

# **FFI RAPPORT**

## **RADARDEKNINGSSIMULATOR - FYSIKK**

OLSEN, Karl Erik

**FFI/RAPPORT-2002/02372**



FFIE/726/170

Godkjent  
Kjeller 3. juni 2002

John-Mikal Størdal  
Forskningsjef

**RADARDEKNINGSSIMULATOR - FYSIKK**

OLSEN, Karl Erik

FFI/RAPPORT-2002/02372

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



**FORSVARETS FORSKNING SINSTITUTT (FFI)**  
**Norwegian Defence Research Establishment**

**UNCLASSIFIED**

P O BOX 25  
 NO-2027 KJELLER, NORWAY  
**REPORT DOCUMENTATION PAGE**

**SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE**  
 (when data entered)

|   |   |                                      |   |   |
|---|---|--------------------------------------|---|---|
| 1) PUBL/REPORT NUMBER<br>FFI/RAPPORT-2002/02372<br>1a) PROJECT REFERENCE<br>FFIE/726/170  | 2) SECURITY CLASSIFICATION<br>UNCLASSIFIED<br>2a) DECLASSIFICATION/DOWNGRADING SCHEDULE<br>-                          | 3) NUMBER OF PAGES                   |   |   |
| 4) TITLE<br>RADARDEKNINGSSIMULATOR - FYSIKK<br><br>(RADAR COVERAGE PREDICTION TOOL – PHYSICS)   |   |                                      |   |   |
| 5) NAMES OF AUTHOR(S) IN FULL (surname first)<br>OLSEN, Karl Erik   |   |                                      |   |   |
| 6) DISTRIBUTION STATEMENT<br>Approved for public release. Distribution unlimited. (Offentlig tilgjengelig)  |   |                                      |   |   |
| 7) INDEXING TERMS<br>IN ENGLISH: <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;">           a) <u>Radar</u><br/>           b) <u>Radar clutter</u><br/>           c) <u>Microwave propagation</u><br/>           d) _____<br/>           e) _____         </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;">           IN NORWEGIAN:<br/>           a) <u>Radar</u><br/>           b) <u>Radareclutter</u><br/>           c) <u>Mikrobølgeutbredelse</u><br/>           d) _____<br/>           e) _____         </td> </tr> </table>                     |   |                                      | a) <u>Radar</u><br>b) <u>Radar clutter</u><br>c) <u>Microwave propagation</u><br>d) _____<br>e) _____ | IN NORWEGIAN:<br>a) <u>Radar</u><br>b) <u>Radareclutter</u><br>c) <u>Mikrobølgeutbredelse</u><br>d) _____<br>e) _____ |
| a) <u>Radar</u><br>b) <u>Radar clutter</u><br>c) <u>Microwave propagation</u><br>d) _____<br>e) _____   | IN NORWEGIAN:<br>a) <u>Radar</u><br>b) <u>Radareclutter</u><br>c) <u>Mikrobølgeutbredelse</u><br>d) _____<br>e) _____ |                                      |   |   |
| THESAURUS REFERENCE:<br>8) ABSTRACT<br><br>Project 726 has developed a multistatic radar coverage prediction tool for frequencies above 100MHz. Various physical effects such as reflection, diffraction, refraction, attenuation due to precipitation and atmospheric absorption are calculated with verified algorithms available in the open litterature. This report describes the simulated effects, and their algorithms. Some examples of simulated radar coverage for different radar systems are included. Project 726 also gives its recommendations for future extensions of the algorithms. |   |                                      |   |   |
| 9) DATE<br><br>3 June 2002  | AUTHORIZED BY<br>This page only<br><br>John-Mikal Størdal   | POSITION<br><br>Director of Research |   |   |

ISBN-82-464-0664-7

**UNCLASSIFIED**

**SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE**  
 (when data entered)



**INNHOLD**

|     | <b>Side</b>   |    |
|-----|---|----|
| 1   | INNLEDNING  | 7  |
| 2   | MÅLSETTING  | 7  |
| 3   | FYSIKK  | 7  |
| 3.1 | Terrengmodell   | 7  |
| 3.2 | Signal-til-støyforhold, enveispropagering fra sender til mottaker | 8  |
| 3.3 | Signal-til-støyforhold, bistatisk radarligning                    | 9  |
| 3.4 | Terrengrefleksjon, signal-til-clutterforhold                      | 10 |
| 3.5 | Refraksjon  | 11 |
| 3.6 | Diffraksjon   | 14 |
| 3.7 | Atmosfærisk demping   | 16 |
| 3.8 | Nedbørsdemping  | 17 |
| 4   | RESULTATER  | 20 |
| 4.1 | Eksempler på dekningsberegninger for radar                        | 20 |
| 4.2 | Beregning av visuell sikt   | 23 |
| 4.3 | Andre bruksområder  | 24 |
| 5   | DISKUSJON   | 24 |
| 6   | FORSLAG TIL VIDEREFØRING  | 25 |
| 7   | KONKLUSJON  | 28 |
| 7.1 | Radardekningsimulator   | 28 |
| 7.2 | Videreføring av radardekningsimulator                             | 28 |
|     | ORDLISTE  | 30 |
|     | LITTERATUR  | 31 |
|     | Fordelingsliste   | 33 |





## **RADARDEKNINGSSIMULATOR - FYSIKK**

### **1 INNLEDNING**

Prosjekt 726 – Digital multistatisk radar har studert et multistatisk radarkonsept. Som en del av studien utviklet og demonstrerte prosjektet en bistatisk radardemonstrator. I løpet av studien meldte det seg et behov for en radardekningsimulator som kunne beregne deknningen multistatiske radarsystemer gir i ulike konfigurasjoner. Det viste seg at mange radardekningsimulatorer var tilgjengelige, (RADEK hos Forsvaret og FFI, CARST hos NC3A), men da dette arbeidet ble påbegynt kunne ingen av dem beregne deknningen for et multistatisk radarsystem.

Prosjekt 726 ønsket først å utvide en eksisterende radardekningsimulator fra monostatisk til multistatisk. Dette viste seg å være vanskelig å gjennomføre av to grunner. Enten så var kildekoden ikke tilgjengelig (CARST), eller så egnet ikke koden seg for utvidelse (RADEK).

Med dette som utgangspunkt startet prosjekt 726 utviklingen av en egen multistatisk radardekningsimulator.

Rapporten inneholder dokumentasjon av algoritmer lagt inn i radardekningssimulatoren, og det gjøres rede for de forutsetninger og antakelser som er gjort for de enkelte algoritmene. Rapporten er ikke en bruksanvisning for radardekningssimulatoren.

### **2 MÅLSETTING**

Målsettingen med radardekningssimulatoren har først og fremst vært å utvide dagens radardekningsimulatorer med muligheten til å simulere multistatiske radarsystemer. I denne prosessen valgte prosjekt 726 å inkludere de mest dominerende fysiske prosessene som berører radarbølgeutbredelsen for frekvenser over 100MHz. Disse er gjeldende både for Continuous Wave (CW) radarer og radarer som sender et pulset signal.

### **3 FYSIKK**

I dette kapitlet presenterer vi effekter som simuleres. Algoritmene, deres forutsetninger og begrensninger blir forklart.

#### **3.1 Terrengmodell**

Den digitale terrengmodellen genereres fra Digital Terrain Elevation Data (DTED) Level 1, (1). DTED kartene har vertikal oppløsning på en meter, og den horisontale oppløsningen i lengde-

og breddegrad er delt inn i fem soner, avhengig av breddegrad:

| Sone | Breddegrad                | Oppløsning, bredde X lengdegrad |
|------|---------------------------|---------------------------------|
| I    | 0 grader – 50 grader N/S  | 3 sekunder X 3 sekunder         |
| II   | 50 grader – 70 grader N/S | 3 sekunder X 6 sekunder         |
| III  | 70 grader – 75 grader N/S | 3 sekunder X 9 sekunder         |
| IV   | 75 grader – 80 grader N/S | 3 sekunder X 12 sekunder        |
| V    | 80 grader – 90 grader N/S | 3 sekunder X 18 sekunder        |

Dataene er organisert i matriser på  $1^\circ \times 1^\circ$ . Innenfor en slik  $1^\circ \times 1^\circ$  matrise er den vertikale nøyaktigheten bedre enn  $20m$ , med horisontal nøyaktighet bedre enn  $30m$  for 90% av data.

I de sydlige deler av Norge svarer oppløsningen til omtrent  $90m \times 90m$ . Dataene er organisert under World Geodetic System 1984 (WGS84) standarden, (2). Koordinatene i WGS84 er breddegrad, lengdegrad og høyde over ellipsoiden. Konverteringsformler mellom det rektangulære  $(x, y, z)$  koordinatsystemet og de geodetiske koordinatene bredde-, lengdegrad og høyde over ellipsoiden,  $(\phi, \lambda, h)$  er gitt ved

$$\begin{aligned}
 x(\phi, \lambda, h) &= (N + h) \cos \phi \cos \lambda \\
 y(\phi, \lambda, h) &= (N + h) \cos \phi \sin \lambda, \\
 z(\phi, h) &= \left( \frac{b^2}{a^2} N + h \right) \sin \phi
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

hvor

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}}.
 \tag{3.2}$$

Konstantene  $a = 6378137,0m$  og  $b = 6356752,3142m$  er henholdsvis store og lille halvakse til ellipsoiden, mens  $e = 8,1819190842622 \cdot 10^{-2}$  er ellipsoidens eksentrisitet. Dermed er jordens radius på overflaten av ellipsoiden gitt for  $h = 0$  ved

$$R(\phi, \lambda, 0) = \sqrt{(x(\phi, \lambda, 0))^2 + (y(\phi, \lambda, 0))^2 + (z(\phi, 0))^2}.
 \tag{3.3}$$

Det digitale terrenget kan interpoleres til ønsket oppløsning, enten det betyr en reduksjon eller økning av antall gridpunkter på et område. Flere interpolasjonsalgoritmer kan benyttes: Nærmeste nabo, bilinear, spline eller bikubisk.

### 3.2 Signal-til-støyforhold, enveispropagering fra sender til mottaker

Enveispropagering inntreffer i et radarsystem når mottaker mottar signal direkte fra sender uten at signalet har vært reflektert fra hverken mål eller terreng. Signal-til-støyforholdet for direktesignal,  $(S/N)_D$  er da (3)

$$\left(\frac{S}{N}\right)_D = \frac{P_T M G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 R^2 N_0 B L_T L_R L_P}, \quad (3.4)$$

hvor  $P_T$  er utsendt effekt,  $M$  er antallet bit vi integrerer og  $B$  er båndbredden. Støyen i mottaker er  $N_0$ , og tap i sender, mottaker og propagering er henholdsvis  $L_T$ ,  $L_R$  og  $L_P$ . Forsterkning i senderantennen er  $G_T$ , og tilsvarende forsterkning i mottakerantennen er  $G_R$ , mens bølgelengden til utsendt signal er  $\lambda$ . Avstanden fra sender til mottaker er  $R$ .

Ligningen benyttes til å beregne signal over støy fra mottaker etter prosessering. I prosesseringen antas ingen tap. Dersom prosesseringen har tap, kan dette inkluderes i tapet i mottakeren,  $L_R$ . Tiden vi prosesserer over er  $M/B$ .

I et multistatisk radarsystem risikerer man å sende direkte inn i mottaker med en eller flere av senderne. Dette bør i utgangspunktet unngås, men dersom topografi og lokale forhold gjør det nødvendig, er det viktig å ha oversikt over konsekvensene. I en tradisjonell monostatisk pulset radar derimot er ikke enveispropagering noe problem. Direktesignalet kommer i null avstand, hvor man befinner seg, og mottakeren kan skrus av så lenge signalet sendes, og skrus på når signalet er tilstrekkelig langt unna.

### 3.3 Signal-til-støyforhold, bistatisk radarligning

Den bistatiske radarligningen (3) for signal-til-støyforhold,  $(S/N)_B$  er

$$\left(\frac{S}{N}\right)_B = \frac{P_T M G_T \sigma_B G_R \lambda^2}{(4\pi)^3 R_T^2 R_R^2 N_0 B L_T L_R L_P}, \quad (3.5)$$

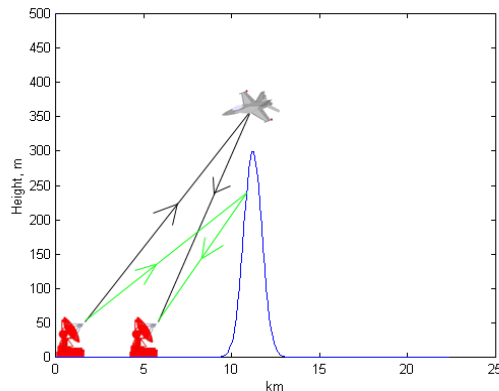
hvor  $P_T$  er utsendt effekt,  $M$  er antallet bit vi integrerer ved båndbredden  $B$ . Støyen i mottaker er  $N_0$ , og tap i sender, mottaker og propagering er henholdsvis  $L_T$ ,  $L_R$  og  $L_P$ . Forsterkning i senderantennen er  $G_T$ , og tilsvarende er forsterkning i mottakerantennen  $G_R$ . Det bistatiske radartverrsnittet (Radar Cross Section - RCS) er  $\sigma_B$ , mens bølgelengden til utsendt signal er  $\lambda$ . Avstanden fra sender til mål og avstanden fra mottaker til mål er henholdsvis  $R_T$  og  $R_R$ .

Ligningen benyttes til å beregne signal over støy fra mottaker etter prosessering. I prosesseringen antas ingen tap. Dersom prosesseringen har tap, kan dette inkluderes i tapet i mottakeren,  $L_R$ . Tiden vi prosesserer over er  $M/B$ .

Mottatt signal er påvirket av en rekke fysiske fenomener på sin vei fra sender til mottaker. I radarsimulatoren har vi inkludert effekter som terrengrefleksjon, refraksjon, diffraksjon, atmosfærisk demping og nedbørsdemping. Alle disse effektene med unntak av refleksjon fra terrenget kommer inn i propageringstapet  $L_P$ . Terrengrefleksjonen kommer i en egen betraktning, signal-til-clutterforhold. Modellering av disse effektene beskrives i det videre.

### 3.4 Terrefleksjon, signal-til-clutterforhold

Den tekniske utvikling har gjort at trusselen fra lavtflygende objekter blir stadig større. Lavdekning blir dermed stadig viktigere for radarsystemer. I et slikt scenario er det viktig å være i stand til å beregne korrekt lavdekning for et utplassert radarsystem. Lavdekning betyr også at radarsystemet blir stilt overfor store utfordringer i form av sterke radarekko fra terrenget. Dette gjelder for både pulsede radarer og CW radarer, slik det er illustrert i Figur 3.1. CW radarer har derimot et større potensial for problemer med radarekko fra terrenget siden de sender kontinuerlig og har dermed også mulighet for å motta signal kontinuerlig. I en CW radar kan et sterkt radarekko fra terrenget i en avstandscelle maskere mål i andre avstandsceller, avhengig av hvor god prosesseringen er til å skille mål og clutter. Det er dermed viktig å være i stand til å forutsi slike situasjoner. Det tilsvarende tilfellet inntreffer for en radar som sender pulsede signal når ekko fra målet er i samme avstandscelle som ekko fra terrenget.



Figur 3.1 Figuren viser et bistatisk radarsystem som belyser både terrenget og målet. I et slikt scenario er det viktig at signal-til-clutterforholdet ikke blir for lavt, slik at målets radarekko forsvinner i radarekkoet fra terrenget.

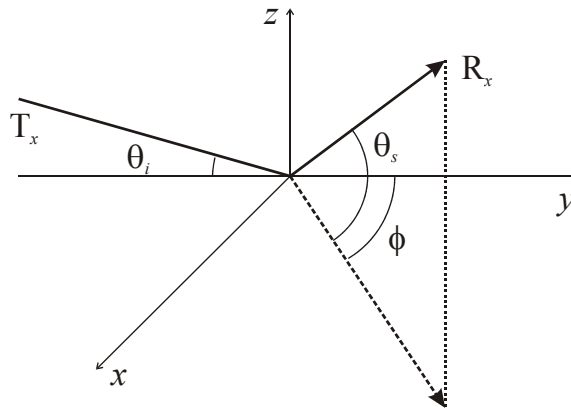
Signal-til-clutterforholdet modelleres ved hjelp av bistatisk radarteori fra Skolnik (4). Det bistatiske radartverrsnittet  $\sigma_c$  til en belyst cluttercelle med fysisk areal  $A_c$  er gitt

$$\sigma_c = \sigma_B A_c, \quad (3.6)$$

hvor  $\sigma_B$  er scatterkoeffisienten definert ved

$$\sigma_B = \gamma \sqrt{\sin \theta_i \sin \theta_s}. \quad (3.7)$$

Parameteren  $\gamma$  er en normalisert refleksivitetsparameter som finnes tabulert. Innfallende og reflektert ståle danner vinklene  $\theta_i$  og  $\theta_s$  med planet cluttercellen definerer, Figur 3.2.



Figur 3.2 Koordinatsystemet for bistatisk clutter. Vinkelen  $\theta_i$  er innfallende stråle i  $yz$ -planet, og  $\theta_s$  er reflektert stråle i planet som inneholder  $z$ -aksen.

Clutterbidraget for en CW radar kan dermed beregnes fra

$$\frac{S}{C} = \frac{\frac{\sigma_T}{R_T^2 R_R^2}}{\sum_i \frac{\sigma_{ci}}{R_{Ti}^2 R_{Ri}^2}}, \quad (3.8)$$

hvor  $\sigma_T$  er målets radartverrsnitt, og  $R_T$  og  $R_R$  er henholdsvis avstand fra sender til mål og mottaker til mål. Størrelsen  $\sigma_{ci}$  er det bistatiske radartverrsnittet til den belyste cluttercellen  $i$ , og  $R_{Ti}$  og  $R_{Ri}$  er avstand fra sender til cluttercelle  $i$  og mottaker til cluttercelle  $i$ . Summen går over alle belyste clutterceller.

For pulsed radarer er det kun clutterceller i samme avstandscelle som målet som kan maskere bort mål. Ligning (3.8) gjelder også for radarer som sender pulsed signaler, men da gjelder summen kun over clutterceller i samme avstandscelle som målet.

### 3.5 Refraksjon

Avbøyningen i atmosfæren, refraksjonen, modelleres med en metode som kalles effektiv jordradiemodell. Fordelen med denne måten å modellere refraksjonen på er at strålefølging kan gjøres ved hjelp av rette linjer, noe som senker beregningstiden. I en slik modell ligger en del forutsetninger som vi skal belyse.

Refraktiviteten  $N$  defineres ut fra den refraktive indeks  $n$ , og er gitt som

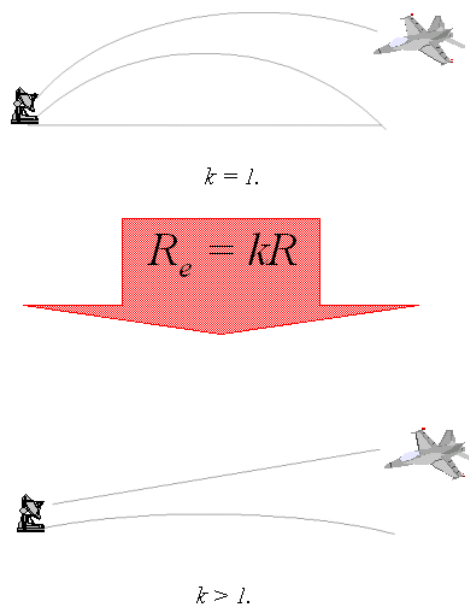
$$N = (n - 1) \times 10^6. \quad (3.9)$$

Både refraktiviteten  $N$  og den refraktive indeks er dimensjonsløse størrelser. En utbredt modell for refraktiviteten er gitt av Debye (5) ved

$$N = 77,6 \frac{P}{T} + 3,73 \times 10^5 \frac{e}{T^2}, \quad (3.10)$$

der  $P$  er trykk i *mbar*,  $T$  er absolutt temperatur i Kelvin og  $e$  er det partielle vanndampstrykket.

Tanken bak den effektive jordradien er at forskjellen mellom jordoverflatens og radarbølgenes krumming skal være lik forskjellen mellom krummingen til en rett linje og en effektiv jordradius sin krumming. Strålefølging kan da gjøres for rette linjer, noe som senker beregningstiden. Prinsippet bak effektiv jordradiemodell er skissert i Figur 3.3.



*Figur 3.3* Figuren illustrerer konseptet jordradiemodell. Den øverste figuren viser hvordan bølgeutbredelsen følger en krum kurve. I den nederste figuren har vi endret på jordoverflatens krumming for å kunne følge bølgeutbredelsen med lineær strålefølging.

Den refraktive indeks og refraktiviteten er avhengig av trykk, temperatur og partielt vanndampstrykk, som vi igjen antar kun er funksjoner av høyden  $h$ . Vi deriverer (3.9) med hensyn på høyden og får

$$\frac{dN}{dh} = \frac{dn}{dh} 10^6. \quad (3.11)$$

Det kan vises, (6), at for radarbølger med høye frekvenser med krumming lik

$$1/\rho = \text{konstant} \quad (3.12)$$

langs utbredelsesretningen er

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{1}{n} \frac{dn}{dh} \cos \theta, \quad (3.13)$$

hvor  $\theta$  er vinkelen radarbølgene danner med tangentplanet til jordkloden i radarens posisjon. Når krummingen er konstant slik vi har antatt i ligning (3.12), er utbredelsesveien en del av en sirkelbue med radius  $\rho$ . For små vinkler,  $\theta \ll 1$  og i lav høyde over jordoverflaten, hvor normalt  $n \approx 1$  kan vi skrive (3.13)

$$\frac{1}{\rho} \approx -\frac{dn}{dh}. \quad (3.14)$$

Dermed kan vi forlange at vi skal ha den samme differansen i krumming mellom jordoverflaten og radarbølgenes utbredelse som mellom en rett linje og en effektiv jordoverflate. Dette betyr

$$\frac{1}{\rho} - \frac{1}{R} = 0 - \frac{1}{R_E}, \quad (3.15)$$

hvor  $R$  er jordklodens radius og  $R_E$  er den effektive jordradius. Vi løser ligningen med hensyn på  $R_E$

$$R_E = \frac{1}{\frac{1}{R} - \frac{1}{\rho}} \quad \text{for} \quad \rho \neq R. \quad (3.16)$$

Ligning (3.16) innsatt (3.11) og (3.14) gir da

$$R_E = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{dN}{dh} 10^{-6}} \quad \text{for} \quad \frac{1}{R} + \frac{dN}{dh} 10^{-6} \neq 0. \quad (3.17)$$

Effektiv jordradiemodell definerer sammenhengen

$$R_E = kR, \quad (3.18)$$

hvor  $R$  er jordklodens radius,  $R_E$  den effektive jordradius, mens  $k$  er en faktor som sier noe om størrelsesforholdet mellom disse. Så lenge  $k$  er positiv krummer den effektive jordoverflaten nedover, mens for negative  $k$  krummer den oppover, sett fra en observatør på jordoverflaten. Figur 3.3 viser tilfellene  $k = 1$  og  $k > 1$ . Dersom  $k$  er uendelig positiv eller negativ er jordoverflaten flat. Ligning (3.18) innsatt (3.17) gir dermed

$$k = \frac{1}{1 + \frac{dN}{dh} 10^{-6} R} \quad \text{for} \quad \frac{dN}{dh} 10^{-6} R \neq -1. \quad (3.19)$$

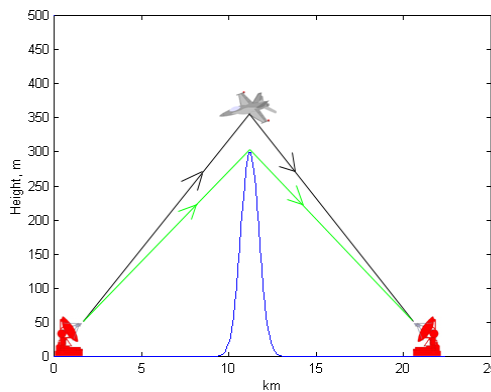
Denne ligningen kan brukes sammen med (3.11) for å regne seg frem og tilbake mellom de

forskjellige enhetene  $k$ ,  $dn/dh$  og  $dN/dh$ . Standard refraksjon for radarbølger i den effektive jordradiemodellen er  $k = 4/3$ , som svarer til  $dN/dh \approx -40N/km$ .

For standard refraksjon i atmosfæren kan vi nå sette  $k = 4/3$ , generere jordoverflaten med den effektive jordradius  $R_E$  fra ligning (3.19), og deretter gjøre lineær strålefølging. Algoritmen kan også gjøre strålefølging for andre verdier av  $k$ , eller  $dN/dh$ , med andre ord simulere andre refraksjonsforhold under forutsetningene gitt i dette avsnittet.

### 3.6 Diffraksjon

Selv med en hindring mellom sender og mottaker er det muligheter for at signalet fra sender til mottaker, avsnitt 3.2, er sterkere enn signalet fra sender via mål til mottaker, avsnitt 3.3. Signalgangen for de to tilfellene er skissert i Figur 3.4. Hvilket av signalene som er det sterkeste, og om det blir et problem i radarsystemet må analyseres i hvert enkelt tilfelle.



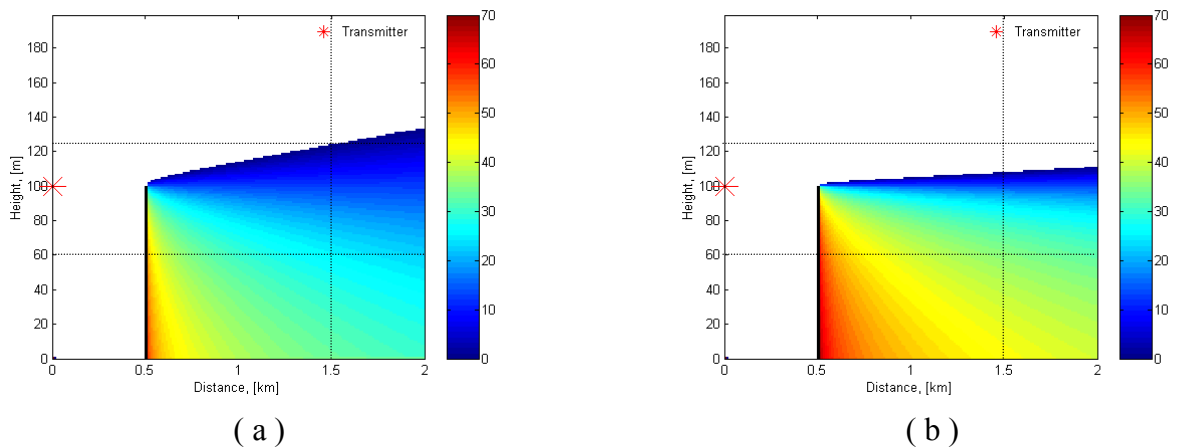
Figur 3.4 Figuren viser hvordan signal fra sender kommer til mottaker på to forskjellige måter: diffraktert over en ås eller reflektert fra et mål

Diffraksjonen modelleres med The International Telecommunication Union (ITU) sin anbefaling ITU-R P.526-6 for diffraksjon over hindringer og irregulært terreng (7).

Figur 3.5 viser enveis diffraksjonstap over en knivegg i 500m avstand fra sender med hindring i samme høyde som sender, 100m. Senderen er markert med en rød \*. Figur (a) viser diffraksjonstapet for frekvensen 500MHz, mens figur (b) viser diffraksjonstapet for 5000MHz. Kolonnen til høyre i figuren angir fargekodingen av tapet i dB. Hvit angir null tap. Fra figuren ser vi at diffraksjonstapet inntreffer også i de områder hvor man har frisikt. Dette blir spesielt tydelig for lavere frekvenser, der vi har diffraksjonstap i et mye større område enn for 5000MHz. For eksempel viser figuren at diffraksjonstapet inntreffer i 125 meters høyde ved 1,5km for 500MHz frekvens, mens det ikke er noe diffraksjonstap i tilsvarende høyde ved 1,5km for 5000MHz.

Samtidig ser vi at når først diffraksjonen inntreffer kan den medføre langt større tap for de høyere frekvensene enn for de lave. I 1,5km avstand i 60m høyde ser vi at diffraksjonstapet for 500MHz ligger rundt 25dB, mens tapet for tilsvarende posisjon med 5000MHz er rundt 35dB.



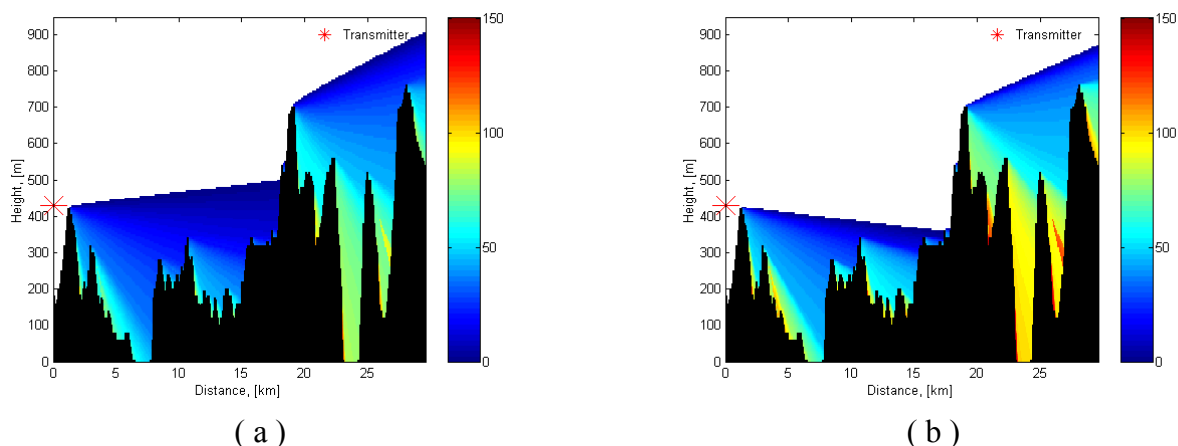


Figur 3.5 Figuren viser enveis diffraksjonstap over en knivegg i 500m avstand og med 100m høyde for en sender i høyde 100m. Senderen er markert med en rød \*. Figur (a) viser diffraksjonstapet for frekvensen 500MHz, mens figur (b) viser diffraksjonstapet for 5000MHz. Kolonnen til høyre angir fargekodingen av tapet i dB. Hvit angir null tap. De stiplede linjene angir referanser for sammenligning med ulike frekvenser.

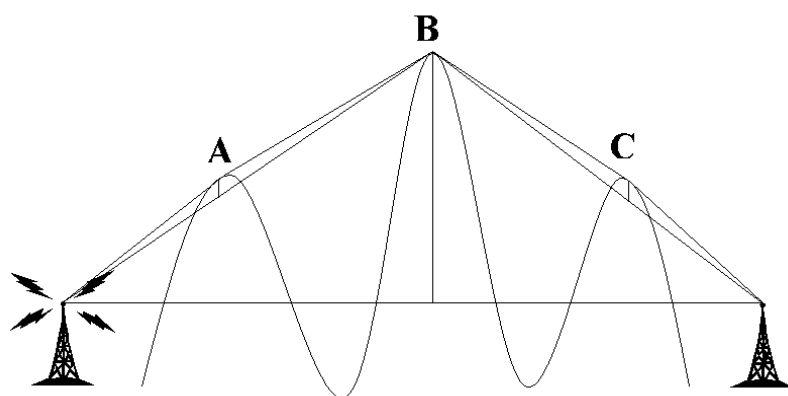
Figur 3.6 viser enveis diffraksjonstap over norsk terreng. Senderen er markert med en rød \*. Figur (a) viser diffraksjonstapet for frekvensen 500MHz, mens figur (b) viser diffraksjonstapet for frekvensen 5000MHz. Kolonnen til høyre angir fargekodingen av tapet i dB. Hvit angir null tap. Figuren viser at algoritmen bryter sammen når det blir mange kanter mellom sender og mottakerpunkt. Dette skal vi belyse nærmere.

Algoritmen er en modifisert Deygoutalgoritme (8) med maksimalt tre kanter. Prinsippet er illustrert i Figur 3.7. Først beregnes diffraksjonstapet fra sender til mottaker, deretter beregnes diffraksjonstapet fra sender til B over A og fra B til mottaker over C. Kanten B velges ut som den med størst høyde over den rette linje mellom sender og mottaker. Kantene A og C velges tilsvarende ut som de største høydene over den rette linjen mellom henholdsvis sender og B og B og mottaker.

Algoritmen deler gangveien mellom sender og mottaker opp i tre deler, der diffraksjonstapet beregnes ut fra hvilke kanter som oppfattes som de dominerende, A, B og C. Utvelgelsen av kanter kan føre til at diffraksjonstapet fra sender til to nærliggende mottakerpunkter kan bli forskjellig, da algoritmen oppfatter forskjellige kanter som dominerende. Dette er tilfellet i Figur 3.6, der algoritmen har valgt forskjellige dominerende kanter som funksjon av mottakerposisjon i dalen ved 25km. Diffraksjonstapet blir ikke en kontinuerlig funksjon, men har klare diskontinuiteter. I figuren er det så store tap i dB at noe deteksjon med radar ikke er mulig. Vi kan tenke oss tilfeller der slike kant-avhengige fenomener vil opptre også for mindre tap, selv om dette i praksis vil være sjelden.



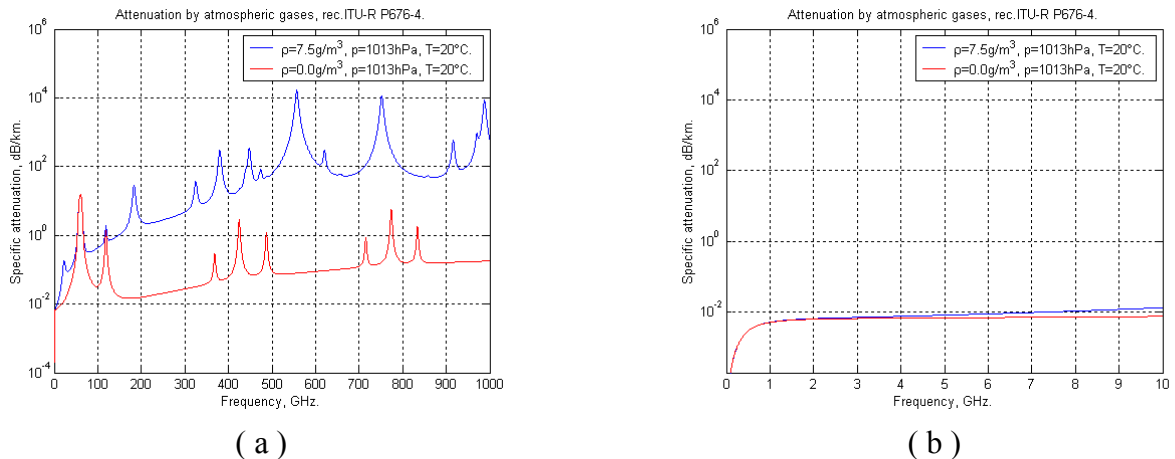
Figur 3.6 Figuren viser enveis diffraksjonstap over norsk terreng. Senderen er markert med en rød \*. Figur (a) viser diffraksjonstapet for frekvensen 500MHz, mens figur (b) viser diffraksjonstapet for 5000MHz. Kolonnen til høyre angir fargekodingen for tapet i dB. Hvit angir null tap.



Figur 3.7 Figuren illustrerer prinsippet bak ITU-R P.526-6, diffraksjon over hindringer og irregulært terreng. Først beregnes diffraksjonstapet fra sender til mottaker, deretter beregnes diffraksjonstapet fra sender til B over A og fra B til mottaker over C. Kantene B velges ut som den med størst høyde over den rette linje mellom sender og mottaker. Kantene A og C velges tilsvarende ut som de største høydene over den rette linjen mellom henholdsvis sender og B og B og mottaker.

### 3.7 Atmosfærisk demping

Den atmosfæriske demping modelleres med ITU Recommendation ITU-R P.676-4 (9). Med atmosfærisk demping menes her demping av signalstyrke pr km som funksjon av frekvens, trykk, temperatur og fuktighet. Modellen fra ITU gjelder i frekvensområdet 0-1000GHz. Figur 3.8 viser eksempler på standard fuktig og tørr atmosfæres enveis demping pr km som funksjon av frekvens i området 0-1000GHz.

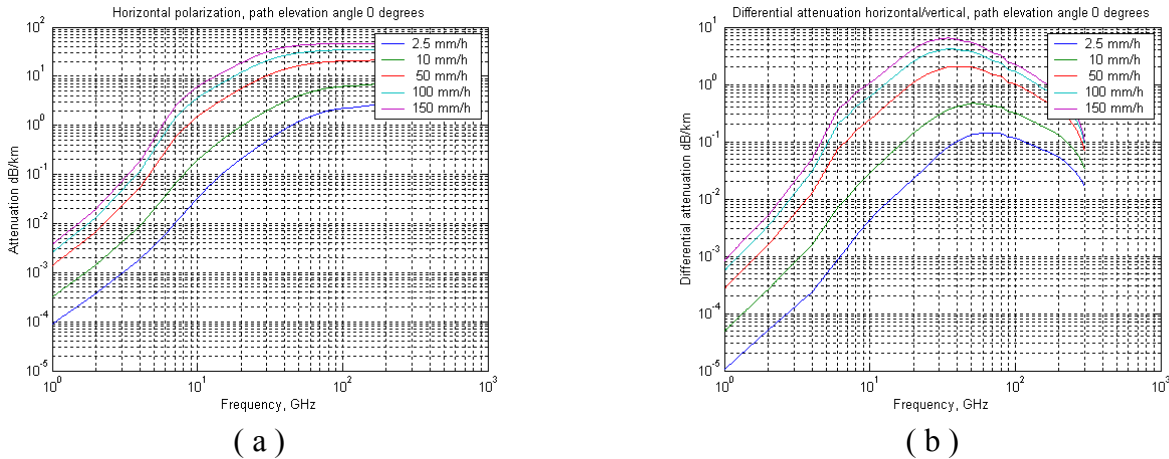


Figur 3.8 Figurene viser enveis demping pr km som funksjon av frekvens for standard fuktig (blå) og tørr atmosfære (rød). Figur (b) er et utsnitt av frekvensområdet 0–10GHz fra figur (a).

### 3.8 Nedbørsdemping

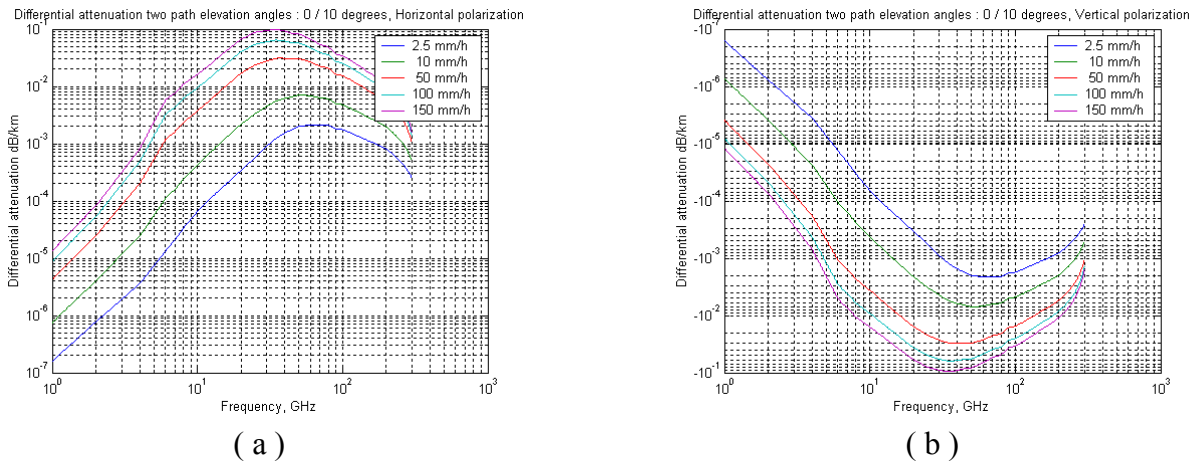
Nedbørsdempingen modelleres med ITU Recommendation ITU-R P.838-1 (10). Modellen fra ITU gjelder for frekvensområdet 0-55GHz. Med nedbørsdemping menes her demping av signalstyrke pr km som funksjon av frekvens, polarisasjon, elevasjon og regnrate. Ytterligere informasjon kan finnes i (10) og (11).

Figur 3.9 viser enveis propageringstap som funksjon av frekvens for ulike regnrater og polarisasjoner. Figur (a) viser tap i signalstyrke pr km for horisontal polarisasjon ved ulike regnrater og null grader elevasjon. Figur (b) viser forskjellen i signalstyrketap pr km for horisontal i forhold til vertikal polarisasjon som funksjon av frekvens for ulike regnrater ved null grader elevasjon. Figurene viser at det er betydelig forskjell på regnets innvirkning for de høyere frekvenser, der horisontal polarisasjon dempes betydelig mer enn vertikal polarisasjon, noe som henger sammen med den flattrukete formen dråpene har. For lavere frekvenser er forskjellen i demping liten.



**Figur 3.9** *Figuren viser enveis propageringstap som funksjon av frekvens for ulike regnrater og polarisasjoner. Figur (a) viser signalstyrketap pr km for horisontal polarisasjon ved ulike regnrater og null grader elevasjon. Figur (b) viser forskjellen i tap pr km for horisontal i forhold til vertikal polarisasjon som funksjon av frekvens for ulike regnrater ved null grader elevasjon.*

Figur 3.10 viser betydningen av elevasjonsvinkel for enveis tap i signalstyrke pr km som funksjon av frekvens for ulike regnrater og polarisasjon. Elevasjonen er satt til 0 og 10 grader. Figur (a) viser tapet pr km for horisontal polarisasjon, mens figur (b) viser signalstyrke tapet pr km for vertikal polarisasjon. Figurene viser at for små elevasjonsvinkler er ikke forskjellen i demping mellom horisontal og vertikal polarisasjon stor. Vi legger også merke til at tap pr km ser ut til å være tilnærmet symmetrisk om 0dB tap pr km for horisontal og vertikal polarisasjon når vi sammenligner elevasjonsvinklene.



**Figur 3.10** *Figuren viser enveis propageringstap som funksjon av frekvens for ulike regnrater. Figur (a) viser forskjellen i demping av signalstyrke pr km for 0 og 10 grader elevasjon for horisontal polarisasjon, mens figur (b) viser tilsvarende for vertikal polarisasjon.*

Dersom gangveien for radarbølgene er lang er sannsynligheten for at det regner like mye hele veien liten, (11). Jo mer intens en regnbyge er, jo mindre er regnbyggets fysiske utstrekning. I

modellen (11) er dette innført som en effektiv gangvei,  $d_{eff}$ .

$$d_{eff} = rd, \quad (3.20)$$

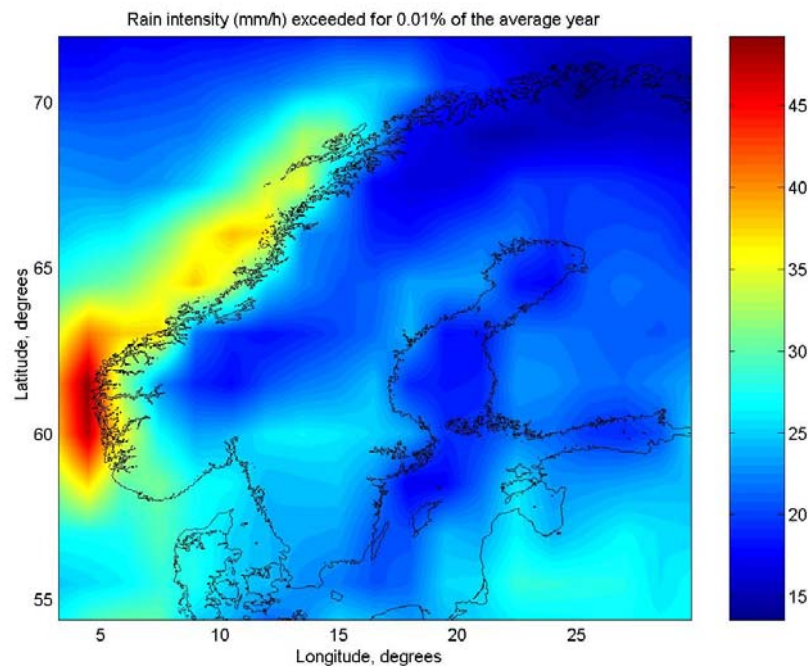
hvor  $d$  er fysisk gangvei, mens  $r$  er en faktor som reduserer  $d_{eff}$  når  $d$  øker. Vi definerer

$$r = \frac{1}{1 + \frac{d}{d_0}}, \quad (3.21)$$

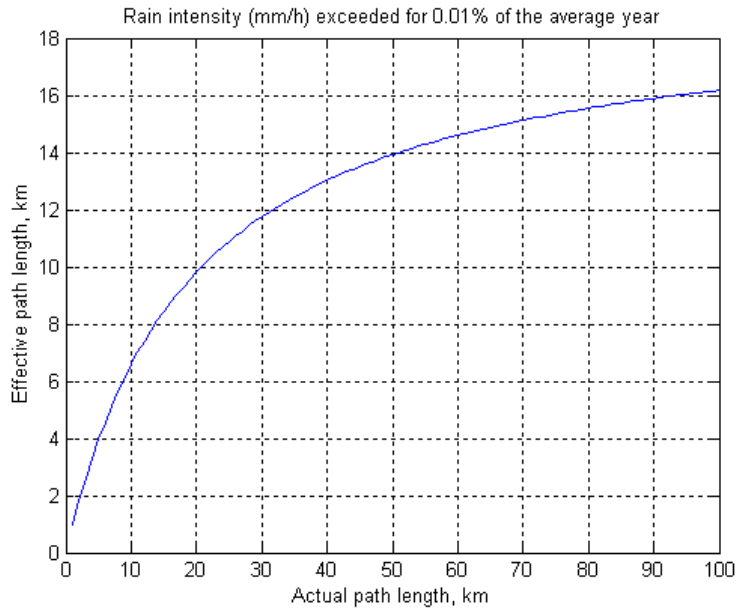
hvor  $d_0$  er en regnrateshengig faktor som reflekterer antagelsen at jo større intensitet en regnbygge har, jo mindre er dens fysiske utstrekning. Parameteren  $d_0$  finnes fra

$$d_0 = 35e^{-0.015R_{0.01}}, \quad (3.22)$$

hvor  $R_{0.01}$  er regnintensiteten i  $mm/h$  som overstiges 0.01% av et gjennomsnitts år på det stedet hvor vi er interessert å estimere regnbyggets sannsynlige utstrekning. Vi bruker ITU Recommendation ITU-R P837-3 (12) for å finne  $R_{0.01}$ . Figur 3.11 viser  $R_{0.01}$  for Skandinavia, mens Figur 3.12 viser fysisk gangvei kontra effektiv gangvei for vestlandsområdet i Norge.



Figur 3.11 Figuren viser regnintensiteten,  $R_{0.01}$ , i  $mm/h$  som overstiges 0.01% av et gjennomsnittlig år i Skandinavia.



Figur 3.12 Figuren viser hvordan den effektive gangveien forholder seg til den fysiske for et område på vestlandet i Norge.

Vi kan nå beregne tap over hele gangveien til radarbølgene, som

$$A_{0.01} = \gamma_R d_{eff}, \quad (3.23)$$

hvor  $A_{0.01}$  er tap pr km oversteget i 0.01% av tiden,  $\gamma_R$  er tap pr km funnet med ITU Recommendation ITU-R P.838-1, og  $d_{eff}$  er som over. For andre prosentandeler  $p$  enn 0.01% av gjennomsnittlig år kan vi benytte (11)

$$A_p = A_{0.01} \times 0.12 p^{-(0.546+0.043 \log_{10} p)}, \quad (3.24)$$

hvor  $0.001\% \leq p \leq 1\%$ .

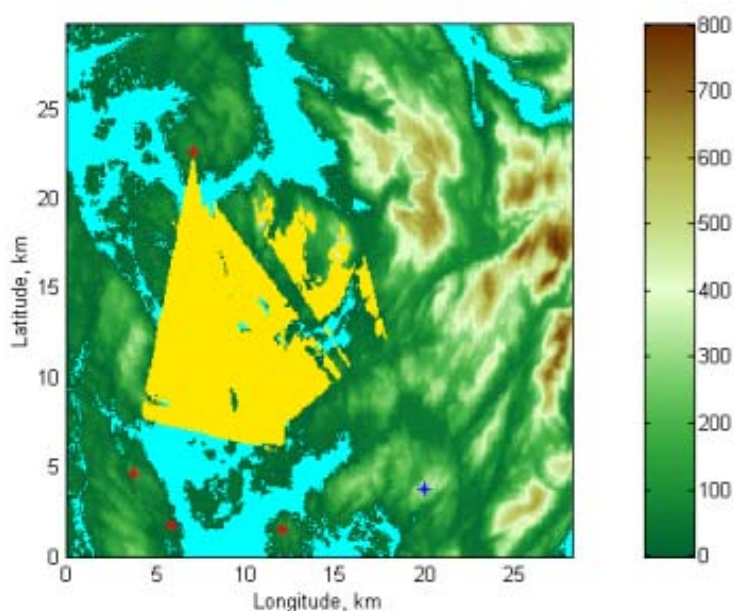
## 4 RESULTATER

Eksempler på resultater fra radardekningssimulatoren for forskjellige scenarier vil bli vist i dette kapittelet.

### 4.1 Eksempler på dekningsberegninger for radar

Figur 4.1 viser dekningsberegning for et multistatisk radarsystem utplassert hvis formål er å overvåke en fjord. Det gule området angir dekningsområdet for radarsystemet i trusselhøyden. Trusselen kommer i en gitt høyde over havet. Det er utplassert fire stasjonære sendere (røde \*), som sender med 10W effekt, og en mottaker med scannende antenne (blå \*). Senderantennene er stasjonære med antenne-lober på 20 grader i azimuth og elevasjon. Mottakeren er en antenne

med lobe på 2 grader i azimuth og elevasjon, der loben kan flytte seg 60 grader i azimuth og 10 grader i elevasjon. Senderantennene har en forsterkning på  $20\text{dB}$ , mens mottakerantennen har et forsterkning på  $37\text{dB}$ . Målet er tildelt et RCS på  $-10\text{dBsm}$ , og prosesseringen kan skille mål og clutter med et signal-til-clutterforhold på minst  $S/C = -50\text{dB}$ , og signal-til-støyforhold på minst  $S/N = 10\text{dB}$ .



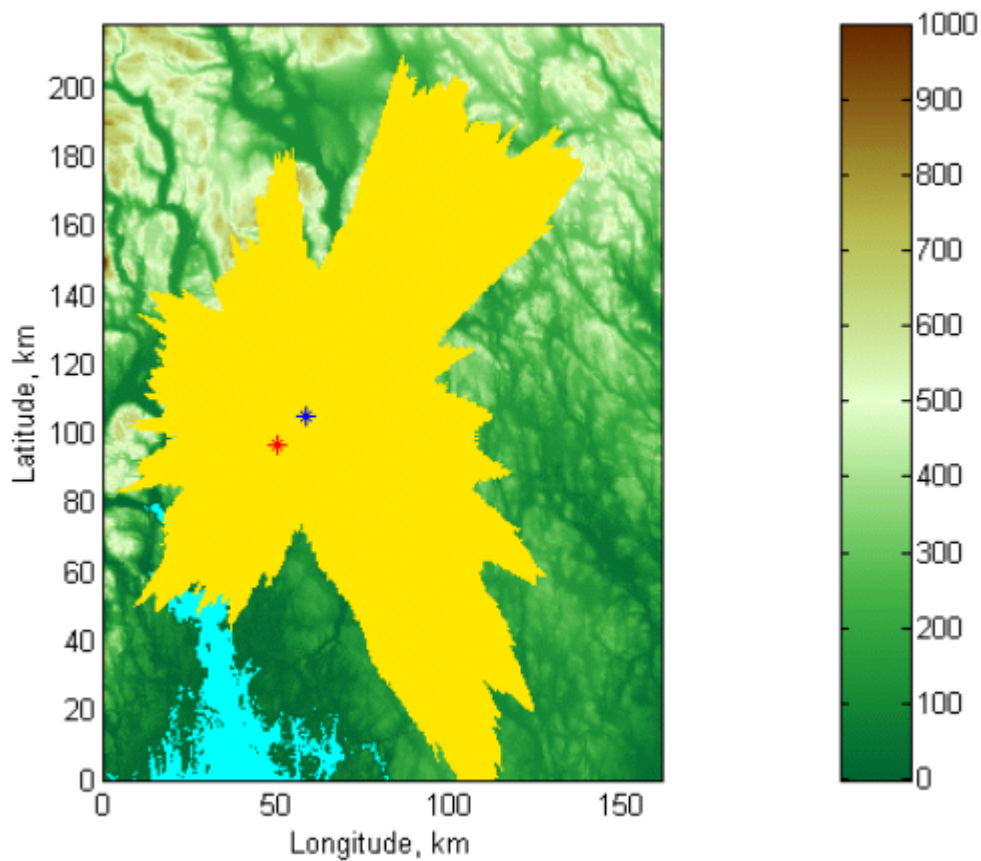
*Figur 4.1* Figuren viser deknningen for et multistatisk radarsystem hvis formål er å overvåke en fjord. Trusselen er tenkt å komme i en gitt høyde over havet. Gult område angir dekningsområde i denne høyden. Det er utplassert fire stasjonære sendere (røde \*) og en scannende mottaker antenne (blå \*). Kolonnen til høyre angir terrengets høyde i meter.

Figur 4.1 viser at radarsystemet har god dekning (gule områder) i det området vi ønsker det skal overvåke, men vi ser også at den nordligste senderen jammer mottakeren i en sektor. I det samme området er det en del terrenkskygging, selv om deknningen må sies å være tilstrekkelig.

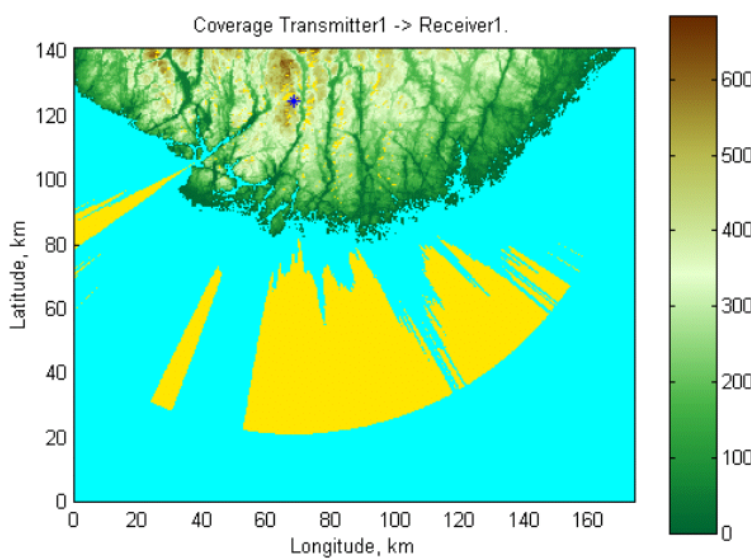
Figur 4.2 viser simulert dekning for et bistatisk radarsystem med oppgave å overvåke luftrommet over Oslo. Trusselen kommer i en gitt høyde over havet, lavt over terrenget. Det gule området angir dekning i denne høyden med de parametre som radarsystemet er satt opp med.

Figur 4.3 viser simulering av områder hvor Meteorologisk institutts monostatiske værradar på Torshei kan få problemer med clutter fra sjø og land.





Figur 4.2 *Figuren viser simulert dekning for et bistatisk radarsystem med oppgave å overvåke luftrommet over Oslo. Trusselen kommer i en gitt høyde over havet, lavt over terrenget. Gult område angir dekningsområde i denne høyden. Kolonnen til høyre angir terrengets høyde i meter.*

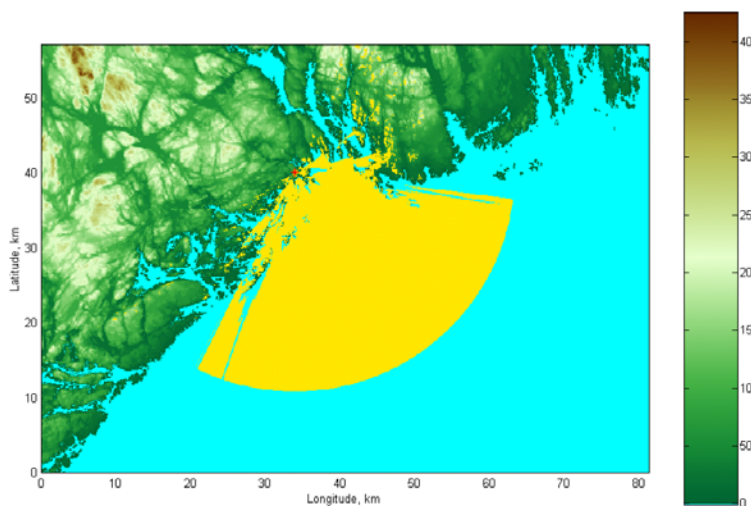


Figur 4.3 *Figuren viser simulering av områder (gule områder) hvor Meteorologisk institutts værradar på Torshei kan få problemer med clutter fra sjø og land. Radaren er monostatisk. Kolonnen til høyre angir terrengets høyde i meter.*

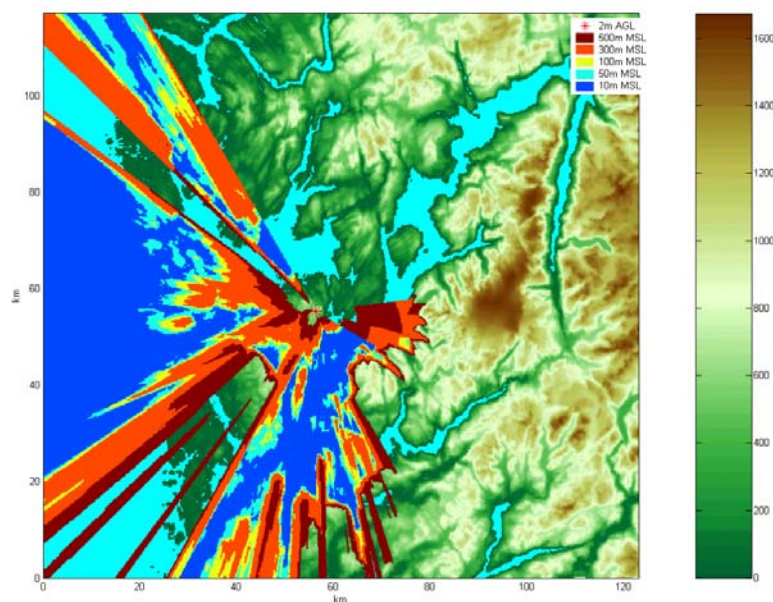


## 4.2 Beregning av visuell sikt

Med algoritmene som er beskrevet i denne rapporten er det mulig å beregne visuell sikt fra et punkt til det omliggende terreng eller høyde over terreng/hav. Figur 4.4 viser et eksempel på visuell sikt til jordoverflaten fra et utsiktspunkt i Sør-Norge, mens Figur 4.5 viser et eksempel på visuell sikt til flere høyder over havet fra et utsiktspunkt i Vest-Norge. Simuleringer av denne typen følger enkelt fra de algoritmene vi har implementert.



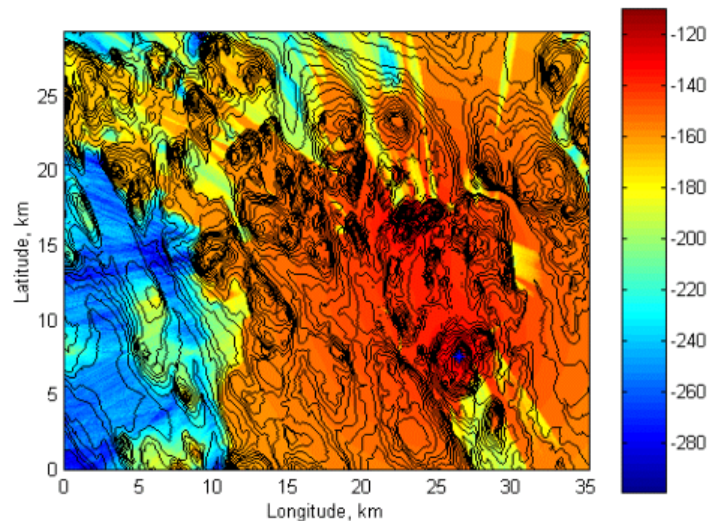
Figur 4.4 Figuren viser et eksempel på simulert visuell sikt (gule områder) til jordoverflaten fra et utsiktspunkt i Sør-Norge. Kolonnen til høyre angir terrengets høyde i meter.



Figur 4.5 Figuren viser et eksempel på simulert visuell sikt (fargede områder - brun, rød, gul, turkis og blå) til høyder over havet fra et utsiktspunkt i Vest-Norge. Kolonnen til høyre angir terrengets høyde i meter.

### 4.3 Andre bruksområder

Etter hvert som arbeidet med simulatoren skred frem dukket ønsket fra andre miljøer enn radarmiljøer opp. Eksempelvis kunne dette være å beregne signalnivåer over et terreng som funksjon av utsendt effekt fra en posisjon, Figur 4.6, fra mange posisjoner, eller en flybane. Dette er simuleringer som lar seg gjennomføre uten veldig stor innsats så lenge man har god kjennskap til kildekoden.



Figur 4.6 *Figuren viser signalnivå i dBW over terrenget som funksjon av posisjon, sendereffekt og terreng i et bistatisk radarsystem som benytter en rundstrålende antenne. Skala til høyre er i dBW.*

Både radardeknings- og visuell sikt beregningene kunne tenkes å kombineres med en mobil eller luftbåren sensor/sender. Da kan f eks dekning for flybårne avbildende radarer beregnes.

## 5 DISKUSJON

Prosjekt 726 har utviklet en radardekningsimulator som kan beregne dekning for et multistatisk eller monostatisk radarsystem. Dekning kan beregnes for både CW radarer og radarer som sender pulsede signal.

Forsvaret benytter i dag RADEK som beregner dekning for monostatisk radarer som sender et pulset signal. Radardekningssimulatoren utviklet i prosjekt 726 beregner dekningen for mono- og multistatiske radarer som enten pulser signalene eller sender kontinuerlige signal.

Av fysiske fenomener som påvirker radarens mulighet for å detektere mål, og som simuleres i radardekningssimulatoren er terrenget fra digitale kart, signal-til-støyforhold, signal-til-clutterforhold, refraksjon, diffraksjon, atmosfærisk demping og nedbørsdemping.

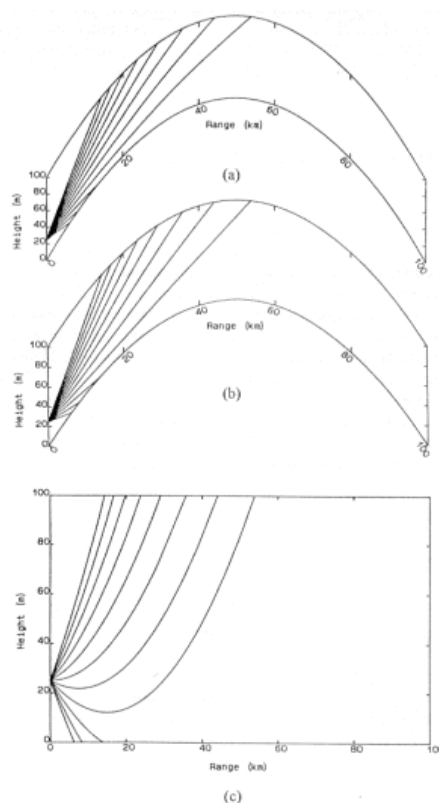
I RADEK beregnes signal-til-støyforholdet for de mål som radaren har fri sikt til. Dersom dette

forholdet er over en terskel har radaren dekning til målet. Radardekningssimulatoren utviklet i prosjekt 726 har mer komplette propageringsalgoritmer enn RADEK, som ikke tar hensyn til refleksjon fra terreng, diffraksjon eller atmosfærisk demping.

## 6 FORSLAG TIL VIDEREFØRING

Selv om radardekningssimulatoren utviklet i prosjekt 726 utgjør et løft av nivået i radardekningssimuleringer er det rom for forbedringer. Den største svakheten ligger i refraksjonsberegningene.

Refraksjonen beregnes med en konstant jordradiemodell slik det er beskrevet i avsnitt 3.5, og ytterligere illustrert i Figur 6.1. Men atmosfærens trykk, temperatur og vanndampstrykk (3.10) kan endre seg på helt andre måter enn det er beskrevet implisitt i likning (3.14). Spesielt gjelder dette for sjikting av atmosfæren, der en av størrelsene i likning (3.10) endrer seg mye over kort avstand, slik at det nærmest dannes en diskontinuitet i atmosfæren. Da kan et fenomen som kalles sjikting (ducting) oppstå.

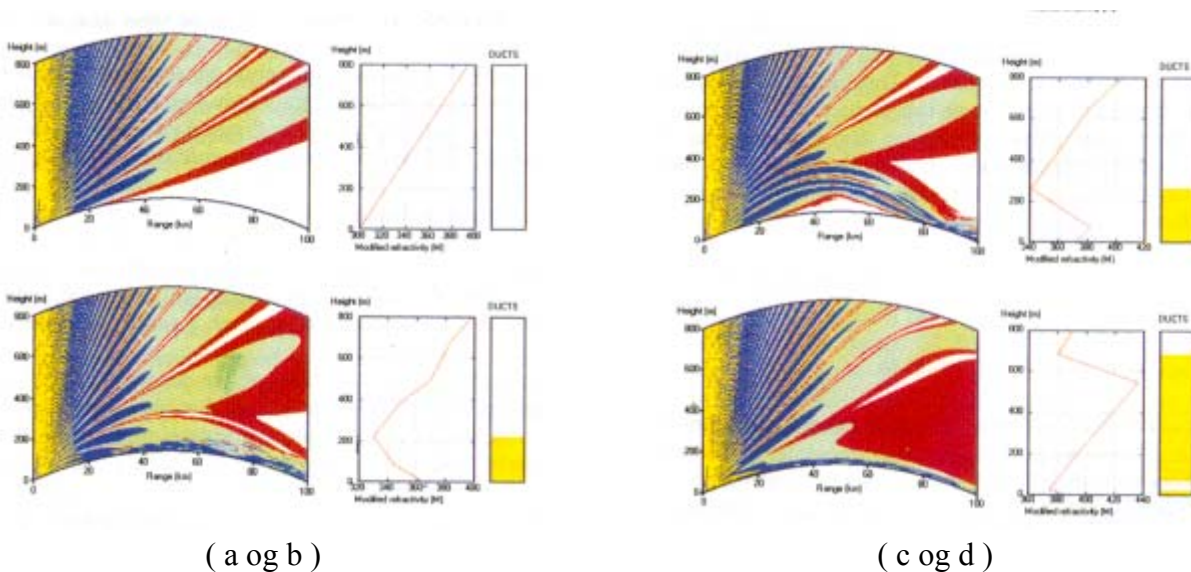


*Figur 6.1* Figuren illustrerer hvordan radardekningssimulatoren som er utviklet i prosjekt 726 behandler refraksjon. Figurene (a), (b) og (c) viser propageringsberegninger med konstant jordradiemodell for henholdsvis  $k=1$ ,  $k=4/3$  og  $k = \infty$ . Figuren er hentet fra (11).

I en videreutvikling av propageringsalgoritmene vil man benytte de siste utviklingene innen algoritmer for radarbølgeutbredelse, såkalte parabolic-equation metoder (PE). PE-metoder

inkluderer alle effekter som inngår i radarbølgeutbredelse: Flervegsutbredelse (multipath), refraksjon, diffraksjon, demping (attenuation) og sjikting (ducting).

Atmosfærens variasjon som funksjon av høyden beskrives ved en modifisert refraktivitetsprofil, slik det er vist i Figur 6.2. Figur 6.2 (a) viser standard atmosfære, der den modifiserte refraktivitetsprofilen da er gitt som en lineær funksjon. I figurene (b), (c) og (d) er den modifiserte refraktivitetsprofilen en ikke-lineær funksjon, og vi ser at det danner seg sjikt, som i stor grad påvirker radarbølgeutbredelsen. Figur 6.2 viser hvordan den samme radaren på 3GHz påvirkes av forskjellige sjikt i atmosfæren.



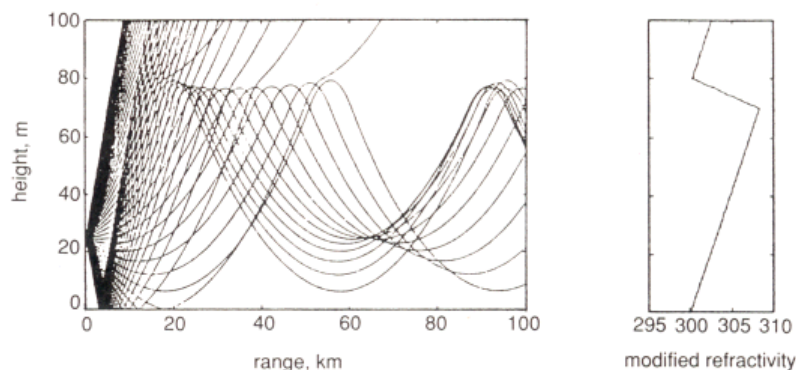
Figur 6.2 Figuren viser propageringsfaktoren for radarbølgeutbredelse (3GHz) over hav med forskjellige sjiktinger i atmosfæren. Senderen står i 20m høyde over havet. Figuren er hentet fra (11).

Et alternativ til PE-metoder er strålefølgingsmetoder som kommer fra geometrisk optikk. Dette er metoder som beregner banen eller strålen som radarbølgene følger. Metoden tar høyde for sjikting i atmosfæren som PE-metoder, men algoritmen forutsetter:

- Når en stråle treffer et sjikt så går den enten i sin helhet inn i sjiktet, eller den reflekteres. En stråle splittes aldri.
- Strålefølgingen er frekvensuavhengig.
- En enkel stråle innehar ingen amplitudeinformasjon.

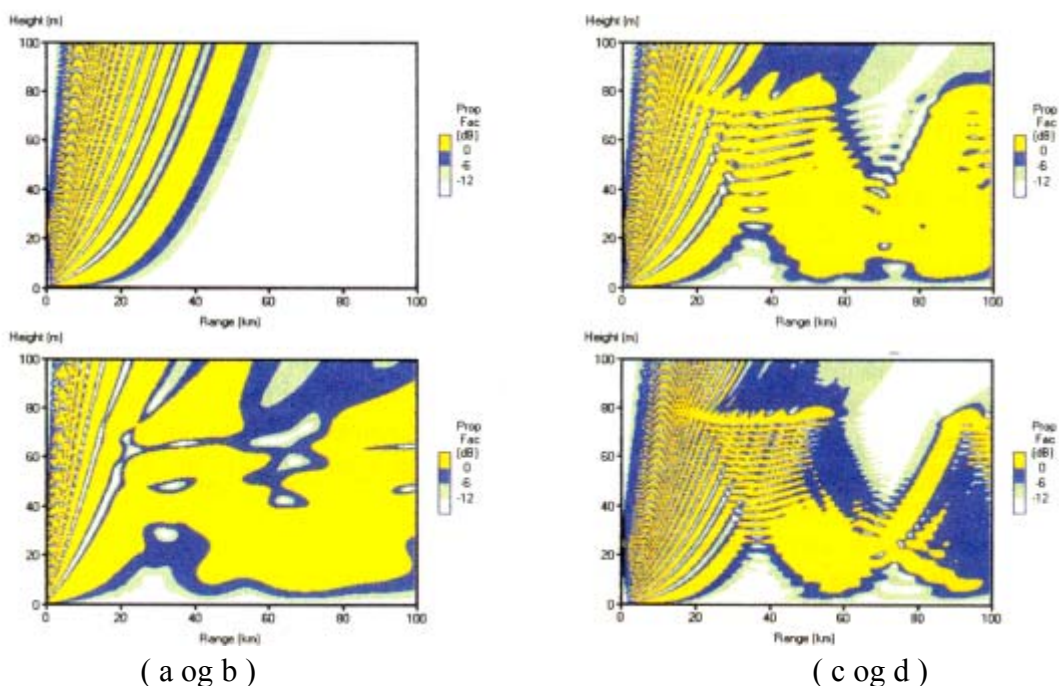
Figur 6.3 viser strålefølgning utført med ett bestemt sjikt. Sjiktet strekker seg fra bakken opp til 80 m høyde. Vi ser at radarbølgeutbredelsen blir kraftig påvirket av sjiktet, men vi vet ingenting om amplituden til signalet, selv om tettheten av stråler indikerer nivåer. Resultatet tyder på at for høye frekvenser fanges energien fra radaren fullstendig i sjiktet. Strålefølgning gir gode resultater for høye frekvenser ( $f > 40GHz$ ).





Figur 6.3 Figuren viser strålefølging for en radar plassert i 25m høyde i et sjikt som strekker seg fra bakkenivå opp til 80m. Figuren er hentet fra (11).

Figur 6.4 (b), (c) og (d) viser beregninger av propageringsfaktoren gjort med PE-metoder for radaren i sjiktet gitt i Figur 6.3, som funksjon av frekvens. PE-metodene gir amplitudeinformasjon og informasjon om energien fanges eller om energien lekker ut av sjiktet.



Figur 6.4 Figurene (b), (c) og (d) viser propageringsfaktoren for radaren og sjiktet definert i Figur 6.3 for frekvensene 3GHz, 9,5GHz og 18GHz. Figur (a) viser propageringsfaktoren for standard atmosfære ved 9,5GHz. Alle propageringsfaktorene er beregnet med PE-metoder. Figurene er hentet fra (11).

Vi ser at det ligger mye mer informasjon i resultatene fra PE-metoder enn i resultatene fra strålefølgingsmetoder. For lavere frekvenser (3GHz), Figur 6.4 (b), ser vi strålefølging og PE-metoder gir meget forskjellige resultat. Dette skyldes først og fremst at radaren som sender på 3GHz ikke får fanget energien i sjiktet i samme grad som radaren som sender på 18GHz, Figur 6.4 (d). Vi ser at resultatene for strålefølging og PE-metoder nærmer seg hverandre for 18GHz,

hvis man ser bort fra amplitudeinformasjonen.

Strålefølgingsmetoder fra geometrisk optikk behandler sjikting, men er frekvensuavhengige og gir ikke amplitudeinformasjon. PE-metoder er effektive metoder som inkluderer alle de effekter som påvirker radarbølgeutbredelsen.

Alle resultater fra PE-metoder presentert så langt har vært utført over flat jord, eller hav. Dersom PE-metoder skal legges inn i algoritmene for radardekningssimulatoren utviklet i prosjekt 726, må PE-metodene utvides til å inkludere terrenginformasjon. Mye arbeid foregår på dette området, og publiserte resultater så langt viser at PE-metoder lar seg modifisere til også å inkludere terrenginformasjon.

Prosjektet 726 anbefaler derfor at videre utvikling av radardekningssimulatoren gjøres ved å studere og inkludere (modifiserte) PE-metoder eller tilsvarende som inkluderer terrenginformasjon i beregningene.

## **7 KONKLUSJON**

### **7.1 Radardekningsimulator**

Prosjekt 726 har utviklet en radardekningsimulator som kan beregne dekning for et multistatisk eller monostatisk radarsystem. Dekning kan beregnes for både CW radarer og radarer som sender pulsede signal.

Av fysiske fenomener som påvirker radarens mulighet for å detektere mål, og som simuleres i radardekningssimulatoren er terrenget fra digitale kart, signal-til-støyforhold, signal-til-clutterforhold, refraksjon, diffraksjon, atmosfærisk demping og nedbørsdemping.

Som en konsekvens er også simulatoren egnet til å beregne visuell sikt fra et punkt til omliggende terreng eller høyder over terreng eller sjø. Radarsimulatoren er også egnet til å beregne signalnivåer over terreng som funksjon av posisjon, sendereffekt og terreng.

### **7.2 Videreføring av radardekningsimulator**

Selv om radardekningssimulatoren utviklet i prosjekt 726 utgjør et løft av nivået i radardekningssimuleringer er det rom for forbedringer. Den største svakheten ligger i refraksjonsberegningene.

Refraksjonen beregnes med en konstant jordradiemodell slik det er beskrevet i avsnitt 3.5, og ytterligere illustrert i Figur 6.1. Men atmosfærens trykk, temperatur og vandampstrykk (3.10) kan endre seg på helt andre måter enn det er beskrevet implisitt i likning (3.14). Spesielt gjelder dette for sjikting av atmosfæren, der en av størrelsene i likning (3.10) endrer seg mye over kort avstand, slik at det nærmest dannes en diskontinuitet i atmosfæren. Da kan et fenomen som

kalles sjikting (ducting) oppstå.

I en videreutvikling av propageringsalgoritmene vil man benytte de siste utviklingene innen algoritmer for radarbølgeutbredelse, såkalte parabolic-equation metoder (PE). PE-metoder inkluderer alle effekter som inngår i radarbølgeutbredelse: Flervegsutbredelse (multipath), refraksjon, diffraksjon, demping (attenuation) og sjikting (ducting).

Strålefølgingsmetoder fra geometrisk optikk behandler sjikting, men er frekvensuavhengige og gir ikke amplitudeinformasjon. PE-metoder er effektive metoder som inkluderer alle de effekter som påvirker radarbølgeutbredelsen.

Prosjektet 726 anbefaler derfor at videre utvikling av radardekningssimulatoren gjøres ved å studere og inkludere (modifiserte) PE-metoder eller tilsvarende som inkluderer terrenginformasjon i beregningene.

**ORDLISTE**

|       |   |
|-------|---|
| CARST | Communication And Radar Simulation Tool |
| CW    | Continuous Wave                         |
| DTED  | Digital Terrain Elevation Data          |
| FFI   | Forsvarets forskningsinstitutt          |
| ITU   | International Telecommunication Union   |
| NC3A  | Nato C3 Agency                          |
| PE    | Parabolic equation                      |
| RADEK | Radar dekningsimulator                  |
| RCS   | Radar Cross Section                     |



## Litteratur

- (1) National Imagery and Mapping Agency (NIMA), Performance Specification Digital Terrain Elevation Data (DTED), MIL-PRF-89020A (1996).
- (2) National Imagery and Mapping Agency (NIMA), Department of Defence, World Geodetic System 1984 (1984): NIMA STOCK NO. DMATR83502WGS84.
- (3) David K. Barton (1988): Modern radar system analysis, Artech House Inc, USA, 17.
- (4) Merrill Skolnik (1990): Radar handbook, McGraw-Hill Inc, USA, 25.18-25.24.
- (5) P. Debye (1957): Polar molecules, Dover Publications, New York, 89-90.
- (6) Mireille Levy (2000): Parabolic equation methods for electromagnetic wave propagation, IEE, London, 64-65.
- (7) International Telecommunication Union (1999): Recommendation ITU-R P.526-6 Propagation by diffraction.
- (8) J. Deygout (1966): Multiple knife-edge diffraction of radio waves, *IEEE Trans AP-14*, 4, 480-489.
- (9) International Telecommunication Union (1999): Recommendation ITU-R P.676-4 Attenuation by atmospheric gases.
- (10) International Telecommunication Union (1999): Recommendation ITU-R P.838-1 Specific attenuation model for rain for use in prediction methods.
- (11) M. P. M. Hall, L. W. Barclay, M. T. Hewitt (1996): Propagation of radiowaves, IEE, London, 179-184.
- (12) International Telecommunication Union (2001): Recommendation ITU-R P.837-3 Characteristics of precipitation for propagation modelling.



## FORDELINGSLISTE

FFIE

Dato: 3. juni 2002

|  |                                |                             |                                      |                 |              |
|--|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|-----------------|--------------|
| RAPPORTTYPE (KRYSS AV)                   |                                | RAPPORT NR.                 | REFERANSE                            | RAPPORTENS DATO |              |
| <input checked="" type="checkbox"/> RAPP | <input type="checkbox"/> NOTAT | <input type="checkbox"/> RR | 2002/02372                           | FFIE/726/170    | 3. juni 2002 |
| RAPPORTENS BESKYTTELSESGRAD              |                                |                             | ANTALL EKS<br>UTSTEDT                | ANTALL SIDER    |              |
| UGRADERT                                 |                                |                             | 35                                   | 33              |              |
| RAPPORTENS TITTEL                        |                                |                             | FORFATTER(E)                         |                 |              |
| RADARDEKNINGSSIMULATOR - FYSIKK          |                                |                             | OLSEN, Karl Erik                     |                 |              |
| FORDELING GODKJENT AV FORSKNINGSSJEF     |                                |                             | FORDELING GODKJENT AV AVDELINGSSJEF: |                 |              |
| John-Mikal Størdal                       |                                |                             | Johnny Bardal                        |                 |              |

### EKSTERN FORDELING

### INTERN FORDELING

| ANTALL | EKS NR | TIL                                  | ANTALL | EKS NR | TIL                           |
|--------|--------|--------------------------------------|--------|--------|-------------------------------|
| 1      |        | Major Sverre Vestad, FLVIKS          | 14     |        | FFI-Bibl                      |
| 1      |        | Rådgiver Tore Belsnes, FO/E          | 1      |        | Adm direktør/stabssjef        |
| 1      |        | FO/SST                               | 1      |        | FFIE                          |
| 1      |        | Bjørn Dyrøy, FLO/Sjø/Teknisk         | 1      |        | FFISYS                        |
| 1      |        | Oblt Svein-Ove Gangnes, FLO/Luft     | 1      |        | FFIBM                         |
| 1      |        | Oblt Willy Borg-Lundquist, FLVUKS    | 1      |        | FFIN                          |
| 1      |        | Major Trond Inge Olsen, FLO/Luft     | 1      |        | Forfatter                     |
| 1      |        | Major Lars Laudal, FLO/Luft          | 5      |        | Restopplag Bibl.              |
| 1      |        | Kapt Sture Christian Linde, FLO/Luft |        |        | <b>Elektronisk fordeling:</b> |
| 1      |        | Kapt Lars W Westad, LUKS             |        |        | John-Mikal Størdal, FFIE      |
|        |        |                                      |        |        | Torleiv Maseng, FFIE          |
|        |        |                                      |        |        | Halvor Bjordal, FFIE          |
|        |        |                                      |        |        | Rune Gundersen, FFIE          |
|        |        |                                      |        |        | Terje Johnsen, FFIE           |
|        |        |                                      |        |        | Steinar Johnsrud, FFIE        |
|        |        |                                      |        |        | Ivar Tansem, FFIE             |
|        |        |                                      |        |        | Per Sørnes, FFIE              |
|        |        |                                      |        |        | Svein-Erik Hamran, FFIE       |
|        |        |                                      |        |        | Hans Øhra, FFIE               |
|        |        |                                      |        |        | Kirsten Kvernsveen, FFIE      |
|        |        |                                      |        |        | Stein Malerud, FFISYS         |
|        |        |                                      |        |        | Tore Smestad, FFIE            |
|        |        |                                      |        |        | Arne Petter Bartholmen, FFIE  |
|        |        |                                      |        |        | Arne Skogstad, FFIN           |
|        |        |                                      |        |        | Jan Andreas Mæland, FFIE      |
|        |        |                                      |        |        | FFI-veven                     |

FFI-K1

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