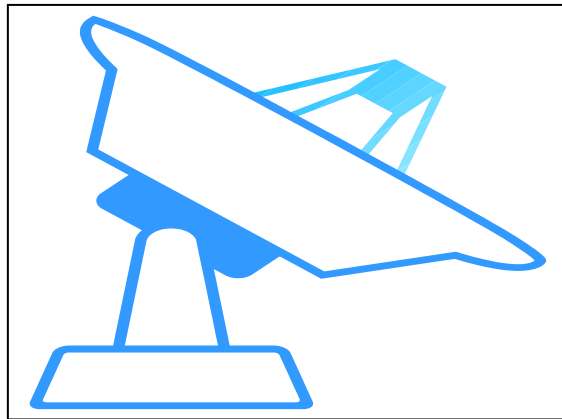


Vurdering av et konsept for mobil snørasradar: RasRad



SAMBA/05/04

Per Ove Husøy

Januar 2004

Tittel/Title:
Vurdering av et konsept for mobil snørasradar: RasRad

Dato/Date: 11 Jan
År/Year: 2004
Notat nr: SAMBA/05/04
Note no:

Forfatter/Author:
Per Ove Husøy

Sammendrag/Abstract:

Dette notatet presenterer resultatene av et forprosjekt utført på oppdrag for Vegdirektoratet. Prosjektets målsetning har vært å vurdere mulighetene for å realisere en mobil rasvarslingsradar for snøras.

Forprosjektet skulle vurdere de fysiske, måletekniske og markedsmessige aspektene ved konseptet, samt se på muligheten for å etablere en gruppering for å føre konseptet videre til et produkt.

En rasvarslingsradar for snøras må kunne detektere og varsle forskjellige typer snøskred med dertil hørende forskjellige radarrefleksjonsegenskaper. Dette gjøres grovt sett ved å bruke en såkalt Dopplerradar (egentlig en Interferometrisk radar), en radar som kan detektere endringer i fasen til det reflekterte signalet som skyldes snøens bevegelse.

For å kunne lage en god og billig radarsensor for å detektere snøras er det viktig forstå den dynamiske snøens radarrefleksjonsegenskaper. I notatet er det derfor samlet en del informasjon om snøens radaregenskaper. I hovedsak ser vi at våt snø har relativt dårlig tilbakespredning. Refleksjonene fra våt snø vil imidlertid typisk komme fra overflaten og derved ha en Doppler frekvens som er proporsjonal med rasets hastighet (projisert på radarens pekeretning). Dette er den tradisjonelle Dopplerradar hastighetsmåling. For områder med tørr snø har vi større tilbakespredning. Denne tilbakespredningen kommer imidlertid i stor grad fra bakken under snøen og ikke fra selve snøen. En enkel analyse av tilbakespredningen viser imidlertid at det med en moderat variasjon i snøhøyde og tetthet i raset vil rasets bevegelse skape en modulasjon (Doppler spredning) også i dette tilfellet. En kan derved detektere bevegelse med relativt lave radarfrekvenser som "ser gjennom snøen". På grunn av den nærmest eksponentielle økning i pris for å få høy effekt ved høy frekvens er dette et godt utgangspunkt for å lage en billig radar.

Emneord/Keywords: Snøras Dopplerradar Rasdeteksjon

Tilgjengelighet/Availability: Åpent

Prosjektnr./Project no.: 220200

Satsningsfelt/Research field: Bildeanalyse og mønstergjenkjenning

Antall sider/No. of pages: 53

Innhold

1	Sammendrag	3
2	Introduksjon	5
3	Målefysikk	6
3.1	Målinger mot snø	6
3.2	Radarrefleksjon	7
3.3	Dopplerspekter	8
4	Radarteknologi	9
5	Markedsmessige aspekter	10
5.1	Kundegrunnlag	10
5.2	Eksisterende produkter	10
5.2.1	AlpuG X-band radar	11
5.2.2	TU-Graz, Institut für Nachrichtentechnik PD radar	12
5.3	Utvikling og produksjonskostnader	13
5.4	Industrigruppering	13
5.5	Andre initiativer i Norge	14
5.5.1	Rasorientert radarutvikling	14
5.5.2	Generell radarutvikling	15
6	Diskusjon	16
6.1	Fysiske aspekter	16
6.2	Radar og implementasjonsmessige aspekter	16
6.3	Markedsmessige aspekter	18
7	Referanser	19
8	Appendiks	21
8.1	Målefysikk	21
8.1.2	Refleksjon fra tørr snø	25
8.1.3	Doppler Hastighetsmåling	30
8.1.4	Direkte og indirekte refleksjoner fra snø	30
8.1.5	Modulasjon av fase gjennom snø	31
8.1.6	Simulering av modulasjonseffekt	32
8.1.7	Refleksjon fra våt snø	35
8.1.8	Lokalisering og innretting av radar	36

8.1.9	Nedbør.....	40
8.1.10	Støybudsjett.....	41
8.1.11	Deteksjon av et ras	43
8.2	Radartyper.....	44
8.2.1	CW radar	44
8.2.2	Puls Dopplerradar	44
8.2.3	FMCW	46
8.2.4	Doppler Prosessering	48
8.2.5	Receiver Operating Characteristic	50
8.2.6	Antenne	51
8.3	Systembeskrivelse.....	52

1 Sammendrag

Dette notatet presenterer resultatene av et forprosjekt utført på oppdrag for Vegdirektoratet. Prosjektets målsetning har vært å vurdere mulighetene for å realisere en mobil rasvarslingsradar for snøras.

Forprosjektet skulle vurdere de fysiske, måletekniske og markedsmessige aspektene ved konseptet, samt se på muligheten for å etablere en gruppering for å føre konseptet videre til et produkt.

En rasvarslingsradar for snøras må kunne detektere og varsle forskjellige typer snøskred med dertil hørende forskjellige radarrefleksjonsegenskaper. Dette gjøres grovt sett ved å bruke en såkalt Dopplerradar (egentlig en Interferometrisk radar), en radar som kan detektere endringer i fasen til det reflekterte signalet som skyldes snøens bevegelse.

For å kunne lage en god og billig radarsensor for å detektere snøras er det viktig forstå den dynamiske snøens radarrefleksjonsegenskaper. I notatet er det derfor samlet en del informasjon om snøens radaregenskaper. I hovedsak ser vi at våt snø har relativt dårlig tilbakespredning. Refleksjonene fra våt snø vil imidlertid typisk komme fra overflaten og derved ha en Doppler frekvens som er proporsjonal med rasets hastighet (projisert på radarens pekeretning). Dette er den tradisjonelle Dopplerradar hastighetsmåling. For områder med tørr snø har vi større tilbakespredning. Denne tilbakespredningen kommer imidlertid i stor grad fra bakken under snøen og ikke fra selve snøen. En enkel analyse av tilbakespredningen viser imidlertid at det med en moderat variasjon i snøhøyde og tetthet i raset vil rasets bevegelse skape en modulasjon (Doppler spredning) også i dette tilfellet. En kan derved detektere bevegelse med relativt lave radarfrekvenser som "ser gjennom snøen". På grunn av den nærmest eksponentielle økning i pris for å få høy effekt ved høy frekvens er dette et godt utgangspunkt for å lage en billig radar.

Det finnes imidlertid relativt lite faktiske målinger av snøens dynamiske radarrefleksjonsegenskaper. Tidligere målinger har vært fokusert på snøens statiske refleksjonsegenskaper og skilte ofte ikke mellom effektene av selve snøen og effektene av den underliggende bakken. I nyere arbeider er både bedre målinger og bedre fysiske modeller for snøens elektriske egenskaper tatt i bruk for å bedre forstå og karakterisere disse fenomenene. Fremdeles er imidlertid de fleste av disse analysene og målingene gjort for statiske, eventuelt lagdelte snølag med lav overflateruhet, relativt høy tetthet og for lave til midlere innfallsvinkler.

Forprosjektet viser derfor et behov for å kjøre en konseptverifikasjonsfase der en gjennom kontrollerte målinger verifiserer at de forventede bidrag i snøens refleksjon og modulasjon er store nok til å detekteres. Det må også bestemmes hva slags utgangseffekt og støytall radaren må ha. Dette er spesielt viktig for store innfallsvinkler der det er spesielt lite eksisterende målinger.

At rasradaren er "interferometrisk" betyr at den vil kunne registrere langsomme faseendringer i tillegg til de hurtige endringene som er vanlige for en Dopplerradar.

Radaren vil derved kunne få et utvidet bruksområde som for eksempel overvåking av langsomme utglidninger i fjellskred og langsom oppbygging av snøfonner. Med tilleggsfunksjonalitet for tidsserieanalyse vil den også kunne registrere endringer i radarrefleksjoner som skyldes smelting og frysing av snø, og således være en nyttig sensor i et meteorologisk overvåkningssystem.

Eksisterende radarystemer som er beregnet på militær eller sivil overvåking er i utgangspunktet ikke tilpasset problemstillingen, men ville nok kunne modifiseres. De har imidlertid i utgangspunktet for høy pris. Eksisterende rasradarer har enten for lav ytelse, eller marginal ytelse kombinert med høy pris. Segmentet "billig, robust radar med god rekkevidde" for rasovervåking ansees derfor ikke dekket av eksisterende radarer.

Selv om markedet for en radarbasert rasvarsler er tilstede både nasjonalt og internasjonalt er det ikke enkelt å etablere økonomiske rammebetingelser som sikrer investeringsinteresse i utvikling av denne type teknologi. For videreføring av konseptet er det derfor viktig at den økonomiske og tekniske risiko minimaliseres. Dette foreslås gjort gjennom for eksempel å finansiere utviklingen ved å bruke offentlig støtte til utvikling (OFU), gjennom garanterte gjenkjøp (0-serie) samt gjennom brukerbetalt konseptverifisering.

Den foreslåtte konseptverifiseringfasen vil, med positivt resultat, redusere den tekniske risiko ved prosjektet, og vil gjøre det lettere å komme forbi en initiell investeringsvegring.

2 Introduksjon

Et ras beskrives i New Penguin Dictionary of Geology som "sudden, rapid movement of desegregated ice, snow, earth or rock down a slope". Ras, så forskjellig i karakter som snøras, jordras, stein og fjellskred har alle evnen til å ødelegge og til å ta liv. Ødeleggelsesevnen til ras er imidlertid ikke begrenset til de fysiske ødeleggelsene, kostnader til gjenoppbygging eller kostnader ved avbrudd eller forsinkelser i transport. Den psykiske belastning og stresset for dem som opplever en kontinuerlig trussel av denne typen er kanskje like viktig. En belastning som aksentueres av mangelen på effektiv overvåking og kontrolltiltak samt organisatoriske virkemidler for å håndtere eventuelle ras. Håndtering av rasrisiko er derfor en viktig samfunnsoppgave i mange områder.

Reduksjon av farene ved og effektene av ras kan oppnås på flere måter.

På lang sikt kan en analysere stedsavhengig fare for ras. Basert på analyser av landskapets form, lokale klimatiske forhold og rashistorikk sammen med modeller for rasutbredelse kan en identifisere farlige områder for bebyggelse og transportruter. Risiko analysene kan så brukes til å støtte offentlige reguleringsmyndigheter.

På mellomlang sikt kan en bruke rasvarsel som gir en områdespesifikk vurdering av faren for utløsning av ras. Basert på lokale værforhold og nær historie kan en lage daglige "rasvarsel" med ras-fare vurderinger som kan gjøres tilgjengelig for befolkningen.

På kort sikt, i såkalt "sanntid", kan deteksjon av selve raset i dag gjøres ved hjelp avforskjellige sensorer. Selv om en slik funksjonalitet av natur ikke gir meget stort tidsrom for handling vil det likevel kunne redusere konsekvensene av et ras.

Fokus for RasRad prosjektet er å utvikle en ras-sensor med sterke tidskrav til bruk i det siste "sanntids" regimet. En radar som kan brukes for å beskytte et arbeidslag under arbeid med å fjerne et ras som blokkerer veien. Ved å varsle når det eventuelt går nye ras oppe i fjellet vil radaren kunne gi mannskapet verdifulle sekunder for å komme seg ut av det truede området i tide.

En rasradar med disse egenskapene kan imidlertid også brukes i en statisk konfigurasjon, tilsvarende dagens meteorologiske målestasjoner, for å gi målinger til et system for rasprediksjon. I tillegg til å detektere ras hendelser, som kan kobles opp mot for eksempel værdata, vil sensoren også kunne brukes til å observere viktige snøparametre på (trygg) avstand. Det vil kunne være mulig å måle oppbyggingen av fonner, detektere endring i overflatefuktighet, tine- og frysesykluser etc. Informasjon samlet inn og bygget inn i et slikt system vil, med støtte i gode fysiske modeller, forbedre muligheten til både kort og langtids rasrisikovurdering og rasprediksjon.

Dette notatet vil beskrive og vurdere flere aspekter ved en slik radarsensor. De fysiske egenskapene ved ras som tillater målinger, radartekniske aspekter samt markedsaspekter.

3 Målefysikk

For å designe et system som skal detektere snøskred ved hjelp av radar må en etablere en oversikt over de fysiske refleksjons og transmisjonsegenskapene til snøen, både i ro og i bevegelse. I dette kapitlet, kalt målefysikk, presenteres derfor en del sentrale egenskaper ved snøens refleksjonsegenskaper. En mer detaljert gjennomgang med referanser er tatt med i Appendiks. I den analysen som er gjort, er verdiene som er vist for snøens refleksjonsegenskaper brukt som grunnlag for å foreslå radartype, indikere hva slags deteksjonsmetode som vil kunne brukes samt antyde nødvendige ytelsesparametre.

3.1 Målinger mot snø

Måling av snø og isparametre ved hjelp av fjernanalysemetoder er et voksende felt, der resultatene brukes innen områder så forskjellige som klimamodellering, meteorologi og kraftproduksjon. Observasjoner av snø og andre overflater utføres rutinemessig med både optiske satellitter og radarsatellitter. Passive optiske sensorer gir vanligvis informasjon om det øverste snølaget, mens aktive og passive sensorer i mikrobølgeområdet også gir informasjon om dypere lag.

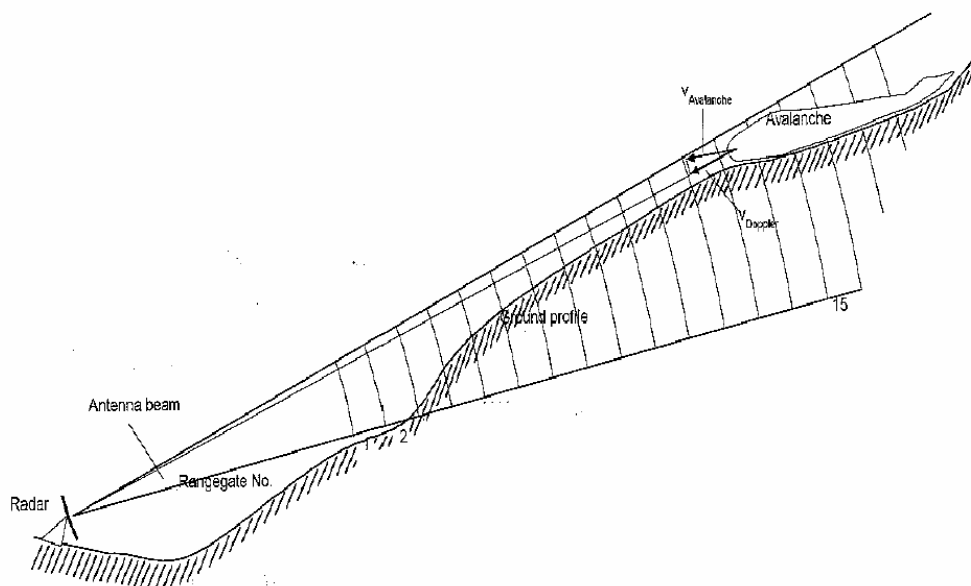
Refleksjonsegenskapene til områder som er dekket av snø og is har blitt gjenstand for mye forskning i mange år. Forskingen har vært både eksperimentell, ved å måle radartverrsnitt for snødekte områder, og teoretisk, gjennom utvikling av modeller og teorier for å beskrive observasjonene.

Tidlige målinger av snøflater ble stort sett gjort med lavoppløsning radar for å karakterisere tilbakespredningsegenskapene til statiske snødekte landskap. Slike målinger ble ofte gjort av forsvarsmessige årsaker, for å kunne karakterisere bakgrunnsreflektansen (clutter) i forhold til for eksempel bevegelige mål (fly). Disse målingene skilte ikke refleksjonene fra overflaten og snøvolumet fra bidragene til bakken under snøen. Sammenligninger av disse målingene med målinger tatt ved barmark gir ikke hele svaret med hensyn på snøens bidrag, siden refleksjonsegenskapene til bakken endrer seg når den er dekket av termisk isolerende snø.

Det finnes nyere målinger der dybdeprofilen til refleksjonene er målt ved hjelp av høyoppløsningsradar. Dybdeprofilen gir en indikasjon om kilden til refleksjonene, om det er overflate, volum eller bakken som bidrar mest. I arbeidet til (Strossi et al 1998) er det gjort grundige målinger for C (5 GHz) og Ka (35 GHz) frekvensbåndene. Arbeidet har også resultert i en samling snø signaturer for forskjellige innfallsvinkler og snøforhold som er tilgjengelige på internett. (Strossi at WWW)

Felles for disse målingene og andre nyere målinger er at de har fokus på lave til midlere innfallsvinkler ($< 70^\circ$) siden dette er typisk observasjonsvinkelområde for radar fjernmålingssatellitter. Målingene og simuleringene har også et fokus på uniforme, lagdelte overflater med relativt lite overflateruhet. Ingen av disse målingene tar for seg effektene av den instantane eller dynamiske struktur og tetthet som oppstår i et snøras.

For en mobil rasvarslingsradar vil vi typisk operere med en geometri som skissert i Figur 1. Radaren er her plassert i "bunnen av bakken", helst i nærheten av vei, og skal overvåke en fjellside for mulige snøras.



Figur 1 Rasradar målegeometri sett fra siden.

3.2 Radarrefleksjon

Snø er karakterisert av svært variable transmisjons og refleksjonsegenskaper avhengig av snøens vanninnhold. Generelt sett kan en si at tørr snø har gode transmisjonsegenskaper for radarbølger ganske høyt opp i frekvens. Dette gjør at snøen i stor grad er gjennomsiktig og slipper signalene gjennom til bakken og tilbake igjen uten særlig demping. Dette tilsvarer omtrent effekten av en vindusrute for vårt syn. Vi skulle derfor tro at det var umulig å observere denne snøen. Imidlertid viser analysen i Appendiks at når snøen beveger seg i forhold til de elementene som reflekterer radarbølgene vil vi kunne observere effekten. Dette kan sammenlignes med å ha en kraftig ruglete vindusrute som vi ser igjennom. Så lenge vi står stille ser vi ikke vinduet, men hvis vi begynner å bevege hodet vil vi få en oppfatning av det vi ser på andre siden av vinduet begynner å bevege seg og endre form. En slik endring vil kunne observeres av en radar.

For våt snø endrer både transmisjons- og refleksjonsegenskapene seg kraftig. Mye mer av energien vil nå absorberes i snøen. Imidlertid vil også mer av energien reflekteres tilbake fra overflaten enn det som er tilfellet for tørr snø. Siden den totale refleksjon for tørr snø er dominert av bakkerefleksjonene, vil likevel totalbildet være at våtsnøområder reflekterer mindre enn tørrsnøområder.

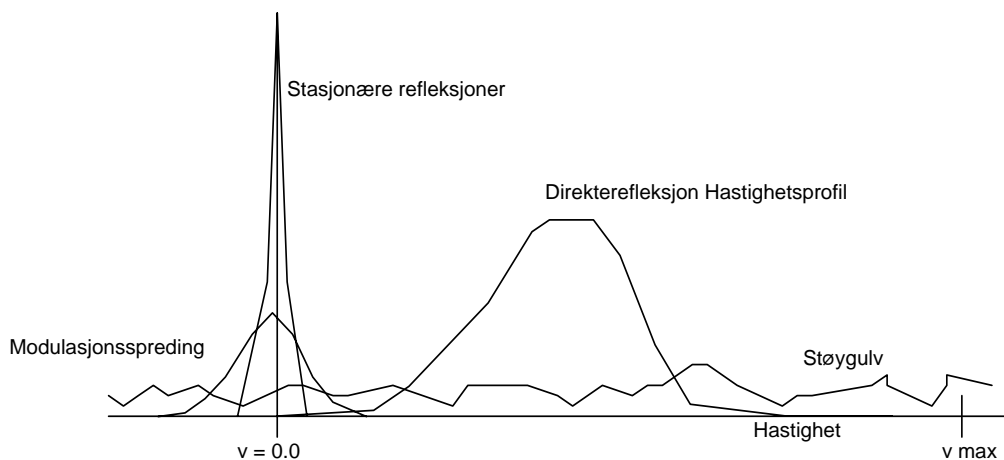
Refleksjonsevnen både for våt og tørr snø går ned når innfallsvinkelen til observasjonen øker. Reflektert energi kan derfor bli så liten, spesielt på stor avstand at vi får et måleteknisk problem. Dette vil sette krav til en radars utsendte effekt samt støyegenskaper.

3.3 Dopplerspekter

Et ras består av refleksjoner fra elementer med forskjellige hastigheter. Siden en bevegelse forårsaker en endring i det mottatte signalets fase som funksjon av tid, den såkalte Dopplerfrekvensen gitt av Dopplerligningen (1), vil vi kunne måle hastigheten.

$$f_d = \frac{2v \cos(\theta)}{\lambda} \quad (1)$$

Her er f_d målets Dopplerfrekvens, v målets hastighet, θ er vinkel mellom radarens observasjonsretning og målets bevegelsesretning og λ er radarens bølgelengde. Dopplerfrekvensen er da proporsjonal med målets hastighet v mot eller bort fra radaren. I tillegg fås, som vist i analysen i Appendiks, en modulasjon av statiske bakkerefleksjoner når snø med varierende transmisjonsegenskaper og tykkelse beveger seg over. Vi vil derfor få et Dopplerspekter som kvalitativt er vist i Figur 2.



Figur 2 Kvalitativ beskrivelse av Dopplerspekter for et snøskred.

I dette Dopplerspekteret er det indikert tre hovedkomponenter: En komponent med direktereflektert energi, altså det vi vanligvis forbinder med rasets Dopplerspekter på grunn av rasets transversale hastighetsprofil. En komponent som i figuren er kalt modulasjonsspredning fordi den oppstår ved en fasemodulasjon forårsaket av endring i snøens tykkelse eller tetthet når den beveger seg over et refleksjonspunkt. Denne komponenten vil være tilnærmet symmetrisk om null Doppler. I tillegg er det en stasjonær komponent fra alle stillestående refleksjoner utenom raset.

Av radartekniske årsaker vil det i en Dopplermåling alltid også være en støykomponent. Denne støykomponenten er i Figur 2 indikert med et uniformt støygulv.

Deteksjon av et ras går i korthet ut på å vurdere den energien som ligger utenfor området rundt null Doppler. Når denne energien i dette området har blitt så stor at det er usannsynlig at det skyldes støy alene, har en detektert en bevegelse i et område. Når området med bevegelse begynner å flytte seg (nedover) har en sannsynligvis et ras.

4 Radarteknologi

Det fins to hovedtyper radar: koherente og ikke-koherente. I koherente radarer brukes meget stabile oscillatorer slik at en kan sammenligne fasen til det mottatte signalet med fasen til det utsendte. Siden vi i rasapplikasjonen ønsker å skille mellom bevegelige og stasjonære mål er en koherent radar, ofte kalt en Dopplerradar nødvendig.

Av Dopplerradarer finnes det to hovedtyper: radarer med og uten avstandsopløsning. For vår rasapplikasjon anses det som viktig at en avstandsmessig kan plassere en observasjon av bevegelse. Dette er viktig både fordi det vil hjelpe å etablere et mer korrekt trusselbilde, det vil gjøre det mulig å se bort fra lokale forstyrrende elementer (for eksempel trær i bevegelse), samt gjøre det mulig å vurdere størrelsen på et ras.

Av radarer med avstandsopløsning er det to aktuelle teknologier som er vurdert. Puls Doppler (PD) og Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW). Begge teknologiene har sine sterke og svake sider. PD er relativt robust med hensyn til design og krav til komponenter. Den er imidlertid effiktmessig ueffektiv og blir raskt avhengig av dyr rørteknologi ved høyere effektbehov. FMCW på den annen side kan gi svært høy virkningsgrad og lav produksjonspris. Designmessig setter den imidlertid større krav til antennekonfigurasjon samt komponentegenskaper som fasestøy og linearitet. I Appendix finnes en mer detaljert sammenligning av egenskapene til disse teknologiene.

For videre designarbeid mot et radarprodukt vil FMCW være vårt førstevalg. Dette valget vil imidlertid være avhengig av at ikke målinger fra en konseptverifiseringsfase viser behov for svært stor utgangseffekt. Selve målingene i denne fasen kan imidlertid gjøres både med utstyr med FMCW og PD teknologi. Det er i forslaget til måleutrustning for konseptverifiseringsfasen tatt med alternativer fra begge typer radar.

5 Markedsmessige aspekter

5.1 Kundegrunnlag.

En mobil rasdeteksjonsradar for beskyttelse av ryddemannskap er et nisjeprodukt med relativt begrenset omsetningspotensiale. Selv ved å utnytte radaren til nærliggende oppgaver som statisk varsling og overvåking av kritiske vegsegmenter, overvåking av rasutsatt bebyggelse, jernbane samt overvåking av fjellskred og utglidninger, er nødvendig antall ganske begrenset. Estimer fra Vegdirektoratet har antydning et mulig behov for 20-30 enheter innen hvert segment. Dette estimatet, fra en ”mini markedsundersøkelse” var også basert på en antatt produktpris i området 200k.

Radaren vil også egne seg som forskningsradar i rassammenheng. Tallet på institusjoner som driver med denne typen forskning i Norge tilsier imidlertid et relativt begrenset kundegrunnlag her.

I tillegg til bruk som ras-detektor vil radaren, hvis den viser seg egnet, kunne brukes som en slags meteorologisk fjernmålingssensor. Både måletekniske aspekter og markedet her er imidlertid usikkert.

I tillegg til det norske markedet finnes det flere land med tilsvarende problemstilling med hensyn på snøras. Det ser ikke ut til at det finnes gode konkurrerende produkter på markedet innen denne nisjen. Sveits har for eksempel en stor satsing innen overvåking av rasutsatte områder, IMIS, med et hundretalls målestasjoner for meteorologiske data plassert på fjelltoppene. Det er ikke brukt radarsensorer her. I Alaska har jernbanen et eget skredprogram, Alaska Railroad Avalanche Program med fokus på overvåking av utsatte skredlokasjoner. De er i dag utrustet med varslingssystem og sensorer fra AlpuG i Sveits. En bedre radar sensor vil nok være interessant inn i et slikt system (se kommentarer i neste avsnitt om konkurrerende produkter).

Til tross for at behovet i Norge, målt i antall enheter er relativt begrenset er imidlertid nytteverdien av disse sensorene stor, både målt i økonomiske termer og i reduksjon i menneskelig lidelse.

5.2 Eksisterende produkter

Det er i dag et par eksisterende radarprodukter innen dette markedet. Den ene radaren er en CW radar som selges av AlpuG i Sveits. AlpuG er et lite konsulentselskap som utvikler og selger komplette rasvarslingssystemer. En presentasjon av systemet er gjort i (Gubler 2000). Selskapet har flere typer sensorer for måling av vær og rasparametre. I sitt system bruker AlpuG en egenutviklet X-bånd CW Dopplerradar for rasdeteksjon. Denne opererer intermittent for å spare energi, men har ikke avstandsopløsning. Rekkevidden og ytelsen generelt er begrenset, men prisen er gunstig: Størrelsesorden 50 k.

Den manglende avstandsopløsningen er et kraftig handicap for å kunne lage sikker rasdeteksjon. En vil da ikke kunne kompensere for det kraftige fallet i målt refleksjon

på grunn av avstandsøkning. En vil heller ikke kunne velge å se bort fra lokale områder med bevegelse, for eksempel trær i bevegelse. Den minste detekterbare hastighet, 5 m/s er også ganske høy. Kriterier for hvor stort raset må være for å bli detektert på 500 m avstand er ikke definert. Systemet har relativt lav utgangseffekt, sannsynligvis for å kunne operere på solcellebasert strømforsyning.

5.2.1 AlpuG X-band radar

Parameter	Verdi
Frekvens	10 GHz
Antenne Forsterkning	20 dB, en antenne
Modulasjonsform	Umodulert CW
Utgangseffekt	50 mW.
Hastighetsområde	5-70 m/s
Rekkevidde	500 m (?)
Pris	50 000 NKr



Figur 3 AlpuG Dopplerradar på toppen av målesøyle (i sylinder)

5.2.2 TU-Graz, Institut für Nachrichtentechnik PD radar

Technische Universitet Graz har også utviklet to Dopplerradar for skredmåling. Disse opererer henholdsvis på 5 GHz og 35 GHz, har en oppløsning på ca 50 m meter og en utsendt effekt på ca 5 watt (spisseeffekt for ny versjon). Det virker ikke som om produktet er kommersialisert i særlig grad, men er mulig å få kjøpt for i overkant av 0.8 mill. Radarene er brukt i noe forskjellige sammenhenger med tilhørende forskjellige krav til antenne. Blant annet har de brukt kommersielt tilgjengelige kommunikasjonsantenner (parabol) med relativt smal åpningsvinkel for observasjoner på større avstand. Hovedanvendelsesområdet for radaren ser ut til å være i forskningssammenheng for å måle rasparametre.

Parameter	Verdi
Frekvens	5GHz, 35 GHz
Antenne Forsterkning	Skreddersydd
Modulasjonsform	Pulset 0.3-2.0 μ s
Utgangseffekt	1 (5 W) p, 15-90 mW eff
prf	50 KHz
Midling i Doppler retning	8 pulser
Effektiv max vel (-3 dB)	41 m/s
Nærmeste avstand	45 m
Max rekkevidde	3000 m
Pris	> 800 000 NKr

I forsvarssammenheng finnes det radarer som brukes for å overvåke landområder og detektere bevegelse av personell og kjøretøy. Disse radarene finnes i to hovedgrupper: Små bærbare CW Dopplerradarer med meget lav uteffekt og noe større radarer med avstandsopløsning og høyere utgangseffekt. Disse radarene er prismessig og robusthetsmessig preget av militære spesifikasjoner. Stykkpriser ligger i området noen hundre tusen for de minste til 1.5-2.5 mill for de større.

5.3 Utvikling og produksjonskostnader

Kostnaden med utvikling og produksjon av en ny rasradar er avhengig av de nødvendige radartekniske krav. For relativt små produksjonsvolum, som det raskt dreier seg om her, vil typisk utviklingskostnadene bli dominerende. Ut fra erfaring fra tilsvarende radarutviklingsprosjekter blir det av NORBIT i Trondheim antydnet en størrelse på ca 2-3 millioner for en slik oppgave. Dette er i tilfelle et fullfinansiert utviklingsprosjekt som resulterer i en produksjonstilpasset enhet.

Produksjonskostnadene pr enhet i serieproduksjon er antydnet å være i området 50 000 NKr. Dette gjelder for en FMCW type radar i C-bånd med bruk av overflatemonterte komponenter og mikrostripteologi. Innebygde kretser for digital signalbehandling (FPGA) er mulig for reduksjon av behovet for eksterne moduler. Ekstreme krav til miljøsikring av boksen vil imidlertid kunne øke prisen en del.

5.4 Industrigruppering

I starten av prosjektet var det intensjonen å gjennomføre dette kundefinansierte forprosjektet for så å trekke inn industripartnere. Tanken var da å finansiere det videre arbeidet med bidrag fra industrideltakerne i bytte mot eierandeler av konseptet, eventuelt også med eksterne investorer. Denne strategien har vist seg vanskelig å

gjennomføre. Felles for de fleste, men spesielt de mindre radarselskapene er at de har relativt klart definerte nisjer for satsingen og et ganske kraftig fokus på denne nisjen. Selv om de rent radarteknisk og ellers kompetansemessig ville kunne bidra konstruktivt i en utviklingen av et slikt produkt, er deres økonomiske situasjon som regel slik at de ikke kan påta seg nye kostnader utenfor hovedsatsingsområdet. I tillegg er oftest markedsapparatet deres fokusert på deres eksisterende markedssegment. Å skulle etablere en ny produktlinje ville derfor medføre ugifter til oppbygging av segmentet rent markedsmessig.

Til tross for noe forsiktige mottakelsen fra radarindustrien (som var markedsmessig basert), har det etter hvert blitt knyttet kontakter som er interessert i konseptet og som har muligheter til å kunne bidra ressursmessig og kompetansemessig til konseptutviklingen. Ericsson og 3D radar i Trondheim har erklært interesse for deltakelse i et videre samarbeid på RasRad konseptet. En slik deltakelse er likevel betinget av at det kan lages en finansieringsstruktur som reduserer deltakernes økonomiske risiko.

Siden disse kontaktene først ble knyttet sent i forprosjektet, etter at en tidligere potensiell industripartner trakk seg, har det ikke vært tid til å få et endelig svar på hvor tungt de er villige til å satse. Ericsson har imidlertid sagt seg villig til å bruke sitt apparat til å vurdere markedsmulighetene for produkt. Avhengig av tilbakemeldingene fra denne vurderingen vil de gå mer inn på detaljene i de økonomiske og eiermessige rammebetingelsene. Foreløpig har begge partene stilt opp med bidrag i form av gratis tid til å gi innspill til utarbeidelsen av dette notatet. 3-D radar har i tillegg også gitt et tilbud på ombygging av deres testradar slik at denne kan brukes i en konseptverifiseringsfase.

5.5 Andre initiativer i Norge

Det er også andre initiativer i gang i Norge.

5.5.1 Rasorientert radarutvikling

Innen grupperingen International Centre of Geohazards (ICG) har NGI, NGU og NORSAR et prosjekt på bruk av bakkebasert Interferometrisk Syntetisk Aperture Radar for måling av utglidning av fjell. Dette er en radar som typisk beveges langs en rett bjelke for å kunne lage en syntetisk ekvivalent av en stor radarantenne med dertil hørende høy romlige oppløsning. En får derved en inndeling også i asimut retning i tillegg til avstandsopløsningen og kan derved påvise hvilke delområder i scenen som faktisk forflytter seg. Dette er et radarsystem med høy ytelse og, som er kostbart som totalsystem. Selve radardelen av dette systemet vil imidlertid kunne ha mye felles med en stasjonær rasradar. Utviklingsarbeidet på denne radaren er så vidt startet opp.

NGI har i tillegg et arbeid på en FMCW radar til bruk for nedgraving i en rastrasée. Denne radaren er en form for omvendt bakkeradar, og skal brukes til å måle rasets egenskaper i vertikal retning. NGI har også et samarbeid med TU-GRAZ på modifikasjon av deres PD radar. Detaljer om dette arbeidet er ikke kjent.

IKTsystems i Moss er et nytt konsulentfirma innen radar. For tiden holder de på med et oppdrag for fylkesgeologen i Møre og Romsdal der de tester bruk av stasjonær interferometrisk radar for å detektere fjellglidning. Den teknologien de bruker for disse målingene (stepped frekvens) er ikke anvendbar mot dynamiske ras. I kommunikasjon med IKTsystems er det heller ikke antydning noen umiddelbare planer om serieproduksjon av denne type sensor.

5.5.2 Generell radarutvikling

ERICSSON Radar er en internasjonal aktør innen radar, som har utviklet flere avanserte radarsystemer. Blant disse er Giraff, en avansert luftforsvarsradar montert på en høy kran, og Artur, en meget avansert prosjekttilsøkeradar som er i bruk i det norske forsvar.

MIROS lokalisert i Asker har tidligere vært involvert i et georadarprosjekt for måling på snø. For tiden har de fokus på maritim sektor med deres hovedprodukt: en bølgeradar.

SINTEF har på konsulentbasis vært deltaker i flere radarprosjekter gjennom de senere år. Det vites ikke hvorvidt de er involvert i noe snø eller rasrelatert for tiden.

3D-RADAR i Trondheim er et relativt nystartet firma i Trondheim som arbeider med en egenutviklet 3-dimensjonalt avbildene bakkeradar. De er nært tilknyttet NTNU og SINTEF miljøet i Trondheim.

NORBIT er et Trondhjemsbasert selskap som driver med mikrobølgedesign og produksjon. De har lang erfaring fra RF design generelt og radarrelatert FMCW design fra C og X bånd spesielt. De har tidligere vært med på større satsinger blant annet i forbindelse med utvikling av en forsvarsradar. NORBIT har også vist interesse for RasRad konseptet, men opererer normalt kun med fullfinansierte prosjekter.

6 Diskusjon

Formålet med forprosjektet har vært å vurdere muligheten for å realisere en radarbasert rasvarslingssensor. I notatet er det presentert vurderinger og analyser som skal hjelpe å identifisere usikkerheter i et slikt prosjekt. Analysene og vurderingene er fokusert på tre hovedområder: Fysiske aspekter ved målingene, radar og implementasjonstekniske aspekter samt markedsmessige aspekter. Innen hvert hovedområde er det identifisert elementer forbundet med større eller mindre grad av usikkerhet. Vi foreslår her alternativer til å håndtere disse usikkerhetene i tillegg til å indikere områder der en har flere parallelle alternativer.

6.1 Fysiske aspekter

Det er i hovedsak to usikkerheter forbundet med de fysiske eller måletekniske siden.

- Er det mulig å plassere radaren slik at den vil kunne se et ras?
- Vil raset kunne detekteres hvis det er synlig for radaren?

For å svare på det første spørsmålet, synlighet av raset, er det gjort geometriske analyser av plasseringsmuligheter ved to rastraséer, Ryggfønn og Nupen. Analysene viste at det for disse var mulig å plassere radaren slik at tildels store deler av rastraseen var synlig. I testplasseringene ble sensoren forsøkt holdt så nært dalbunnen som mulig, basert på et ønske om nærhet til veien som antas å ligge der. Rent måleteknisk vil plasseringer lenger borte, eller enda bedre, et stykke oppover fjellsiden på andre siden av dalen, gi gunstigere observasjonsvinkel. Vurdering av plassering av radaren med hensyn på dekningsområde kan, spesielt for kritiske lokasjoner gjøres visuelt på forhånd, eller også ved hjelp av terrengmodeller og analyse av radarsignalene. Det siste kan gjøres selv i dårlig vær. Ved å bruke radaren som bevegelsessensor kan en også "gå opp" rastraseen og se hvilke områder som faktisk synes.

Svaret på det andre spørsmålet, om raset vil kunne detekteres, er positivt. Selv om refleksjonsevnen til snø i bevegelse og for høye innfallsvinkler er ganske dårlig dokumentert i litteraturen, så indikerer ekstrapolering fra eksisterende stasjonære målinger at problemet er løsbart. Selv for tørr snø, som er ganske gjennomiktig for lavfrekvent radar, vil det bli spredning av refleksjonsenergien i Dopplerspekteret. Denne spredningen av energien i frekvens er, i det minste i prinsippet, detekterbar. For våt snø er refleksjonen fra snøen liten. Dette stiller krav til radarens følsomhet. Dette problemet er imidlertid mest et kostnad og implementasjonsmessig spørsmål: om en for en akseptabel pris kan lage en radar som har godt nok signal til støyforhold til å kunne registrere forskjellen.

6.2 Radar og implementasjonsmessige aspekter

Det er i den foregående analyse vist at signalet fra selve raset skiller seg fra de stasjonære refleksjonene i Doppler domenet. Hvorvidt det er mulig å detektere denne forskjellen er i hovedsak avhengig radarens støyegenskaper, eller for å detaljere noe,

radarens utsendte effekt i forhold til det totale støybidrag. For Puls Doppler teknologi kan en, ved å øke effekten, detektere signaler i termisk støy selv for meget svake refleksjoner. Spørsmålet er derfor ikke om en vil kunne detektere raset, men mer om hva som er den billigste og mest tjenlige teknologien for å gjøre det. Vår oppfatning er at FMCW basert på halvlederteknologi prismessig og driftsmessig er å foretrekke. Hvis behovet for utsendt effekt blir for stort, på grunn av ekstremt svake refleksjoner fra raset, vil det imidlertid kunne være vanskelig å håndtere i et FMCW system. I så tilfelle vil en i stedet velge pulset teknologi. Det kritiske parameter her er altså områdets reflektans.

Måling og uttesting av reflektansen samt karakterisering av Doppler spredningen kan og bør gjøres i en konseptverifikasjonsfase. Dette kan gjøres med vilkårlig valg av PD eller FMCW system. Så lenge avstanden til raset kan justeres slik at reflektert signal blir stort nok og kan karakteriseres.

Ved å gå opp i frekvens for radaren vil tilbakespredningen fra snøen øke. Ved å gå opp fra 5.5 til 14 GHz vil en øke reflektansen med 6-7 dB for våt snø. For tørr snø, som er nærmest gjennomsiktig ved 5.5 GHz, vil en begynne å få en økning i overflate og volumspredning. Totalt sett vil en derfor få mer energi ut på sidene i Dopplerspekteret og altså en lettere deteksjonsoppgave i forhold til termisk støy. Den høyere frekvensen er imidlertid vanskeligere og dyrere å håndtere teknisk. Dette gjelder spesielt halvlederbasert teknologi og høye effekter. For FMCW vil også kravene til oscillatorenes fasestøyegenskaper øke. I tillegg vil en høyere frekvens også gjøre radaren vanskeligere å bruke til applikasjoner som interferometrisk snødybdemåling (fordi denne er avhengig av å se gjennom snøen og til bakken). Vi vil derfor anbefale å teste ut konseptet for lavfrekvens (5GHz) i første omgang. Resultatene fra disse forsøkene vil fortelle oss om vi bør gå videre med 5GHz FMCW teknologi.

6.3 Markedsmessige aspekter

Det eksisterer i dag ikke noe robust og billig radar med god ytelse for rasvarsling. Det finnes i utlandet enkelte aktører som arbeider med denne typen sensorer, men de har enten for lav ytelse (AlpuG) eller er tenkt for forskningsformål. (TU-Graz). Innen forsvarsområdet finnes det radarer der de tekniske egenskapene ville oppfylle behovene, men der prisen gjør dem uinteressante for rasvarsling. I tillegg til høy pris ville de også kreve modifikasjoner for å brukes innen dette spesielle området.

Markedspotensialet for en rasvarslingsradar er imidlertid ikke stort i antall enheter. Avskrivning av utviklingskostnader vil derfor måtte gjøres på et relativt lite antall. I en uformell vurdering fra kunden, ved en prisantydning på 200 000 per sensor, ble det anslått et tall på mindre enn 30 enheter innen det mobile rasvarslingssegmentet. Selv ved å inkludere stasjonær bruk av diverse slag lå forventet totalantall på mindre enn 60-70 enheter. Med utviklingskostnader estimert i området 3 mill fordelt på 60 enheter fås et stykktillegg på 50000 kr i utvikling. Dette kommer i tillegg til produksjonskostnader i samme størrelsesorden. Marginene for utvikling og produksjon av slike systemer blir derved relativt små, spesielt siden det ikke er noen garanti for faktisk å få solgt det forventede antallet. Offentlige innkjøp har i lignende situasjoner vist seg å være noe usikre. Ved å gå ut internasjonalt vi dog størrelsen på markedet øke betraktelig. Det er derfor en ganske god "upside".

Totalt sett er imidlertid forholdet mellom investeringene til utvikling og mulig fortjeneste ved salg såpass små at industrien vegrer seg for å bære denne usikkerheten. For å redusere usikkerheten til et nivå som gjør det interessant for industrien vil det være behov for rimelig grad av offentlig støtte til utviklingsfasen, eventuelt med gode garantier for salg.

Hvis vi ser på de samfunnsøkonomiske aspektene, vil bruk av en slik sensor kunne være svært økonomisk. Hvis vi legger til grunn samme kostnadsnivå som ved trafikkulykker vil selv ett eneste liv reddet spare samfunnet for et beløp i størrelsesorden det utviklingen av radaren koster. Utvikling av en rasradar burde derfor være en meget interessant kandidat for offentlig støtte. Både vil investeringen til egen bruk være lønnsom, i form av reduserte kostnader ved ulykker samt høyere effektivitet i gjenåpning av viktige transportruter, men også siden det faktisk utvikles et internasjonalt salgbart produkt.

Det anbefales derfor at det, ved et positivt resultat fra konseptverifiseringsfasen, arbeides videre med en løsning for delvis offentlig finansiering av et utviklingsprosjekt. Dette kan for eksempel være et OFU prosjekt med en industrikonstellasjon bestående av NR, ERICSSON og 3_D Radar.

7 Referanser

Nghiem S V, Tsai W Y, Global Snow Cover Monitoring With Spaceborne Ku-band Scatterometer, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol 39, No 10, October 2001

Mätzler C., Potential of microwave remote sensing for assessing critical snow properties, Natural Hazards Workshop, Igls, Austria, 5-7 June 2000

Fortin R, and Fortier R. 2001. Tomographic Imaging of a Snowpack, Proceedings of the 58'th Eastern Snow Conference, Ottawa, Ontario Canada.

Strozzi T, Matzler C, Backscattering Measurements of Alpine Snowcovers at 5.3 and 35 GHz. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol 36, No3, May 1998

Kendra J.R., Sarabandi K., Ulaby F.T., Radar Measurements of Snow: Experiments and Analysis, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol 36, No 3, May 1998.

Guneriussen T, Høgda K A, Johnsen H, Lauknes I, InSAR for Estimation of Changes in Snow Water Equivalent of Dry Snow, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, No 10., October 2001

Gunneriussen T, Johnsen H., Lauknes I., Radarsat, ERS and EMISAR data for snow monitoring in mountainous areas, CEOS SAR Workshop, Toulouse 26-27 October, 1999.

Rice R, Decker R, Jensen N, Patterson R, Singer S, Sullivan C, Wells L, Avalanche hazard reduction for transportation corridors using real-time detection and alarms, Cold Regions Science and Technology 34(1): 31-42 February 2002. <http://www.sicop.net/ANNALS-PAPER%20TOTAL.pdf>

Gubler H, Five Years Experience with Avalanche-, Mudflow- and Rockfall- Alarm Systems in Switzerland., Proceedings ISSW 2000.

Gubler H, Remote Avalanche Warning-, Alarm-, and Control Systems, Fundamentals, Applications and Experience. http://www.avalanche.org/~issw/96/art_37_.html

Skolnik M I, Radar Handbook, McGraw Hill, 1970.

Strozzi T., A. Wiesmann, C. Mätzler

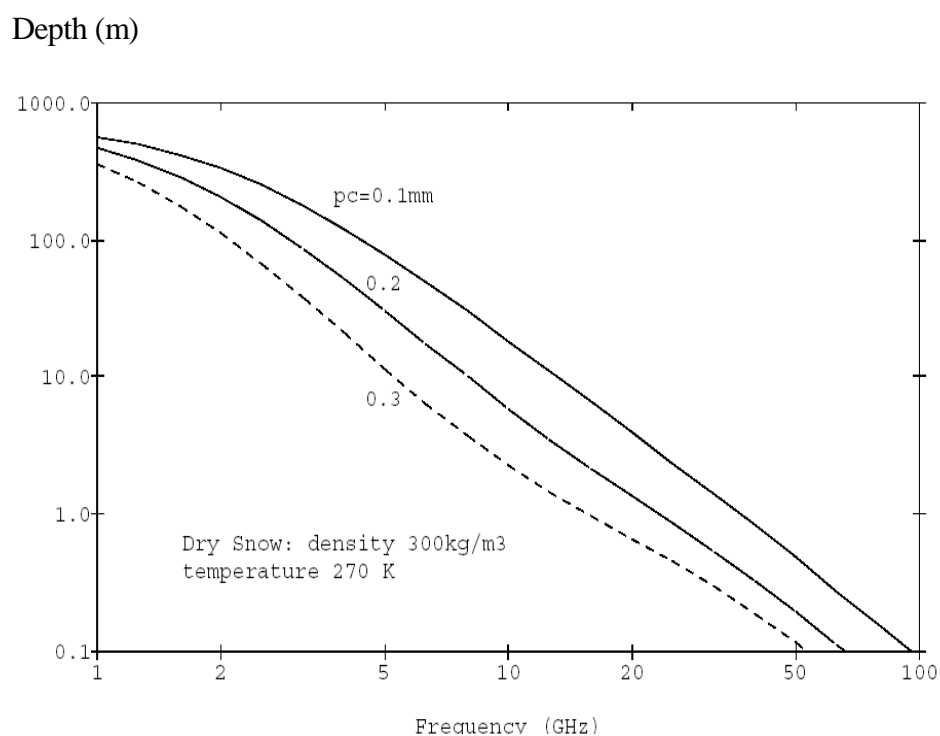
<http://www.iapmw.unibe.ch/research/projects/snowtools/201/signacat/signca06.doc>

8 Appendiks

8.1 Målefysikk

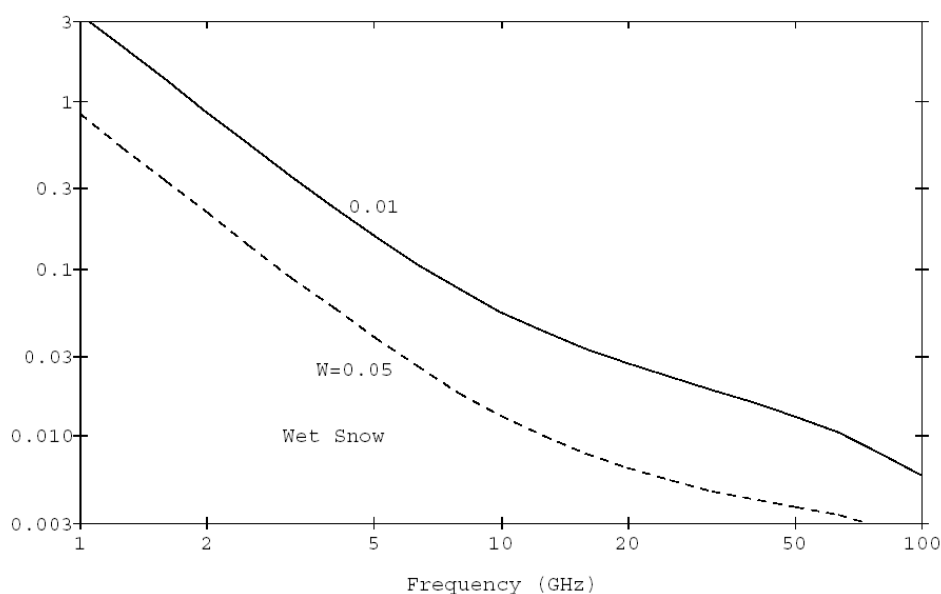
Snø, som transmisjonsmedium, endrer kraftig karakter som funksjon av snøens tilstand. Tørr snø vil, selv for ganske høye frekvenser, være nærmest transparent for radarsignaler. Det vil oppleves omtrent som et klart vindu for vårt syn. I Figur 4 tatt fra (Mätzler 2000) ser vi penetrasjonsdybden som funksjon av frekvens for tørr snø ved forskjellig kornstørrelse (benevnt p_c i figuren). For C bånd, altså i området 5 GHz, ser vi at penetreringsdybden er fra ti til flere titalls meter. Dette betyr at radarsignalene går stort sett udempet gjennom snølaget og blir reflektert fra den underliggende bakken.

For våt snø er penetrasjonsdybden vesentlig mindre, se Figur 5. Dette skyldes både økt absorpsjon og refleksjon. Den delen av radarsignalet som blir reflektert vil her hovedsaklig komme fra den øverste delen av snølaget. Hoveddelen av signalet vil imidlertid bli absorbert nedover i snøen.



Figur 4 Penetreringsdybde for tørr snø som funksjon av frekvens.

Depth (m)



Figur 5 Penetreringsdybde for våt snø som funksjon av frekvens.

8.1.1.1 Radartverrsnitt

Måling av et objekt på bakken er avhengig av at nok energi reflekteres tilbake til radaren. Hvor mye som reflekteres tilbake bestemmes blant annet av gjenstandens radartverrsnitt σ (Sigma) hvis enhet er areal. For de fleste geometrier er ikke radartverrsnittet lik det synlige arealet, men er definert som det synlige arealet av en perfekt ledende kule med den samme refleksjonsstyrken som objektet.

Hvis refleksjonene er distribuerte, for eksempel refleksjon fra bakken, brukes ofte en verdi for radartverrsnitt per areal σ_0 (Sigma Nought) til å karakterisere egenskapen. σ_0 er et dimensjonsløst forhold mellom radartverrsnittet til et område delt på arealet av området på bakken og oppgis ofte i *dB*.

For å få synlig areal av bakken i en retning gitt av innfallsvinkelen må en normalisere med cosinus til innfallsvinkelen, eller ekvivalent, med sinus til den korresponderende markvinkelen ψ (eng Grazing angle). Hvis vi normaliserer σ_0 slik, får man en mer (men slett ikke helt) aspektuavhengig konstant γ (Gamma).

$$\gamma = \sigma^0 / \sin(\psi) \quad (2)$$

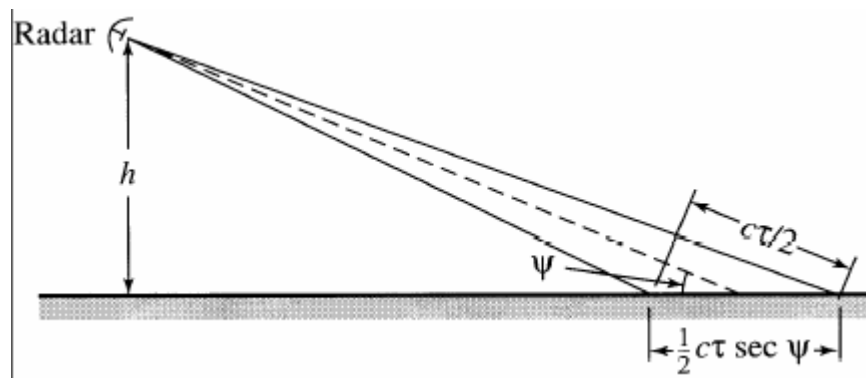
Radartverrsnittet til området på bakken er avgrenset av avstandscellen i lengderetning og antenne beambredden i sideretningen er da gitt ved

$$\sigma = \sigma^0 A_c = \sigma^0 R \theta_a \left(\frac{c\tau}{2} \right) \sec(\psi) = \gamma \sin(\psi) R \theta_a \left(\frac{c\tau}{2} \right) \sec(\psi) = \gamma A_{proj} \quad (3)$$

Her er A_c bakkearealet av clutter, R er avtanden ut til cellen, θ_a er antennens azimut bredde, $\sec(\psi)$ korrigerer for økningen av avstandscellen på bakken i lengderetningen

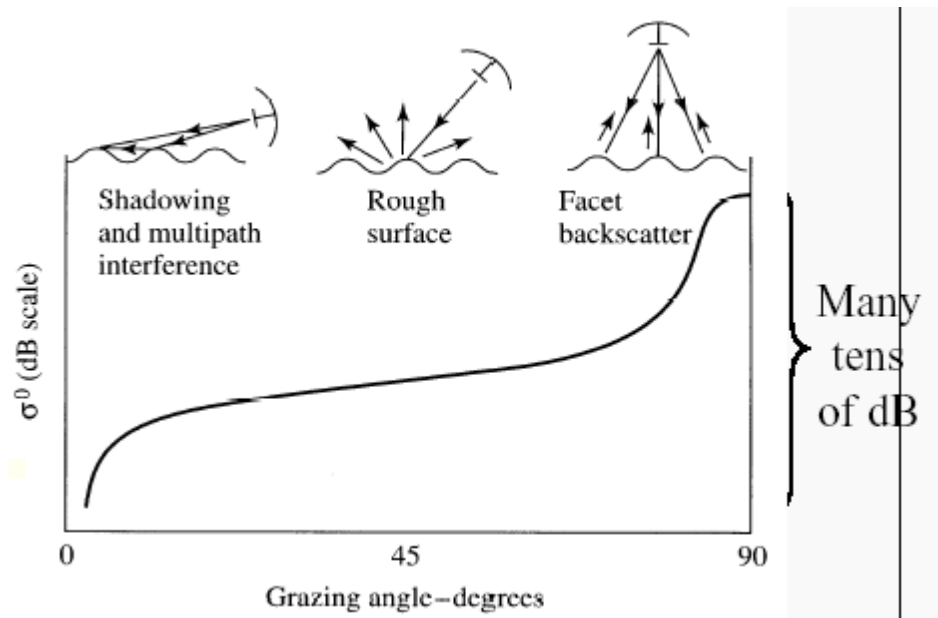
på grunn av markvinkelen ψ . Uttrykket i parentes, $\left(\frac{c\tau}{2}\right)$ er radarens avstandscellestørrelse i meter. Se Figur 6. En annen måte å se uttrykket på er som produktet av γ og projisert bakkeareal vinkelrett på radarens pekeretning A_{proj} .

Målinger av refleksjonsegenskaper fra et landskap, som i de følgende figurer, er oftest representert ved en av de over beskrevne relative refleksjonsverdiene σ_0 eller γ . Ut fra disse verdiene, samt radarens antennebredde, radarens avstandscellestørrelse og utstrålt effekt, kan en så beregne mottatt energi i radaren fra dette området.



Figur 6 Observasjonsgeometri for radar sett fra siden.

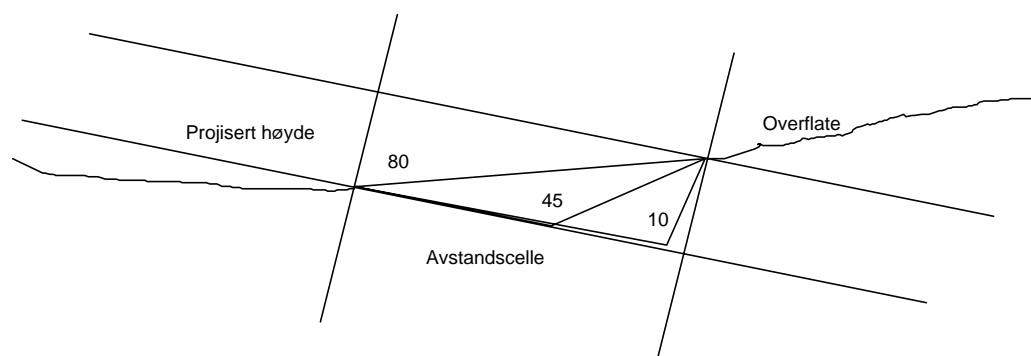
En generell trend er at tilbakespredningen fra en naturlig overflate blir svakere jo mindre markvinkel observasjonen gjøres fra. Se Figur 7. Noe av denne effekten skyldes naturlig nok reduksjonen av projisert areal, men selv normalisert for dette, altså γ , vil ofte tilbakespredningen minke med minkende markvinkel



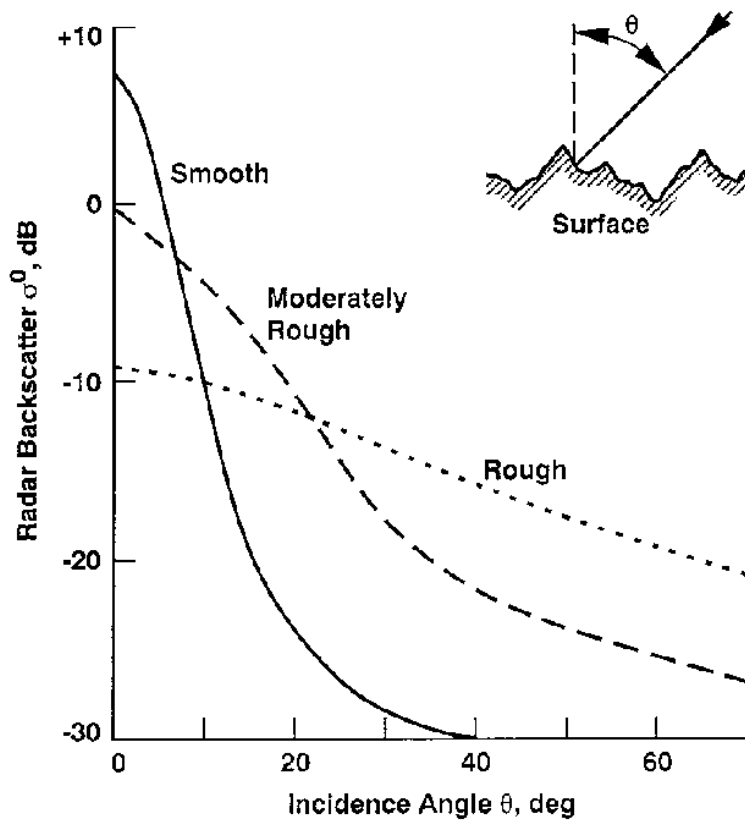
Figur 7 Generell trend for sigma null som funksjon av markvinkel (Grazing angle).

Hvor mye tilbakespredningen reduseres ved lave markvinkler er avhengig av ruheten til overflaten. Se Figur 9. For røe overflater får en vesentlig mindre reduksjon enn for jevne overflater. Når det gjelder tilbakespredning fra snøras, vil nok den instantane ruheten ligge godt over verdiene for et stasjonært snødekket landskap, og en vil derfor forvente et mer moderat fall i γ for lave markvinkler enn de fleste målinger fra stasjonære snølandskap indikerer.

At γ varierer med innfallsvinkelen, og er større ved lave innfallsvinkler, betyr at selv om projisert areal er det samme for to områder vil det område som har størst variasjon i overflatenormal få størst total σ . Dette er illustrert i Figur 8. Vi ser her tre overflateformer. Én er karakterisert av en kontinuerlig stigning, de to andre av forskjellig trinn-oppførsel. Alle tre har samme projiserte areal i retning radaren, men radartverrsnittet vil, med for eksempel γ som målt i Figur 13, ha radartverrsnitt σ som varierer sterkt. For de angitte vinkler faktisk med forholdet 0.032, 0.1 og 3.2 m² ved 10 meters bredde (rasbredde) for innfallsvinklene 80, 45 og 10 grader respektivt. Selv om 10 grader innfallsvinkel nok er noe ekstremt siden et ras vil ha problemer med å følge en slik kontur, ser vi likevel at det er stor forskjell i refleksjon bare ved små variasjoner i landskapets overflate på stor skala.



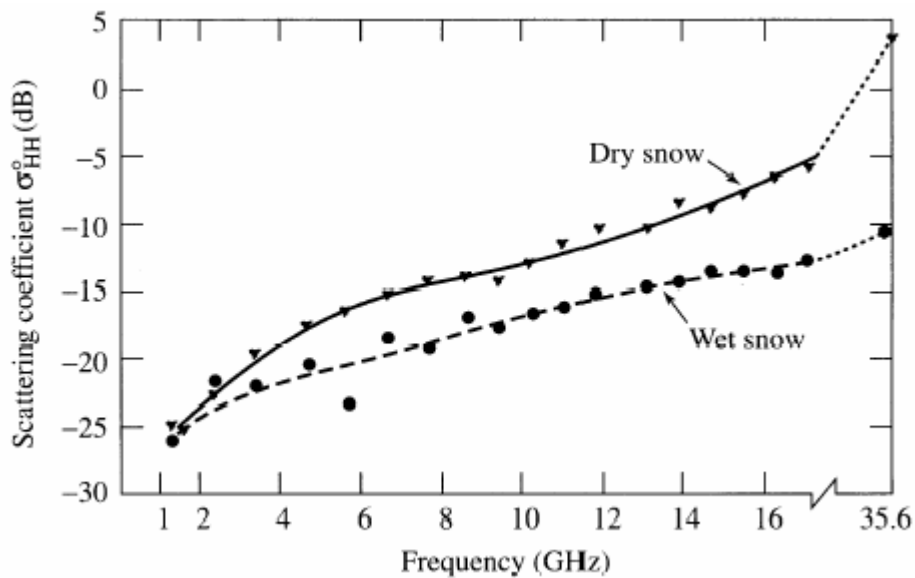
Figur 8 Overflater med med samme projisert areal innen en avstandscelle men med forskjellig fordeling av subarealenes orientering.



Figur 9 Generell trend for tilbakespredning som funksjon av innfallsvinkel for forskjellig grad av overflateruhet.

8.1.2 Refleksjon fra tørr snø

Generelt er tilbakespredningen fra områder dekket av tørr snø lavere enn for de samme områdene med våt snø. Se Figur 10. Denne forskjellen brukes gjerne til å detektere snøens smeltesone med radar.



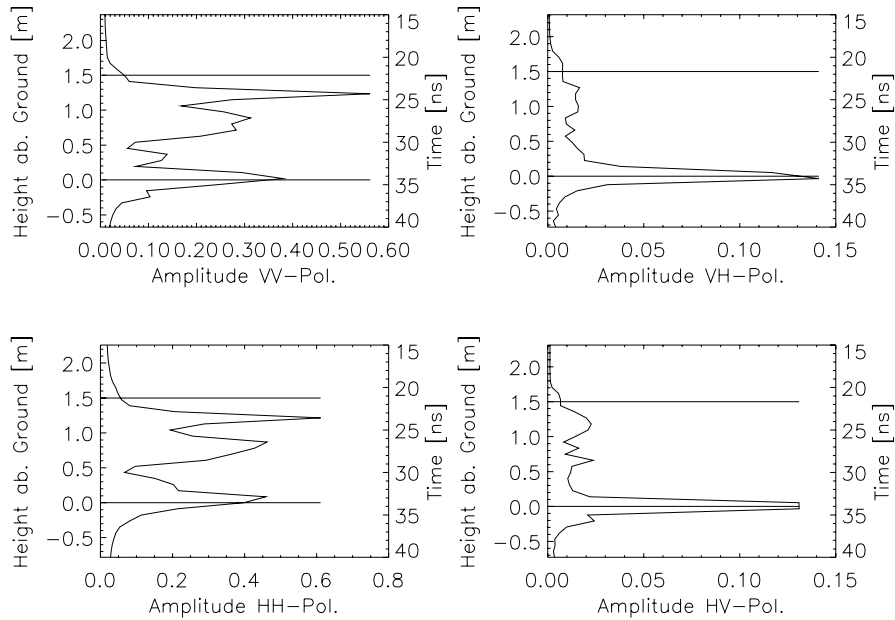
Figur 10 Sigma null for snø ved forskjellige frekvenser.

Flere publikasjoner indikerer at for tørr snø er tilbakespredningen dominert av refleksjoner fra overgangen mellom snø og barmark, og at volumrefleksjonene er små. Se for eksempel (Guneriussen et al 2001) og referanser der. Dette bildet er imidlertid ikke entydig. For store innfallsvinkler, altså når radaren ser nesten parallelt med bakken, vil tilbakespredningen fra bakken gå ned og volumrefleksjon kan faktisk begynne å dominere. (Guneriussen et al 1999). Her er også volumrefleksjonene sagt å være bare 2-3 dB lavere enn refleksjonene fra barmarken under. Disse verdiene for volum-refleksjon er også konsistente med data og analyse i (Kendra 1998) der kontrollerte forsøk er gjort med kunstig snø og kjent bakkerefleksjon. Kendra kommenterer også "tidligere påstander" om at tørr snø ikke er observerbar i X bånd (10 GHz) og refererer til nyere målinger som indikerer det motsatte.

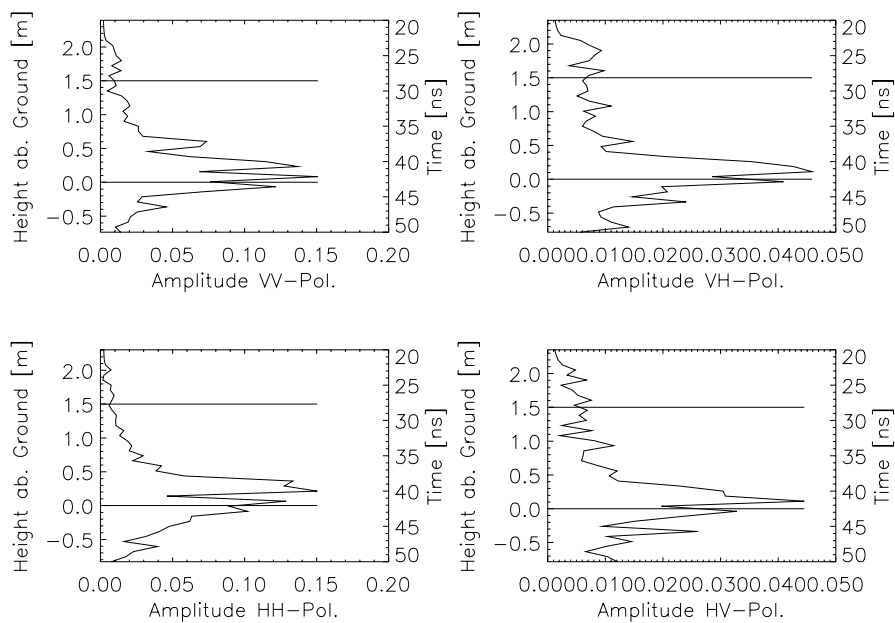
Noen av problemene med disse målingene er nok at kvantitativ måling av tilbakespredning for snø i forhold til barmark er vanskelig når barmarkens refleksjonsegenskaper endres av det isolerende snølaget over. I målingene, som i (Strozzi et al WWW) er presentert i en egen signaturkatalog, er imidlertid refleksjonspunktene identifiserbare. Følgende eksempel, Se Figur 11, er tatt fra Strozzi og viser målinger fra Weissfluhjoch. Bakgrunnsdata med hensyn på snøens lagdeling, temperatur tetthet og vanninnhold er her grundig dokumentert. I figurene representerer den horisontale linjen med 0.0 langs y-aksen bakkenivået, mens det som ligger over er snø. Refleksjonenes styrke øker med utslag mot høyre i figurene. Figurene til venstre viser ko-polariserte målinger (samme polarisasjon ved sending og mottak) mens høyre siden viser verdiene for krysspolarisasjon (motsatt polarisering for sending og mottak). VV står for Vertical Vertical, eller at det sendes med vertikal polarisasjon og mottas med vertikal.

Vi ser klart at både volum og overflaterrefleksjoner er tilstede. For krysspolariserte opptak, der det sendes og mottas henholdsvis på horisontal og vertikal polarisasjon, er imidlertid bakkerefleksjonen dominerende. Spesielt gjelder dette for lave

innfallsvinkler. Viktig er også den store forskjellen i signalstyrke. Ko-polarisert er mye kraftigere enn kryss polarisert. I Figur 12, som er tatt med høyere innfallsvinkel, ser vi at totalrefleksjonen som forventet har gått ned. I tillegg ser en også, kanskje i strid med forventningene, at forholdet mellom volumrefleksjonene og bakkerefleksjonene faktisk har gått ned.



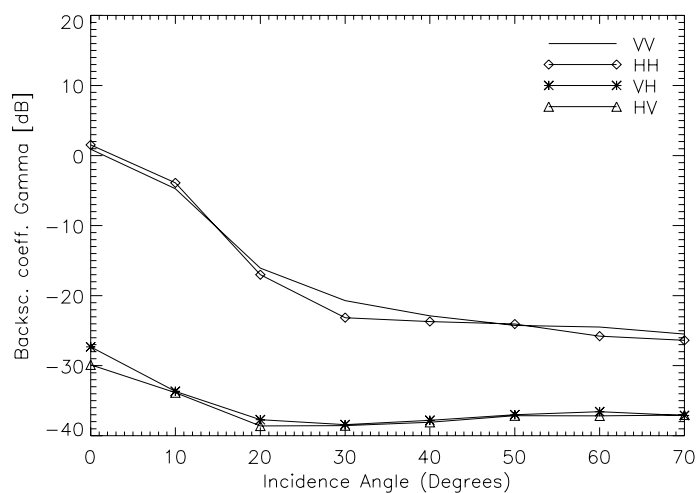
Figur 11 Avstandsprofiler for tørt snølag tatt med C-bånd høyopløsningsradar med 10 graders innfallsvinkel.



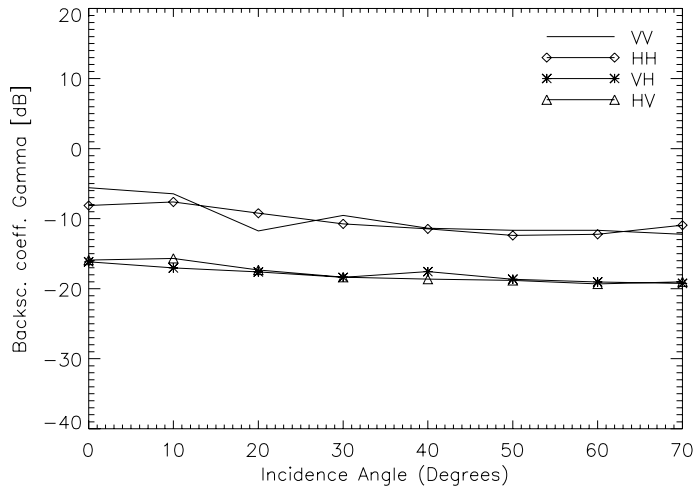
Figur 12 Avstandsprofiler for tørt snølag tatt med C-bånd høyoppløsningsradar med 40 graders innfallsvinkel.

Når strukturen og morfologien til snøen begynne å bli i den samme romlige størrelsesorden som bølgelengden, altså for høyere frekvenser, vil volum og overflatespredning bli mer fremtredende.

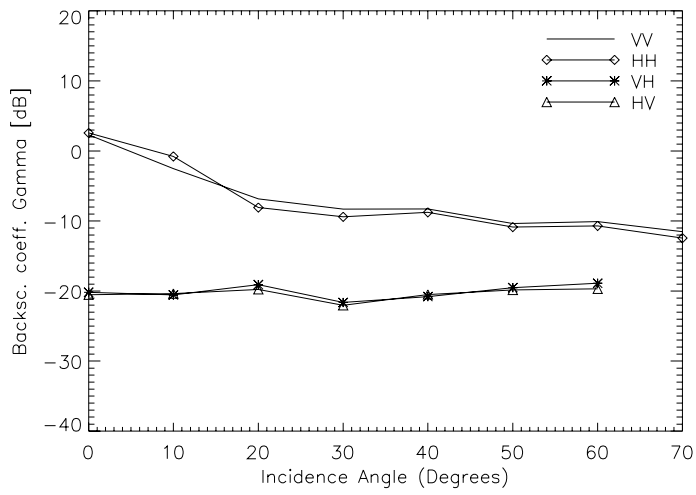
I de følgende figurene, Figur 13 til Figur 16, er den totale tilbakespredning γ (integrert over y-aksen i de forrige figurene) vist for våt og tørr snø og for henholdsvis 5 GHz og 35 GHz. Vi ser i disse eksemplene en klart høyere tilbakespredning for 35 GHz enn for 5 GHz radaren. Spesielt er forskjellen stor ved våt snø og for høy innfallsvinkel. Forskjellen går opp mot 12-14 dB ved 70°. Dette betyr at for samme Signal til Støy forhold må en radar ha 12-14 dB høyere utgangseffekt i 5 GHz enn i 35GHz båndet. I Figur 13 ser vi at γ går ned mot -25 til -30 dB for våt snø og høye innfallsvinkler. Selv om disse ekstremt lave verdiene nok skyldes at overflaten er svært lite ru, og at våt snø i et ras nok vil ha større γ , så er det nok likevel våt snø som er dimensjonerende for refleksjonsstyrken i 5 GHz båndet. Sett isolert ville vi nok ut fra disse figurene valgt å bruke 35 GHz båndet for vår ras. Dette er imidlertid også et teknikkavhengig kostnadsspørsmål. Prisen for å få høy utgangseffekt i lave frekvensbånd er vesentlig lavere en for høye frekvenser. I tillegg er det andre radartekniske problemer med høye frekvenser. Det er imidlertid ikke sikkert at en ville trengt å gå helt opp i 35 GHz for å høste en rimelig god gevinst. Enkelte publikasjoner indikerer at hovedøkningen i refleksjon nås allerede ved 12-14 GHz. Dette er også i bra samsvar med Figur 10.



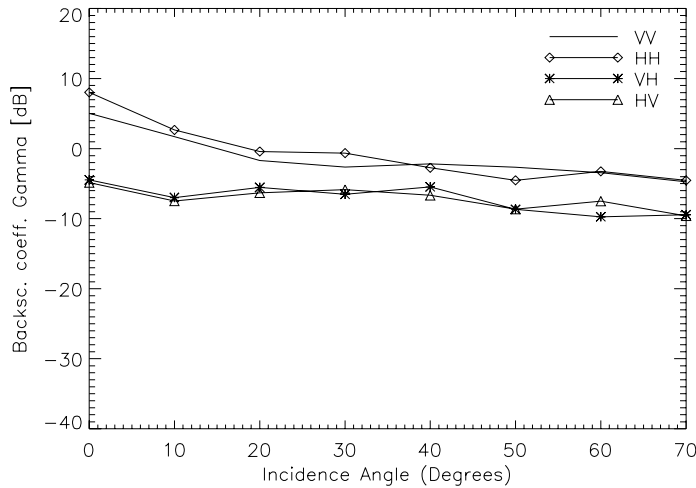
Figur 13 Gamma for våt snø ved 5 GHz.



Figur 14 Gamma for våt snø ved 35 GHz



Figur 15 Gamma for tørr snø ved 5 GHz



Figur 16 Gamma for tørr snø ved 35 GHz.

8.1.3 Doppler Hastighetsmåling

Når et radar pulstog reflekteres fra et objekt i bevegelse mot radaren, vil refleksjonens fase mellom hver puls endre seg proporsjonalt med den tilbakelagte avstand i tidsintervallet. En konstant faseendring per tidsenhet refereres oftest til som en frekvens. Den frekvensen som observeres ved en slik radarmåling kalles Doppler frekvensen og er grunnlaget for Doppler hastighetsmåling. Det er lett å tenke seg et snøskred som sammensatt av en mengde små refleksjonspunkter med konstant hastighet, noen på overflaten (overflaterrefleksjoner) og andre lenger ned i snøen (volumrefleksjoner). Det målte radarsignalets spekter vil da bestå av en sum av slike Dopplerfrekvenser

$$f_D = \frac{2v \cos(\theta)}{\lambda} \quad (4)$$

der θ er vinkelen mellom radarens pekeretning og bevegelsesretningen, og λ er radarens bølgelengde.

8.1.4 Direkte og indirekte refleksjoner fra snø

Når bakken eller også elementer i snøvolumet reflekterer radarsignalet vil også de reflekterte signalene igjen kunne reflekteres. I disse indirekte refleksjonene er det den totale endringen i gangavstand som gir faseskiftet og altså ikke lenger bare hastigheten til et objekt projisert på retningen til radaren. Dette vil kunne koble radarmålingen mot bevegelser i andre retninger enn mot radaren og derved endre (spre) Doppler spekteret fra en rasmåling. Nå er det oftest en rimelig antakelse at disse høyereordens refleksjonene er neglisjerbare, og at de direkte overflate, volum og bakkerefleksjonene er dominerende. I så tilfelle ville vi forvente at vi har målinger der energien i Doppler spekteret til en stor grad indikerer mengden av snømassen med

den gitte hastighet. Imidlertid er det andre effekter enn direkte refleksjoner som påvirker Doppler spekteret.

8.1.5 Modulasjon av fase gjennom snø

I de tilfellene der snøen stort sett er transparent for radarbølgene vil likevel radarsignalet påvirkes av å gå gjennom mediet. For radiosignaler som går gjennom et medium med en annen dielektrisitetskonstant ϵ , vil hastigheten til signalet gå ned. For tørr snø med massetetthet i området 0-0.5 g/cm³ vil vi ha følgende tilnærming (Fortin 2001)

$$\epsilon = 2.0\rho + 1 \quad (5)$$

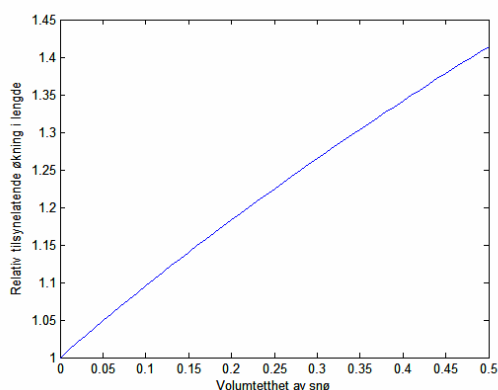
der ρ er mediets volumtetthet og ϵ er realdelen av dielektrisitetskonstanten (realdelen til ϵ gir lyshastigheten i mediet, kjent fra beregning av brytningsindeks, mens imaginærdelen gir størrelsen på tap eller absorpsjon av innkommende energi).

Hastigheten til radiobølgene i mediet er gitt av

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (6)$$

der c er lyshastigheten i vakum.

Denne endringen i hastighet gir en tilsynelatende endring i gangavstand som funksjon av snøtetthet som gitt i Figur 17. For en snø med volumtetthet på 0.25 og tykkelse på 1 meter vil tilsynelatende dybde være 1.25 m. Nå vil ikke en slik endring i refleksjonsavstand være registrerbar med en tradisjonell lavoppløsnings radar. Men når vi måler fasen til det mottatte signalet, slik som i en Dopplerradar, er det klart at en endring i snøtykkelsen eller i volumtettheten, og derved ϵ , til snøen over et reflekterende lag vil ha en klar effekt på fasen.



Figur 17 Relativ økning i gangavstand som funksjon av snøens volumtetthet.

I et tørrsnøras der den underliggende bakken gir det største bidraget til radarrefleksjonen, vil dette signalet bli fasemodulert av den kontinuerlig endrende tykkelsen og tettheten til skredet som passerer. Selve radarrefleksjonens styrke for

hvert lite element av bakkekomponenten, vil være tilnærmet konstant og være bestemt av bakkens refleksjonsegenskaper. Summen av slike komponenter etter en faseforskyving gjennom en lokalt endrende ekvivalente tykkelse, vil imidlertid ikke gi en konstant signalstyrke. Vi vil få både en amplitude og fasemodulasjon som resultat av de lokale fasemoduleringene.

8.1.6 Simulering av modulasjonseffekt

I det følgende har vi simulert effekten av et snøskred med tørr snø over en reflekterende bakke. Det er her antatt at volum og overflatereflasespredning er neglisjerbare.

Modulasjonen av tilbakespredningen skyldes i hovedsak endring i snøens effektive massetetthet $\rho(R)$ der R er posisjonen langs rasets bevegelsesretning, samt endring i snøens tykkelse $h(R)$. For en gitt avstandsopløsningscelle modellerer vi bakkens tilbakespredning som et konstant (ikke tidsvariabelt) sett av refleksjonspunkter i med gaussisk fordelt intensitet a_i og uniformt fordelt fase ϕ_i . Disse refleksjonspunktene vil hele tiden befinne seg i samme oppløsningscelle siden bakken er stasjonær.

$$x_i = a_i e^{j\phi_i} \quad (7)$$

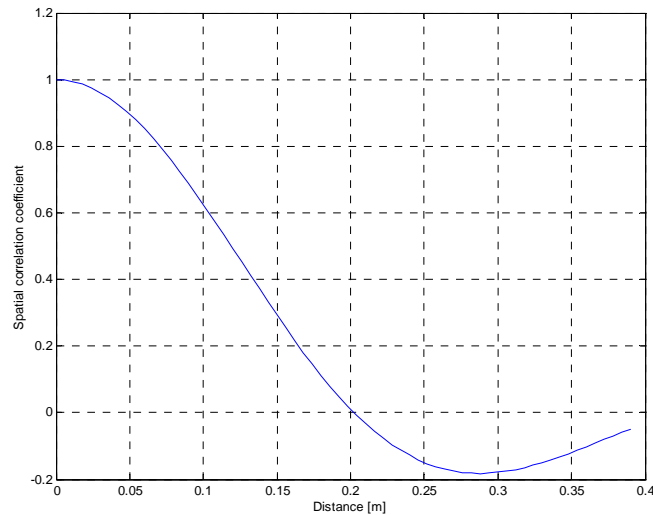
Snøen, med romlig avhengig effektiv snøtetthet og høyde antas å ”gli” over de stasjonære bakkerefleksjonspunktene med hastighet v . Fasemodulasjonen til signalet x_i fra ett av de stasjonære bakkerefleksjonspunktene er da gitt ved

$$\theta_i(t) = \frac{4\pi h_i(vt)(\sqrt{2\rho_i(vt)+1}-1)}{\lambda} \quad (8)$$

der snøhøyden h og snøtettheten ρ er avhengige av tiden t via rasets bevegelseshastighet v . Det totale bidraget i oppløsningscellen er summen av slike bidrag.

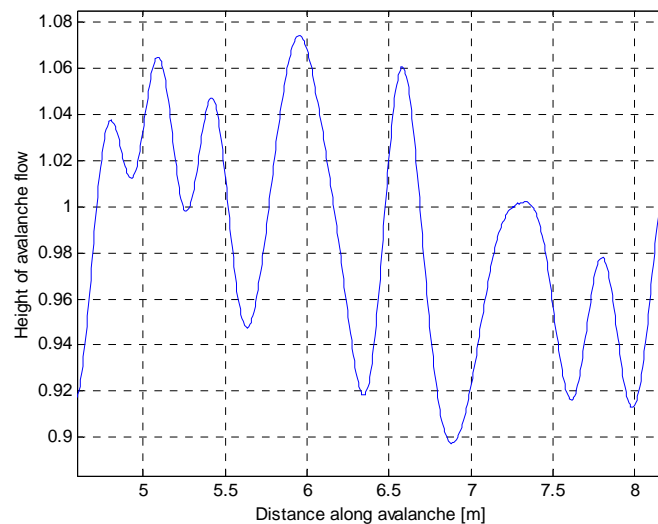
$$s(t) = \sum_n a_i e^{j\phi_i} e^{j\theta_i(t)} \quad (9)$$

Snøens høyde og volumtetthet modellerer vi som en enkel romlig korrelert gaussisk fordelt funksjon med korrelasjonsavstand på 0,2 meter. Denne lages ved å lavpassfiltrere sampler fra en gaussisk fordelt hvit sekvens og skalere. Autokorrelasjonen for sekvensen er vist i Figur 18.



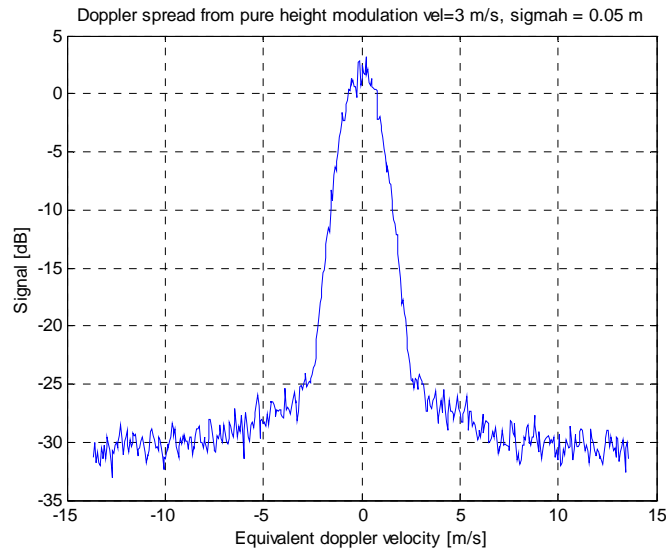
Figur 18 Romlig korrelasjonsfunksjon for simulert snøhøyde og volumtetthet.

En typisk utsnitt av en snøhøydeprofil generert fra modellen med standardavvik på 0,05 m og romlig korrelasjon på 0,2 meter er vist i Figur 19.



Figur 19 Simulert snøhøyde som funksjon av avstand til radar. Midlere høyde på 1 meter er brukt.

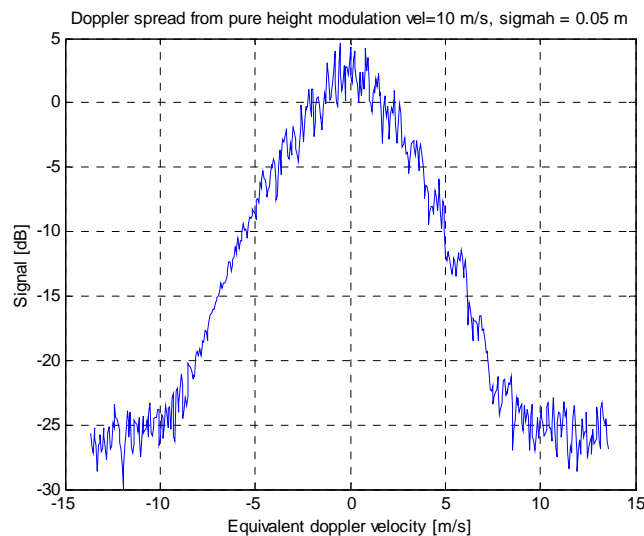
Ved en hastighet på 3 m/s og en oppløsningscellestørrelse på 10 m vil fasemodulasjonen av de stasjonære bakkerefleksjonene forårsaket av endringen av snøtykkelsen gi en effektiv Dopplerspredning som vist i Figur 20.



Figur 20 Dopplerspekter forårsaket av fasemodulasjon av bakkerefleksjoner.

Tilsvarende spektral bredde og form fås med en standardavvik på 0.05 i relativ volumtetthet ρ rundt volumtettheten $\rho=0.2$.

For en høyere rashastighet vil den spektrale bredden øke. I Figur 21 har vi plottet responsen ved en rashastighet på 10 m/s.



Figur 21 Dopplerspekter forårsaket av fasemodulasjon av bakkerefleksjoner

Bredden av Dopplersignalet skaleres både med rasets hastighet, variasjonen i snøens volumtetthet og størrelsen på endringen i rasets høyde (egentlig transmisjonslengde). Vi ser fra simuleringene at selv for moderat tetthet og høydevariasjon vil Doppler spredningen være signifikant, og faktisk gi en bredde som er en stor fraksjon av det simulerte rasets hastighet.

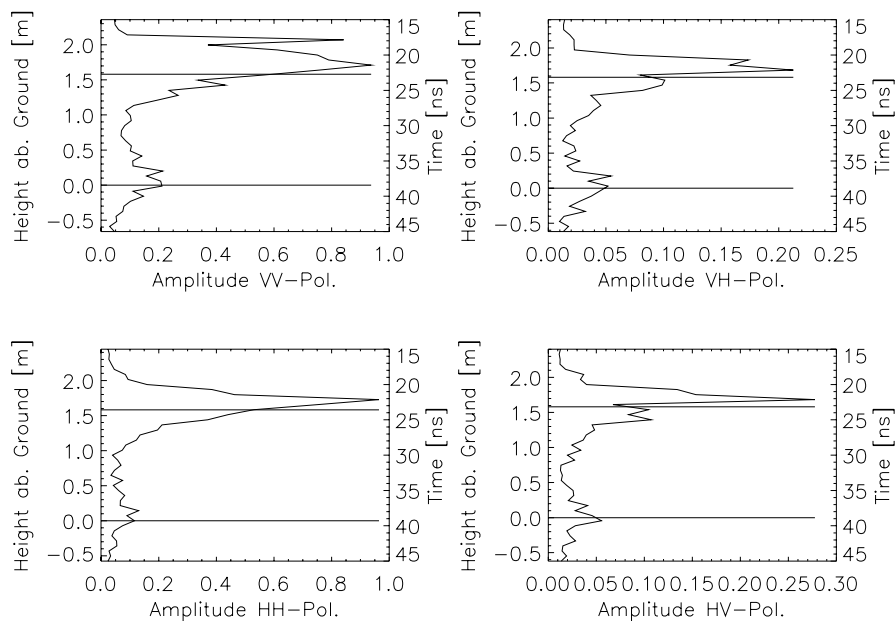
En interessant egenskap ved denne typen modulert bakkerefleksjon er at Dopplerspekteret er tilnærmet symmetrisk om null Doppler. Dette er til forskjell fra ren volum eller overflaterefleksjon der en typisk vil ha en ikke-symmetrisk, kanskje til og med ensidig positiv Dopplerspredning (bortsett fra eventuelle turbulenser som vil kunne gjøre at refleksjonspunktene faktisk får negativ hastighet).

I de tilfellene der raset graver seg ned og begynner å flytte på de reflekterende barmarkselementene vil vi øke modulasjonsbredden ytterligere. En vil da både få rene Dopplerbidrag fra hastigheten til de elementene som rives med (volumspredning), samt bidrag som skyldes endringen i de statiske bakgrunnsrefleksjonene.

En noe problematisk effekt av denne typen modulasjonsbasert Doppler kan oppstå hvis snøen (snøskya) i raset får stor høyde. For eksempel vil en med en høy puddersky som dekker refleksjoner som ligger langt bak selve skyen kunne oppleve at modulasjonsendringen registreres i en avstand som er tilnærmet lik avstanden til de bakenforliggende refleksjonspunktene og ikke der selve snøskya befinner seg. Hvis det ikke befinner seg refleksjonspunkter bak snøskya, vil den ikke detekteres i det hele tatt. Den siste effekten indikerer at en bør unngå ekstremt høye innfallsvinkler i målinger mot tørr snø, slik at en sikrer at det finnes en bakkerefleksjon bak snømassene.

8.1.7 Refleksjon fra våt snø

Selv små mengder med fritt vann i snøen endrer egenskapene drastisk. Både den reelle og den imaginære delen av dielektrisitetskonstanten øker kraftig. Dette medfører at både tap og overflaterefleksjon til snøen øker. Totalen er imidlertid at tilbakespredningen minker i forhold til tørrsnø tilfellet. I følgende Figur 22 fra målinger tatt 18 April 1995 ser vi høydeprofilen med et vått overflatelag. Total γ for VV og HH er i dette tilfellet ca -20 dB ved 40° innfallsvinkel. Det er ikke spesifisert hvor grov overflatestrukturen er på den våte snøoverflaten, men det kan nok antas at overflaten er ganske flat og derfor "speiler" radarsignalene godt. I et våtsnøskred vil sannsynligvis overflaten ha mer struktur og derfor reflektere mer tilbake ved høye innfallsvinkler.



Figur 22 Avstandsprofiler for vått (3.9 %Vol) snølag tatt med C-bånd høyoppløsningsradar med 40 graders innfallsvinkel

8.1.8 Lokalisering og innretting av radar

Det er viktig at lokalisering av radaren og pekeretningen velges slik at potensielle skredtraseer er dekket. Lokaliseringen må være slik at det er fri siktelinje til størst mulig del av raset og at ikke lokale formasjoner hindrer dette. Heldigvis vil analyse av radarsignalet selv kunne hjelpe til med å indikere om disse vilkårene er oppfylt. Områder som havner i radarskygge vil vise seg som områder uten signal i radarsignalet. En skal imidlertid her være klar over at på grunn av at radarstrålen dekker en bredde, vil deler av denne bredden kunne ligge i radarskygge mens andre deler ikke gjør det. Siden skred ofte følger de dype furene i terrenget vil disse ha størst sannsynlighet for å havne i en radarskygge og derfor ikke bli detektert.

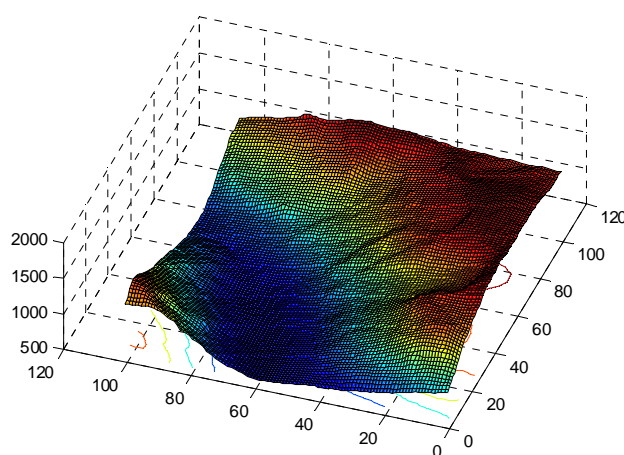
Siden styrken til radarrefleksjonene er avhengig av projisert (synlig) areal, og derfor øker med lavere innfallsvinkel, vil en ganske høy radarplassering ofte være tjenlig. Tentative plasseringer av radaren for å gi best mulig observasjonsmulighet kan finnes ved hjelp av analyse av en høydemodell over området. Et PC program for analyse av høydemodell sammen med en vurdering av målt signal fra tentative radarplasseringer vil kunne brukes i denne fasen.

For kjente raslokasjoner vil forhåndsmontering av radarplattformer kunne være et godt alternativ. Her vil plassering og innretting kunne gjøres i godt vær og optiske hjelpemidler kunne brukes til å vurdere dekningsgrad. Om ønskelig kan en rastrase også "gås opp" med en person til fots. En vil da få ganske detaljert informasjon om hvilke områder som er synlige for radaren.

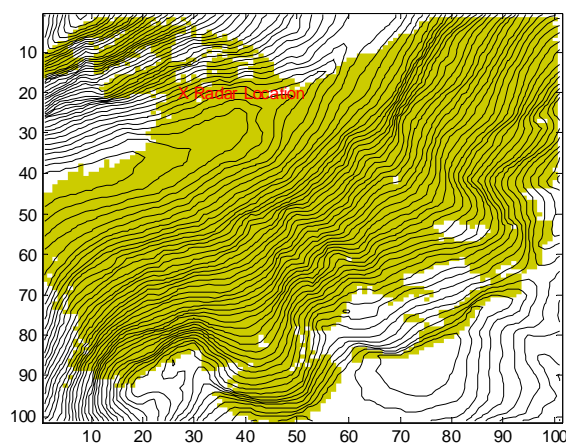
Plassering av radaren i området rundt bunnen av rasområdet gjør at målevinkelen i forhold til bakken ofte blir ganske lav. I Figur 23 til og med Figur 25 har vi analysert

dekningsområdet og målevinkelen for et område rundt Ryggefonn testområde ved Stryn. Analysen er gjort ved hjelp av en 25 m grid DEM. Vi ser at med en gunstig plassering et stykke oppe i bakken på andre siden av dalen vil en kunne se store deler av rastraséen, se Figur 24, samt ha relativt gunstige observasjonsvinkler, se Figur 25.

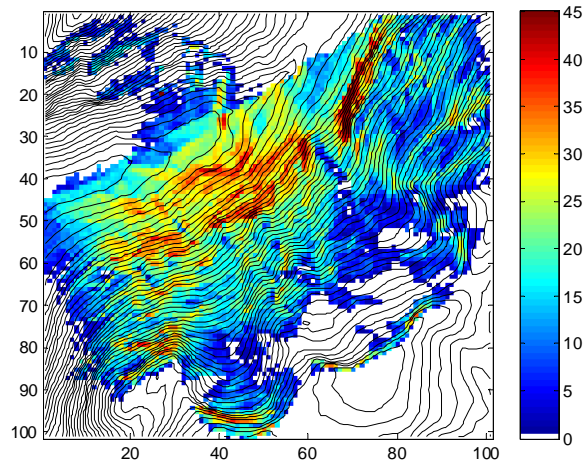
Ved en noe mindre gunstig plassering av radaren, vil en få områder som ligger i radarskyggen av forhøyninger foran. Se utsnittet nederst til høyre i Figur 26. Området fra 1450 til 1600 meter horisontal posisjon, der den røde kurven ligger over den blå, blir skygget av "toppen" på 1450 meter. I denne analysen har vi fulgt en linje oppover fjellet fra et startpunkt noe nærmere fjellsiden enn i Figur 24. Hvor bred denne radarskyggen er, gir denne analysen ikke noe informasjon om. Dette er imidlertid en enkel utvidelse.



Figur 23 Høydemodell over Ryggefonn området med inntegnede konturlinjer.

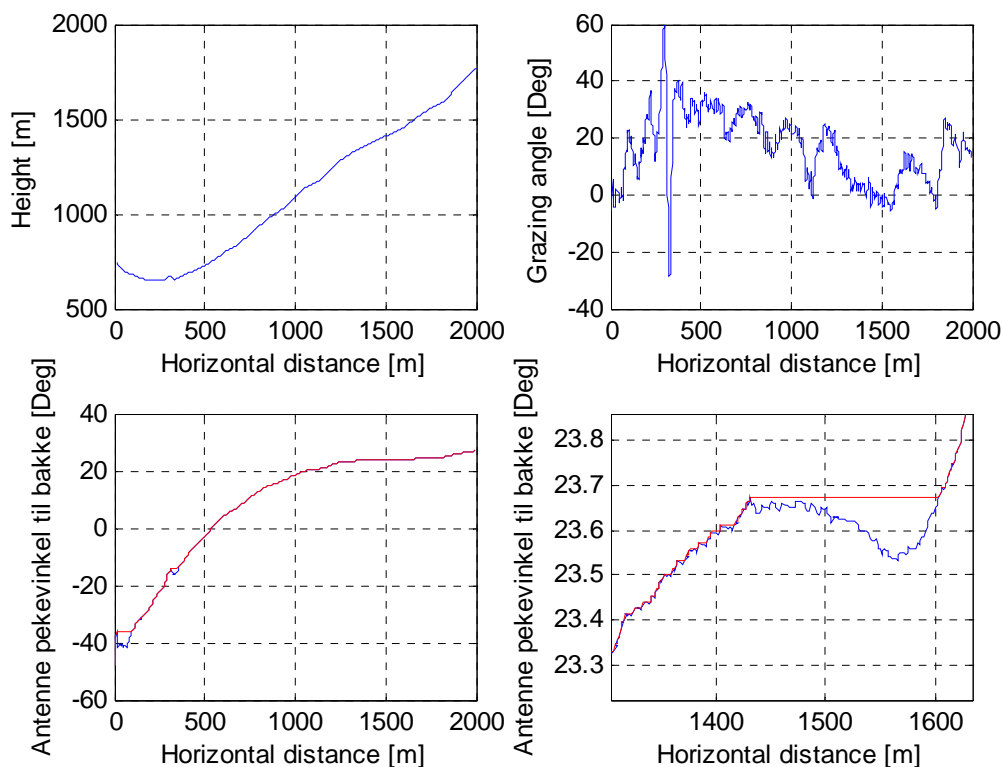


Figur 24 Konturkart over Ryggefonnområdet. Synlig område for radar markert med gul farge. Plassering av radar er angitt med rødt kryss. X og y koordinatene er i bildepunkter á 25 m.



Figur 25 Konturkart over Ryggefonn. Relativ vinkel mellom overflate og radarstråle er angitt med fargekode. X og y koordinatene er i bildepunkter á 25 m.

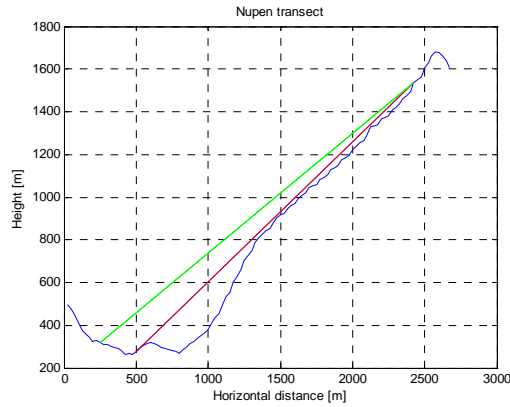
Profilen langs skredtraseen, samt tilhørende markvinkel er vist i Figur 26. De to nederste plottene i denne figuren viser antennens pekevinkel til bakken. I de tilfellene denne vinkelen går nedover som funksjon av avstand, får vi en radarskygge. Se utsnittet på plottet nederst til høyre i Figur 26. Plasseringen av radaren i denne analysen er imidlertid noe forskjellig fra Figur 25.



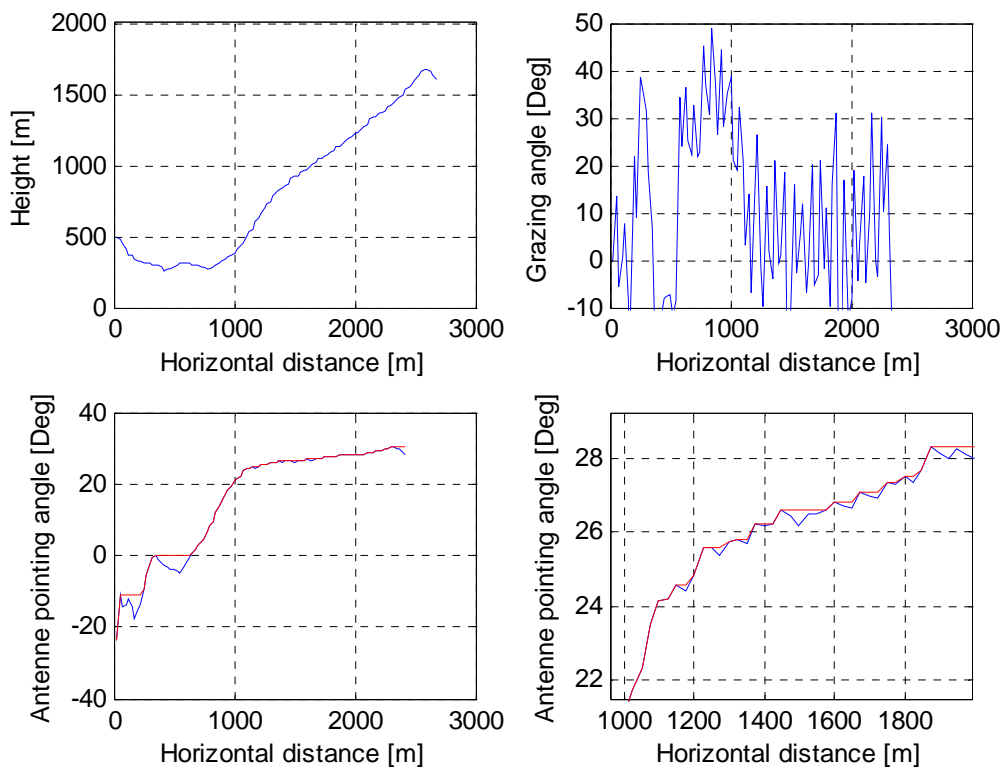
Figur 26 Karakteristiske egenskaper for radarobservasjon oppover rastrasé på Ryggefonn.

I en tilsvarende analyse av landskapet ved Nupen får vi en høydeprofil linje vist i Figur 27. Vi ser her at ved å plassere radaren ved horisontal posisjon på 500 m vil store deler av den øvre fjellsiden ligge helt parallelt med radarens pekeretning og derfor komme i radarskyggen. Ved å plassere radaren noe lenger tilbake blir observasjonsgeometrien bedre, og en får en økning i observasjonsavstand på i overkant av en kilometer.

I Figur 28 ser vi likevel at den relative observasjonsvinkel for den øvre del av traséen er relativt lav. På grunn av variasjoner av høyden rundt en rett linje vil vi få områder med ganske høy vinkel med radarskygger inn i mellom. Se plottet øverst til høyre i Figur 28. En slik fordeling kan imidlertid være gunstig for radar deteksjon av ras. I det snøen går over en "kant" langs rastraséen vil den ha en relativt god aspektvinkel for deteksjon i den tilhørende avstandscellen.



Figur 27 Høydeprofil fra Nupen ved Stryn. Innlagt er også to siktvektorer fra forskjellige plasseringer av radaren.



Figur 28 Karakteristiske egenskaper for radarobservasjon for rastrase på Nupen

8.1.9 Nedbør

I tillegg til refleksjoner fra snø og bakke vil også nedbøren til en viss grad påvirke radarsignalene. Her er det i hovedsak tre effekter som har betydning: demping av signalet på grunn av spredning, absorpsjon og refleksjon tilbake til radaren. For frekvenser utenom resonansbåndet til vann, ved ca 22 GHz, er imidlertid ikke noen av effektene svært store. Spesielt ikke for lavere frekvenser.

Klarværsdempingen av radarsignaler er tilnærmet gitt med

$$A = \frac{f^{0.3}}{100} [dB / km] \quad (10)$$

Som for C band gir ca 0.03 dB ved 2 km avstand.

En tilnærming for toveis dempingen av et radarsignal i regnvær er gitt ved

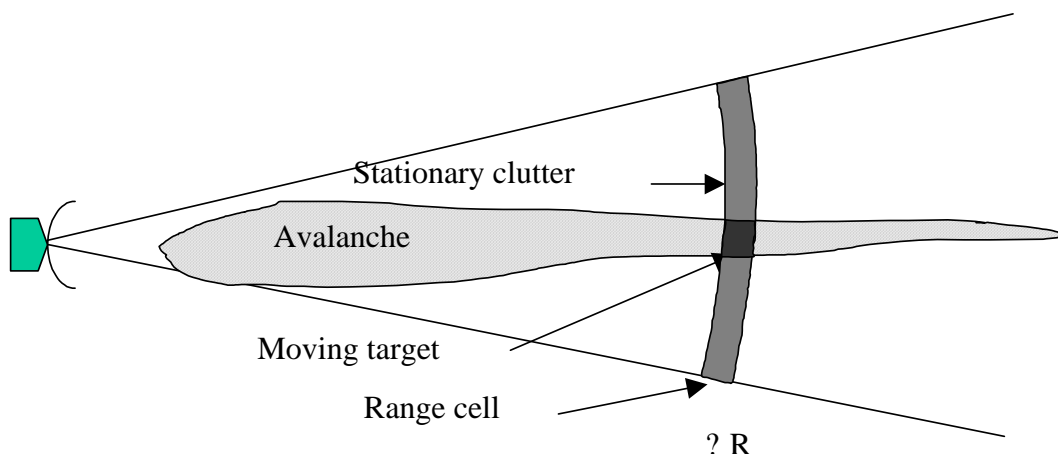
$$A = 3.7 \cdot 10^{-4} f^{1.85} [(dB / km) / (mm / time)] \quad (11)$$

For C band blir dempingen for et mål på 2 km avstand ubetydelige 0.17 dB for 10 mm/time nedbør (svært kraftig). Vi kan derfor neglisjere dempingen av radarsignalet på grunn av nedbør.

Et viktigere bidrag av nedbør er nok volumrefleksjoner. Dette er refleksjoner tilbake til radaren fra regn og våt snø som er i bevegelse. Disse refleksjonene kan ikke skilles fra snø på bakken og vil, på grunn av at de er i bevegelse, derfor vil kunne konkurrere med Dopplersignalet fra et ras.

8.1.10 Støybudsjett

En målesituasjon med radar mot et ras vil typisk kunne se ut som i Figur 29 .Vi ser at innenfor en avstandscelle vil det både være områder med stasjonær snø og områder med snø i bevegelse.



Figur 29 Rasradar målegeometri sett ovenfra.

For å se på nødvendig utgangseffekt for radaren skal vi ta ett eksempel. I det følgende har vi antatt at vi kan se bort fra den stasjonære delen av refleksjonene og at vi kun ser på forholdet mellom Dopplerspredt energi og termisk støy. Se Figur 2.

Signal til støyforhold for en puls kompresjonsradar er gitt ved

$$SNR = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma \tau}{(4\pi)^3 k T_0 F L_s R^4} \quad (12)$$

der P_t er utsendt effekt, G er antenneforsterking λ er bølgelengden σ er målets radartverrsnitt, k er Boltzmanns konstant, T_0 er systemets støytemperatur F er systemets støyttall, L_s er systemtap og R er avstand.

For å finne behovet for SNR for en gitt deteksjonssannsynlighet (P_d) må vi spesifisere akseptabel sannsynlighet for falsk alarm (P_{fa}). I følgende tabell er det i beregningene brukt et sett med aktuelle verdier for snørefleksjon, aspektvinkel og radarparameter. Vi ser at vi må opp i en utgangseffekt på 5 W for å tilfredstille krav om 95% sannsynlighet for deteksjon. Dette regnestykke gjelder imidlertid under antakelsen at det er termisk støy og ikke fasestøy som er begrensende faktor, men er konservativt med hensyn på at deteksjonen gjøres bare ved hjelp av et måleintervall på 0,1 s.

Målinger mot faktiske ras vil kunne gi oss grunnlag for å gå ned på disse kravene. Hvis vi for eksempel finner en stor grad av samling av reflektert energi i Dopplerdomenet, vil mer effektiv integrasjon kunne gjøres og effektkravet reduseres. I talleksempel under er det antatt en uniform Dopplerspredning.

Talleksempel for FMCW radar ytelse.

γ	-25 dB	Refleksjonskonstant
ψ	88 Deg	Høy innfallsvinkel
$R\theta_a$	10 m	Egentlig rasets bredde.
R	2000 m	Avstand til mål
$\left(\frac{c\tau}{2}\right)$	10 m	Avstandsopløsning
Sigma	0,011	Radartverrsnitt Ligning (3)(3)(3)(3)
Beregning av Signal til Støyforhold pr puls		
P_t	5 W	
G	25,8 dB	
k	1,38E-23	
T_0	290	
F	2	
L_s	5 dB	

prf	4400 Hz	
SNR	7,8 dB	Radarligning Ligning (12)
Tint	0,1 s	
Pfa	5E-9	Gir en falsk alarm/døgn for gitt oppløsning og Tint.
Pd	0,95	Sannsynlighet for deteksjon
Npuls	440	Antall pulser for Tint
SNR behov pr puls for gitt Pfa,Pd og Npuls	7.0 dB	(Skolnik 1970, p2-23) Swerling 1. for 440 pulser)

Vi ser at for en så høy innfallsvinkel vil refleksjonen fra to kilometers av stand bli ganske svak. Det er derfor behov for en relativt stor utgangseffekt på hele 5 W middel.

I det foregående har vi laget gjennomgang av noen kjerneaspekter ved snøens interaksjon med radarsignaler. Hovedkonklusjonene på dette avsnittet er at tilbakespredning fra snø kan være lav, til dels svært lav for våt snø som absorberer og reflekterer bort mye av den innkomne energien. Fasen i det reflekterte signalet fra våt snø vil typisk være direkte refleksjoner, noe som gir en Dopplermodulasjon proporsjonal med rasetts hastighet. For tørr snø er tilbakespredningen gitt av bakkerefleksjoner, men den tørre snøens bevegelse over disse refleksjonene vil modulere fasen og lage Dopplerspekter i dette tilfellet også. Vi kan altså forvente Dopplermodulert tilbakespredt energi både for våt og tørr snø, selv om den siste er forårsaket av et annet fenomen enn den rene rashastigheten.

8.1.11 Deteksjon av et ras

I et ras vil en typisk ha en hastighetsfordeling på tvers av raset med størst hastighet på midten og avtagende mot kantene. For flakskred kan denne overgangen være ganske abrupt, med store områder både på tvers og på langs av raset med samme hastighet. I såkalte blandede ras vil en finne snømasser med hastighet som både er avhengig av høyde og transversal og longitudinal posisjon. En detektor for ras bør på best mulig måte kunne utnytte all tilbakespredt energi fra områder i bevegelse. En slik variabel og rasavhengig romlig- og hastighetsspredt målrespons vil helt klart kreve en annen deteksjonsmetode enn den vi kjenner fra tradisjonelle stive radarmål (for eksempel fly). Vi vil komme nærmere inn på dette i avsnittet om radarer. Vi ser imidlertid fra den forutgående analyse at selv om koblingen mellom rasstørrelse og Dopplerspektra er mer kompleks en man i utgangspunktet skulle anta er vår nåværende

problemstilling, ”å detektere at noe er i bevegelse” i utgangspunktet en lettere oppgave enn å skulle karakterisere rasets bevegelse i detalj.

8.2 Radarter

8.2.1 CW radar

I en Dopplerradar uten avstandsopløsning, typisk en såkalt Continuous Wave (CW) radar, sendes og mottas et kontinuerlig radarsignal på en fast frekvens. I radarmottakeren vil refleksjoner fra stasjonære mål gi et konstant likespenningssignal (bias), mens et mål i bevegelse vil gi et vekselstrømsignal med frekvens gitt av hastigheten til målet. Amplituden til signalet er gitt av refleksjonsstyrken til målet. Siden denne typen radar sender kontinuerlig og altså har hundre prosent ”på” tid (duty cycle), noe som i seg selv er meget gunstig, har metoden noen viktige ulemper.

Hvis en skal både sende og motta med én antenne er det vanskelig å isolere det utsendte signal fra det mottatte. Dette gjør at mottakeren går i metning hvis den ikke er laget med ekstreme krav til dynamikk. Dette problemet kan reduseres ved å gå over til adskilte sender og mottakerantener. Alternativt kan en i en en-antenne konfigurasjon benytte en såkalt sirkulator til å skille utsendt og innkommende signal. En vil i det siste tilfelle likevel ha behov for ekstra demping av interne refleksjoner i antenne (ekkokansellering), en relativt kompleks teknikk.

Et annet problem er at en i en ren CW radar ikke får noen informasjon om avstanden ut til målet, noe som er ønskelig av flere årsaker. Siden styrken til refleksjonene svekkes med fjerdepotens av avstanden, vil et meget lite skred nært radaren gi samme signal som et kjempeskred langt vekk. Dette gjør en trusselvurdering vanskelig.

For å finne avstanden til et mål, må en endre (modulere) det utsendte radarsignalet som funksjon av tid slik at en kan ”kjenne igjen” hvor lang tid det tar før det reflekterte signalet kommer tilbake. Denne tiden, sammen med lyshastigheten, vil da gi avstanden til målet.

8.2.2 Puls Dopplerradar

En vanlig måte å endre det utsendte signalet på, er å sende ut korte pulser med relativt stor avstand. Dette er en såkalt pulset radar. Når en mottar en reflektert puls antar en at tidsforsinkelsen til målet som reflekterte den er tiden siden forrige utsendte puls. Dette gir avstanden til målet. Faseendringen mellom pulsens bærebølge i en gitt avstand over tid gir hastigheten til målet i denne avstanden. Denne typen Dopplerradar kalles en Puls Doppler (PD) radar.

Avstandsopløsningen til en PD radar er gitt av lengden på den utsendte puls. For å få en avstandsopløsning på 50 meter er tidsvarigheten til pulsen kun 0,34 mikrosekunder. Hyppigheten til disse pulsene, den såkalte puls repetisjonsfrekvensen (prf), må være stor nok til at den bevegelsesinduserte endring i fasemålingen mellom pulsene ikke er større enn π . Dette kravet oppfylles gjennom

$$prf \geq \frac{4v_{\max}}{\lambda} \quad (13)$$

der λ er radarens bølglengde og v_{\max} er den maksimale hastighet som målet kan ha for å være sikker på å kunne detekteres. Samtidig har vi en *største* tillate *prf* for å sikre at vi vet hvilken utsendt puls den mottatte puls kommer fra. For en ønsket entydig avstand på R_{\max} vil vi ha følgende uttrykk for den maksimale *prf*

$$prf \leq \frac{c}{2R_{\max}} \quad (14)$$

Ved denne *prf* vil et mål som ligger i avstand $(R_{\max} + \delta)$, altså utenfor det entydige området, bli tolket som om det lå i avstand δ . Dette skjer fordi refleksjonen alltid tolkes som en refleksjon fra siste puls (i stedet for nest siste som egentlig er tilfelle utenfor området).

Virkemåten til en PD radar medfører en stor fordel og et par viktige ulemper. Ved å sende i korte pulser, hvor man samtidig slår av mottakeren, for deretter å åpne for mottak av signal i en lengre periode, får en lettere håndterbare krav til inngangstrinnet til radarmottakeren. Det følsomme inngangstrinnet slipper å håndtere kraftige interne refleksjoner og refleksjoner fra næromgivelsene siden det er koblet ut mens sendingen pågår. En kan derfor bruke samme antenne for å sende og motta signalene.

I en PD radar vil en også kunne kompensere for den sterke avstandsavhengigheten til signalstyrken til det reflekterte radarsignalet, typisk $1/R^4$. Dette kan gjøres ved å bruke tidsavhengig økning av forsterkingen, en såkalt Sensitivity Time Control (STC).

En kraftig ulempe med PD er imidlertid at den midlere utsendte effekt blir svært lav i forhold til spisseffekten. For transistor utgangsforsterkere, der det er spisseffekten som er begrensende faktor, vil dette ofte gi svært lav midlere utgangseffekt og derav følgende lavt signal-til-støyforhold (SNR) i det mottatte signal. Ofte vil forholdet mellom spiss og midlere effekt kunne bli mer enn -20 dB, eller en faktor på 100.

En kan øke pulslengden og dermed effektiviteten til en PD radar ved å modulere de utsendte pulsene. I mottakeren kan man deretter komprimere pulsene tilbake til den opprinnelige lengde for å få ønsket avstandsoppløsning. Denne metoden introduserer imidlertid nye problemer. Det ene er økt krav til prosessering siden komprimeringen vil være avhengig av målets hastighet (en må ha såkalte Doppler filterbanker). Det andre er at den såkalte blindsonen, altså avstanden ut til det første registrerbare mål, må være minst lik den ukomprimerte pulslengden.

Hvis en bruker såkalt rørteknologi i stedet for transistorer i en PD radar vil en imidlertid ikke tape så mye på å bruke pulseteknologi. For denne type utgangstrin vil ofte spisseffekten kunne være mye større siden det er midlere effekt (termisk) som er begrensende faktor. Med såkalte Traveling Wave Tube (TWT) rørteknologi vil en fremdeles ha et koherent system.

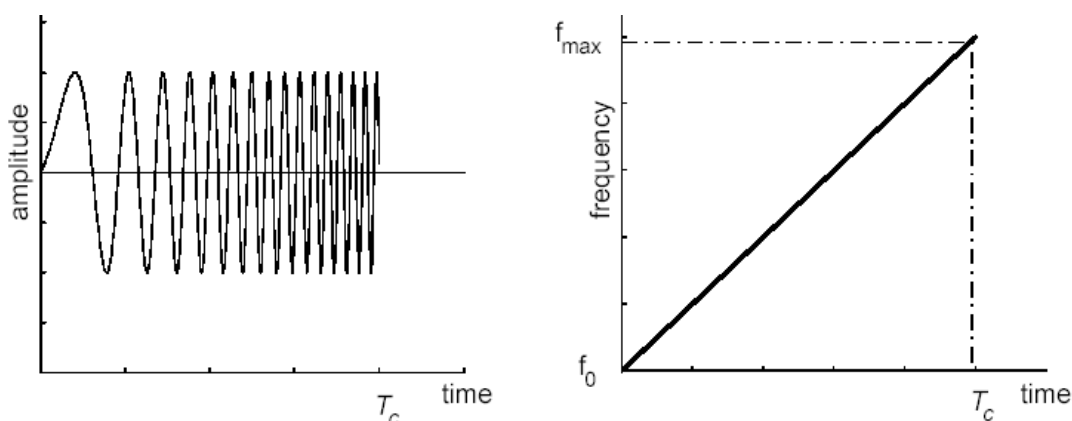
En annen mulighet når en går over til rørteknologi er å bruke ikke-koherente pulsede oscillatorer. Ved direkte å måle det utsendte signalets fase kan en likevel gjøre

systemet koherent gjennom å korrigere for fasen til det utsendte signal. Dette kalles Coherent on Receive. Felles for rørteknologi er imidlertid ulemper med høy spenning, pris og kortere holdbarhet.

I en PD radar er målestøyen dominert av termisk støy i mottakeren.

8.2.3 FMCW

En måte å omgå den manglende avstandsoppløsningen i CW er som nevnt å modulere signalet. Å pulse signalet er en måte å gjøre dette på, noe som gav oss PD radaren. En annen måte er å frekvensmodulere det utsendte signalet. Hvis en modulerer med en lineært økende frekvens, såkalt (lineær) Frekvens Modulasjon CW eller FMCW, fås en spesielt letthåndterlig analyse. I FMCW sender radaren ut en kontinuerlig sekvens med lineært frekvensmodulerte sveip. Se Figur 30.



Figur 30 Lineært Frekvens Modulert radarsignal. Venstre figur viser tidsforløpet til amplituden mens høyre figur viser den lineære frekvensendringen som funksjon av tiden.

I de følgende ligningene som viser sammenhengen mellom noen kjerneparametre for en FMCW, er følgende nomenklatur brukt

- R_{max} Max rekkevidde for radaren (entydig avstand).
- V_{max} Max hastighet til et mål
- F_c Bærebølgefrequens for radar
- dR Avstandsoppløsning (cell size)
- T Sveip tid for FMCW modulasjonen

Tiden τ_{max} mellom starten på et nytt sveip og til refleksjonen fra et mål på avstand R_{max} er gitt av

$$\tau_{max} = \frac{2R_{max}}{c} \quad (15)$$

I analysen av signalet får vi en fasemåling av målenes bevegelse for hvert sveip med avstand T . Dette er ekvivalent med pulsavstanden for en PD radar. For å få entydige fasemålinger er derfor sveiptiden begrenset av

$$\frac{1}{T} = prf \geq \frac{4v_{\max}}{\lambda} \quad (16)$$

Vi har her valgt å kalle sveip repetisjons frekvensen for prf for å indikere parallellen mellom et sveip i FMCW og en puls for PD.

Uten å ta i bruk spesielle frekvensavhengige forsinkelsesfiltre i mottakeren kan vi utnytte en fraksjon $T - \tau_{\max}$ av det utsendte sveipet. Den maksimale effektiviteten blir derfor:

$$\eta_{\max} = \frac{T_{\max} - \tau_{\max}}{T_{\max}} = 1 - \frac{2f_c R_{\max} v_{\max}}{c^2} \quad (17)$$

For en entydig rekkevidde R_{\max} på 3000 meter, en høyeste hastighet v_{\max} på 100 m/s og en bærebølgelengde $\lambda=0.055$ m får vi en effektivitet på 0.97 (eller 0 dB). En forbedring på nært 20 dB i forhold til et PD system.

Noe av denne forbedringen i utnyttelsen av spissefekten i forhold til et PD system blir imidlertid spist opp av økt støy i mottakeren samt økt krav til dynamikk. Dette er ett av hovedproblemene med FMCW. Se tidligere kommentarer under CW radar.

Avstandsopløsningen til systemet for et FMCW system er gitt av den prosesserte båndbredde

$$B = B_{\text{eff}} = \eta B_{\text{transmit}} \quad (18)$$

som finnes fra

$$B_{\text{eff}} = \frac{c}{2dR} \quad (19)$$

der dR er den ønskede avstandsopløsningen.

For en avstandsopløsning på 30 m får vi en effektiv båndbredde B på 5 MHz, og en utsendt båndbredde som er marginalt høyere.

I et FMCW signal har vi en kobling mellom hastighet og avstand. Dette betyr at et mål med en gitt hastighet ser ut til å befinne seg nærmere (eller lengre borte) enn et stasjonært mål på samme avstand. Siden prf for FMCW systemet ble valgt for å gi et maksimum faseskift på π for en bevegelse på $\lambda/4$ mellom målingene, noe som tilsvarer et avstandsskift på en avstandscelle, har dette normalt sett ikke stor betydning for oss. Hvis radarens prf velges svært lav slik at målingen blir undersamplet i Doppler domenet, og/eller at avstandscellestørrelsen blir svært stor bør vi imidlertid tenke oss om.

I en FMCW radar vil man i tillegg til termisk støy også kunne ha kraftige bidrag fra oscillator-fasestøy og senderamplitudestøy. I noen tilfeller vil faktisk disse

støybidragene dominere og være den begrensende faktor for rekkevidde og deteksjonsevne. For et godt designet FMCW system vil en imidlertid kunne nå ned mot termisk støygulv.

8.2.3.1 Pulset FMCW

For å unngå noen av dynamikkproblemene forbundet med å sende samtidig som man mottar er det mulig å kjøre en FMCW radar i såkalt avbrutt modus (eng Interrupted CW). Ved å velge den utsendte pulslengden lik toveistiden til største rekkevidde (R_{max}) fås en reduksjon i effektiviteten på 50 % eller 3 dB. Til gjengjeld får en et mye enklere design av radarens inngangstrinn. En bonus ved denne formen for modulasjon er at en får en avstandsavhengig skalering av belysningstiden innen hver puls. En har altså en effekt som ligner STC for vanlig pulset radar: Kraftige nære mål blir skalert ned i forhold til fjerne, og dynamikken reduseres.

Pulsingen har imidlertid også den effekt at det utsendte og mottatte spekteret repliseres med en spektral avstand gitt av repetisjonsfrekvensen prf_{sub} til pulsene. For å få entydighet i den spektralt baserte avstandsanalysen til FMCW-systemet er en avhengig av å operere innefor båndbredden gitt av denne repetisjonsfrekvensen. Den utsendte pulsbredden T_p er gitt av

$$T_p = \frac{2R_{max}}{c} \quad (20)$$

og prf_{sub} er gitt av

$$prf_{sub} = \frac{1}{2T_p} \quad (21)$$

For en R_{max} på 2000 meter fås en spektral repetisjon ved 37500 Hz.

Frekvensskiftet for et mål på avstand R_{max} er gitt ved

$$f_{max} = \frac{2prf_{sweep}BR_{max}}{c} \quad (22)$$

der B er båndbredde (som gir ønsket oppløsning), c er lyshastigheten og prf_{sweep} er sveip repetisjonsfrekvensen. Vi har fra tidligere en minimal verdi for prf_{sweep} gitt av entydighet til fasemålingene. Hvis vi setter inn verdier for $f_{max}=37500$, $R_{max}=2000$ m og $prf_{sweep} = 4000$ Hz (som fås fra en maximum rashastighet på 60 m/s i C-bånd) får en at båndbredden B må være mindre enn 0.6 MHz. Dette gir en avstandsoppløsning på 250 meter, klart dårligere enn ønskelig. Dette ville for eksempel gi oss en feilavlesning av avstanden på 250 meter for et ras med største entydige hastighet. IFMCW er derfor ikke anvendbart til vårt formål.

8.2.4 Doppler Prosessering

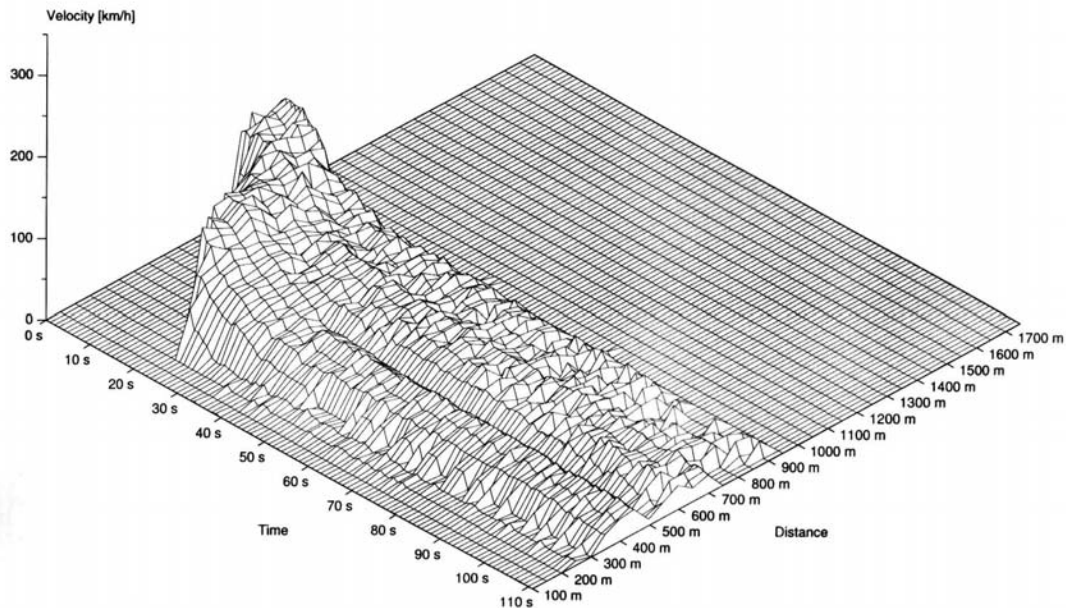
Uavhengig av om radaren er en pulset radar eller en FMCW-radar vil deteksjon av elementer i bevegelse gjøres ved å analysere tidsutviklingen til signalet i en

avstandscelle. Den avanserte måten å gjøre denne analysen på er å gjøre utføre en spektral analyse, oftest ved hjelp av en Fouriertransform. Et mål med en bestemt hastighet vil som tidligere nevnt få en Doppler frekvens som er proporsjonal med denne hastigheten. Den spektrale analysen vil typisk måle energien i signalet for et sett av diskrete frekvenser (diskret Fouriertransform). En kan deretter teste om et bevegelig mål eksisterer ved å måle energien ved hver frekvens (hastighet). Hvis signalet er høyt nok over støygulvet, kan en med rimelig sikkerhet si at det er en gjenstand med den målte hastigheten.

Denne analysemetoden av Dopplersignalet egner seg godt når en observerer et stivt legeme med en ukjent men konstant hastighet mot en bakgrunn av termisk støy. Den reflekterte energien vil da bli konsentrert på en frekvens, og en vil derfor oppnå en såkalt koherent integrasjonsgevinst. Dette er en signalmodell som passer godt til et av hovedanvendelsesområdene til radar: nemlig å detektere farkoster av diverse slag i forsvars eller sivil sammenheng.

Et ras er imidlertid et meget fleksibelt legeme, karakterisert av stor spredning i refleksjonspunktens hastighet og stor samt variabel romlig utstrekning. I Figur 31 ser vi hvordan maksimalhastigheten i raset endrer seg som funksjon av avstand og tid. For et gitt tidspunkt langs tidsaksen vil en ha en spredning av maksimalhastigheten langs avstandsaksen for det området raset til da har dekket. For en gitt tid og avstandscelle vil en også ha en fordeling av hastighetene. Hvordan dette kan se ut i Dopplerdomenet er antydning i Figur 2. Vi ser her et hovedbidrag fra direkterefleksjoner fra raset. Dette bidraget vil ha en hastighetsprofil som avhenger av rasets type. For et flakskred vil nok profilen være smalere mens et blandingsskred vil ha en bredere profil. Lenger nede i hastighet, sentrert rundt 0 hastighet, finner vi det tidligere beskrevne modulasjonsspekteret som en noe mindre profil. På null hastighet finner vi og energien som er reflektert utenom raset. Denne energien har i prinsippet ingen spektral (hastighets) bredde, men på grunn av matematiske egenskaper ved analysen vil den likevel i praksis få en viss bredde. I tillegg er et uunngåelig støygulv tegnet inn.

I stedet for en kraftig signalspiker ved en bestemt hastighet og avstand som funksjon av tid, som er vanlig for stive mål, vil et ras altså få en bred "blob".



Figur 31 Maximum hastighet i et ras som funksjon av tid og avstand.

Hvis bredden av denne ”blob”en blir en stor fraksjon av det entydige hastighetsområdet, v_{max} vil vi ikke lenger ha mye å tjene på en detaljert spektral analyse. Vi kan da i stedet bruke en annen metode som kalles Moving Target Indicator (MTI). MTI er i praksis en høypassfiltrering av signalet som fjerner energien fra de stasjonære refleksjonene. Den gjenværende energien er da i praksis integralet av reflektert energi over alle gjenværende hastigheter, og en kan lage en detektor basert på terskling av denne energien. En slik analyse vil imidlertid ikke fortelle oss noe om hastighetsfordelingen innen raset, den vil bare kunne indikere total størrelse.

I de tilfellene hvor hastighetsbredden til raset er vesentlig mindre enn v_{max} vil imidlertid en slik integrasjon over hele hastighetsområdet gi et lavere forholdstall mellom det integrerte signal og den integrerte støy enn hvis vi reduserte integrasjonsområde.

8.2.5 Receiver Operating Characteristic

I radarlitteraturen finnes det mange analyser av såkalt Receiver Operating Characteristic (ROC) for radarer mot forskjellige former for mål. En slik ROC beskriver hvordan sannsynligheten for deteksjon (probability of detection eller p_d) og sannsynligheten for å feildeteksjon (probability of false alarm eller p_{fa}) endrer seg som funksjon av en terskelverdi på en deteksjonsvariabel. Hvis en øker terskelverdien (kravet til signalenergi) for deteksjon vil feilraten (p_{fa}) gå ned, men samtidig reduseres også sannsynligheten for å detektere et mål.

De fleste slike ROC analyser er imidlertid gjort for stive mål (fly, skip) med liten utstrekning i forhold til radarens oppløsning, med antakelse om konstant hastighet,

eller i høyder en liten intern hastighetsvariasjon som skyldes endring i aspektvinkel. Dette er svært forskjellig måloppførsel fra et snøras der en har et meget fleksibelt objekt med stor utstrekning og med variabel hastighet. Metodikk fra for eksempel luftovervåkningsradarer, der en typisk detekterer ved å terskle i hver celle av en avstands/hastighetsmatrise, vil ikke være optimale for et skred der en forventer at den tilbakereflekterte energien er spredd både i hastighet og avstand. De verdiene som finnes fra tabeller for nødvendig Signal-til-Støyforhold (SNR) for tabulerte par med pfa og pd vil ikke stemme for et ras.

Deteksjon av et "rasobjekt" går i hovedsak ut på å beregne et ras-intensitetstall basert på radarsignalet. Dette tallet kan for eksempel være total mottatt energi over et visst romlig areal og hastighetsintervall. Når energien i dette intervallet blir større enn en gitt terskel, sier en at et ras er detektert.

Problemet en kjemper mot i en slik deteksjon er i hovedsak støy og sideløber. Støy er et tilfeldig signal som mottas gjennom antennen eller genereres i radaren selv på grunn av termiske effekter eller fasestøy. Denne støyen adderes også til det reflekterte signalet fra målet og blir tatt med i "ras-intensitetstallet". I deteksjonsprosessen må en sette terskelen høyt nok til at ikke denne støyen alene gir en deteksjon.

8.2.6 Antenne

En radarantenne er karakterisert av et lite antall kjerneparametre. Viktigst av disse parametrene for vår bruk er den såkalte åpningsvinkelen samt antennens polarisasjonsegenskaper.

8.2.6.1 Åpningsvinkel og forsterkning

En antennes form og størrelse kan velges slik at den utsendte energi fokuseres mer eller mindre i en bestemt romlig retning. Dette er analogt med en lommelykt som fokuserer lyset. Ved å lage strålen smalere økes den utsendte energien som når det spesifiserte området samtidig som følsomheten for tilbakereflektert energien økes tilsvarende. Når den mottatte refleksjonenergien på denne måten blir større reduseres problemene med å detektere et mål mot en bakgrunn av termisk støy. Denne effekten reflekteres i den såkalte radarligningen der deteksjonsrekkevidden R er gitt ved

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 kTBFL_s SNR_{\det}}} \quad (23)$$

Her er P_t utsendt effekt, G er antenneforsterkningen, λ er bølgelengden σ er målets radartverrsnitt, produktet $kTBFL_s$ er radarmottakerens termiske støyeffekt innen analysebåndbredden B og SNR_{\det} er det minste signal til støy forholdet som trengs for å kunne gjøre en sikker deteksjon.

Vi ser her at rekkevidden kan økes ved å øke antenneforsterkningen G . Dette vil imidlertid også redusere størrelsen til den observerte romvinkel. For et system med en

enkelt stasjonær antenne er vi avhengig av at romvinkelen dekker hele det potensielle rasområdet.

Vi velger da å spesifisere en antenne strålingsvinkel i azimut og elevasjon. For en rektangulær antenneåpning har vi da følgende sammenheng

$$\theta = \frac{b\lambda}{L} \quad (24)$$

der θ er antennens åpningsvinkel, b er en forbredningsfaktor, λ er bølgelengden og L er antennens dimensjon i den korresponderende retning.

Antennens forsterkning, som måler graden av signalfokusering i forhold til en isotrop rundstråler, er gitt ved

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} A \eta \quad (25)$$

der G er antenneforsterkingen, η er en effektivitetsfaktor (typisk 0.5 til 0.7) og θ_e og θ_a er åpningsvinklene i elevasjon og azimut respektivt.

For en azimut åpningsvinkel på 20° fås en antenne dimensjon på ca 0.2 m. Tilsvarende gir en 10° elevasjonsåpning en dimensjon på 0.4 m. Tilhørende antenne gain G blir da ca 22 dB.

Siden ko-polariserte målinger gir størst tilbakespredning velges dette. Se for eksempel Figur 11.

I en to-antenne FMCW løsning monteres antennene sammen med samme polarisasjon i et par slik at lekkasje mellom antennene minimaliseres. Siden antennens åpningsvinkel er relativt stor, noe som gir liten antenneåpning, gir selv en to-antenne konfigurasjon ikke noen uakseptabel størrelse. Størrelsesanslag for et antennepar på 5 GHz bånd vil kunne være 0.5 x 0.5 meter frontareal, mens en ved å gå høyere i frekvens vil skalere størrelsen tilnærmet lineært. På 14 GHz vil en for eksempel få en enhet med typisk 0.2 x 0.2 meter.

8.2.6.2 Lekkasje

For et to-antenne system for FMCW er det viktig at lekkasjen mellom sender og mottakerantennen minimaliseres. Denne lekkasjen vil på en måte oppføre seg som et nært og kraftig ekko, og kunne gi problemer både med dynamikk og fasestøybidrag i radarsystemet. I (Skolnik 1970) er det imidlertid beskrevet at lekkasje mellom to hornantenner relativt enkelt kan reduseres ned i -70 dB. Hvor langt ned en må få den i et endelig system er avhengig av både mottakerens dynamikk og radarens fase og amplitudestøyeegenskaper.

8.3 Systembeskrivelse

I tillegg til en radarsensor for å detektere ras er det behov for et styresystem som håndterer alarmene fra sensoren, gir de nødvendige varselsignaler og beskjeder,

akkumulerer ønsket informasjon med mer. Kravene til det omliggende systemet vil variere med bruken og bør identifiseres og spesifiseres for hvert bruksområde.

Selv om fokuset for dette prosjektet er selve radar sensoren, er selvfølgelig nytteverdien totalt avhengig av det omliggende systems virkemåte.

Viktige bestanddeler i et totalsystem vil være

Kontrollsystem (Setting av parameter, ruting av alarmer, kontroll av system integritet og ytelse.)

Kommunikasjon (Til hvem og hvordan skal alarmer kommuniseres. Hvordan overføre signaler)

Alarmer(Lyd, lys, vibratorer, radio.)

Krafttilførsel (Hvordan skal sensorer og systemet ellers få kraft.)

Kombinasjon med andre sensorer

Tilleggssystemer for å gi livreddene virkning (Redningsutstyr, maskiner etc)

Forhåndsetablerte prosedyrer og fluktruter (komme seg bort).

Forhåndsetablerte redningsprosedyrer (redde dem som ikke kom seg bort)

Bygge inn erfaringer fra historiske begivenheter. Hvordan måtte systemet ha vært for å ha forbedret en situasjon.