kolonne i figur 2.2. Ved gården i bakgrunnen kan varebilen med radaren skimtes. Ved å fusjonere datasettene fra disse to målingene fikk vi fleksibilitet til å skalere opp og ned amplitude på mål relativt til turbin, endre avstand og andre parametere som i praksis ville ha medført et betydelig mer komplekst målescenario dersom UAV-en skulle vært målt samtidig med vindturbininterferensen.

BirdRAD er en eksperimentell pulset koherent radar bygget for polarimetrisk måling. Figur 2.3 viser måling med BirdRAD under opptaket som ble gjort av UAV-en. Selv om BirdRAD er nedskalert i effekt i forhold til langtrekkende overvåkningsradarer antas båndet den opererer i, S-bånd, å være aktuelt for den type radar. Den nedskalerte effekten har imidlertid ikke betydning for de problemer vi undersøker her så lenge det tas hensyn til. Vi sendte med en lineær frekvensmodulert bølgeform (LFM) med 3.25 GHz bærefrekvens hvor pulslengden var $\tau = 2 \mu s$. Båndbredden B var 50 MHz og samplingsfrekvensen f_s var 250 MHz. Under opptaket på Smøla ble det sendt med 4 kHz PRF og under opptaket av UAV-en ble det sendt med 10 kHz PRF. Horisontal polarisasjon ble benyttet både på sending og mottak. Antennebeamen har 3-dB åpningsvinkel på 10° både i asimut og elevasjon ved S-bånd. Flere detaljer for BirdRAD er beskrevet i [10].



Figur 2.3 BirdRAD under måling av UAV. Varebilen huser sender, mottaker og prosesseringsrack. Antennene med kamera i mellom seg og den styrbare pidestallen er plassert på utsiden av bilen.

2.4 Signalbehandling

Datasettene fra begge målingene er avstandskomprimert. Opptaket av UAV-en er clutterfiltrert med finite-impulse-response (FIR)-filter hvis karakteristikk er vist i figur 2.4. Filteret gjør at mål med relativ hastighet under 1.5 m/s blir undertrykt og mål med relativ hastighet ned mot 0 m/s blir sterkt undertrykt.

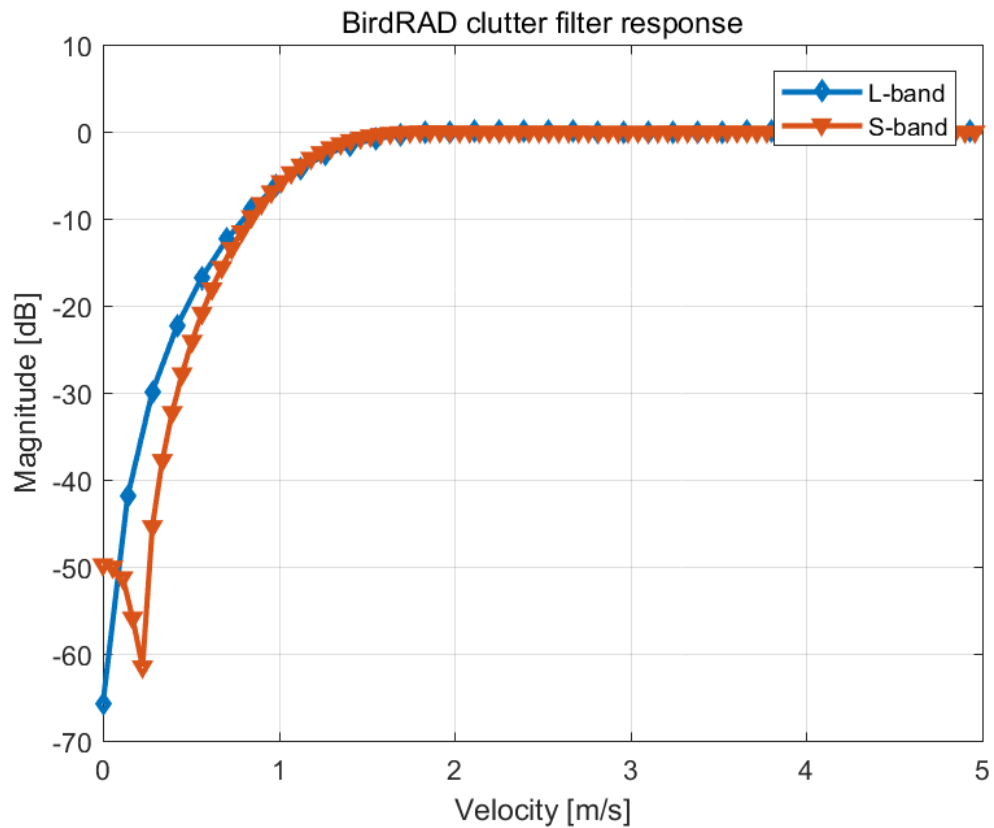
Datasettet med UAV-en ble summert med datasettet som inneholder vindturbininterferens. La oss benevne datasettene med vindturbiner og UAV henholdsvis χ_v og χ_u . Før summering er begge datasett desimert ned til den samme PRF. I datasettet med UAV-en antas neglisjerbart bidrag fra støy og clutter (pga. clutterfiltreringen), i.e.

$$\chi_u = S + N + C \sim S \quad (2.8)$$

hvor S er det avstandskomprimerte signalet, N er termisk støy og C er statisk clutter. Konkret foretar vi summeringen ved

$$\chi = \chi_v + AS \quad (2.9)$$

hvor $A \in \mathcal{R}^1$ er en vekt som vi kan velge for å skalere amplituden på UAV-en opp eller ned. Vi begrenser amplituden på A siden vi har støy i datasettet som også blir skalert med A . Dette gir forhøyet støygulv. Å summere på denne måten er en forenkling som påvirker signalene på en kunstig måte, vi er derfor påpasselige med å ikke øke støyen for mye og siden vi ikke gjør noen terskling eller deteksjon på dataene har vi for enkelhets skyld brukt denne modellen. Vi bruker ulike forholdstall mellom UAV-en og vindturbinen for å illustrere ulike radartverrsnitt. Forholdstallet er definert som



Figur 2.4 FIR-filteret som er brukt på datasettet inneholdende UAV-en (S-bånd-kurven).

forholdet mellom den sterkeste avstand-dopplercellen på den statiske delen av vindturbinen og UAV-en. Det er brukt et Hammingvindu i dopplerdimensjonen for alle våre prosesserte data.

Redusert båndbredde ble simulert ved å ta ut 10% av båndbredden i frekvensdomenet, med et Hammingvindu lagt på etter denne operasjonen. Avstand-doppler koplingen forårsaket av LFM-bølgeformen kan for vårt tilfelle neglisjeres da den utgjør noen millimeter.

3 Resultater

I dette kapittelet presenteres måleresultater for å besvare hypotesene som tidligere er fremsatt. Målinger av vindturbinene vises både alene og der målinger av UAV-en er summert inn.

3.1 Hypotese 1 – deteksjoner i mellom turbiner

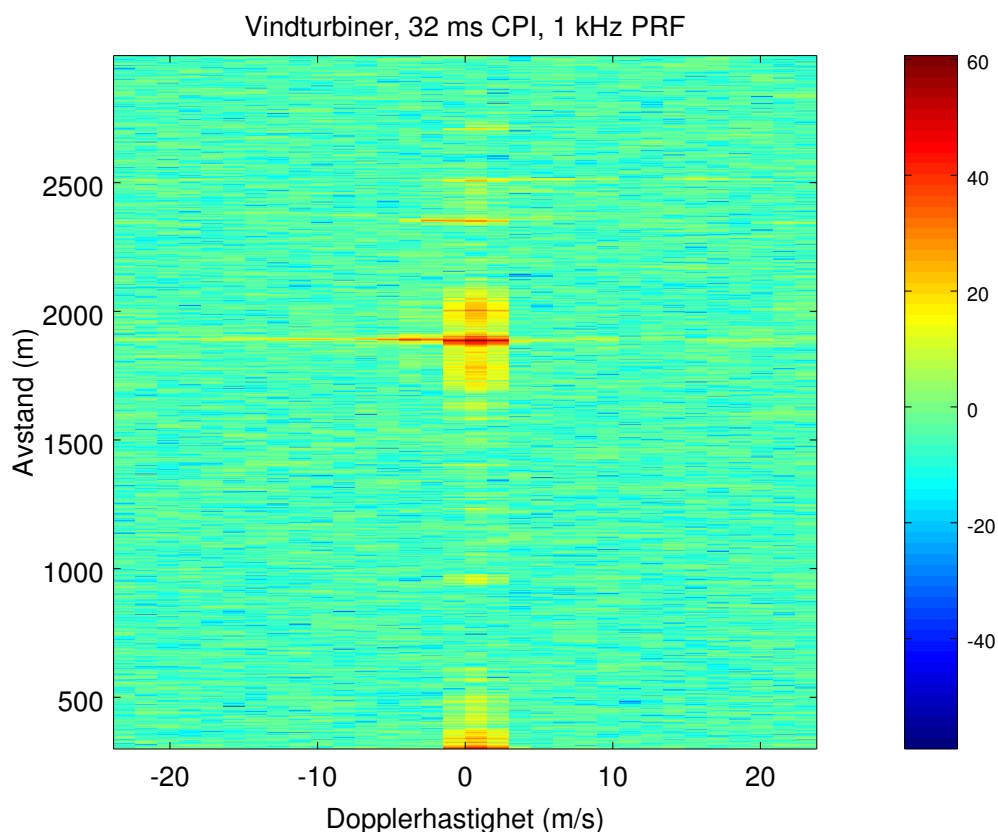
I hypotese 1 antas det at ikke-lokale deteksjoner kan gjøres inne i vindparken. Målingen her vil ikke besvare denne hypotesen for alle vindparker, men sannsynliggjøre dette ved å vise amplitudfordelingen i avstand som vindturbiner gir opphav til, der vi har belyst et større område med flere vindturbiner.

Fra våre målinger viser vi hele avstand-dopplerbildet for en asimutretning i figur 3.1. Bildet viser resultatet av en observasjonstid der vi har integrert 32 pulser koherent med 1 kHz PRF til å bli 32 ms CPI. Vi ser kraftig spredning fra en turbin på ca. 1900 m avstand. Denne turbinen har utslag i negativ doppler, trolig skapt av et turbinblad som beveger seg mot radaren. Vi kan også se sidelober i avstand rundt det kraftige turbintårnet som ikke har noen bevegelige komponenter eller amplitudeendring over tid, og som dermed kommer ut med 0 m/s dopplerhastighet. Flere turbiner er synlige på ca. 2300 m, ca. 2500 m og ca. 2700 m avstand. Grunnen til at de tre sistnevnte turbinene har lavere amplitude er trolig både på grunn av lengre avstand og at de i varierende grad er i antennens hovedlobe, jfr. bildet tatt i antennens pekeretning i figur 2.2. Det forhøyede signalet på ca. 1000 m avstand kan ikke stamme fra turbiner, men samsvarer med en forhøyning i terrenget. Dette er verifisert med et satellittbilde fra Google Earth der avstand til turbinene i antennens hovedlobe er avlest opp mot radarens global positioning system (GPS)-posisjon. Hovedlobens asimut ble funnet å ha en offset på ca. 14° i forhold til det som var oppgitt i dataene (offset funnet ved sjekk av vinkel til gjenkjennbart bolighus avbildet med radarens kamera i aktuell målesituasjon, bildet av huset tatt av Google var gammelt og samsvarte ikke med bildet fra radarkameraet, derfor måtte foto fra Norgebilder.no verifisere at det var rett hus). Vi har 10° asimutoppløsning på BirdRAD-antennen. Hypotetisk sett kan dermed figur 3.1 illustrere en roterende radar for 10 observasjonstider i asimut med 1° oppløsning for den avstanden som er vist (0.3–3 km), dog innenfor samme tidsvindu på 32 ms. Det kan imidlertid også illustrere hvor mange turbiner en vil få inn for en observasjonstid/asimutretning for 10 ganger avstanden av hva som er brukt (3–30 km) med 1° asimutoppløsning. Vi tar forbehold om noen effekter som gjør at skalering av ulike avstander som beskrevet over ikke er direkte sammenlignbare. Den første åpenbare effekten er at avstanden mellom turbinene ved den oppskalerte avstanden ville være større enn hva den er i denne vindparken. En annen effekt som ikke enkelt lar seg skalere med økt avstand er endringen i den kurvede bølgefronten som når turbinene da de ikke er i radarens fjernfelt. Ved fjernfeltsdefinisjonen [11] vil en 100 m høy turbin i S-bånd kreve den følgende avstanden R for å være definert som i fjernfelt (dvs. mindre enn 22° faseforskjell over turbinenes utstrekning):

$$R \geq \frac{2h^2}{\lambda} = \frac{2 \cdot 100^2}{0.0923} = 216 \text{ km} \quad (3.1)$$

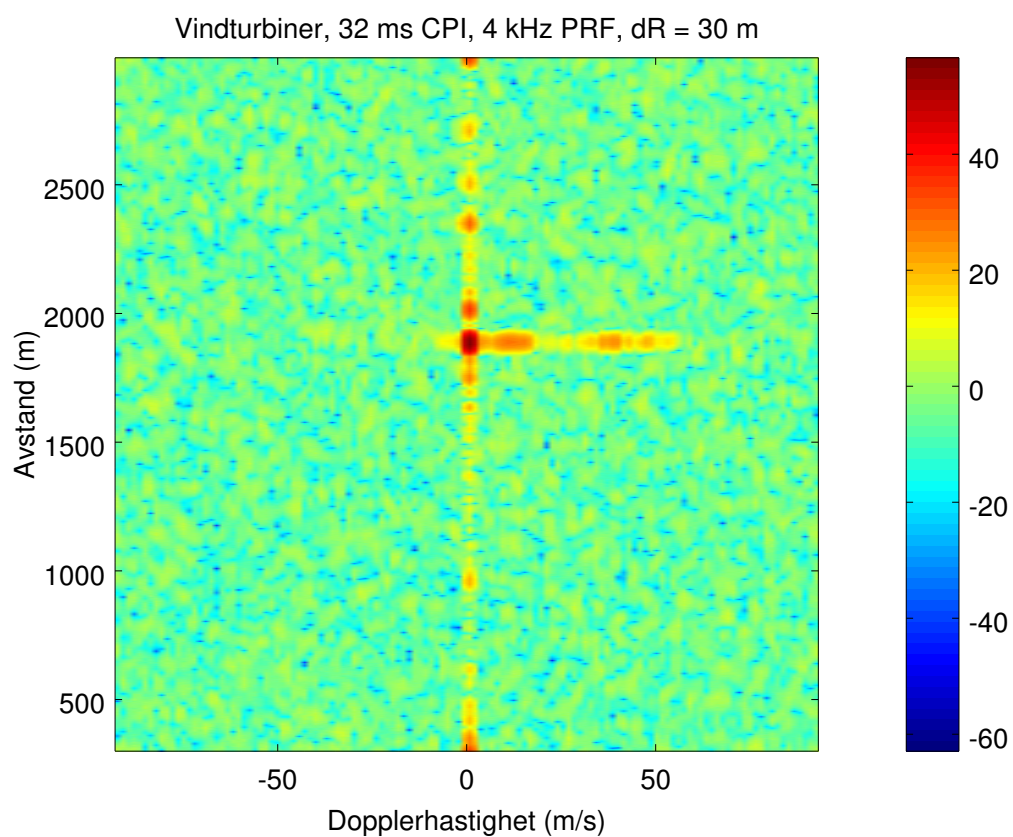
Her er h høyden på turbinen. Total høyde på turbinen vil avhenge av posisjon på turbinbladene (deler av ekkoet med avgrensede dopplerskift vil ha mindre utstrekning og raskere komme i fjernfelt).

Som påpekt i [2] medfører det at fasefronten treffer ulike deler av turbinen ved ulike tidspunkter (noe som også vanskeliggjør beregning av radartversnitt som er definert for fjernfelt, der $R > 216$ km). Dette vil gi ulik tilbakespredning avhengig av avstand, når avstanden ikke er i fjernfeltet. Sett bort i fra forskjellen i fasefrontens krumning er heller ikke effekt i avstand-dopplercellene med oppskalert avstand den samme. Dette kan det imidlertid være enklere å kompensere for.



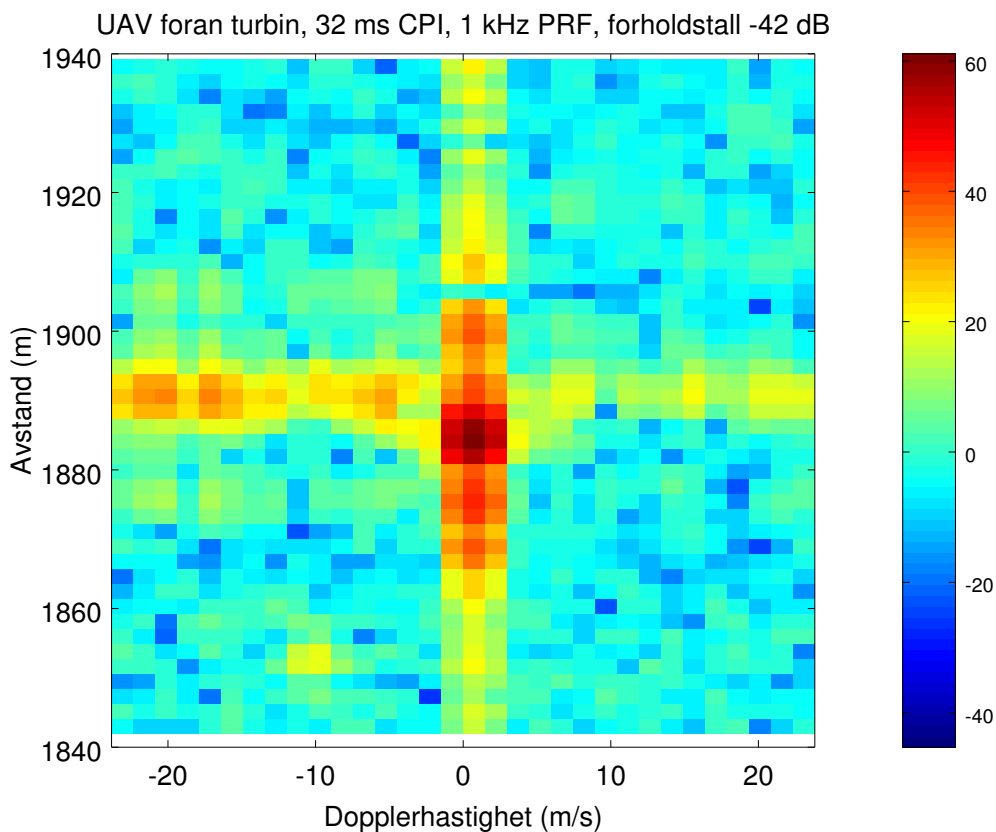
Figur 3.1 Avstand-dopplerbilde vist for en asimutretning med 10° åpningsvinkel ved Smøla vindpark. Flere turbiner er synlige i dette avstand-dopplerbildet der en turbin er i hovedloben på ca. 1900 m avstand. Turbinens tårn, nacelle og nav har lite bevegelse, noe som vises ved høy amplitude rundt 0 m/s dopplerhastighet. Siden tårnet gir høy amplitude er også sidelober i avstand synlige før og etter turbinen. Ved ca. 2300 m, ca. 2500 m og ca. 2700 m avstand er andre turbiner synlige. 50 MHz båndbredde gir her en del avstandsceller mål kan detekteres på i mellom turbinene.

I vårt målescenario hvor vi har 50 MHz båndbredde vil det for denne asimutretningen være mange avstandsceller å kunne detektere på mellom vindturbinene. Ved å redusere båndbredden til 10% simulerer vi i figur 3.2 hvordan avstand-dopplerbildet blir for en radar med 5 MHz båndbredde. Avstandsopløsningen øker da fra 3 m til 30 m. CPI er 32 ms og PRF er økt til 4 kHz, noe som gjør at folding av turbinblader unngås. Vi observerer i figur 3.2 at avstandcellene blir større og dermed færre innenfor avstanden vi observerer. Energienivået skulle være redusert til 10% relativt til figur 3.1. Sidelober er likevel synlige foran og bak turbinen ved ca. 1900 m avstand. I dette målescenarioet fremgår det fra figur 3.2 at det også ved 5 MHz båndbredde er celler i avstand i mellom turbinene som bør kunne brukes til deteksjon av UAV-er.



Figur 3.2 Avstand-dopplerbilde vist for samme asimutretning som i figur 3.1. Figuren simulerer hva en kan oppnå med 5 MHz båndbredde som gir $dR = 30$ m avstandsoppløsning. Utslagene i doppler fra vindturbinene ved ca. 2300 m, 2500 m og 2700 m har også svakere amplitude enn i figur 3.1, trolig på grunn av lavere energi som følger av lavere båndbredde. I dette tilfellet gir det mulighet for å detektere mål mellom turbinene. Det er brukt 32 ms CPI og 4 kHz PRF. Denne er en PRF som ikke gir folding av turbinblader pga. undersampling i doppler.

Vi illustrerer videre hvordan en UAV vil kunne bli detektert på avstander mellom turbiner ved å fusjonere inn UAV-en som beskrevet i kapittel 2.4. Dette er vist i figur 3.3 hvor en UAV ved ca. 1850 m avstand og -10 m/s dopplerhastighet kommer frem foran vindturbinen ved ca. 1890 m avstand. Det er båndbredden på 50 MHz (som gir en avstandsopløsning på 3 m) som her er tilstrekkelig til å skille UAV-en fra turbinen. Det er benyttet 1 kHz PRF og 32 ms CPI. Vi observerer at vindturbinbladene skaper folding på grunn av undersampling i doppler. Så lenge vi utelukker deteksjoner fra området i avstand like ved turbinen har ikke denne foldingen noen betydning. UAV-en er skalert i amplitude med $A = 0.5$ som gir et forholdstall på -42 dB (ref. likning 2.9).



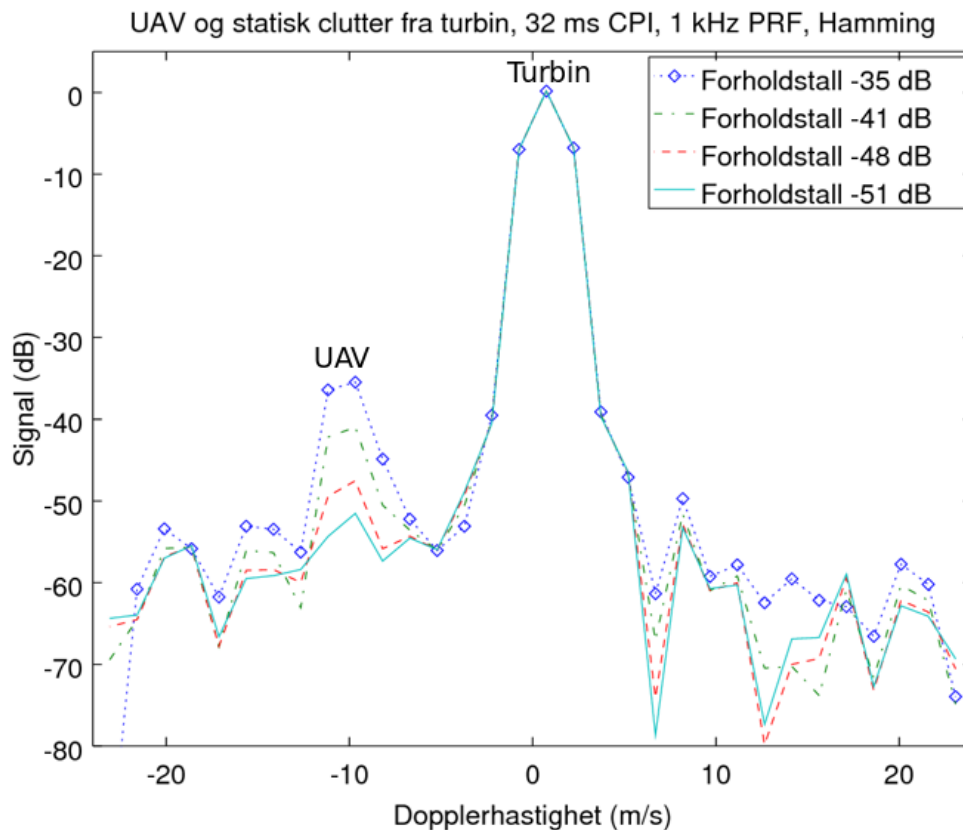
Figur 3.3 Figuren viser turbinen ved ca. 1890 m avstand og UAV-en ved ca. 1850 m avstand. Bildet er fremkommet ved summering av to datasett. Dette illustrerer hva en kan oppnå med båndbredde på 50 MHz som gir 3 m avstandsopløsning. Forholdstallet er her -42 dB. Det er brukt 32 ms CPI og 1 kHz PRF, noe som skaper folding av turbinbladene, vist ved at det er utslag i både positiv og negativ doppler rundt turbinen.

3.2 Hypotese 2 – deteksjon nær turbiner

I hypotese 2 ser vi på tilfellet der en UAV ligger i samme avstand og asimutcelle som en vindturbin. Det hevdes i hypotesen at det da er et problem å fastslå om et radarekko er skapt av et mål eller av et turbinblad. Videre hevdes det at en kan klassifisere turbinblad og mål eller utelukke turbinblader ved andre metoder. I dette kapittelet vil vi vise måleresultater som kan teste denne hypotesen.

3.2.1 Metode 2a) – skille bevegelig mål fra statisk clutter

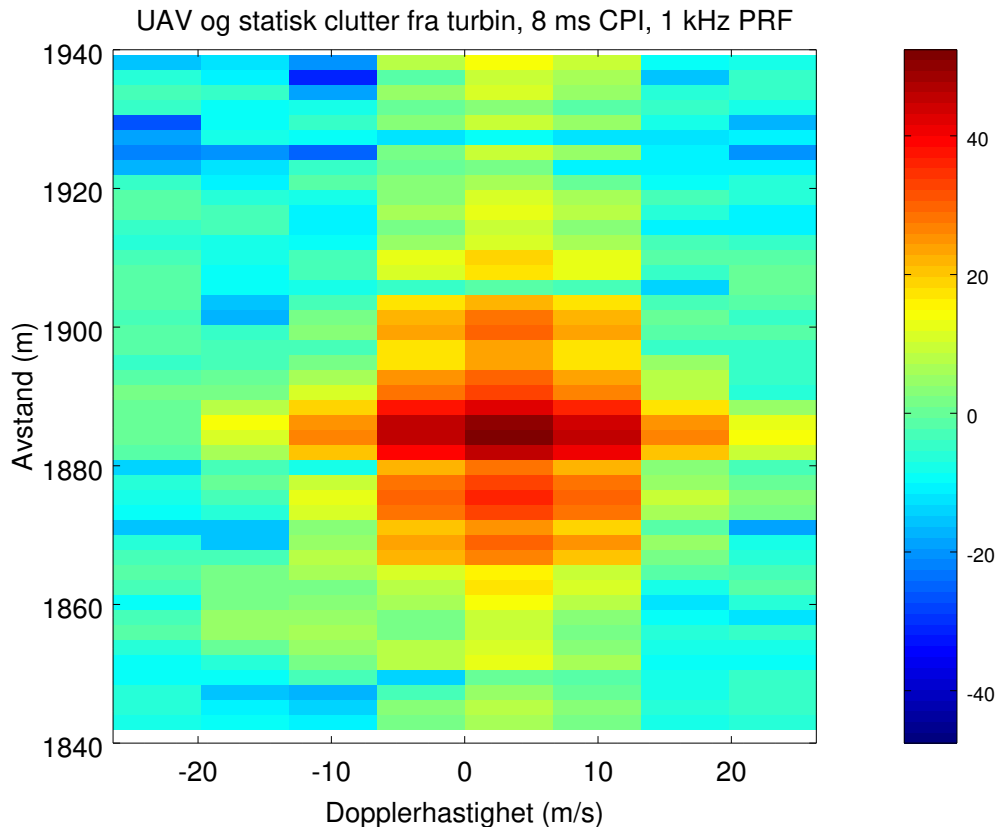
Metode 2a) som må fungere for å kunne skille mål og vindturbinblad der begge har relativ hastighet i forhold til radar, er at målet har høyere signal enn eller er utenfor dopplerbidragene fra turbinclutter som er nær statisk. Vi ser her på et tilfelle der UAV-en er summert inn på samme avstand som turbinen. For i dette tilfellet å skissere hvilke radartvernsnitt et mål med $v = -10$ m/s relativ hastighet må ha for å komme over sidelobene vil vi her tilnærme en skalering av målets radartvernsnitt ved å øke amplituden på målet relativt til turbinen. Skaleringen av målets amplitude er vist i figur 3.4 hvor vi plotter signalnivå som funksjon av doppler for avstandscellen der turbinen ligger. Turbinen tilsvarer toppen av kurven rundt 0 m/s dopplerhastighet og UAV-en gir utslag ved en dopplerhastighet på -10 m/s. I dette tidsintervallet er det lite dopplerskift fra turbinen. Det er brukt 32 ms CPI og 1 kHz PRF. Det er videre benyttet et Hammingvindu i dopplerdimensjonen. Andre vinduer vil kunne gi mer undertrykking av sidelobene, men dette går på bekostning av bredden på hovedloben. Fire forskjellige forholdstall i effekt mellom den sterkeste avstand-dopplercellen for turbinen og UAV-en er vist med ulike kurver. Dersom vi kun hadde energien gitt av et objekts radartvernsnitt samlet innen en avstand-dopplercelle kunne vi ha brukt signalnivået i avstand-dopplercellene til å sammenligne ulike objekters radartvernsnitt. I praksis er energien spesielt fra turbinene spredt ut i avstand og doppler. I tillegg kommer noe bakkeclutter sannsynligvis med. Hvis vi antar at turbinen kan ha et maksimalt radartvernsnitt på 51 dBsm, kan vi gjøre følgende estimat. Kurven for -51 dB forholdstall i figur 3.4 kunne representere et radartvernsnitt på 51 dBsm og 0 dBsm for hhv. turbin og mål, dersom vi neglisjerer at bakkeclutter er med og at energi spredt fra radartvernsnittet er fordelt ut over flere celler. Vi neglisjerer med andre ord at radartvernsnittet til et objekt fremkommer ved å summere cellene som inneholder objektet. Siden energien i den sterkeste cellen fra turbinen sannsynligvis representerer et radartvernsnitt lavere enn 51 dBsm, vil kurven for -51 dB representere et mål med radartvernsnitt mindre enn 0 dBsm. Summeringen av de to datasettene påvirker støyen og gjør det vanskelig å gjøre en deteksjonsprosess, derfor gjøres det ikke noe forsøk på det i denne rapporten. Rent visuelt ville kurven vist for -51 dB forholdstall være nær grensen til hvor svake mål med -10 m/s dopplerhastighet en kan se i samme avstand som turbinen, gitt de anvendte systemparametere (32 ms CPI, 1 kHz PRF, S-bånd, bølgeform og pulslengde). Vi tar da forbehold om at radar har sensitivitet til å måle slike mål også dersom turbininterferensen ikke hadde vært der. Bredden på toppen av kurven rundt 0 m/s dopplerhastighet i figur 3.4 som i hovedsak skyldes turbinen er som tidligere nevnt avhengig av CPI og vindusfunksjon. Beregner vi doppleroppløsningen uten noen vindusfunksjon er den i følge likning 2.7 1.44 m/s. Samplet kritisk i doppler som vi har gjort ser vi at det er noen celler (punkter i figuren) fra 0 m/s ut til målet ved -10 m/s dopplerhastighet. Lengre CPI ville ha gitt flere celler ut til målet fra 0 m/s, og derfor også en smalere topp rundt 0 m/s doppler (dersom faktisk clutter har avgrenset hastighet rundt 0 m/s). Samtidig ville en kortere bølgelengde for samme CPI ha plassert målet med -10 m/s hastighet lengre ut på doppleraksen fra 0 m/s, gitt at det ikke forårsaker folding siden kortere bølgelengde gir folding for lavere hastighet.



Figur 3.4 Plot av signal-til-støyforhold som funksjon av doppler for en avstandcelle der turbinen er vist i en observasjonstid hvor det er lite dopplerskift fra turbinbladene. Turbinen kan sees som en topp rundt 0 m/s dopplerhastighet. En UAV har -10 m/s dopplerhastighet og ligger i samme avstandcelle som turbinen. Ulike forholdstall i effekt på signal fra UAV og turbin er vist i de ulike kurvene. Det er benyttet 1 kHz PRF og 32 ms CPI. Et Hammingvindu er lagt på i dopplerdimensjonen.

Dersom vi ser på det samme tilfellet med 8 ms CPI og 1 kHz PRF får vi et avstand-dopplerbilde som vist i figur 3.5. Tilfellet her illustrerer begrensningen i å se saktegående mål gitt av doppleropløsningen (CPI) da målet maskeres av hovedloben eller sidelober fra clutter med dopplerhastighet rundt 0 m/s. Dette skjer selv om vi her har økt forholdstallet mellom UAV og turbin til -6 dB. Ved 8 ms CPI blir doppleropløsningen i hastighet i følge likning 2.7 5.8 m/s (uten vindusfunksjon). To like sterke mål skulle derfor kunne skilles ved denne hastighetsforskjellen på 5.8 m/s. Vi antar at turbinen vil ha noe clutter med dopplerkomponenter (selv når clutteret er dominert av statisk clutter), slik at det også er økt signalnivå for dopplerceller utover de som ville ha vært påvirket av sidelober fra en helt statisk turbin. Dette indikerer at mål med høye radartverrsnitt og lave dopplerhastigheter også vil være påvirket av turbinene, uansett hvor fin doppleropløsning en har og uavhengig av vindusfunksjon. Dette gjelder mål med lav hastighet relativt til radar. Vi understreker at det også gjelder mål med høyere hastighet, så lenge hastigheten er lav relativt til radar (bevegelse i sirkler rundt radar gir null relativ hastighet mot radar). Disse måleresultatene indikerer at radar i S-bånd med denne bølgeformen må sette av over 8 ms CPI for å kunne skille mål fra statisk vindturbinclutter ned til $|\pm 10|$ m/s relativ hastighet. For samme mål har 32 ms CPI vist seg tilstrekkelig og det er

mulig CPI kan kortes noe ned i forhold til dette. Temaet rundt statisk radarclutter og saktegående mål er forøvrig behørig diskutert i [12].

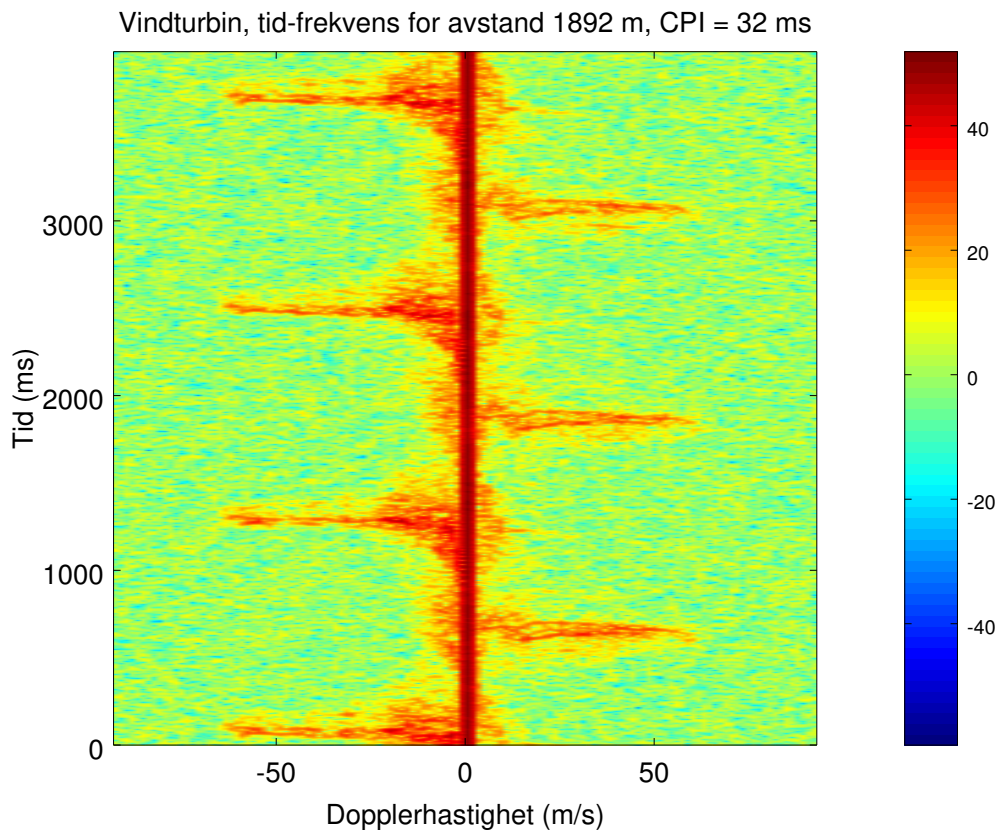


Figur 3.5 Avstand-dopplerbilde av turbin og UAV hvor det er lite dopplerskift fra turbinbladene. UAV-en som har en dopplerhastighet på -10 m/s og ligger i samme avstandscelle som turbinen maskeres her av det kraftige (nesten) statiske turbinclutteret. Det er brukt 8 ms CPI og 1 kHz PRF. Et Hammingvindu er lagt på i dopplerdimensjonen. Det kan antas at vi både ser sidelover fra sterke signaler med 0 Hz dopplerfrekvens men også noe clutter fra sakte-roterende deler som forårsaker utslag i doppler noe utover 0 m/s.

3.2.2 Metode 2b) – unngå tidsrom der vindturbinblader påvirker

I metode 2b) omtales muligheten for å detektere mål innenfor turbinens utstrekning i avstand og asimut i tidsrom hvor clutteret har liten spredning i doppler. Clutteret som har dopplerforskjøvet frekvens i forhold til radarens bærefrekvens er som beskrevet i kapittel 2 skapt av turbinbladene der de beveger seg innenfor gitte posisjoner. Ved å studere den komplekse verdien for en avstandscelle tilhørende en vindturbin over tid, kan vi ved en tid-frekvensanalyse som vist i figur 3.6 se effekten turbinbladene har på radarekkoet som funksjon av tid og frekvens. De periodiske dopplerutslagene er forårsaket av turbinbladene idet de nærmer seg eller beveger seg vekk (relativt) til radar. Vi ser at det er tidsintervaller der signalet i liten grad er dopplerforskjøvet. En studie [4] viser med tilsvarende tid-frekvensanalyse som i figur 3.6 at utstrekningen av ekkoet langs doppleraksen og

tidsaksen endres med aspektvinkel. Den viser også individuelle forskjeller for de tre turbin typene som er undersøkt. Trenden er imidlertid den samme der det finnes tidsintervaller hvor turbinbladene gir lite dopplerskift over $|\pm 10|$ m/s. Rent visuelt ser man fra figur 3.6 at det er sannsynlig at en vil få inn interferens med doppler ved 32 ms CPI (og de andre systemparametere som er benyttet her), siden tidsintervallene med dette clutteret fyller en betydelig andel av tidsaksen. Dette viser at metoden med å unngå perioder med dopplerforskjøvet signal fra turbinblader krever at en har kontroll på når turbinen skaper dette clutteret som diskutert i kapittel 2.



Figur 3.6 Tid-frekvensbilde av avstandscelle som inneholder vindturbinblader. Avstanden her tilsvarer ikke selve tårnet men en avstand turbinbladene sveiper over bak tårnet. En ser hvordan de tre turbinbladene gir dopplerforskjøvet ekko etter hvert som tiden går oppover langs 2. aksen. Turbinbladene som roterer slik at de beveger seg vekk fra radar gir positiv dopplerhastighet mens turbinbladene som beveger seg mot radar gir negativ dopplerhastighet. De stasjonære delene av det som befinner seg i avstandscellen vi analyserer er kraftigere og kommer ut med dopplerhastighet rundt 0 m/s. Det er her brukt 4 kHz PRF og 32 ms CPI. Et Hammingvindu er lagt på i dopplerdimensjonen.

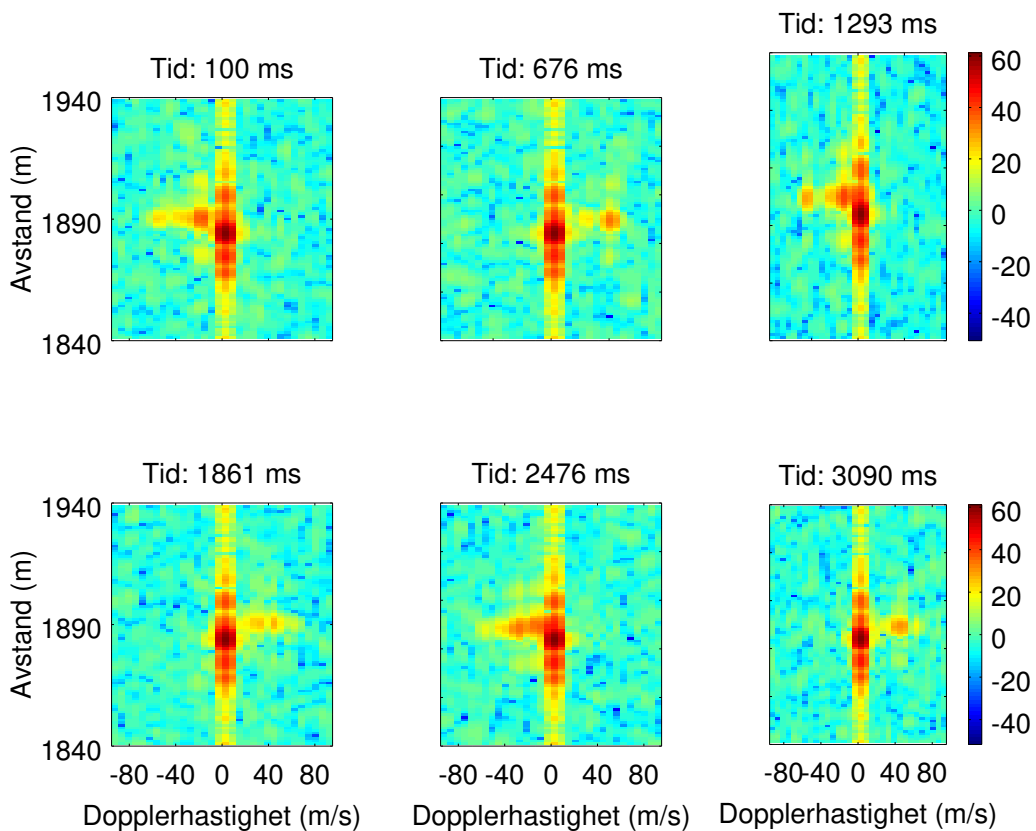
3.2.3 Metode 2c) – unngå dopplerhastigheter der vindturbinblader påvirker

I metode 2c) beregnes mulighet for deteksjon ved høyere dopplerhastighet enn det turbinene forårsaker. Disse områdene der doppler for målet må være høyere enn doppler fra turbinbladet er synlige i figur 3.6. I akkurat dette tilfellet ville det ha vært en mulighet for deteksjon dersom målets dopplerhastighet var over ca. $|\pm 65|$ m/s og under $|\pm 92|$ m/s som er den entydige hastigheten gitt av likning 2.3. Problemstillingen og krav til PRF er diskutert i kapittel 2 og vi illustrerer her kun hvor disse områdene ligger i figur 3.6.

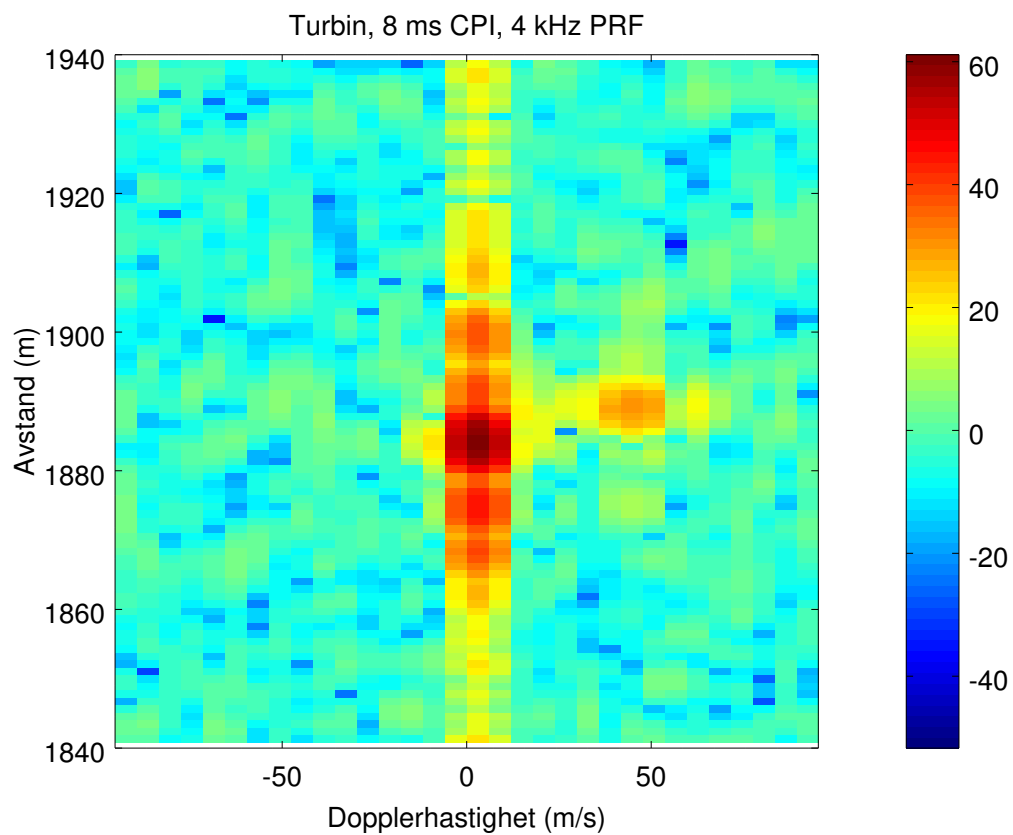
3.2.4 Metode 2d) – studerer forskjellen mellom UAV og turbinblad

Vi har her studert tilfellet der UAV-en er i samme avstand og asimutcelle som turbinen og turbinbladet ikke gir dopplerskift, og holdt dette opp mot ekkoet fra turbinen alene der turbinbladet gir dopplerskift. I disse to tilfellene undersøker vi avstand-dopplermatrisene visuelt for forskjeller mellom ekko skapt av turbinblad og UAV.

Vi ser først på en turbin uten at noe mål er lagt inn. Figur 3.7 viser en vindturbin ved ulike tidspunkter der vi har kraftige ekko med dopplerskift skapt av turbinblader. Det er prosessert med 4 kHz PRF og 8 ms CPI. Denne PRF-en gir en entydig hastighet på 92 m/s, noe som gjør at turbinbladene ikke foldes. En CPI på 8 ms gir imidlertid en doppleropløsning på 5.77 m/s (uten vindusfunksjon), noe som gjør at en samler mer av clutteret fra de bevegelige turbinbladene innenfor færre dopplerceller sammenlignet med de tilfellene der en benytter lengre CPI. Som nevnt tidligere vil også cellen med statisk clutter bre seg lengre ut i hastighet. Tidspunktene kan sammenliknes med de man finner i figur 3.6. I figur 3.7 observerer vi at turbinbladene forårsaker distinkte toppe i doppler med høy amplitude som er spredt ut over noen få meters avstand. Disse toppene har forskjellig dopplerhastighet og utstrekning i doppler som funksjon av måletidspunkt. Signalet fra turbinbladene ligger på en avstand ca. 10 m bak tårnet som er ca. 20 dB sterkere og som er sentrert i 0 m/s dopplerhastighet. Et oppblåst bilde av figuren nederst til høyre i figur 3.7 er vist i figur 3.8. En kan i denne figuren tydeligere se at turbinbladet som skaper et ekko med ca. 50 m/s dopplerhastighet ved denne CPI-en på 8 ms dekker ca. 3 dopplerceller og ca. 4 avstandsceller. Ekkoet fra turbinbladet er kraftig og sidelover i avstand kan observeres.

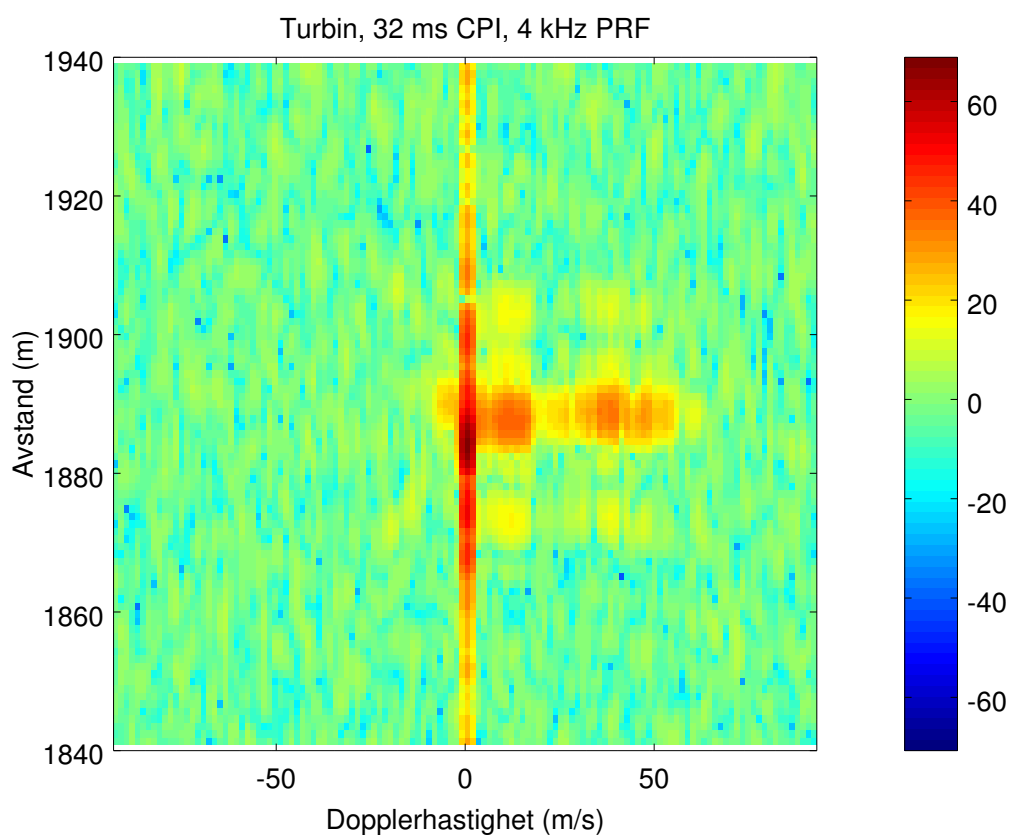


Figur 3.7 Avstand-dopplerutsnitt av vindturbin ved tidspunkter der det er sterk tilbakespredning med dopplerskift. Turbinbladene skaper et dopplerforskjøvet ekko med dopplerhastighet som endres med tiden. Ekkoene er spredt ut over noen få meters avstand. De statiske bidragene fra turbinen er kraftigere og synlig ved ca. 1880 m avstand og rundt 0 m/s dopplerhastighet. Et Hammingvindu er lagt på i dopplerdimensjonen. 4 kHz PRF og 32 pulser gir 8 ms CPI. 4 kHz PRF gir ikke folding av turbinblader i dette tilfellet.



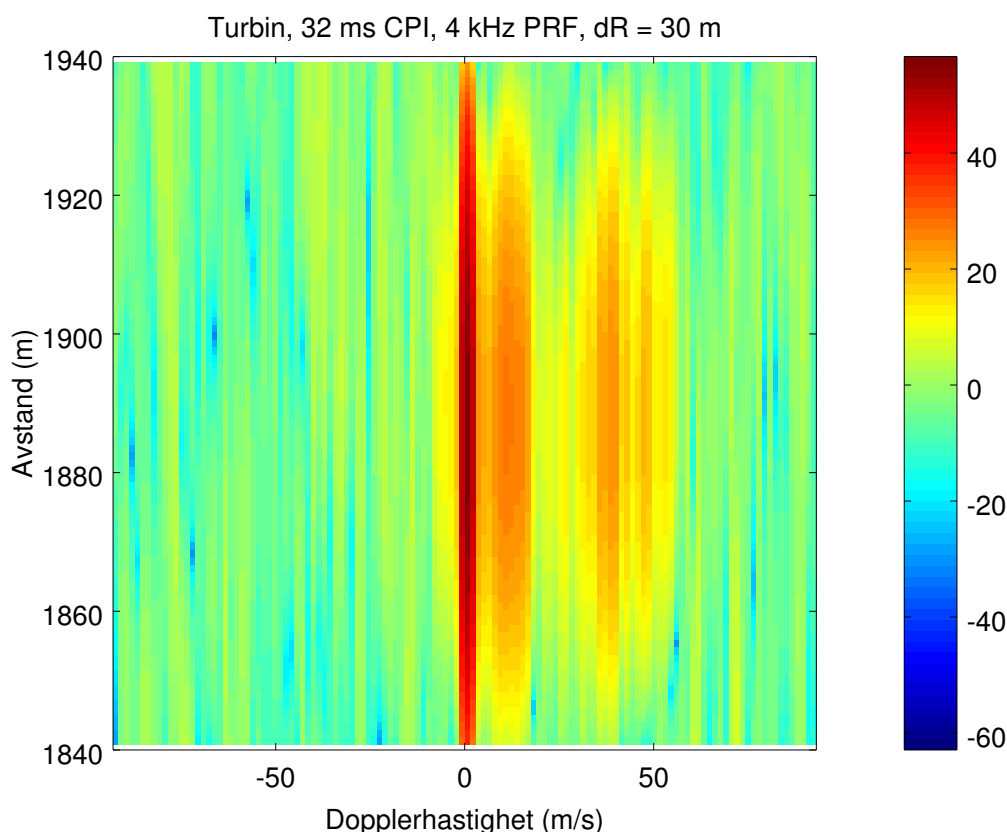
Figur 3.8 Avstand-dopplerutsnitt av vindturbin ved samme tidspunkt som nederst til høyre i figur 3.7. I denne observasjonstiden skaper turbinbladet et signal som har en dopplerhastighet på 40–50 m/s. Et Hammingvindu er lagt på i dopplerdimensjonen. 4 kHz PRF og 32 pulser gir 8 ms CPI.

Figur 3.9 viser turbinen i samme starttidspunkt som i figur 3.8 men det er integrert flere pulser koherent til 32 ms CPI. PRF-en er her 4 kHz. I forhold til i figur 3.8 observerer vi at det er kommet et ekko til med lavere dopplerhastighet. Antagelig på grunn av at vi har integrert inn i et område der turbinbladet har rotert slik at det har økt radartversnitt i en posisjon som gir lavere dopplerhastighet. Videre observeres det finere oppløsning i dopplerhastighet på grunn av økt CPI. For ekkoet ved ca. 50 m/s dopplerhastighet er det ca. 10 dB mer energi i forhold til i figur 3.8. Som forventet er det mer energi da CPI-en er fire ganger lengre. For koherent integrasjon av et statisk mål ville en for denne fire-doblingen av CPI teoretisk ha økt energien med 6 dB. Siden økningen i signal til støyforhold er høyere enn dette kan det indikere at en har integrert inn i et tidsintervall der turbinbladet har økt radartversnitt. Videre er signalet fra turbinbladet fordelt over noen flere avstandsceller. Sideløber i avstand er synlig ved de to ulike dopplerhastighetene der turbinbladet skaper ekko.



Figur 3.9 Avstand-dopplerutsnitt av vindturbin ved samme starttidspunkt som nederst til høyre i figur 3.7, men med fire ganger lengre CPI. Et Hammingvindu er lagt på i dopplerdimensjonen. 4 kHz PRF og 128 pulser gir 32 ms CPI. 4 kHz PRF gir ikke folding av turbinblader.

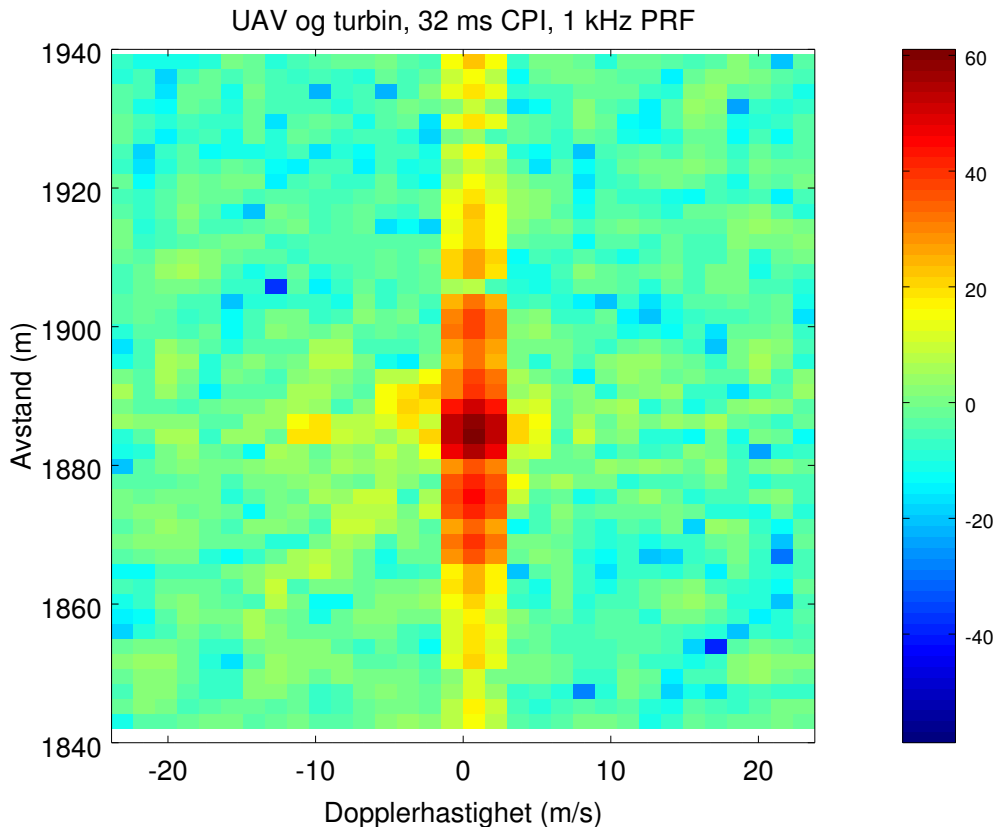
Vi viser videre den samme målesituasjonen der vi simulerer effekten av å redusere båndbredden fra 50 MHz til 5 MHz. Figur 3.10 viser den økte avstandsoppløsningen som da blir 30 m som følger av dette. Som i figur 3.9 er det brukt 32 ms CPI som gir den samme doppleroppløsningen. Vi kan se av figuren at turbinbladet okkuperer ca. to avstandsceller på 30 m og flere dopplerceller. Signal til støyforholdet er redusert med ca. 10 dB i forhold til i figur 3.9. Dette er forventet dersom den faktiske båndbredden på pulsen er en tiendedel. Sammenligner vi med figur 3.9 der vi har bedre avstandsoppløsning ser vi at det legges beslag på flere avstandsceller som diskutert i resultatene fra hypotese 1.



Figur 3.10 Avstand-dopplerutsnitt av vindturbin ved samme tidspunkt som nederst til høyre i figur 3.7. Båndbredden er her redusert til 5 MHz slik at avstandsoppløsningen dR er 30 m. Et Hammingvindu er lagt på i dopplerdimensjonen. 4 kHz PRF og 128 pulser gir 32 ms CPI. 4 kHz PRF gir ikke folding av turbinblader.

Vi viser i figur 3.11 turbinen i et tidspunkt der turbinbladene ikke skaper dopplerforskjøvet ekko og UAV-en er lagt til. Det er prosessert med 1 kHz PRF og 32 ms CPI. Clutteret fra turbinen ligger på ca. 1890 m avstand. På samme avstand ved ca. -10 m/s dopplerhastighet er UAV-en lagt til. Vi bruker en skaleringsfaktor på $A = 0.5$ i likning 2.9 for å skalere amplituden på signalet fra UAV-en. Forholdstallet er i dette tilfellet -42 dB. Som diskutert i metode 2a) er et maksimalt estimat for hele turbinenes radartversnitt 51 dBsm. I vårt måleoppsett fordeles energien fra dette radartversnittet ut over flere avstand og dopplerceller og det er ikke sikkert vi står i en orientering som gir maksimalt radartversnitt mot radar. Det er usikkert hvor mye under det maksimale radartversnittet vår måling

av turbinen er, men et anslag er 5 til 20 dB. Dermed kan UAV-en i figur 3.11 som har -42 dB lavere effekt enn turbinen tilnærme et radartversnitt på 4 til -11 dBsm. Tatt i betraktning at energien fra UAV-en også ligger i tre dopplerceller, kan UAV-ens radartversnitt være noen dB underestimert.



Figur 3.11 Avstand-dopplerbilde av vindturbin og UAV i et tidspunkt hvor det er lite dopplerskift fra turbinbladene. UAV-en har en dopplerhastighet på -10 m/s og en avstand på ca. 1890 m. Det er her brukt 1 kHz PRF og 32 ms CPI. Forholdstallet mellom sterkeste avstand-dopplercelle på UAV og turbin er -42 dB. Et Hammingvindu er lagt på i dopplerdimensjonen.

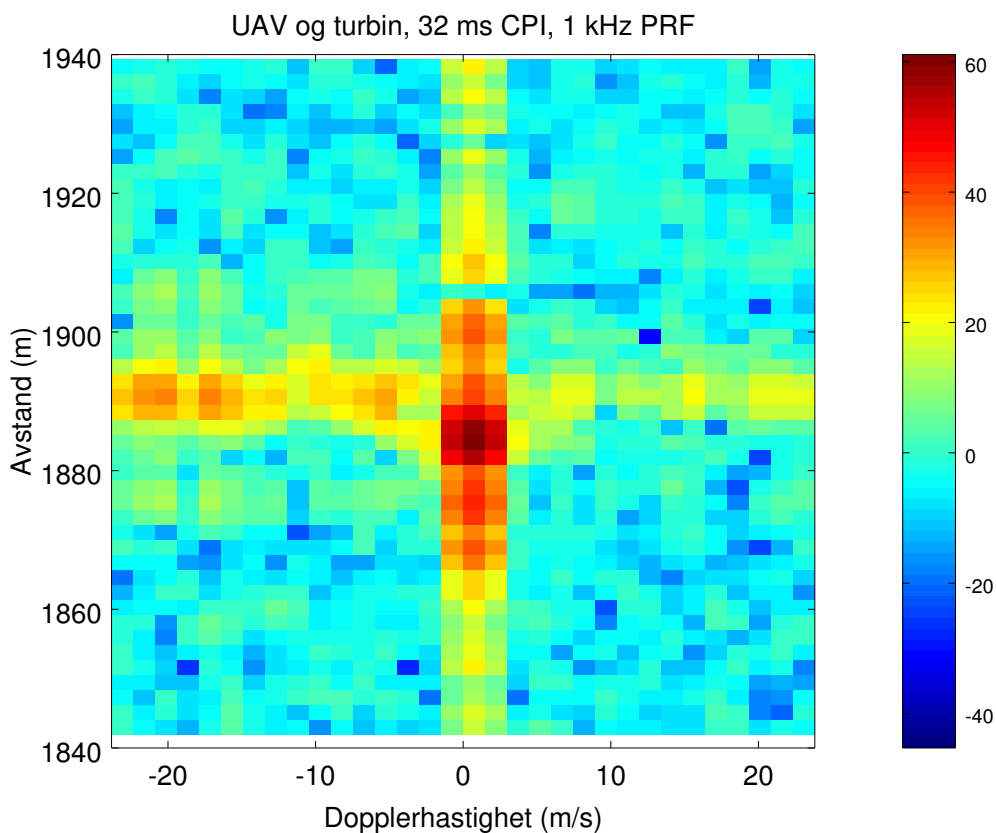
Når vi skal sammenligne avstand-dopplermatrisene av UAV og turbinblad der hver av de er alene med statisk turbin i to ulike scener, ønsker vi å gjøre dette når vi ikke har folding av turbinblader. UAV-en er målt med 10 kHz PRF, som ikke lar seg desimere til den PRF som vindturbinene er målt med som er 4 kHz. Siden vi må ha samme PRF for å fusjonere to datasett kan vi ikke fusjonere UAV-målingen inn i vindturbinmålingen ved 4 kHz PRF. Den høyeste PRF som begge datasett kan desimeres ned til er 2 kHz og dernest 1 kHz. 1 kHz og 2 kHz PRF gir imidlertid begge folding av vindturbinblader. På den andre siden bør UAV-en som vist i figur 3.4 ha 32 ms CPI for å komme godt ut av statisk clutter. Vi velger derfor å studere turbinen ved 32 ms CPI og 4 kHz PRF da det ikke gir folding av turbinblader. Vi sammenlikner det ovennevnte med UAV-datasettet der det er summert inn i datasettet med vindturbinen ved 32 ms CPI og 1 kHz PRF. Forskjellen mellom de to datasettene ved 1 kHz og 4 kHz PRF vil være at ved 4 kHz PRF er det flere pulser summert for samme CPI. Dopplercellene har imidlertid samme størrelse, slik at doppleraksen strekker seg lengre for 4 kHz PRF.

Signalet fra en turbin med et turbinblad som skaper ekko med dopplerskift, prosessert med 32 ms CPI og 4 kHz PRF og signalet fra en UAV og en turbin, prosessert med 32 ms CPI og 1 kHz PRF, på et tidspunkt der turbinbladet ikke gir ekko med dopplerskift, vil derfor kunne sammenlignes opp til tvetydig hastighet for 1 kHz PRF (23 m/s). Dette tilsvarer 1/4-dels tvetydig hastighet for 4 kHz PRF. Sammenligningen kan gjøres ved å studere figur 3.9 og figur 3.11. Det er flere visuelle forskjeller mellom de to figurene. Det ene er at turbinbladet fra vindturbinen fordeles i mange oppløsningceller i avstand og i doppler i forhold til det som er tilfellet med UAV-en. Det andre er at signal til støyforholdet til turbinbladet her er ca. 20 dB høyere enn til UAV-en. Sidelober i avstand er synlig for ekkoet fra turbinbladet i figur 3.9. Selv om vi ikke kan gjøre sammenligningen ved 8 ms CPI, ser vi i figur 3.7 (der det er brukt 8 ms CPI) at turbinbladet også der fordeles over flere avstand og dopplerceller.

Trolig vil UAV-en og turbinbladene fordeles over like få avstandsceller der båndbredden er lavere som vist i figur 3.10. Vi hadde ikke tilstrekkelig med avstandsceller til å redusere utsnittet av datasettet med UAV-en til 5 MHz båndbredde, og får derfor ikke testet dette i denne rapporten.

3.2.5 Metode 2e) – studerer UAV sammen med turbinblad

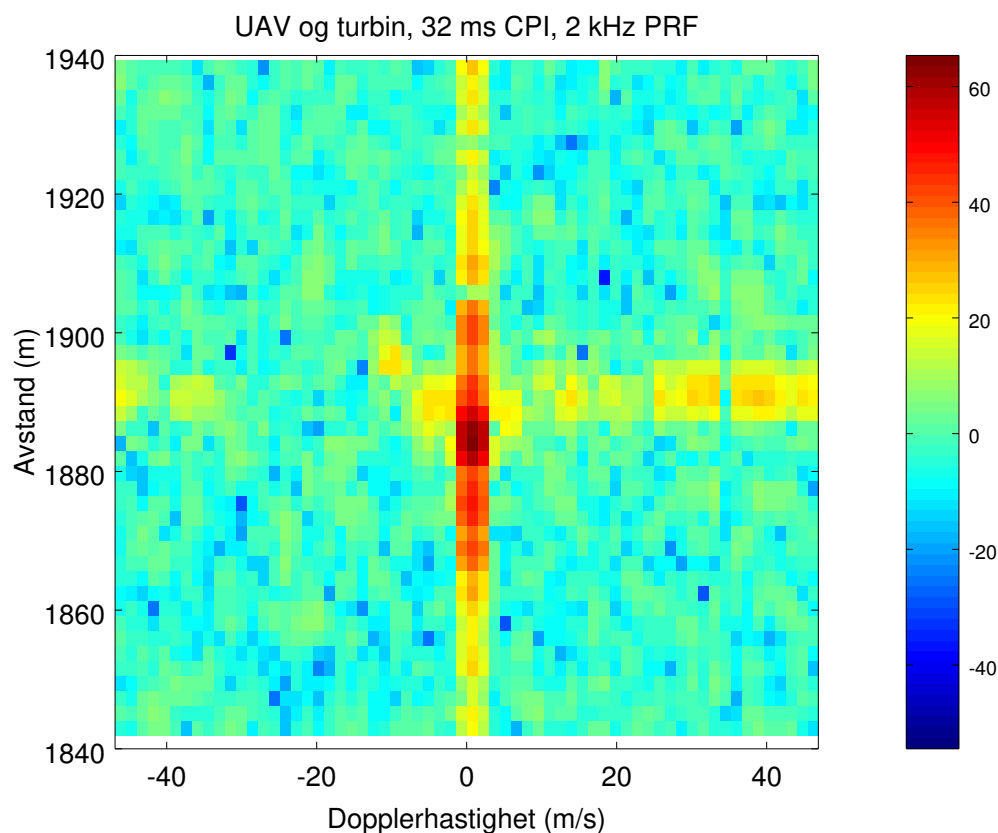
Vi studerer her tilfellet der UAV-en er i samme avstand og asimutcelle som turbinen i det turbinbladet gir dopplerskift, slik at både UAV og turbinblad gir utslag i doppler samtidig. Da det ikke er mulig å fusjonere UAV-en inn i et datasett fra vindparken med en PRF som unngår folding av turbinbladene (pga. at desimeringen må gå opp), kan vi ikke sammenligne UAV og turbinblad i samme datasett der turbinbladet ikke foldes inn i doppler. Figur 3.12 viser vindturbinen sammen med UAV-en ved -10 m/s dopplerhastighet. Vi har brukt samme skalering $A = 0.5$ i likning 2.9 på UAV-en som i forrige avsnitt. Det er videre prosessert med 1 kHz PRF og 32 ms CPI. UAV-en maskeres her åpenbart av turbinbladene som foldes inn. Å lese ut et forholdstall mellom UAV-ens og turbinens sterkeste avstand-dopplercelle vil her være problematisk siden UAV-en er maskert av turbinen.



Figur 3.12 UAV ved -10 m/s dopplerhastighet er her maskert av clutter fra turbinblader ved samme avstandscelle. $A = 0.5$ er brukt for å skalere UAV-en i forhold til vindturbinen men det gir ikke mening å lese ut forholdstall her siden turbinbladet maskerer UAV-en i avstand-dopplerbildet. Det er brukt 32 ms CPI og 1 kHz PRF. Denne PRF-en gir folding av turbinbladet. Et Hammingvindu er lagt på i dopplerdimensjonen.

I figur 3.13 har vi tatt samme observasjonstid og CPI (32 ms) som i figur 3.12 men brukt 2 kHz PRF. Dette gir høyere entydig dopplerhastighet som vises på skalaen på 1. aksen i figuren. Det observeres folding av turbinbladene, men på andre frekvenser enn i figur 3.12. UAV-en er her synlig ved -10 m/s dopplerhastighet dersom man vet at den er der. Uten annen informasjon virker det vanskelig å

si med sikkerhet om det er en UAV tilstede sammen med turbinbladene i dette tilfellet.



Figur 3.13 Vindturbin i en observasjonstid der det er kraftig ekko med dopplerskift skapt av turbinbladene. UAV-en ved -10 m/s dopplerhastighet befinner seg i omtrent samme avstandscelle som turbinen og er synlig (hvis man vet hvor man skal se). Det er her brukt 2 kHz PRF og 32 ms CPI. Turbinbladene foldes i doppler. Uten mer informasjon virker det vanskelig å kunne si sikkert om det er et mål eller om det er et turbinblad ved -10 m/s dopplerhastighet.

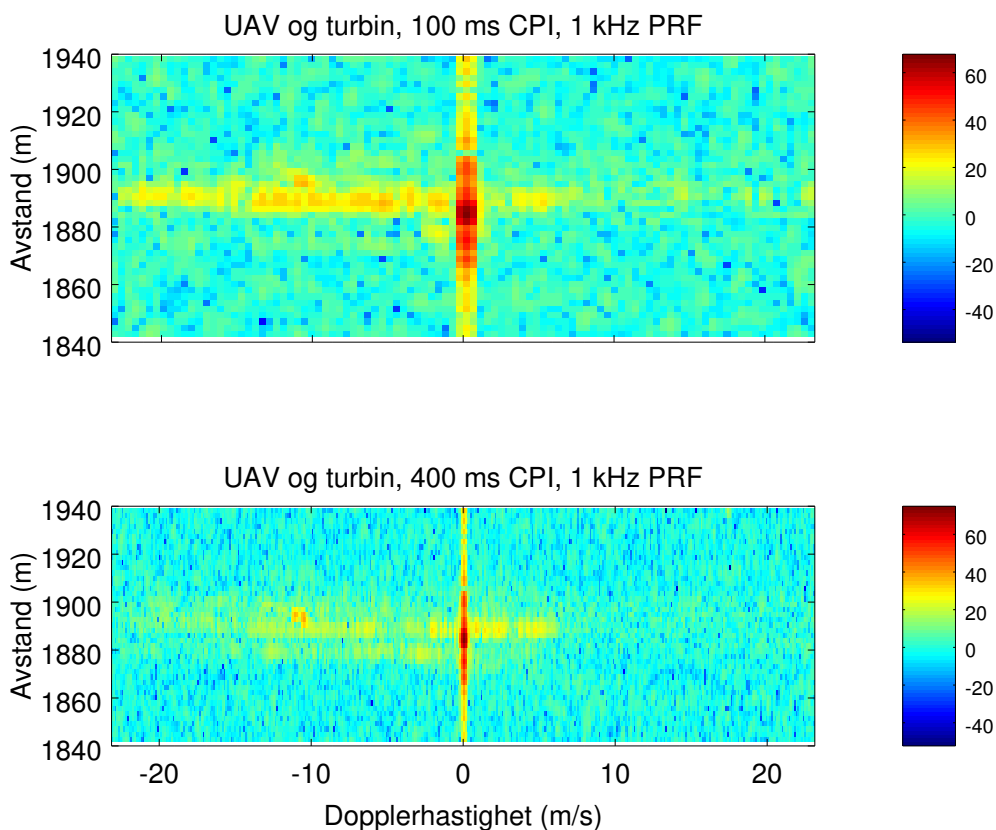
3.2.6 Betydning av CPI

Vi undersøker her effekten av å øke CPI (ved samme PRF). Vi tar utgangspunkt i det samme starttidspunktet og skalering av UAV-en som i figur 3.12 og med UAV-en i samme avstand som turbinen. Fra det prosesserer vi med økende CPI, vi forsøker 100 ms og fortsetter gradvis opp til 400 ms. I det øvre panelet i figur 3.14 hvor det er brukt 100 ms CPI er UAV-en maskert av clutteret fra turbinbladet som foldes inn og dekker store deler av doppleraksen.

Først ved 400 ms CPI blir det observerbare effekter i avstand-dopplerbildet, vist i det nedre panelet i figur 3.14. Amplituden på clutteret fra turbinbladet blir svakere, bortsett fra noen distinkte utslag under ca. 3 m/s dopplerhastighet. I sterk kontrast ser vi at signalet fra UAV-en er tydelig og ca. 20 dB sterkere enn clutteret fra turbinen. Til tross for at UAV-en har migrert over flere avstandsceller ligger signal-til-støyforholdet på ca. 40 dB. UAV-en har i dette tidsvinduet trolig stabilt radartversnitt som øker signal-til-støyforholdet under den koherente integrasjonen.

Ser vi tilbake på tid-frekvensbildet av turbinen i figur 3.6 observerer vi at turbinbladet kun forårsaker dopplerskiftet signal av betydelig amplitude kun en liten andel av en periode på 400 ms. Dette skyldes at bladene har høyt radartversnitt og høy relativ hastighet når de står i visse posisjoner for en gitt aspektvinkel. Når det integreres pulser fra ekko der turbinbladene er utenfor disse posisjonene dekorrelerer energien til turbinbladene. At turbinbladet endrer avstand så mye at det migrerer over flere avstandsceller vil også kunne dekorrelere signalet fra turbinbladet, men det ser imidlertid ikke ut til å være den dominerende effekten i dette tilfellet.

Ved å sammenligne øvre og nedre panel i figur 3.14 observerer vi at doppleropløsningen blir finere når CPI-en økes. Dette fordeler signalet fra turbinbladene som er spredt over et større hastighetsspenn til flere dopplerceller mens signalet fra UAV-en som har tilnærmet konstant hastighet holdes i færre dopplerceller.



Figur 3.14 Avstand-dopplerbilder med innslag av dopplerskiftet clutter fra turbinblad, prosessert med 100 ms og 400 ms CPI og 1 kHz PRF. På samme avstand som clutter fra vindturbinen er en UAV lagt inn. I øvre figur hvor det er brukt 100 ms CPI kan UAV-en så vidt observeres på ca. 1890 m avstand og -10 m/s dopplerhastighet. I nedre figur hvor det er brukt 400 ms CPI har UAV-en høy signalstyrke. En kan se at UAV-en har beveget seg over flere avstandsceller i løpet av CPI-en. Turbinbladet har her blitt integrert over en så lang tidsperiode at signal-til-støyforholdet har falt.

4 Konklusjon

I hypotese 1 hevdes det at en kan gjøre deteksjon av mål inne i en vindpark i mellom turbinene. Denne rapporten kan ikke gi et generelt svar på denne hypotesen, da det må gjøres enkeltvurderinger for hver vindpark. Vi har imidlertid ved enkle teoretiske betraktninger og målinger sannsynliggjort at slike deteksjoner kan gjøres ved tilstrekkelig båndbredde og asimutoppløsning i radar, dersom radar er plassert i en gunstig avstand i forhold til parken.

I hypotese 2 hevdes det at det er et problem å skille mellom en deteksjon fra et mål og fra et vindturbinblad, dersom målet er i samme avstand og asimutcelle som turbinen. Når turbinblader skaper dopplerskiftede ekko observerte vi fra våre data at det er vanskelig å skille det fra ekko skapt av en UAV, slik de to ser ut i avstand-dopplerbilder. Som vist i figur 3.7 varierer det dopplerskiftede ekkoet fra vindturbinen både i relativ hastighet og utstrekning i avstand og doppler, etter hvordan turbinbladene roterer. For enkelte observasjonsvinduer og der det ikke oppstår folding av turbinblader, er det klare forskjeller i energinivå samt i utstrekning i avstand og doppler mellom ekkoet fra dopplerskiftede turbinblader og UAV. Et tilfelle der det er slike forskjeller kommer frem i figurene 3.9 og 3.11, der UAV og turbinblad kan skilles ut fra utstrekning i avstand, dersom en har båndbredde til å gjøre dette. I de samme figurene observerer vi at energinivået på turbinbladet er høyere enn UAV-en. Forskjellene er imidlertid ikke alltid så store, i tillegg er en avhengig av båndbredde og CPI for å få forskjellene frem. Basert kun på analyse av enkeltstående avstand-dopplerbilder vil det derfor alltid være tvil om en deteksjon er forårsaket av en UAV eller av turbinbladene. Dette styrker hypotese 2. Radar med klassifiseringsmulighet vil trolig kunne skille de to måltypene. Vi har identifisert flere teknikker som har ulike krav til teknologinivå i radar for å kunne skille UAV-er og vindturbinblader. Disse er gjengitt under.

I tidsdomenet: Vi har vist at teknologi som muliggjør overvåking av hver turbin, vil kunne finne tidsrom til deteksjon av mål uten bidrag fra turbinblader. Dette forutsetter at en ikke har for mange turbiner i hver (avstand, asimut og elevasjon) oppløsningcelle. Klassiske roterende overvåkningsradarer vil i liten grad kunne utnytte denne metoden.

I hastighetsdomenet: Metoden kan kun benyttes på mål som har en hastighet høyere enn ca. 100 m/s relativt til radar, og utelukker dermed saktegående UAV-er. Vi nevner likevel metoden, siden denne klassifiseringen vil utelukke turbinblader med høy konfidens. Mål som har en relativ hastighet høyere enn den maksimale tangentielle hastighet turbinbladene kan oppnå kan utelukkes som turbinblader, gitt at høy nok PRF kan brukes i radar. Med sanntidsinformasjon om turbinbladenes retning og rotasjonshastighet kan en potensielt lavere og mer korrekt øvre hastighet benyttes. Vi har vist at en slik PRF for typiske radarbånd forårsaker lav entydig avstandsmåling. For å nå utover noen ti-talls km rekkevidde kreves derfor dedikert økt PRF i områder rundt vindparken (dersom vindparken er innenfor entydig avstand) eller staggered PRF (veksling i PRF) for å løse ut ambiguitetene.

Vi testet økning av CPI i et tilfelle der UAV ble lagt til i samme avstand som en vindturbin, i et tidsvindu der turbinbladene forårsaket dopplerskift som ble foldet inn. Ved økning av CPI til 400 ms observerte vi at en saktegående liten UAV som hadde nær konstant relativ hastighet mot radar tydelig kunne observeres og vindturbinbladet ble lite synlig (dekorrelerte). Å øke CPI så mye vil gå på bekostning av radarens ressurser til overvåking av andre sektorer. Det er heller ikke gitt at en UAV øker sitt signalnivå over en periode på 400 ms dersom den har endring i hastighet og akselerasjon

som medfører migrasjon ut av avstand og dopplerceller. Klassisk roterende overvåkingsradar vil ikke ha mulighet for å øke CPI i dette omfanget.

Del to av hypotese 2 er derfor styrket ved at vi har demonstrert at UAV og turbinblad kan skilles eller klassifiseres.

Vi påpeker at det kan være et problem å skille saktegående mål fra statisk vindturbinclutter, som med alt annet statisk clutter. Vi har her kun undersøkt et mål med -10 m/s hastighet relativt til radar, siden vi anser det som lavt nok til å demonstrere utfordringene små saktegående UAV-er gir. Lite ville ha vært tilført resultatene ved å studere lavere eller høyere hastigheter annet enn å endre hastigheten hvor målet ville ha blitt maskert av hovedlobe eller sidelober fra turbinen, gitt bølgelengde, bølgeform, CPI og radartverrsnitt.

Det må vurderes om kostnaden ved å bruke mer avansert teknologi for å klassifisere er verdt det en vinner i en operativ sammenheng. For å detektere UAV-er inne i vindparker vil sannsynligvis den mest potente effekten i forhold til de økonomiske ressursene en bruker fås ved å ha høy båndbredde og fin asimutopløsning. Dette gir mulighet for å kunne fjerne vindturbinclutter akkurat der turbiner er plassert og vil øke graden av upåvirkede oppløsningceller for deteksjon av mål inne i vindparkene.

Referanser

- [1] P. Drake, "Overview of raytheon wind farm mitigation techniques and test results," in *CNS/ATM Conference*, June 2011.
- [2] F. Kong, Y. Zhang, and R. Palmer, *Radar Micro-Doppler Signature of Wind Turbines*. Radar, Sonar and Navigation Series 34, IET, 2014.
- [3] B. M. Kent, K. C. Hil, A. Buterbaugh, G. Zelinski, R. Hawley, L. Cravens, C. Vogel, T. Coveyou, *et al.*, "Dynamic radar cross section and radar doppler measurements of commercial general electric windmill power turbines part 1: Predicted and measured radar signatures," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 50, no. 2, pp. 211–219, 2008.
- [4] H. J. De Wind, K. H. Kloke, U. Böniger, and H. Pratisto, "Comparison of the recorded RCS and spectra of three different wind turbines on L-and S-band," in *IEEE Radar Conference*, IEEE, 2015.
- [5] K. Venkataraman, "Impact and Mitigation of Windfarm Interference to Surveillance Radar Systems," in *Military Radar Conference 2016*, Aug. 2016.
- [6] G. Høye, *FFI-Rapport 2007/00842: ELECTROMAGNETIC SHADOW EFFECTS BEHIND WIND TURBINES*. 2007.
- [7] <http://www.fornybar.no/vindkraft/teknologi#vind2.3>, besøkt 2017-08-29.
- [8] E. Aarholt and C. A. Jackson, "Wind farm gapfiller concept solution," in *European Radar Conference (EuRAD)*, IEEE, 2010.
- [9] M. A. Richards., *Principles of Modern Radar - Basic Principles*. Raleigh, NC.: SciTech Publishing., 2010.
- [10] B. Torvik, *Investigation of non-cooperative target recognition of small and slow moving air targets in modern air defence surveillance radar*. PhD thesis, University College London (UCL), 2016.
- [11] F. T. Ulaby, D. G. Long, W. J. Blackwell, C. Elachi, A. K. Fung, C. Ruf, K. Sarabandi, H. A. Zebker, and J. Van Zyl, *Microwave radar and radiometric remote sensing*, vol. 4. University of Michigan Press Ann Arbor, 2014.
- [12] B. Torvik, *FFI-Rapport 17/00669: Vurdering av K&V-radarenes evne til deteksjon og målfølgning av droner*. 2017.

A Ordliste

CPI	koherent prosesseringsintervall
FIR	finite-impulse-response
GPS	global positioning system
LFM	lineær frekvensmodulert bølgeform
PRF	puls-repetisjonsfrekvens
UAV	unmanned aerial vehicle

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.

FFIs 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.

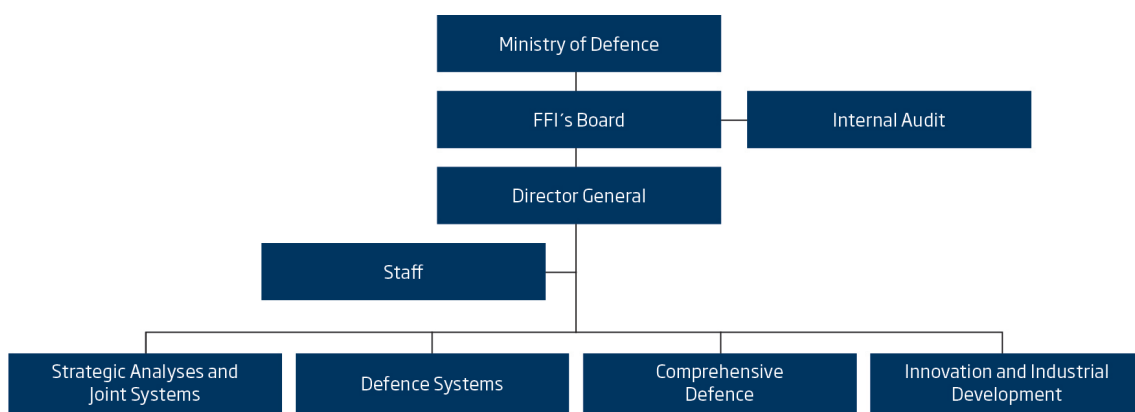
FFIs VISJON

FFI gjør kunnskap og ideer til et effektivt forsvar.

FFIs 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