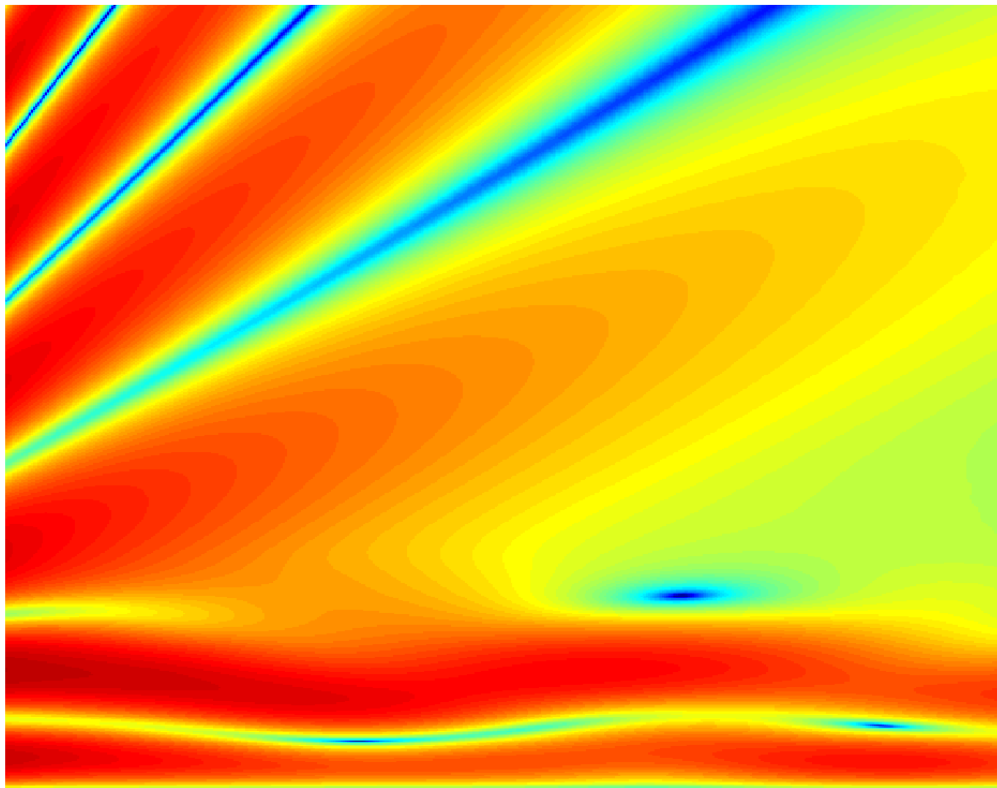


Ove Gustafsson, Gunnar Eriksson, Peter Holm, Arne Hågård, Edvard Karlsson,
Melker Nordstrand, Rolf Persson, Pontus von Schoenberg, Åsa Waern

Slutrapport för projektet Vågutbredningsanalys för radio, radar och elektrooptiska system



TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

Sensorteknik
Box 1165
581 11 Linköping

FOI-R--0985--SE

Oktober 2003

ISSN 1650-1942

Användarrapport

Ove Gustafsson, Gunnar Eriksson, Peter Holm, Arne Hågård, Edvard Karlsson,
Melker Nordstrand, Rolf Persson, Pontus von Schoenberg, Åsa Waern

Slutrapport för projektet Vågutbredningsanalys för radio, radar och elektrooptiska system

| | | |
|--|---|--|
| Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Sensorteknik Box 1165 581 11 Linköping | Rapportnummer, ISRN FOI-R--0985--SE | Klassificering Användarrapport |
| | Forskningsområde 4. Spaning och ledning, 6. Telekrig | |
| | Månad, år Oktober 2003 | Projektnummer E3049 |
| | Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet | |
| | Delområde 49 Breda projekt spaning och ledning 69 Breda projekt telekrig | |
| Författare/redaktör Ove Gustafsson Rolf Persson Gunnar Eriksson Pontus von Schoenberg Peter Holm Åsa Waern Arne Hågård Edvard Karlsson Melker Nordstrand | Projektledare Ove Gustafsson | |
| | Godkänd av | |
| | Uppdragsgivare/kundbeteckning | |
| | Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig | |
| Rapportens titel Slutrapport för projektet Vågutbredningsanalys för radio, radar och elektrooptiska system | | |
| Sammanfattning (högst 200 ord) Vågutbredning av elektromagnetisk strålning (radio-, radar- och optisk-strålning), har studerats i projektet ”Vågutbredningsanalys för radio, radar och elektrooptiska system” speciellt för marina miljöer under åren 2001-2003. I projektet har metoder och modeller studerats för vågutbredning samt meteorologiska mätmetoder och modeller för att skapa bättre indata till dessa vågutbredningsmodeller. Studien har haft som utgångspunkt att förbättra och utvidga den existerande LBM (Lokal brytningsindexmodell) genom att undersöka alternativ till strålbanelmodeller för radio, radar, främst PE-modeller (metod baserad på parabolisk ekvationslösningsteknik) samt undersöka modeller för optisk strålutbredning. I studien har meteorologiska mätmetoder som raketsonder, IR-termometer-tekniker och meteorologiska metoder för prediktering (SMHI’s HIRLAM modell) använts. I projektet ingår ett nyligen startat internationellt samarbetsprojekt inom WEAG /CEPA; Duct Mapping Improvement based on Atmospheric Data Fusion for Naval Purposes, CEPA 1.19. I samarbetet deltar Sverige, Frankrike, Nederländerna, Tyskland och Storbritannien. Studien rekommenderar fortsatt arbete inom området med tyngdpunkt mot verifiering av vågutbredningsmodeller, fortsatta studier av meteorologiska metoder och modeller samt fortsatt arbete med optisk vågutbredning. | | |
| Nyckelord LBM, refraktionsindex, brytningsindex, turbulens, aerosol, atmosfärstransmission, radar, radio, laser, IR, vågutbredning | | |
| Övriga bibliografiska uppgifter | Språk Svenska | |
| ISSN 1650-1942 | Antal sidor: 40 s. | |
| Distribution enligt missiv | Pris: Enligt prislista | |

| | | |
|--|---|-----------------------------------|
| Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Sensor Technology P.O. Box 1165 SE-581 11 Linköping | Report number, ISRN FOI-R--0985--SE | Report type User report |
| | Programme Areas 4. C4ISR, 6. 6. Electronic Warfare | |
| | Month year October 2003 | Project no. E3049 |
| | General Research Areas 5. Commissioned Research | |
| | Subcategories 49 Interdisciplinary Projects regarding C4ISR 69 Interdisciplinary Projects regarding EW | |
| Author/s (editor/s) Ove Gustafsson Rolf Persson Gunnar Eriksson Pontus von Schoenberg Peter Holm Åsa Waern Arne Hågård Edvard Karlsson Melker Nordstrand | Project manager | |
| | Approved by | |
| | Sponsoring agency | |
| | Scientifically and technically responsible | |
| Report title (In translation) Final report of the project Wave propagation analysis for radio, radar and electroptical wavelengths | | |
| Abstract (not more than 200 words) Propagation of electromagnetic waves has been studied within the defence research project in the C4ISR and EW area Wave propagation analysis of radio, radar and electro optical waves, with concentrations on naval environments during 2001-2003. Methods and models to analyze wave propagation together with meteorological models and methods to enhance the precision and quality of input data to the wave propagation models have been studied. The main purpose has been to improve upon the existing LBM-model (refractive index model) through alternative to ray trace models as PE-model (parabolic equation solver) and investigate methods and ray trace models for optical wave propagation. The meteorological methods of measuring as rocket sounders, water surface temperature measurement with IR-techniques and meteorological methods (the SMHI HIRLAM-model) for predicting the atmospheric parameters as temperature and humidity. An international collaboration through WEAG/CEPA organizations is included within the project; Duct Mapping Improvement based on Atmospheric Data Fusion for Naval Purposes, CEPA 1.19. Participators are France, Great Britain, The Netherlands, Germany and Sweden. The study recommends a continuation of the work within the field with more emphasis on verification of the models, continuation of the meteorological methods and models and of the work with optical wave propagations. | | |
| Keywords LBM, refractive index, turbulence, aerosol, atmospheric transmission, radio, radar, laser, lidar, IR | | |
| Further bibliographic information | Language Swedish | |
| ISSN 1650-1942 | Pages 40 p. | |
| | Price acc. to pricelist | |

Innehåll:

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | Inledning..... | 7 |
| 1.1 | Motiv och projektmål | 8 |
| 1.2 | Begrepp | 8 |
| 2 | LBM-systemet idag | 10 |
| 3 | Meteorologi | 11 |
| 3.1 | Raketsond | 11 |
| 3.2 | Raketsondering som indata till LBM | 11 |
| 3.3 | Hirloom prognosprofiler som indata till LBM | 14 |
| 3.4 | Mätning av havsytans temperatur | 15 |
| 3.5 | Turbulensmätning till havs..... | 16 |
| 4 | Radio och radar | 18 |
| 4.1 | Jämförelse mellan vågutbredningsmodellerna FDPE och APM..... | 18 |
| 4.2 | APM med raketsond som indata, jämförelse med LBM..... | 23 |
| 4.3 | Invers beräkningsteknik | 24 |
| 5 | Vågutbredning för optisk strålning | 26 |
| 5.1 | Spridning, absorption och emission i gaser..... | 27 |
| 5.2 | Spridning och absorption i aerosolpartiklar | 27 |
| 5.3 | Refraktion..... | 28 |
| 5.4 | Strålbasesondering nära havsytan med lidar..... | 29 |
| 5.5 | Turbulensens effekter på optiska system | 32 |
| 5.6 | Turbulensmätningar strax ovan vattenytan | 34 |
| 6 | Internationellt samarbete inom Western European Armament Group (CEPA-projekt) .. | 36 |
| 7 | Slutsatser och förslag | 37 |
| 8 | Referenser..... | 39 |

1 Inledning

Försvarsmaktsprojektet ”*Vågutbredningsanalys för radio, radar och elektrooptiska system*” har under åren 2001 – 2003 studerat vågutbredning för elektromagnetiska vågor, meteorologiska parametrar och dess inverkan på utbredningen samt möjligheten att prediktera effekten av atmosfärens inverkan på marina sensorsystem. Projektet har genomförts inom FOI avdelningarna för Sensorteknik, Ledningssystem och NBC-skydd.

Ett flertal av de marina systemen påverkas kraftigt av förhållanden på och strax ovanför havsytan vilket gör att det marina gränsskiktet är av största intresse. Det marina gränsskiktet sträcker sig från vattenytan till en höjd som kan variera från ca tjugo till flera hundra meter. En egenskap hos det marina gränsskiktet är att temperaturen kan variera starkt både vertikalt och horisontellt. Då havsytans temperatur förändras långsammare än luftens kan vertikala och horisontella temperaturgradienter uppstå. Dessutom påverkas luftens aerosolinnehåll speciellt kraftigt för de lägre höjderna, av vinden och vågegenskaperna.

Prestanda hos exempelvis övervakningssystem, mål- och hotsensorer som använder strålning inom det elektromagnetiska spektrat påverkas av atmosfärsförhållanden. En god kunskap om väderparametrar och atmosfärens egenskaper, som exempelvis temperatur, luftfuktighet, vind, regn, turbulens och aerosoler gör det möjligt att uppskatta utbredningsförhållanden för strålning inom olika spektrala områden. Kunskap om vilka effekter som atmosfärsparametrarna har på strålningens utbredning ger en möjlighet att förutsäga prestanda hos system, för exempelvis övervakning och kommunikation och hot eller mål-sensorer. Är dessa systemprestanda möjliga att bestämma som funktion av atmosfärsparametrar kan valet av system optimeras utifrån uppgift och hot.

Sedan slutet av 1980-talet har möjligheten att beräkna atmosfärens inverkan på signaldämpning, räckvidd, upptäcktsavstånd mm för radio och radar kraftigt förbättrats under förutsättning att brytningsindexförhållandena är kända. Orsaken är främst utvecklingen av PE-modellerna. Dessa modeller ger också bättre möjlighet att beräkna effekter av terräng, kust och öar. Modellerna kan även tillämpas på kommunikationsfrekvenser eftersom modellerna bland annat hanterar frekvensberoende effekter. I projektet har därför egenskaper hos några PE-modeller för radio/radar studerats och jämförts.

När det gäller bestämning av brytningsindex för radio/radar och elektrooptiska system har också möjligheterna förbättrats sedan slutet av 1980-talet. Bättre möjlighet finns tex. för punktmätning av temperatur och fuktighet, sondering med raket- eller ballongsond och mätning av havsytans temperatur med IR-termometer. Sondering till ca 500 m höjd eller mer är speciellt viktigt för kartläggning av utbredningsförhållandena för kommunikationsfrekvenser. Möjligheten att bestämma horisontella variationer av brytningsindex och variationer med tiden är dock fortfarande begränsad. Vissa lösningar för radio/radar kan dock skönjas, exempelvis mesoskaliga meteorologiska modeller och fjärranalys med befintliga sändare som GPS, radio/TV-sändare och radarstationer, vilka kan ge ett medelvärde av brytningsindex mellan sändare och mottagare. I projektet vågutbredningsanalys för radio, radar och elektrooptiska system har de nya sätten att bestämma indata till vågutbredningsmodeller med hjälp av raketsond, IR-termometer och mesoskaliga meteorologiska modeller prövats och jämförts med konventionella standardmätningar på fartyg.

I rapporten ges först en övergripande inledning med förklaring av några i rapporten använda begrepp. I kapitel 2 beskrivs LBM systemet som det finns implementerat på marinens fartyg idag. Kapitel 3, som helt enkelt kallas meteorologi, beskriver möjliga förbättringar av LBM-systemet genom förbättring vid mätning av meteorologiska parametrar vid raketsondering, ytvattentemperaturmätning och turbulensmätning. Dessutom beskrivs arbetet med att koppla SMHI's prognosmodell, HIRLAM, till LBM. Kapitel 4 handlar om arbetet med vågutbredningsmodeller för radio- och radarvågor. Där beskrivs jämförelser mellan olika PE-modeller (främst FDPE och APM (AREPS)) i simulerat kustlandskap. I kapitlet beskrivs även jämförelser mellan APM och LBM gjorda med indata från raketsonderingar. Det just påbörjade arbetet med att studera invers beräkningsmetodik för radio-, radarvågor, beskrivs i detta kapitel, där tanken är att bestämma atmosfärssegenskaper genom att mäta signalen från kända sändare. Kapitel 5 behandlar modeller för vågutbredning av optisk strålning nära havsytan (vattenytan). Dessutom behandlas ett par inledande försök för att mäta optiska egenskaper strax ovan havsytan, bl. a. ett försök med horisontellt riktad Lidar samt turbulensmätningar längs en sträcka nära vattenytan med scintillometer. I kapitel 6 beskrivs det internationella samarbetet inom WEAG/CEPA som heter *"Duct mapping improvement based on atmospheric data fusion for naval purpose"*. Rapporten avslutas med slutsatser och förslag samt referenser som förslag till vidare läsning/fördjupning.

1.1 Motiv och projektmål

Motivet för projektet *"Vågutbredningsanalys för radio, radar och elektrooptiska system"* är att skapa kunskap om och metoder för att i realtid kunna analysera vågutbredningsförhållanden för radio, radar och elektrooptiska system över hav och i kustområden.

Målsättningen är att utveckla diagnos/prognosmodell för att kunna förutsäga sensorprestanda vid olika väderförhållanden samt att studera teknik för att kompensera inverkan av brytningsindexgradienter, turbulens och andra atmosfärs effekter.

1.2 Begrepp

LBM: Lokal brytningsindexmodell. Finns på vissa svenska militära fartyg. Består av meteorologisk bulkmodell, strålbanelmodell för radar, modell för relativ radarräckvidd och fångade frekvenser samt får indata från ett meteorologiskt mätsystem.

Meteorologisk bulkmodell: Modell för vertikal profil av vindhastighet, temperatur, luftfuktighet och vissa andra parametrar. Modellen baseras på standardobservationer (bulkobservationer) på 10 m höjd och vid havsytan.

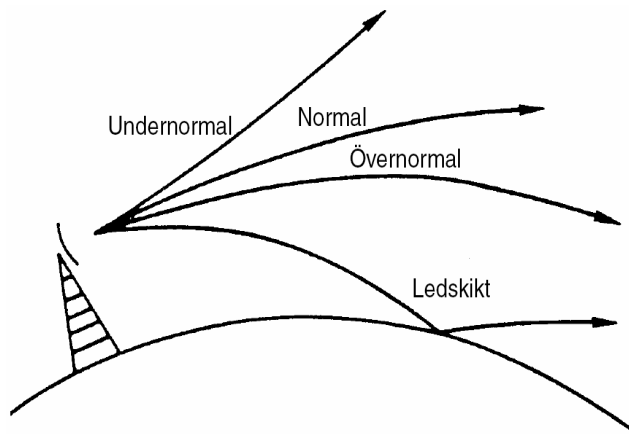
Strålbanelor: Beskrivning av vågutbredning mha strålar (även för radar/radio), som kan brytas (refrakteras) när brytningsindex varierar längs strålbanelan. Brytningen kan beräknas med hjälp av Snells lag.

Ledsikt (engelska duct): Skikt där radio/radarstrålar bryts ned mot och reflekteras mot havsytan (markledsikt eller markbaserat ledsikt) eller där radio/radarstrålar genom brytning fångas mellan två höjdnivåer (höjdsledsikt), se figur 1.1.

Normalutbredning förekommer i en standardatmosfär, det betyder att lufttemperaturen avtar med höjden med 0,65 °C/ 100m och relativa luftfuktigheten är ungefär konstant, se figur 1.1

Övernormal utbredning (eng. super-refraction) innebär att en stråle böjs ned mer än vid normalatmosfär, se figur 1.1.

Undernormal utbredning (eng. sub-refraction) innebär att en stråle böjs ned mindre än vid normalatmosfär eller böjs uppåt, se figur 1.1.



Figur 1.1: Utbredningsförhållanden.

Brytningsindex, n : Vågutbredningshastighet i vakuum dividerat med vågutbredningshastighet i luft.

Brytningsmodul, $N = (n-1) \cdot 10^6$, beskriver samma fysikaliska egenskaper som brytningsindex men med hanterligare siffror.

Modifierad brytningsmodul, $M = N + 0,157 \cdot z$, där z är höjden över havet i meter (medger att jordytan betraktas som en plan yta).

PE-modell: Beräkningsmodell baserade på parabolisk ekvationsteknik (PE). Två olika modeller kommer att kort beskrivas. Den ena är FDPE som använder sig av finita differensmetoden för att lösa den paraboliska ekvationen. Den andra är APM som använder sig av 'split-step' metoden och fouriertransformteknik för att lösa den paraboliska ekvationen.

C_n^2 : Fluktuationen hos brytningsindex både temporärt och spatialt beskrivs av

strukturparameter för brytningsindex, C_n^2 . Parametern kallas även proportionalitetskonstanten för brytningsindex strukturfunktion.

ASTD står för 'air-to-sea-temperature difference' och avser temperaturskillnaden mellan luftens och havsytans temperaturer.

DSTD är en förkortning av 'dewpoint-to-sea-temperature difference' som är skillnaden mellan daggpunktstemperaturen (mått på luftfuktigheten) och havsytetemperaturen.

2 LBM-systemet idag

Lokal brytningsindexmodell (LBM) är ett datorprogram som utifrån uppgifter om ytvattentemperatur, lufttemperatur och luftfuktighet på ca 10 m höjd, samt vindhastighet kan beräkna radarstrålens utbredning och förutsäga eventuella ledsikt med långa radarräckvidder, upp till 400 meters höjd. Nuvarande LBM gör inga beräkningar av radarsignalens dämpning i atmosfären och tar ingen hänsyn till radarmålets storlek eller reflektion.

Hårdvaran till LBM består idag av laptop dator, HP Omnibox xp 4100, med LBM-programvara, version 2.0.11 build 7, som kan köras under operativsystemen Win98 och Win2000. Luftfuktighet- och lufttemperaturgivare med tillhörande strålningskydd samt mätvärdesomvandlare HMP243 från Vaisala, ytvattentemperaturgivare med mätvärdesomvandlare PTU200 från Vaisala samt en USB till RS422-serieomvandlare typ Edgeport/2i Pn:301-1000-12.

Luftfuktighetsmätaren har en sensor gjord av ett polymermaterial vars kapacitans ändras med luftfuktigheten och är försedd med uppvärmningsanordning som gör att den kan mäta även vid kondensation på givaren. Den behöver praktiskt taget ingen löpande skötsel i motsats till tidigare använd psykrometer som bygger på torr och våt temperaturgivare. Kalibrering en gång per år rekommenderas dock av tillverkaren. Ytvattentemperatur-givaren är ett Pt100-element som sticks in i en dykficka monterad i kylvattenrör som bland annat förser fartygets motor med kylvatten. Inloppet för kylvattenröret är i allmänhet på 1 till 1,5 meters djup. Insamling av mätvärden till dator sker via datorns USB-port och en USB till RS422-serieomvandlare med två RS422-portar som anslutits till de två mätvärdesomvandlarna, RS422-snittet klarar av kabellängder på upp till 1200 meter. Endast vindhastighet behöver manuellt inmatas till datorprogrammet varje timme.

Med början år 2000 har installationer och driftsättning av ovanstående version av LBM utförts på den svenska marinens fartyg av FMV, Ostkustens Marinbas och Sydkustens Marinbas. På våren 2003 var 13 fartyg driftsatta och klara och utbildning av fartygens besättningar har påbörjats. Programvaran LBM som har installerats är en omarbetad version av tidigare versioner för DOS/Windows. Den har ett mer användarvänligt gränssnitt som är smidigare att hantera.

3 Meteorologi

3.1 Raketsond

Från Vaisala har inköpts och testats raketsonder typ RK91 och tillhörande mottagarutrustning PP16 för profilmätning av lufttemperatur och luftfuktighet upp till ca 1000 meters höjd. Utrustningen har använts för att prova möjligheten att bestämma indataprofiler för LBM direkt på fartyg (försöksfartygen Urd och Ägir) i realtid samt för att påbörja kartläggning av ledskiktsförhållanden mellan 0 och 1000 m över Östersjön.

Raketsonden består av en 70 cm lång rakethylsa med styrfenor, en krutraketmotor, en sondutrustning för mätning av lufttemperatur, luftfuktighet och lufttryck (RS90 sensorer) samt telemetriutrustning som sänder mätdata via radio, och en fallskärm. Fuktgivarna (humicap) är okapslade, för att klara snabba förändringar av luftfuktigheten.

Raketsonden skjuts upp från en startramp och efter ca 10 sekunder har den nått sin högsta höjd, då skjuts sondutrustningen ut från rakethylsan, temperatur- och fuktgivarna faller ut och fallskärmen vecklas ut. Sonden dalar mot marken med ca 2,5 m/s och under tiden sänder den varje sekund mätvärden på temperatur, fukt och tryck. Givarna i varje raketsond är individuellt kalibrerade och varje givares kalibreringskonstanter finns lagrade i sonden och sänds tillsammans med mätvärdena till mottagaren. I mottagaren separeras kalibreringskonstanterna från mätvärdena som omräknas till verkliga värden och sedan sänds till den anslutna datorn som lagrar all mätdata.

Mätområdet för temperaturen är -50..+60 °C, svarstid 0,2 sekunder, standardavvikelsen i differensen mellan två på varandra följande kalibreringar 0,1 °C. (standard deviation of differences between two successive repeated calibrations, k=2 confidence level). Mätområde för fukt 0..100 %RH, svarstid vid 20 °C <0,5 sekunder, standardavvikelsen i differensen mellan två på varandra följande kalibreringar 2 %RH. Lufttryck 500..1080 hPa, standardavvikelsen i differensen mellan två på varandra följande kalibreringar 0,4 hPa. Lufttrycksvärdena används för att bestämma sondens höjd. Ungefär 15 minuter behövs för att förbereda en raketuppskjutning och datainsamlingen under sonderingen tar upp till 10 minuter.

Skjutningen av raketsonder har hitintills gjorts på militära och marina skjutområden där det finns inarbetade rutiner för att söka tillstånd och avlysa skjutområden samt de kontakter och samband med tillståndsgivande flygtrafikledning som krävs, eftersom flygning normalt inte får ske inom riskområdet för pågående skjutning. Vilka regler som gäller för att skjuta raketsonder utanför skjutområden och på svenskt och internationellt vatten håller på att utredas tillsammans med luftfartsverket.

3.2 Raketsondering som indata till LBM

För att undersöka vilka förbättringar raketsonden kan ge vid bestämning av ledskikt och strålbånar mellan 0 och 1000 meter har den ursprungliga LBM-datorkoden modifierats så att den kan göra beräkningar med raketsondering som indata. Den sk. meteorologiska bulkmodellen i LBM används därvid från havsytan upp till den fasta mätpunkten på fartyget (ca 10 m). Ovanför denna höjd används sedan brytningsindex beräknad mha. temperatur, luftfuktighet och lufttryck enligt raketsonden. Eftersom LBMs brytningsindex kan skilja sig något från raketsondens brytningsindex på fartygets mätthöjd (≈ 10 m) används inte

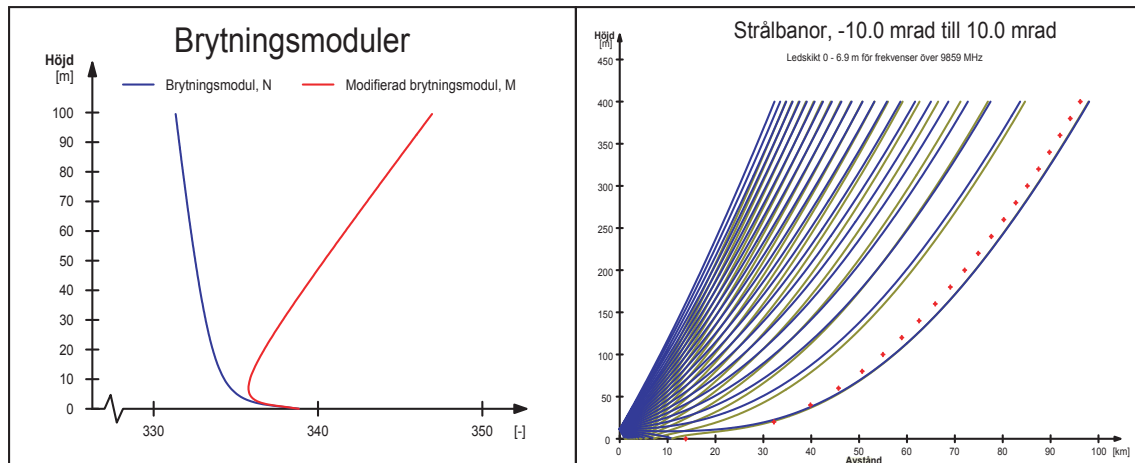
raketsondens absolutvärden utan en anpassning sker med LBMs brytningsindexvärde på fartygets mätthöjd och vertikalgradient hos brytningsindex enligt raketsonden. Vid beräkning av ledskikt med raketsond kan tre huvudtyper av ledskikt förekomma (se även figur 4.11):

- (1) *Markledskikt* som beror på ett spärrskikt hos brytningsindex vid havsytan, dvs. brytningsmodulen M minskar med höjden från havsytan upp till en viss höjd (kan utgöras av avdunstningsledskikt med översida max ca 40 m eller advektions-ledskikt med översida 40- ca 200 m).
- (2) *Markbaserat ledskikt* som beror på ett spärrskikt hos brytningsindex en bit ovanför havsytan, dvs. brytningsmodulen M minskar med höjden inom ett höjdsikt så mycket att radarstrålar från havsytan kan böjas tillbaks mot havsytan.
- (3) *Höjdledskikt* som beror på ett spärrskikt hos brytningsindex på höjd, som inte kan orsaka att radarstrålar från havsytan bryts ned mot havsytan. Höjdledskikt har betydelse främst för luftburna radarstationer.

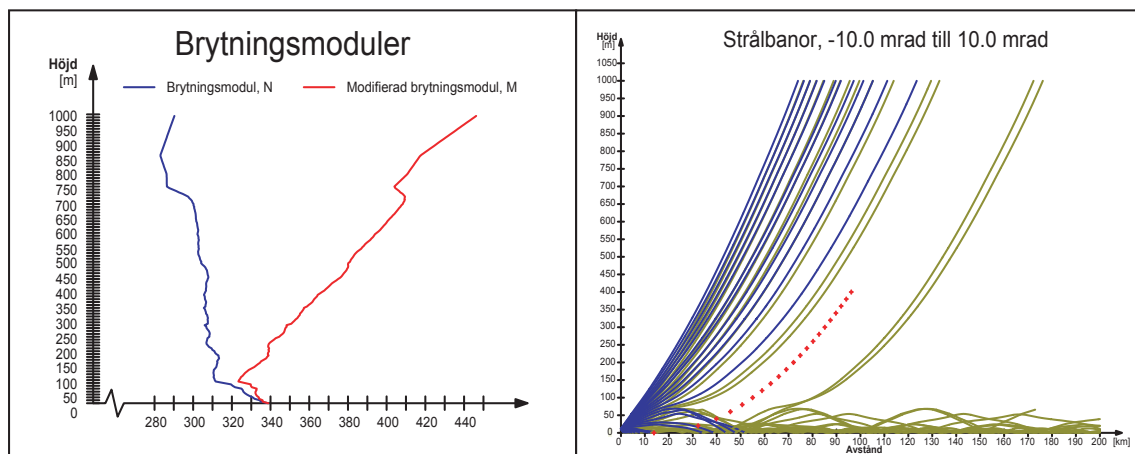
Ibland kan flera typer av ledskikt förekomma samtidigt. Originalversionen av LBM kan dock endast visa den första typen av ovan beskrivna ledskikt.

I augusti-november 2002 sköts 17 raketer med lyckat resultat upp från fartyget HMS Urd. Jämför vi originalversionen av LBM med LBM med raketsondsindata så ger hälften av fallen samma bedömning av ifall ledskiktsutbredning råder eller ej. De båda metoderna jämfördes med observationer av aktuella radarförhållanden ombord på båten. De båda metoderna visar ungefär lika ofta rättvisande resultat. Fler raketsonderingar, speciellt från vår och försommar, måste göras för tillförlitligare analys. Raketsondens viktiga fördel är dock att man får en rättvisande bild av brytningsmodulens ändring med höjden varvid exempelvis kraftiga markledskikt blir rättvist gestaltade med raketsonden till skillnad från original-LBM.

Ett exempel där raketsonden identifierar ett kraftigare markledskikt än i LBMs originalversion visas i figur 3.1-3.2. I detta exempel finns två tydliga ledskikt från raketsonderingen. Dels ett markbaserat ledskikt som når till ca 75 m medan originalversionen av LBM endast predikterar ett markledskikt som når till 6.9 m, samt ett höjdledskikt vid ca 600 m, som originalversionen av LBM inte upptäcker alls. Eftersom radarantennen måste ligga inom ledskiktet för att ledskiktsutbredning skall uppstå så missbedömer originalversionen i detta fall helt de aktuella ledskiktsförhållandena.



Figur 3.1: Brytningsmoduler, N och M (vänster) samt strålbånor (höger) från LBM, skapade utifrån atmosfärdata med uppmätta fartygssensorer. Jämför med raketsondering för samma tillfälle, figur 3.2. Sändarens höjd är 11,2 m.



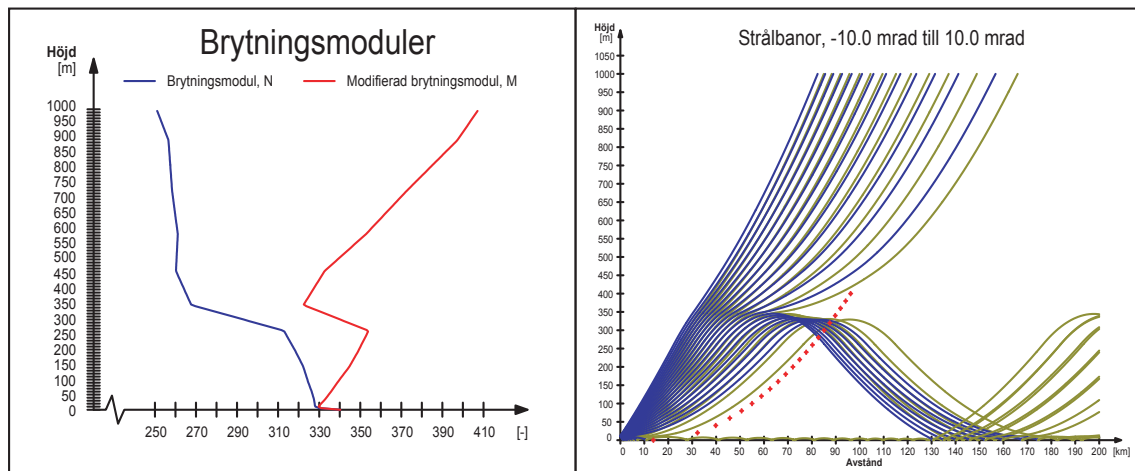
Figur 3.2: Brytningsmoduler, N och M (vänster) samt strålbånor (höger) från LBM skapade utifrån atmosfärdata uppmätta från raketsond uppskjuten den 2002-09-12 och fartygssensorer. Situationen visar ett högt markledskikt på 75 meter. Sändarens höjd är 11,2m.

Försöken med raketsond visar att den kan ge indata till LBM och att den ger möjlighet att identifiera fler typer av ledskikt och effekter, som kan missas om man enbart har tillgång till standardmätningar på fartyg. Data från raketsonden har dock små variationer med höjden, som beror på onoggrannhet hos trycksensorn. För att smidigt anpassa data till LBM samt eftersom variationerna inte är horisontellt homogena bör dessa variationer filtreras bort. För att kunna användas praktiskt på krigsfartyg föreslås att datorprogramvaran för hantering av raketsond och överföring av data till LBM görs smidigare och mer användarvänlig. När reglerna för enkel användning utanför militära skjutområden har klarlagts föreslås praktiska prov på krigsfartyg.

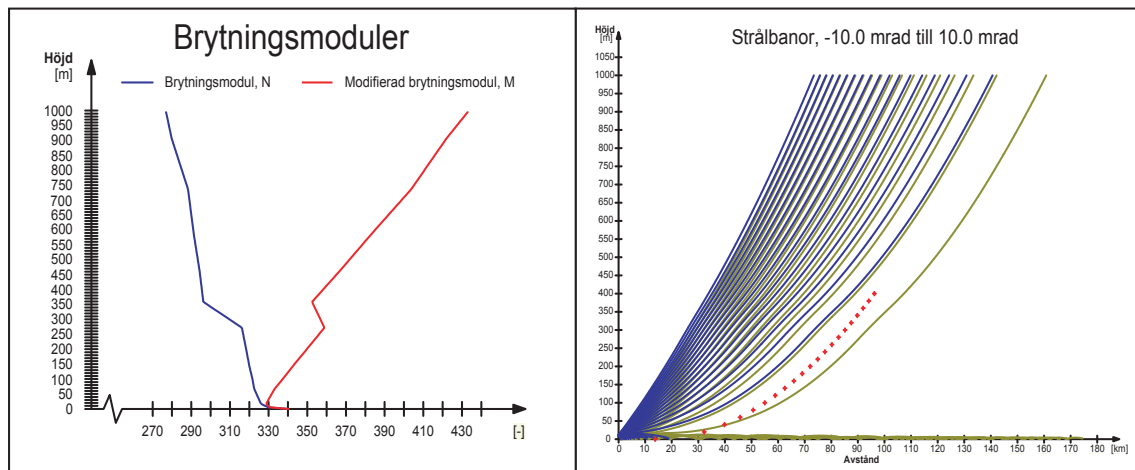
3.3 Hirlam prognosprofiler som indata till LBM

För att undersöka möjligheten att göra prognos av ledskikt har försök påbörjats för att anpassa prognosprofiler från den mesoskaliga väderprognosmodellen Hirlam så att de kan utgöra indata till LBM. Därvid beräknas först brytningsindex från Hirlamprofilens temperatur, luftfuktighet och tryck för vald plats och prognostid. Därefter beräknas ledskikt och strålbånar på samma sätt som när raketsonden ger indata till LBM. I de inledande försöken har anpassning skett till aktuella LBM-observationer på fartyget.

För fyra olika positioner i närheten av området där raketerna sänts upp finns Hirlam-prognoser. Prognoser på mellan 2 och 5 timmar har använts och jämförts med raketsonderingarna. Den Hirlam-position som legat närmast raketsonderingens uppskjutningsplats har med hjälp av LBM jämförts med raketsonderingen. Det storskaliga utseendet hos brytningsindexmodulen från raketsonderingen är i de flesta fall överensstämmande med brytningsindexmodulen från Hirlamprofilen. Raketsonderingens många små gradientskillnader blir utsuddade i sonderingen från Hirlam. Två positioner i Hirlammodellen kan ge väldigt olika resultat i LBM. Den 28 augusti 2002 sköts en raket upp från en plats mellan två av Hirlam-positionerna. I detta fall kan man se att två Hirlampositioner, som ligger relativt nära varandra och över hav, kan ge olika ledskiktsanalyser. I figur 3.3 och 3.4 visas resultaten som brytningsmoduler och strålbånar från dessa positioner.



Figur 3.3: Brytningsmoduler N och M (vänster) samt strålbånor (höger) från LBM skapade utifrån atmosfärdata från en Hirlam-sondering. Positionen för Hirlam-sonderingen låg nära de yttre öarna i havsbandet. Sändarens höjd är 11,2m.



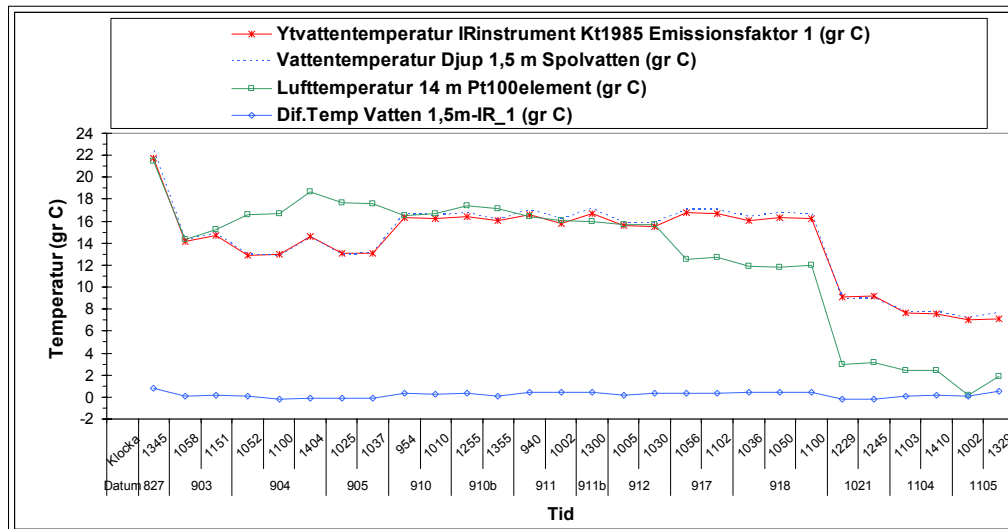
Figur 3.4: Brytningsmoduler N och M (vänster) samt strålbånor (höger) från LBM skapade utifrån atmosfärsdata från en Hirlam-sondering. Positionen för Hirlam-sonderingen låg längre ut i havet än föregående punkt, ca 20 km längre ut. Sändarens höjd är 11,2m.

Genomförda prov visar att Hirlam-profiler tekniskt kan kopplas till LBM. Det är dock ännu för tidigt att avgöra om och hur stor förbättring eller nytta man kan ha av detta. Fortsatta försök för att verifiera förbättringar i diagnos/prognos av vågutbredningsförhållanden med hjälp av mesoskaliga meteorologiska modeller förslås därför inom ramen för CEPA1.19 projektet ”*Duct mapping improvement based on atmospheric data fusion for naval purpose*”, se vidare Kapitel 6.

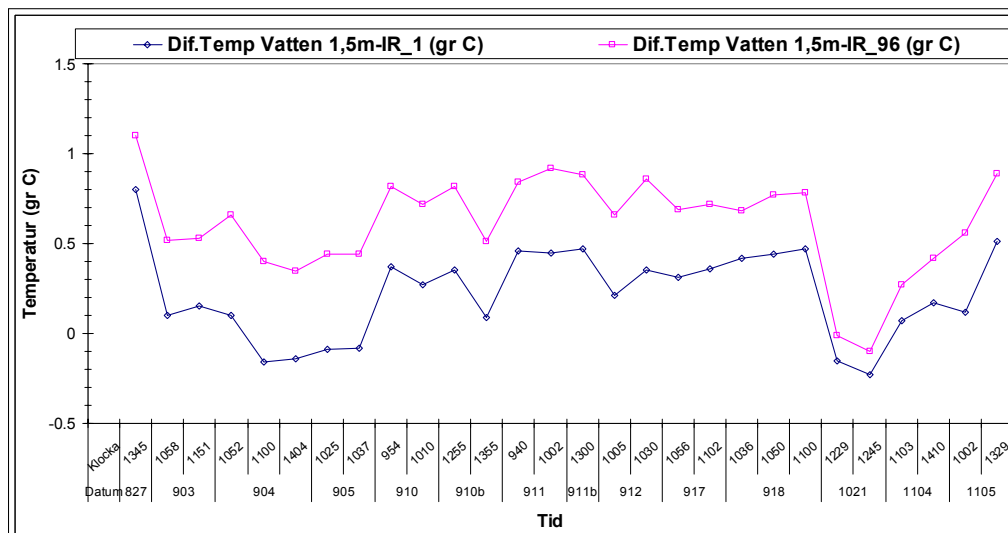
3.4 Mätning av havsytans temperatur

Ytvattentemperaturen bestäms genom mätning av vattentemperaturen på 1-1,5 m djup hos de fartyg som har fått LBM installerat. Detta kan ibland ge missvisande värden på ytvattentemperaturen. Dessutom kan vissa fartyg helt sakna lämpliga möjligheter till mätning av vattenytans temperatur på konventionellt sätt. För att undersöka möjligheten att förbättra mätningen av ytvattentemperaturen till LBM har därför ett IR-instrument, KT19.85 från Heitronics, testats. Vid testen jämfördes temperaturen från IR-instrument monterat på fartyget för att mäta ytvattentemperaturen med mätvärden från en Pt100-temperaturgivare monterad i kylvattenröret från ca 1,5 meters djup. KT19.85 är känslig för IR-strålning inom våglängdsområdet 9,6..11,5 μm och har mätområdet -50 ..+200 °C, instrumentets emissionsfaktor kan ställas mellan 0,100 och 1,000.

Instrumentet har varit monterat 2 dagar på en militär bilfärja i Härnösand år 2001, på forskningsfartyget HMS Urd under hösten 2002 och under 2003 på HMS Ägir. Preliminära resultat visar att när fartygen är igång så har skillnader mellan det två sätten att mäta vattentemperaturen visat på differenser på mellan -0,2 .. 0,8 °C med ett medelvärde på 0,23 °C med emissionsfaktor 1,0. Med emissionsfaktor 0,96 har skillnaderna i medelvärdet varit 0,63 °C. Se figur 3.5-3.6.



Figur 3.5.: Vattentemperaturmätningar på HMS Urd hösten 2002.



Figur 3.6.: Differens mellan spolvattentemperatur- och IR-ytvattentemperaturmätning med emissionsfaktor 1,0 och 0,96. HMS Urd hösten 2002.

Litteraturuppgifter pekar på att reflektion av himmelstrålning kan störa mätningarna, men inga sådana störningar har upptäckts hittills. Resultaten från IR-termometern är lovande, varför försöken föreslås fortsätta så att fler typer av väder och vattentemperaturförhållanden erhålls, speciellt från vår, försommar och nattetid.

3.5 Turbulensmätning till havs

Jämförelser mellan mätningar och en bulkmodell för strukturkonstanten för brytningsindex C_n^2 [Frederickson *m.fl.*, 2000] som påverkar optisk vågutbredning (se kap 5) visar att bulkmodellen i vissa vädersituationer kan antingen överskatta eller underskatta C_n^2 . För att undersöka möjligheten att korrigera bulkmodellen med hjälp av direkta mätningar av turbulenta temperaturvariationerna planeras under 2003 försök till havs (HMS Ägir) med en treaxlig ultraljudsanemometer typ R3 tillverkad av Gill Instruments Ltd. På grund av fartygets

problem med delaminering har försöken försenats. Anemometern kan mäta vindhastighet och ljudhastighet, som omräknas till temperaturvariationer, med upp till 100 Hz. Om de inledande försöken faller väl ut föreslås fortsatta verifieringsprov tillsammans med en bulkmodell för C_n^2 (*strukturkonstanten för brytningsindex*), se kap 5.5-5.6.

4 Radio och radar

Atmosfären påverkar radio- och radarvågor så att de bryts (refrakteras), absorberas och sprids. Omfattningen av atmosfärens inverkan på vågutbredningen bestäms av lufttrycket, lufttemperaturen och luftfuktigheten. Horisontella gradienter av brytningsindex uppstår till exempel vid kustområden, vid horisontella gradienter i vattentemperaturen och vid kallfronter/varmfronter. Dessa gradienter kan variera mycket snabbt. Dessutom tillkommer terrängeffekter såsom diffraktion, vegetationsinverkan med mera. För att hantera detta krävs sofistikerade beräkningsmodeller som klarar ett stort antal vertikala och horisontella nivåer i brytningsindexprofilen. Beräkningsmodeller baserade på Parabolisk Ekvationsteknik (PE) är lämpliga att använda eftersom det elektromagnetiska fältet, i ett tvådimensionellt snitt (höjd och avstånd) mellan sändare och mottagare, kan beräknas successivt genom att lösningen i vertikal ledd stegas fram i avståndsledd. Godtyckliga variationer i utbredningsmediet går då att modellera genom att låta brytningsindex variera i både höjd- och avståndsledd.

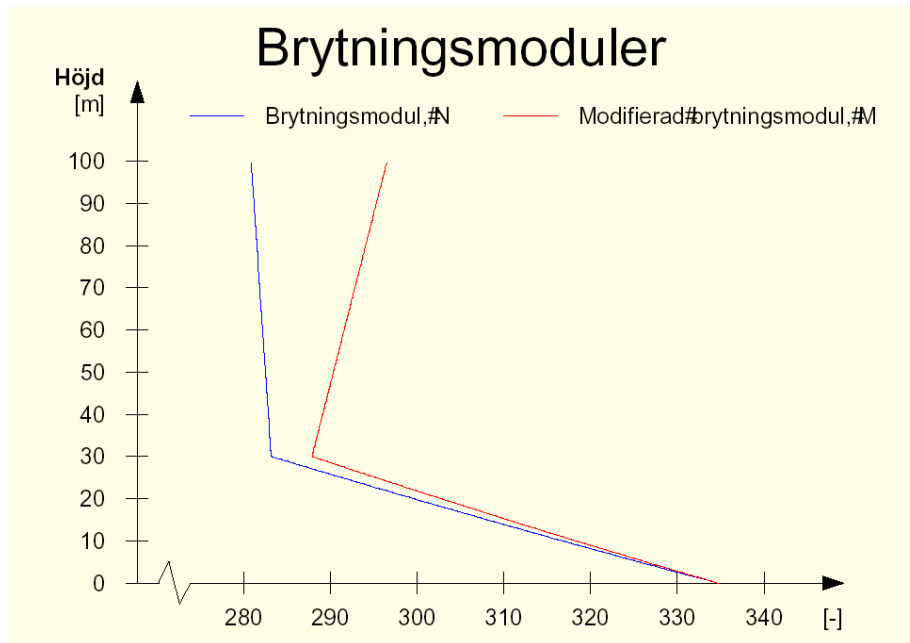
4.1 Jämförelse mellan vågutbredningsmodellerna FDPE och APM

I detta avsnitt ska vi visa några jämförelser mellan två olika PE-modeller. Den ena är FDPE som använder sig av finita differensmetoden för att lösa den paraboliska ekvationen [Holm och Eriksson, 2002]. Modellen som är utvecklad på FOI i Linköping är begränsad till låga höjder, dvs från 0 till ca. 500 m. Den är däremot ganska bra på att ta hand om en varierande terräng, dvs en terräng med varierande topografi. Den andra modellen vi ska undersöka är ”Advanced Propagation Model” (APM) från SPAWAR Systems Center, San Diego, vars källkod kan laddas ner fritt via internet. Modellen ingår i programmet ”Advanced Refractive Effects Prediction System” (AREPS) som kan laddas ner i binär form från SPAWAR. AREPS är ett program för att utifrån meteorologiska förhållanden göra taktiska bedömningar av radio- och radarräckvidd.

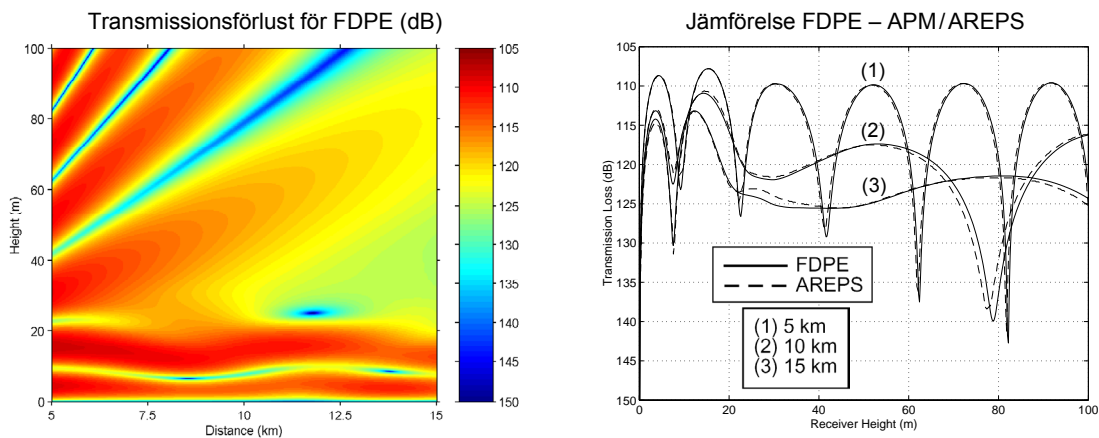
APM använder sig av split step metoden och fouriertransformteknik för att lösa den paraboliska ekvationen. Denna har ingen begränsning i höjddled men däremot vad det gäller variationer i terrängen, vilket vi kommer att se senare. APM är egentligen en så kallad hybridmodell, dvs. förutom en PE-modell ingår här andra modeller. För låga höjder är det dock möjligt att göra en beräkning med hjälp av endast PE-teknik, vilket är en valbar option i programmet. Alla färgplottar är gjorda med denna option vald. Väljer man att göra en beräkning med hybridmodeller använder sig APM av en utvidgad form av stråloptik för höga höjder och av en plan jordmodell eller stråloptik för korta avstånd. För lite längre avstånd och låga höjder används dock alltid PE-modellen som finns i APM.

PE-tekniken användes till en början bara för att modellera ett varierande brytningsindex i atmosfären, dvs. terrängen antogs vara plan. Den första jämförelsen är för ett sådant fall. I figur 4.2 visas resultatet för ett markledskikt. Brytningsindex för det finner vi i figur 4.1. I figur 4.2 kan vi se att båda modellerna ger ett ganska överensstämmande resultat. Detta kommer inte att vara fallet för terräng med varierande topografi, åtminstone inte för kuperad terräng.

Vid vågutbredning över hav antas vanligtvis att havsytan är jämn och sfärisk. En typisk skärgårdsmiljö innehåller ganska ofta många öar och skär. Hur dessa påverkar vågutbredningen har egentligen ingen undersökt närmare. Intressant i det fallet är närområdet till t.ex. en ö, eftersom vågutbredningen bör påverkas som mest här, men också hur öar och



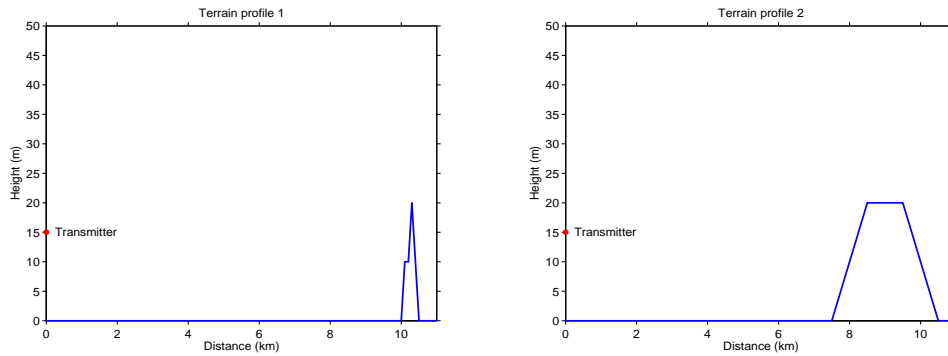
Figur 4.1: Brytningsindex som funktion av höjden vid markledskikt.



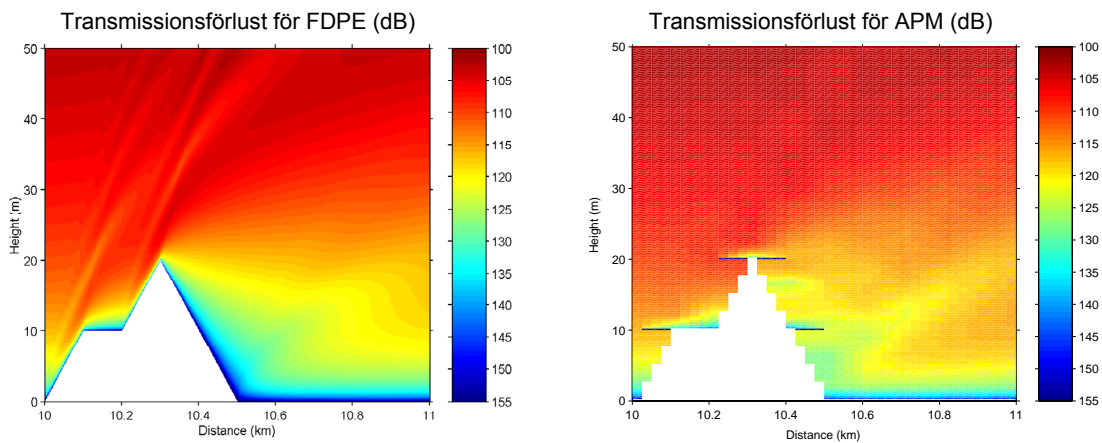
Figur 4.2: Transmissionsförlust för de två modellerna FDPE och APM, frekvensen 2800 MHz och det markledskiktet i figur 4.1.

skär påverkar räckvidden. I denna rapport har vi dock valt att i första hand undersöka vad som händer direkt och 500 meter bakom en ö. Dess storlek eller längd har vidare valts till 500 m och 3 km.

I figur 4.3 visas terrängprofilerna för de två öar som vi valt att modellera. Resultatet för den första, dvs. terrängprofil 1, presenteras i figur 4.4, där de två färgplottarna visar transmissionsförlusten för FDPE respektive APM. Det man bland annat kan se här är att APM inte beskriver reflektionen mot kullens vänstra sida på ett riktigt sätt. Man kan även se att APM ger oegentliga minima vid höjderna 10 och 20 meter, dvs. de tunna horisontella blå strecken vid 10 och 20 m. Jämförelsen i figur 4.4 är å andra sidan lite till APM nackdel, eftersom APM inte kan ge bättre upplösning än vad färgplotten visar. APM-programmet tillåter helt enkelt inte ett mindre beräkningssteg.



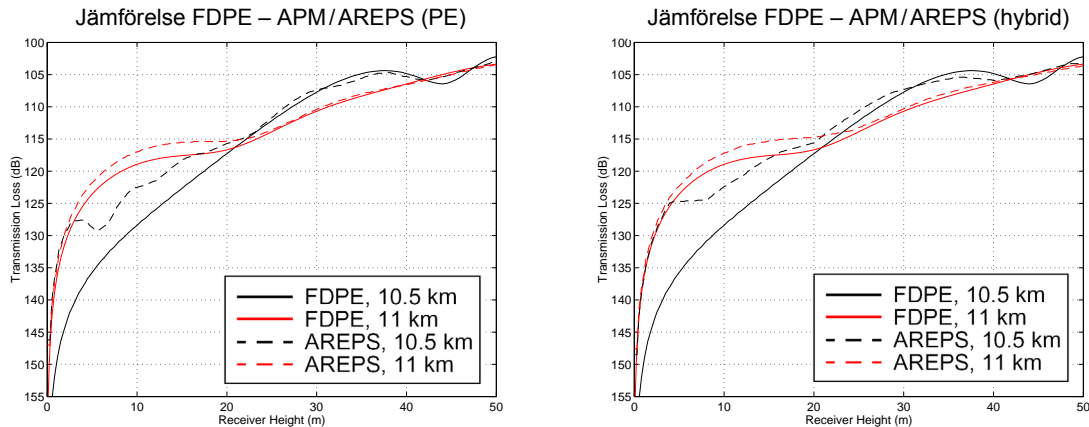
Figur 4.3: Terrängprofiler för simulering av en kobbe eller ö i öppet hav.



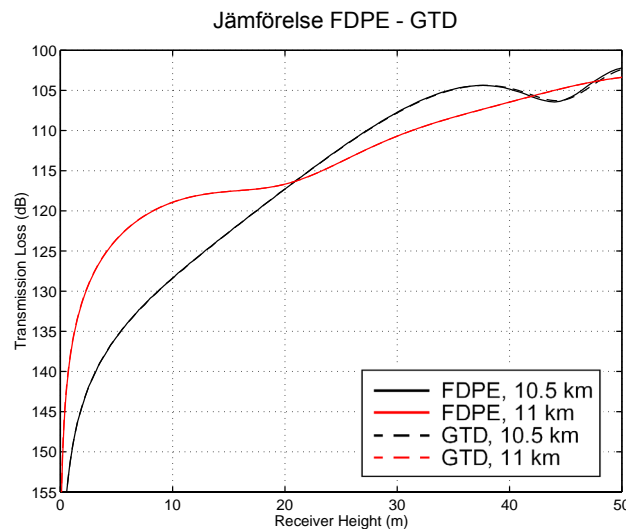
Figur 4.4: Transmissionsförlust för FDPE och APM, frekvensen 200 MHz och terrängprofil 1 i figur 4.3.

I figur 4.5 visas transmissionsförlusten som funktion av höjden för två snitt i höjddled från figur 4.4 vid avståndet 10,5 km och 11 km, dvs vid avståndet 0 meter och 500 meter bakom hindret eller ön. Här har vidare gjorts två beräkningar; en med hjälp av endast PE-teknik (vänstra figuren) och en med hjälp av hybridmodeller (högra figuren), dvs. med hjälp av de andra tidigare nämnda modellerna (som ej bygger på PE-teknik). För avståndet 11 km ger FDPE och APM resultat som någorlunda överensstämmer. För 10,5 km har vi en tydlig skillnad mellan de två modellerna. Med tanke på att reflektionen mot hindrets vänstra sida inte modelleras korrekt av APM, dvs säga nästan inte alls, hade en större skillnad inte varit oväntad. Vad som händer precis ovanför ön är dock inte så intressant om man befinner sig på ett fartyg. (Lägger man ett snitt i höjddled vid avståndet 10,2 eller 10,3 km fås större skillnader.)

Att FDPE definitivt ger ett bättre resultat än APM för en varierande topografi kan man se i figur 4.6, där FDPE och GTD (geometrisk diffraktionsteori) jämförs. GTD är en erkänd metod för att ta hänsyn diffraktionseffekter på grund av t.ex. terränghinder. Kurvorna för FDPE och GTD ligger i stort sett på varandra.



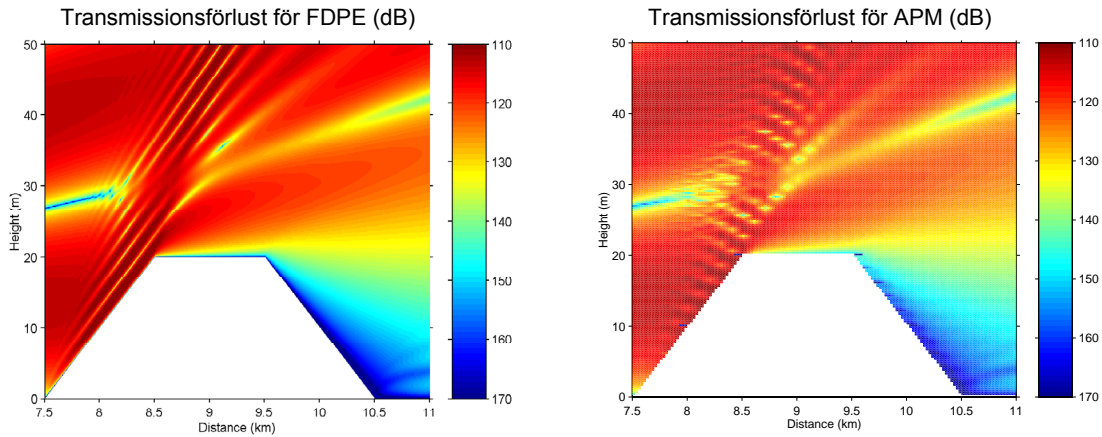
Figur 4.5: Transmissionsförlust som funktion av mottagarhöjden vid avstånden 10,5 och 11 km för FDPE och APM, frekvensen 200 MHz och terrängprofil 1 i figur 4.3.



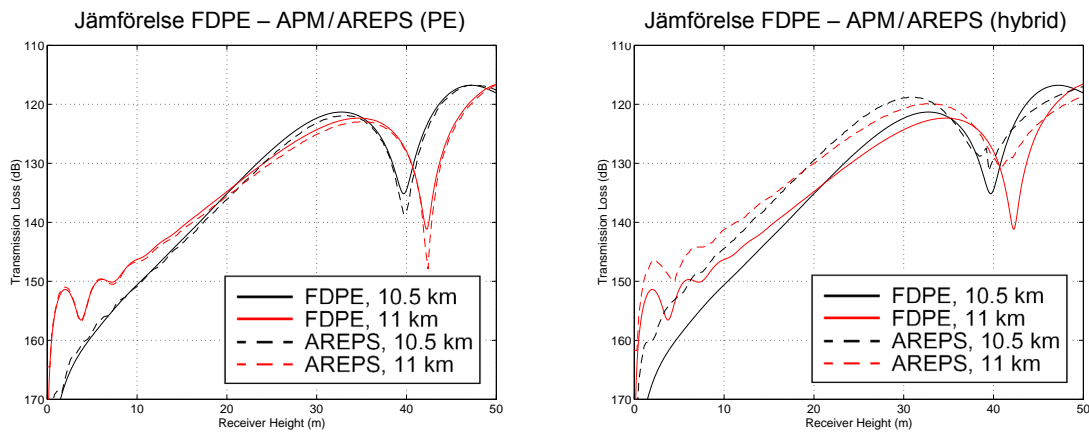
Figur 4.6: Transmissionsförlust som funktion av mottagarhöjden vid avstånden 10.5 och 11 km för FDPE och GTD, frekvensen 200 MHz och terrängprofil 1 i figur 4.3.

Terrängprofil 2 i figur 4.3 är betydligt flackare än profil 1, lutningen är som mest ca. 1° . För denna ger APM, med PE-moden vald, ett resultat som ligger betydligt närmare FDPE. Hybridmoden ger dock fortfarande mindre bra överensstämmelse. PE- och hybridmod är här APM-beräkningar med hjälp av endast PE-teknik respektive med hjälp av hybridmodeller.

Resultatet för terrängprofil 2 finner vi i figur 4.7 och 4.8. Som för den föregående profilen kan man se att APM inte verkar beskriva reflektionen mot kullens vänstra sida korrekt, vilket bör framgå ur färgplottarna i figur 4.7. (Färgplotten för APM är med PE-moden vald och reflektionen beskrivs inte bättre i hybrid-moden). Resultatet för APM med PE-moden vald en bit bakom hindret är dock bra, vilket bör framgå ur figur 4.8. Här överensstämmer FDPE och APM väl både vid avståndet 0 meter och 500 meter bakom hindret.



Figur 4.7: Transmissionsförlust för FDPE och APM, frekvensen 2800 MHz och terrängprofil 2 i figur 4.3.



Figur 4.8: Transmissionsförlust som funktion av mottagarhöjden vid avstånden 10.5 och 11 km för FDPE och APM, frekvensen 2800 MHz och terrängprofil 2 i figur 4.3.

Ur de visade resultaten kan några slutsatser dras i fråga om APM. Den första är att reflektioner mot icke plan mark ej modelleras korrekt. Orsaken till detta ligger med all säkerhet i hur varierande terräng approximeras i APM. Terräng approximeras nämligen med trappsteg, dvs för terrängprofil 1 i figur 4.3 har APM i stort sett använt den höjdprofil som kan ses i den högra färgplotten i figur 4.4. FDPE å andra sidan använder sig av terrängens verkliga lutning, vilket naturligtvis ger ett bättre resultat. Den teknik som används för ta hänsyn till terrängens lutning kallas ”shift map” teknik och skulle även kunna användas i APM.

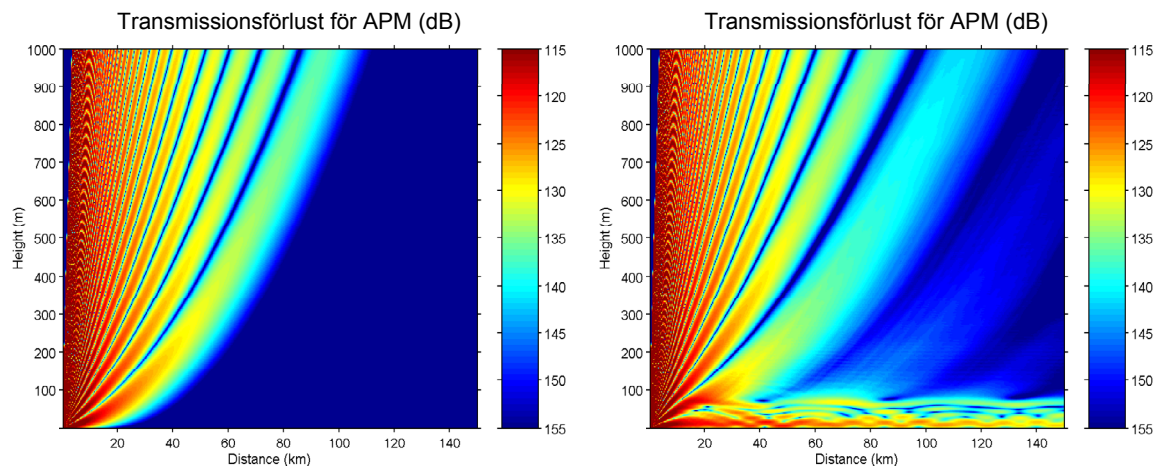
En andra slutsats är att APM verkar ge ett otillförlitligt resultat för höjdprofiler med kraftig lutning, vilket kan ses i figur 4.5. Resultatet för den flackare profilen i figur 4.8 är betydligt bättre. Detta har inte direkt med trappstegsapproximationen att göra. Vad vi har kunnat konstatera väljer APM beräkningssteg, både i höjd- och längdled, mer eller mindre oberoende av hur terrängen ser ut. Detta är inte bra eftersom vi t.ex. vet att FDPE kräver betydligt mindre beräkningssteg för en terräng med kraftig lutning i jämförelse med en terräng med liten lutning. APM skulle förmodligen ge ett bättre resultat än vad figur 4.5 visar, om

modellen hade kunnat anpassa beräkningssteget till hur terrängen ser ut, dvs. desto större lutning hos terrängen ju mindre beräkningssteg.

4.2 APM med raketsond som indata, jämförelse med LBM.

Raketsonderingarna som är gjorda i och med utvecklingsarbetet av LBM har använts som indata till APM, PE-modellen som används i AREPS, för att studera en PE-modells fördelar. Dessa resultat kan sedan användas i jämförelse med LBM för att se hur LBM kan vidareutvecklas. LBM saknar idag exempelvis beräkningar av dämpning i atmosfären, upptäcktsavstånd samt sannolikhet för målupptäckt.

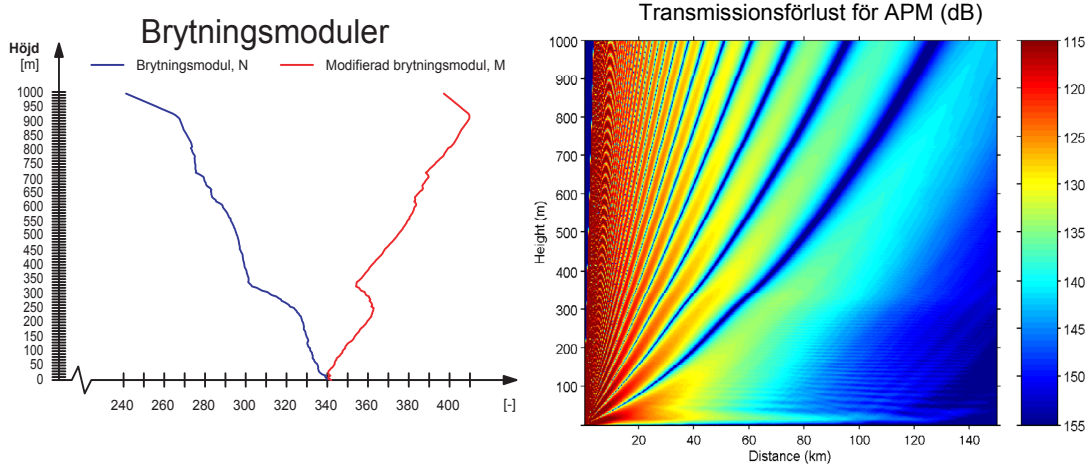
Beräkningarna gjordes för en rundstrålande radar med frekvensen 2800 MHz. Resultatet från APM är plottat i figur 4.9 i form av dämpning i dB som funktion av höjd och avstånd från radarn. Till vänster är dämpningen för normalatmosfären plottad som referens. Till höger är resultatet för en raketsondering gjord 12/9 2002 plottad, den kan jämföras med figur 3.2 där samma raketsondering använts för LBM beräkningen (där finns även brytningsmodulen för sonderingen).



Figur 4.9: Transmissionsförlust som funktion av mottagarhöjden och avstånd från radarn. Standardatmosfären till vänster samt för en raketsondering (12/9 2002) till höger. (Brytningsmodulen för sonderingen samt LBM-beräkning finns i figur 3.2). Sändarens höjd är 11,2m.

För raketsonderingen syns ett tydligt markledskikt med en höjd på ca 100 m. Detta ledskikt är kraftigt men en viss avklingning i intensitet (ökning i transmissionsförlust) syns i figuren. Högre upp är förändringarna mindre vid en jämförelse med standardatmosfären. En viss förskjutning av lobmönstret kan dock ses. Exempelvis så blir den första loben som försvinner upp i atmosfären lite svagare och mer utbredd.

Transmissionsförlusten från PE-beräkningarna kan användas för att bestämma sannolikheten för målupptäckt. Sannolikheten beror vidare på vilken känslighet radarn har, signalstyrkan samt typen av mål. När dessa faktorer är kända så kan man göra en analys av hur långt bort radarn förväntas att se och sannolikheten för målupptäckt.



Figur 4.10: Brytningsmoduler från raketsondering gjord 3/9 2002 samt transmissionsförlust som funktion av mottagarhöjden. Sändarens höjd är 11,2m.

Figur 4.10 visar brytningsmodul samt transmissionsförlust i dB för en raketsondering gjord 3/9 2003. Här finns ett markledskikt up till ca 30 meter som inte är lika kraftigt som det i figur 4.9. Därmed blir förändring i signalstyrka mycket viktigare för föremål inom exempelvis 100 km räckvidd, se figuren. Med kunskap om den egna radarn och målet kan då radarns aktuella räckvidd bestämmas, medan LBM i detta fall endast kan säga att det finns ett ledskikt. Brytningsmodulen i figur 4.10 visar på ett höjyledskikt mellan ca 200 och 300 meters höjd. Effekten av detta skikt blir mycket liten för en radar nära marken. I figur 4.10 ses dess inverkan endast som ett litet hack i transmissionsförlusten strax ovanför höjden 300 meter. Ligger radarn däremot på ungefär samma höjd som ledskiktet skulle radarvågorna fångas in av detta betydligt mer.

De värden som fås från raketsonden innehåller många snabba småförändringar som framförallt beror på osäkerhet i tryckgivaren. Dessa syns i transmissionsförlusten som ett svagt interferensmönster i vertikal led. Variationerna kommer däremot inte vara oförändrade (homogena) i horisontell led. För att få en sonderingskurva som i medel är rätt måste således någon form av medelvärdesbildning göras.

Med kännedom om den aktuella radarns känslighet, vad det gäller signalstyrka, ger en PE-model en betydligt tydligare bild av rådande vågutbredningsförhållande än vad t.ex. en ren strålbaneberäkning gör. Med hjälp av en raketsondering får man också med inverkan av eventuella höjyledskikt, höga markledskikt och markbaserade ledskikt (se figur 4.11). Hur sonderingsinformationen bör medelvärdesbildas kvarstår dock att utvärdera. Kopplingen av en raketsondering till APM fungerar däremot bra under antagande att horisontellt homogena förhållanden råder. Kopplar man dessutom raketsonderingen till en orografisk karta så skulle man även kunna ta hänsyn till terrängvariationer i horisontell led, se avsnitt 4.1.

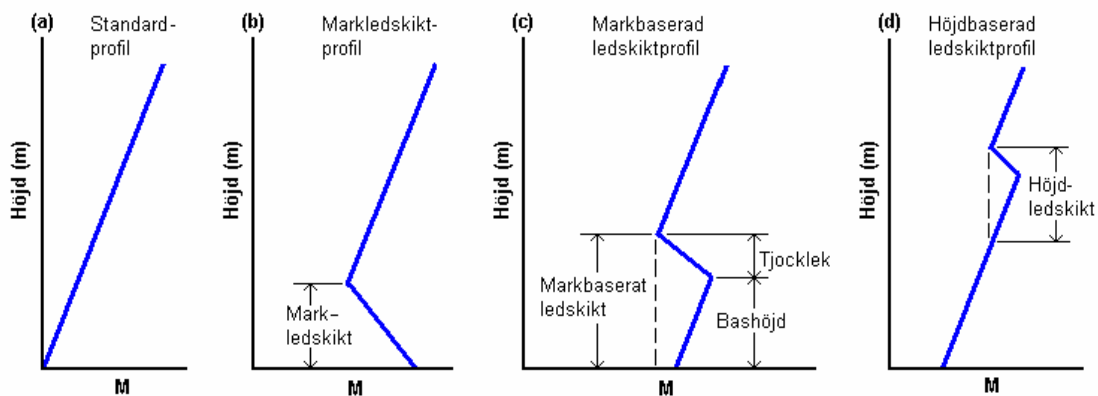
4.3 Invers beräkningsteknik

För att kunna beräkna vågutbredningen på ett någorlunda korrekt sätt behövs kännedom om atmosfärens brytningsindex. Brytningsindexprofilen ger viktig information om förekomst av olika ledskikt, vilka kan ge upphov till stora räckviddsökningar för både radio- och radarfrekvenser. De vertikala gradienterna över hav är normalt större än de horisontella,

varför det ibland är tillräckligt att bestämma brytningsindex som en funktion av höjden för att kunna beräkna vågutbredningsförhållandena. Horisontella skillnader i den vertikala variationen av brytningsindex kan dock ha mycket stor betydelse, exempelvis vid en kustlinje eller där vattentemperaturen varierar horisontellt som till exempel i Östersjön.

Ett sätt att uppskatta atmosfärens brytningsindexprofil är genom observation av hur radiovågor från kända sändare utbreder sig. Det kan vara sändare anordnade speciellt för detta ändamål, eller sändare för helt andra tillämpningar. Exempel på det senare kan vara GPS-, TV- eller radiosändare eller den egna radarn ombord på fartyget. När det gäller användning av radar studeras vanligtvis radarekon från havsytan (sjöklotter) eller ekon från land som då kan vara från enskilda objekt eller från en skrovlig markyta (markklotter). En fördel med att använda egen fartygsradar och sjöekon, jämfört med att mäta på andra sändare, är att information enkelt kan hämtas från olika avstånd. Hur mycket den extra informationen är värd i förhållande till de extra obekanta, i form av okända spridningstvärnsnitt som eventuellt måste lösas ut, är något som måste undersökas närmare. Att mäta på andra sändare kan, i mån av tillgång på sändare, ge värdefull information från många frekvenser inom ett brett spektrum.

Att uppskatta brytningsindexprofiler från observerade radiosignaler innebär i de flesta fall att man måste lösa ett så kallat inverst vågutbredningsproblem. Dessa problem löses genom att man med hjälp av kända sända och mottagna signaler kan beräkna ett brytningsindex som sedan används som inparametrar i en vågutbredningsmodell. Inparametrarna justeras sedan tills den modellerade vågutbredningen ger bästa överensstämmelse med observerat data. Vid lösningen av inversa problem behöver oftast ett mycket stort antal beräkningar utföras med vågutbredningsmodellen över de tänkbara parameterkombinationerna. För att minska parameterrummets storlek antas ofta enkla modeller för brytningsindexprofilens utseende. De vanligaste ansatserna är att använda en bilinjär brytningsindexprofil för att representera ett markledskikt eller en trilinjär brytningsindexprofil för att representera ett markbaserat eller höjdbaserat ledskikt, se figur 4.11. Den trilinjära profilen kan beskrivas fullständigt med fem parametrar. En svårighet med inversa problem är att det oftast inte existerar en entydig lösning, utan man får försöka finna den mest sannolika lösningen givet sina observationer.



Figur 4.11: Idealiserade bilder av brytningsindexprofiler. (a) standardprofil utan ledskikt, (b) markledskikt som representeras av en bilinjär profil, (c) markbaserat ledskikt samt (d) höjdbaserat ledskikt som båda representeras av en trilinjär brytningsindexprofil.

Arbetet med metoden att bestämma brytningsindex genom invers teknik har påbörjats och föreslås att studeras närmare i FOIs åtagande inom CEPA-arbete, se kapitel 6.

5 Vågutbredning för optisk strålning

Långräckviddiga optiska bildgenererade system och system som utnyttjar optisk energiöverföring för mätning, kommunikation eller verkansåtgärd kräver ofta en kombination av hög upplösning och hög känslighet. Under operationella förhållanden kan dessa systems prestanda reduceras på grund av atmosfärs effekter som: transmissionsförlust, kontrastminskning, turbulens och refraktion. En god kännedom om utbredningsförhållanden för optisk strålning kan användas för att välja rätt system vid rätt tillfälle, att bestämma egen aktiv och passiv signatur samt för uppskattning av hotande systems signaturer vid aktuella väder- och atmosfärsförhållanden.

Prestanda för optiska system som observerar, detekterar eller belyser mål genom en sträcka i atmosfären påverkas av denna på flera olika sätt. Optisk strålning påverkas av atmosfärens egenskaper genom:

- (1) spridning och absorption i gaser
- (2) emission från gaser och partiklar
- (3) spridning och absorption i aerosolpartiklar
- (4) refraktion (brytning)
- (5) turbulens.

Spridning innebär att en del av strålningen (fotonerna) ändrar riktning och sprids i olika riktningar, medan resten fortsätter i den ursprungliga riktningen. Absorption innebär att strålning omvandlas till annan energiform t.ex. värme. Spridning och absorption medför extinktion (dämpning) dvs. att effekten i en stråle avtar med avståndet. Ofta kan Beers lag användas för att beräkna effekten enligt

$$P(r) = P(0)\exp(-\alpha r)$$

där $P(r)$ är effekten vid avståndet r , $P(0)$ är utgångseffekten och α är extinktionskoefficienten, som är ett mått på dämpningsförmåga (optisk täthet).

Kontrastförlust orsakas av att strålning från närliggande källor eller bakgrunden sprids eller emitteras in till detektorn av aerosolpartiklar och gasmolekyler i atmosfären. Detta leder till att ett ungefär lika stort bidrag adderas till radiansen från målet och bakgrunden och i kombination med dämpning ger det reducerad kontrast, om kontrast definieras som kvoten mellan radianskillnad och bakgrundsradians.

Refraktion innebär att strålar kröks dvs. gradvis ändrar riktning men ändå i stort sett behåller sin karaktär som sammanhållen stråle. Turbulens dvs. slumpmässiga (stokastiska) fluktuationer i atmosfärens temperatur och därmed brytningsindex orsakar bl.a. reduktion av vinkelupplösningen och bildskärpan hos bildsensorer samt ökad divergens, strålvandring och varierande intensitetsfördelning för laserstrålar.

Räckvidd och prestanda för optiska sensorer påverkas av alla ovan nämnda effekter. Extinktion medför att räckvidden reduceras. Vid något avstånd, räckvidden, har effekten hos strålningen från ett objekt respektive kontrasten mellan mål och bakgrund reducerats till en nivå, som motsvarar bruset i bakgrunden eller detektorbruset.

5.1 Spridning, absorption och emission i gaser

Spridning mot gasmolekyler betecknas ofta som Rayleighspridning. Teorin är enkel och väl känd och metoder för beräkning ingår t.ex. i programmet MODTRAN [*Kneizys m.fl.*, 1996]. För att beräkna extinktion för Rayleighspridning krävs värden på temperatur och tryck för utbredningssträckan.

Absorption i gaser innebär att energitillståndet hos gasmolekylerna ändras. Eftersom antalet möjliga tillstånd och därmed energiövergångar, som motsvaras av absorptionslinjer, är mycket stort, krävs en stor databas för noggrann beräkning. För bredbandiga system som t.ex. vanliga IR-sensorer för värmestrålning kan man med normalt tillräcklig noggrannhet beräkna absorption med en snabbare beräkningsmetod, som utnyttjar en betydligt mindre databas. Denna är baserad på den totala mängden data för absorptionslinjer. MODTRAN är ett sådant program, som i praktiken är etablerat som standard över en stor del av världen. Det duger bra för beräkning av absorptionens inverkan på räckvidden för t.ex. IR-sensorer. De gaser, vars absorption har väsentlig betydelse för sensorprestanda i det optiska området, är vattenånga, koldioxid och i viss mån ozon.

För att beräkna transmission för smalbandiga system dvs. speciellt för lasersystem kan det vara nödvändigt att använda ett s.k. linjprogram, som summerar bidrag från enskilda absorptionslinjer. Ett sådant program är FASCOD, som liksom MODTRAN har utvecklats vid Phillips Laboratories inom US Air Force. Den kommersiella PC-versionen av FASCOD för Windows heter PcLnWin. Både det och en PC-version av MODTRAN (PcModWin) distribueras av Ontar Corp. i USA. Se [*Kneizys m.fl.*, 1996].

Emission dvs. värmestrålning är starkt kopplad till absorption, så att en gas eller aerosol, som absorberar starkt vid en viss våglängd, emitterar också starkt vid samma våglängd. Emissionsberäkning kan göras i MODTRAN, som beräknar banstrålningen (path radiance) för en given sträcka inom angivet spektralband.

5.2 Spridning och absorption i aerosolpartiklar

Begreppet aerosol betyder partiklar som svävar i atmosfären. Aerosolpartiklar finns så gott som alltid i naturlig miljö. De bildas genom kemiska reaktioner ur gaser i atmosfären, genom bränder och genom att vinden river upp stoft från marken eller salt från havet. Mänskliga verksamheter som industri, uppvärmning och trafik bidrar också till aerosolproduktion. Partikelinnehållet i luften vid en viss plats beror av luftmassans ursprung dvs. av vilken väg luften har transporterats och hur vädret etc. har varit längs vägen. Partiklarnas optiska egenskaper beror av deras storleksfördelning, form och brytningsindex. För att beräkna de optiska spridningsparametrarna antar man normalt att partiklarna är sfäriska vilket ofta är en rimlig approximation. Detta innebär att Mie-teori (efter fysikern Mie) kan användas för att t.ex. beräkna extinktionskoefficienten för olika våglängder. Programmet MODTRAN innehåller ett antal aerosolmodeller för olika miljötyper och program för beräkning av extinktionskoefficienten. Tyvärr finns ingen bra metod för att välja vilken modell, som är relevant i en viss situation. Jämförelser med mätdata har visat att modellerna ofta stämmer dåligt i Sverige. I FOIs aerosolmodell [*Persson och Kaurila, 2002*] används värden på sikt, temperatur och ev. tryck som ingångsparametrar för att beräkna extinktionskoefficienten för våglängder i IR-området.

Aerosoler i havsmiljö, marina aerosoler, består av en blandning av partiklar, som bildats över land och sådana som bildats vid havsytan genom samverkan av vind och vågor. I MODTRAN

ingår en modell med benämning NAM, Navy Aerosol Model, som är baserad på data från öppet hav långt från någon kust [*Gathman, 1983*]. Ingångsparametrar är sikt, relativ fuktighet, momentan vindhastighet och ett medelvärde av vindhastigheten under det föregående dygnet. Dessutom kan man specificera en parameter, som anger hur stort bidrag av kontinentala partiklar dvs. partiklar med ursprung över land, som skall ingå i modellen. Vertikalprofilen inom gränsskiktet beräknas med ett särskilt program, NOVAM (the Navy Ocean Vertical Aerosol Model, [*Gathman, 1989*]). Mätningar bland annat utanför Katwijk vid den nederländska kusten har visat att NAM har brister och bör kompletteras med en komponent av stora partiklar med radier i området kring 10 μm . En ny modell, ANAM [*Gathman och van Eijk, 1998*], som innehåller en sådan partikelmod, kommer troligen att implementeras i en kommande ny version av MODTRAN. Mätningar utanför Irland och i Medelhavet [*Piazzola m.fl., 2003*] har visat att aerosoler i kustområden har egenskaper, som inte stämmer med modeller som NAM. En komplettering, som bättre representerar aerosolbidrag från landområden bör tillföras.

En allmän slutsats är att det är svårt att konstruera en generellt giltig marin aerosolmodell, eftersom lokala förhållanden speciellt vid kusten kan ha stor betydelse för partikelinnehållet. En lösning på problemet kan vara att genom lokala mätningar med t.ex. lidar karakterisera aerosolen. Lidarprincipen beskrivs utförligare i ett senare avsnitt. En lidar med lämplig våglängd till exempel ca 1,5 μm kan användas för att sondera aerosolen och ge underlag för att beräkna extinktion i IR-området [*Hågård och Persson, 1997*]. Dessutom kan man få information om vertikalprofilen dvs. höjdfördelningen, som kan avvika starkt från den som anges i modeller.

5.3 Refraktion

En elektromagnetisk våg dvs. i vårt fall en optisk stråle, som utbreder sig i atmosfären, kröks eftersom vågfronten vrids, om brytningsindex varierar längs vågfronten, dvs. i en riktning tvärs mot utbredningsriktningen. Brytningsindex i det optiska området för luft beror främst av temperaturen. Nära horisontella strålar över vattenytan kröks, när temperaturen varierar med höjden över vattenytan. Om vattnet är kallare än luften kröks strålarna nedåt, vilket ger övernormal utbredning (superrefraction). Detta innebär att räckvidden för en optisk sensor på t.ex. ett fartyg mot mål på låg höjd blir längre än normalt, dvs. den ser mål bortom den horisont, som gäller vid neutral atmosfär. I motsatta fallet, när vattnet är varmt och luften kallare, kröks strålarna uppåt, vilket ger undernormal utbredning (subrefraction) och reducerad räckvidd. Vid ett försök vid Landsort, som genomfördes i samarbete mellan FOI och TNO från Nederländerna [*de Jong m.fl., 1999*], observerades räckvidder för en IR-sensor mot ett litet fartygsburet mål, som varierade mellan 17 km och 27 km, på grund av att lufttemperaturen och därmed temperaturprofilen ändrades. Parametern ASTD (Air to Surface Temperature Difference), som ger temperaturskillnaden mellan luft och vatten, är väsentlig för att bedöma refractionseffekter till havs.

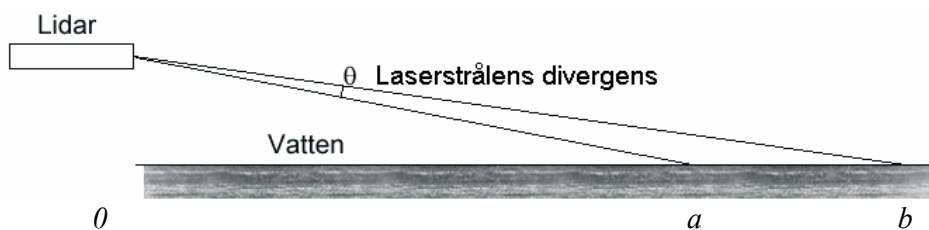
Beräkning av strålbågar kan genomföras relativt enkelt med numeriska program, som löser en differentialekvation baserad på Snells lag för kontinuerligt varierande medier. Sfärisk geometri används vanligen, eftersom jordytan och speciellt havsytan är i stort sett sfärisk. Det svåra problemet ligger i att bestämma temperaturprofilen. Om mätvärden för luft- och vattentemperatur, fuktighet och vindhastighet är tillgängliga kan t.ex. i princip LBM-programmet användas efter viss anpassning.

Program för strålbaneberäkning, som ingår i IRBLEM [*Dion m.fl.*, 2000] och ARTEAM [*van Eijk m.fl.*, 2001], utnyttjar olika algoritmer för att beräkna brytningsindex med bl.a. ASTD som indata. En alternativ metod, som beskrivs i ett senare avsnitt, är att använda lidar för att sondera atmosfären över vattenytan, så att profilen för brytningsindex kan beräknas med hjälp av data från lidarsvaren.

5.4 Strålbanesondering nära havsytan med lidar

En LIDAR (Light Detection And Ranging) är den optiska motsvarigheten till radar och består oftast av en pulsad laser, en mottagare och en signalregistreringsenhet (Waveform recorder). Laserstrålning riktas ut i atmosfären, där den sprids mot partiklar. En del av den spridda strålningen detekteras i mottagaren med en tidsfördröjning efter laserpulsens, som motsvarar avståndet till de spridande partiklarna. Svaret dvs. detektorsignalen motsvarar partikelfördelningen längs sonderingssträckan. Avsikten med det försök, som redovisas här, var att prova en ny metod för strålbanesondering: Lidarn placeras nära vattnet på lämplig höjd över ytan och riktas nära horisontellt ut över vattnet. Lidarloben dvs. mottagarens synfält och laserstrålen riktas via en spegel, som kan vridas så att elevationsvinkeln varierar stegvis inom en liten vertikal sektor. För elevationsvinklar över den optiska horisonten blir räckvidden endast begränsad av mottagarens brusnivå. För lägre vinklar träffar loben (laserstrålen) vattenytan på något avstånd, som vi kan kalla stråbanelängden. Svar registreras för ett antal elevationsvinklar. Vid det avstånd, där loben träffar ytan, bryts svaret. Genom analys av svaren får man ett antal värden på stråbanelängden och motsvarande elevationsvinklar. Tillsammans ger dessa värden ett samband, som beror av brytningsindexprofilen.

Sonderingsmetoden kan betecknas som en invers metod, eftersom man inverterar sambandet mellan temperaturprofil och funktionen som ger avstånd relativt vinkel. Troligen finns många lösningar, men genom att lägga till annan information om temperaturprofiler kan man förhoppningsvis hitta en mest sannolik lösning. Så vitt författarna vet har inte den här metoden beskrivits tidigare.



Figur 5.1: Principskiss över hur laserstrålen träffar vattenytan.

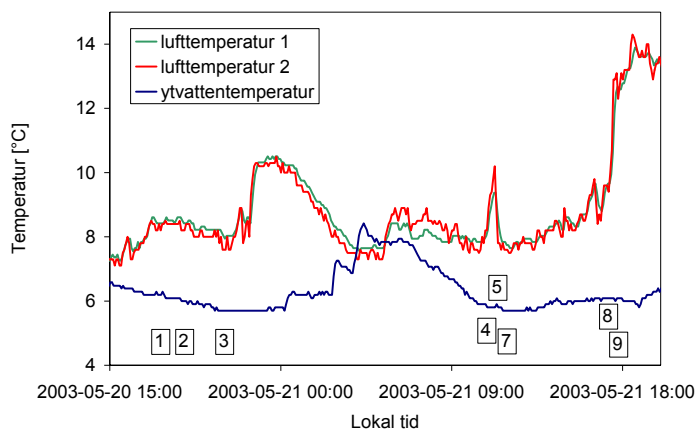
En optisk stråle (t.ex. en laserstråle), som riktas nära horisontellt längs vattenytan kan böjas av ner mot eller upp från vattenytan på grund av refraktion, som beror av brytningsindexgradienten. Avböjningen är ofta särskilt stark strax över vattenytan där gradienten är stor, när skillnaden mellan luft- och vattentemperatur (ASTD) är stor.

Lidarsystemet [*Renhorn m.fl.*, 2000] innehåller en Nd:YAG-laser med våglängdsomvandlare (övertongenerator) och en mottagare bestående av ett teleskop med filter och en PMT-detektor. Laserns tredje överton vid 355 nm i UV används för lidarsondering. Laserns divergens är ca 0,3 mrad och strålningen är horisontellt polariserad. Vid försöket var lidar koaxiellt monterad, vilket innebär att laserstrålen sammanföll med mottagarens optiska axel. Ett vridspegelsystem med stegmotorer används för att rikta lidarloben och därmed laser-

strålen. Vinkelstegen för avlänkning av loben är $1/100^\circ$ i både azimut- och elevationsledd. Vid mätningarna ändrades lobens elevationsvinkel i steg om $2/100^\circ$. För varje vinkel summerades 600 enkelpulssvar under en minut.

Mätningarna genomfördes under perioden 20 – 22 maj 2003 från kajen i Flatvarps hamn på Stora Askö i Västerviks kommun med lidarn riktad ut över öppet vatten. Avståndet i höjddled mellan vattenytan och centrum av optiken var 3,0 m. Som referens för lidarlobens elevation användes ett litet skär på ca 950 m avstånd. För mätning av luft- och vattentemperatur placerades en enkel boj ut på öppet vatten några hundra meter från land. Denna mätte och lagrade lufttemperaturen på 1,5 m höjd och vattentemperaturen ca 5 - 10 cm under vattenytan. Relativ fuktighet och vindhastighet avlästes manuellt från handhållna instrument.

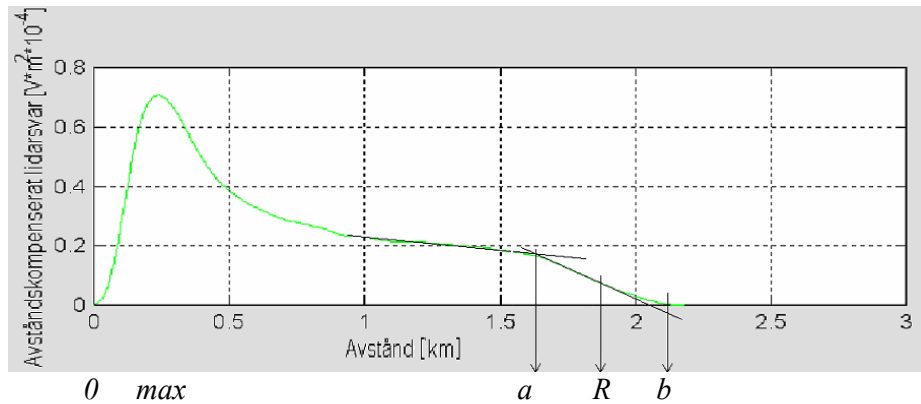
Sammanlagt nio mätningar genomfördes under tre mättillfällen vid varierande tid på dygnet och med mycket skiftande väder; allt från vackert försommarväder till gråväder med intensiva regnskurar. I figur 5.2 visas luft- och vattentemperaturer mätta i bojen med tre kurvor. Blå kurva representerar vattentemperaturen medan röd och grön kurva visar lufttemperaturen registrerade med två olika mätare. En del av temperatursprången i figur 5.2 kan förklaras av att solen direkt värmden luften längs mätsträckan över havet, men största påverkan hade troligen solens uppvärmning av marken på land och att den uppvärmda luften blåste ut över havet.



Figur 5.2: Uppmätta luft- och ytvattentemperaturer från kl. 15.00 den 20:e till kl. 20.00 den 21:e. Blå kurva representerar vattentemperaturen medan röd och grön kurva visar lufttemperaturen. Siffermarkeringarna indikerar när lidarsonderingar utfördes.

5.4.1 Utvärdering

I figur 5.3 visas ett avståndskorrigerat lidarsvar från en av mätningarna. Svaret har alltså multiplicerats med faktorn r^2 , där r är avståndet. 0 betecknar avståndet noll (lidarplatsen). Punkten *max* visar avståndet för maximal mottagarsignal. Värdet beror normalt av den s.k. överlappsfunktionen, som i det här fallet främst beror av teleskopets fokuseringsfunktion. Tyvärr var detektorn troligen överstyrd, vilket också påverkat svarets form. Det har egentligen ingen väsentlig betydelse för den aktuella tillämpningen, men bör korrigeras till nästa försök.

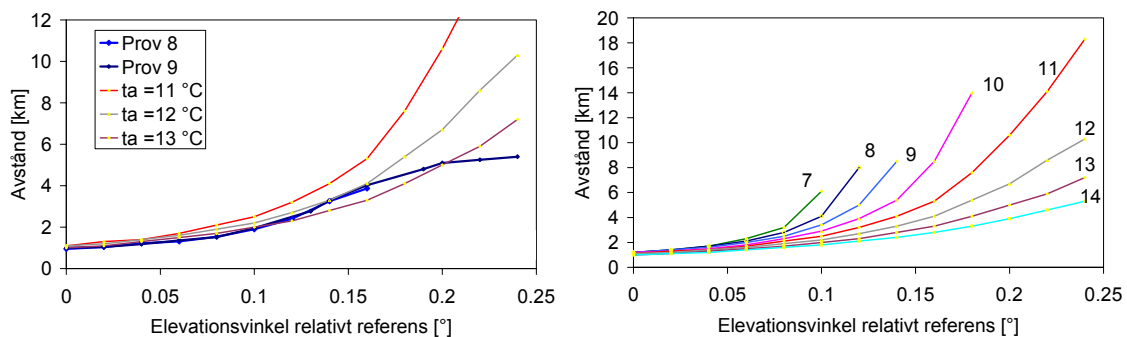


Figur 5.3: Lidarsvar från atmosfären vid sondering över vattenytan.

Strålen träffar vattenytan inom intervallet $a - b$. Vid detta försök har inte någon bakåtspridning från vattenytan observerats. En förklaring kan vara att en stor del av energin i strålen absorberas i vattnet. Reflektionen i vattenytan är polarisationsberoende, men polarisationen kunde inte varieras under försöket. Punkterna a och b visas även i figur 5.1, som illustrerar hur laserstrålen träffar vattenytan. Allteftersom infallsvinkeln mot vattenytan blir flackare, blir avståndet mellan a och b längre. Vid utvärderingen användes en enkel metod att bestämma strålbanelängden för centrum av strålen. Först bestämdes avstånden från 0 till punkterna a och b och därefter beräknades medelvärdet R av dessa. För långa avstånd var det dock svårt att bestämma punkten a eftersom kurvans lutning inte förändrades i någon högre grad och punkten b var svår att definiera ur bruset och avståndet R blev därför osäkert.

5.4.2 Resultat

Efter analysen gjordes en jämförelse mellan uppmätta och simulerade strålbanelängder. Se figur 5.4. Simuleringarna gjordes med strålgångsberäkningsprogrammet EO-Star från TNO i Nederländerna [*van Eijk m.fl.* 2002]. I programmet ges som indata bl.a. värden på meteorologiska parametrar, data för optik och sensor samt val av modell för strålgångsberäkningen.

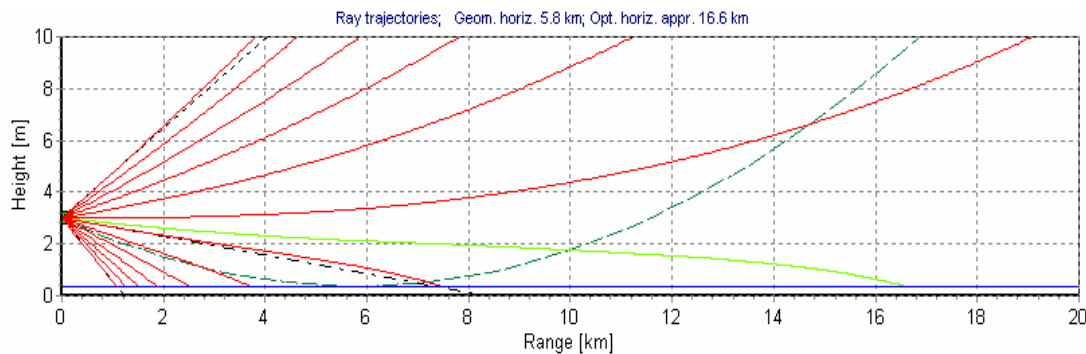


Figur 5.4: Till vänster uppmätta data från prov 8 och 9 (grova linjer) och beräknade data (tunna linjer) för lufttemperaturerna 11, 12 och 13 °C och vattentemperaturen 6 °C. Till höger maximala avstånd för laserretur som funktion av elevationsvinkel beräknade med EO-Star för lufttemperaturerna 7 - 14 °C och vattentemperaturen 6 °C.

Resultaten från lidarsonderingarna stämmer bra överens med simuleringarna för ett begränsat vinkel- och avståndsintervall men avviker för stora vinklar och motsvarande avstånd. Flera

förklaringar kan finnas. En är att laserstrålens relativt stora divergens medför osäkerhet i avstånd. En annan är att temperaturen kan ha varierat starkt längs sträckan, vilket kan ha påverkat simuleringsresultaten.

Figur 5.5 visar beräknade strålbånar (röda kurvor) från en punkt på 3,0 m höjd över havsytan. I simuleringen definierades optik med field of view (FOV) på $0,24^\circ$. FOV markerades med 13 kurvor, alltså delades FOV in 12 lika delar med delningen $2/100^\circ$. De 13 kurvorna kan också tänkas markera lidarns sonderingar med steget $2/100^\circ$. Steget är alltså ca $0,35$ mrad, vilket ungefär motsvarar laserstrålens divergens. Den optiska horisonten märks ut av den ljusgröna kurvan och var i detta fall 16,6 km. Blå horisontell linje illustrerar beräknad våghöjd. Grön streckad kurva markerar den geometriska horisonten, som blir en krökt linje i detta diagram, som plottats med ”plan jord”.



Figur 5.5: Kurvor över strålgången från Lidarn beräknade med hjälp av programmet EO-Star. Vid beräkningarna har följande värden använts: relativ fuktighet 85 %, vindhastighet 5 m/s, lufttemperatur $8,0^\circ\text{C}$ och ytvattentemperatur $6,0^\circ\text{C}$.

Slutsatser från dessa inledande prov är att resultaten är lovande och att flera försök bör genomföras för att utveckla metoden och för att göra flera jämförelser, mellan simuleringar och mätningar för olika ASTD-förhållanden och sjötillstånd.

Lidarsystemet kan optimeras t.ex. genom reducerad stråldivergens och installation av anordning för polarisationsvridning.

Frågor, som bör studeras är: hur reflektion och spridning från vattenytan påverkas av polarisationen, våghöjdens inverkan på lidarsvaret samt vilken laservåglängd, som är mest lämplig. Speciellt vore det intressant att göra liknande försök vid våglängden $1,55\ \mu\text{m}$ med en ögonsäker lidar, som dessutom är intressant för aerosolsondering.

5.5 Turbulensens effekter på optiska system

Strålning som passerar genom en turbulent atmosfär, som påverkas av vind, temperaturvariationer eller av rörelser, kommer att förändras både till riktning och intensitet. Optisk turbulens har sitt upphov i ojämn temperaturfördelning och luftfuktighet längs den optiska sträckan. Det betyder för passiva bredbandiga system att kontrastförhållanden och bildskärpa påverkas medan för aktiva system kommer intensitet, strålstorlek eller överförd effekt att påverkas. Vilka fenomen som uppträder och hur inverkan kommer att resultera i olika effekter, beror på arten av turbulens.

Storleken och rörelser hos de i turbulensen ingående turbulensvirvlarna (cellerna) kommer att bestämma de tidsskalor som definierar turbulensens effekter på strålningen. Gränserna för virvelstorleken, inom vilken teorierna är giltiga, är viktiga i beskrivningen av turbulensen.

Den övre gränsen för turbulensvirvlarnas storlek betecknas med L_o och den nedre gränsen med l_o , dvs. för de små virvlarna. Virvelstorleken som har betydelse för optiska system sträcker sig från delar av en mm till tiotals meter. Om en tänkt optisk stråle passerar dessa virvlar kan gränsen för typiska tidsskalor uppskattas. De snabba turbulensfenomenen har tidsskalor kring millisekunder medan det kan krävas medelvärdesbildningar över någon eller några sekunder för att exempelvis en ljuskällas intensitetscentrum skall kunna bestämmas med noggrannhet.

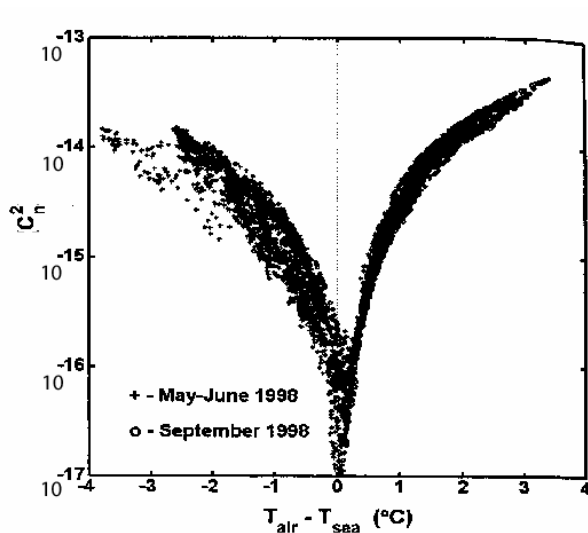
Laser: Intensitetsfördelningen hos en laserstråle som passerar en turbulent atmosfär kan få ett fläckigt utseende som snabbt förändras (scintillation). Laserfläcken kan komma att vara bredare än utan den turbulenta atmosfären, dvs. strålen divergerar. Laserfläcken kan brytas upp i flera mindre, ibland sammanhängande ibland i fristående laserfläckar. Laserstrålen kan utbreda sig vid sidan av den kortaste sträckan mellan sändare och mål under korta tidsperioder medan medelvärdet följer den optiskt kortaste vägen. Resultatet blir s.k. strålvandring.

Bildgenererande system: Systemprestanda hos bildgenererande system reduceras på grund av turbulens i atmosfären. Turbulens leder till scintillation (intensitetsvariationer hos olika delar av bilden), suddighet och rörelser av delar inom bilden. Suddigheten påverkar bildens upplösning, vilket kan liknas vid en reducering av den effektiva aperturstorleken vilket i sin tur begränsar det faktiska signal-till-brusförhållandet hos systemet.

Effekten av optisk turbulens kan under gynnsamma förhållanden reduceras med antingen adaptiv optik redan vid observationstillfället eller i efterhand genom filtrering av exempelvis bilder med Wiener filter.

Effekten av turbulens på brytningsindex kan beskrivas med ett statistiskt mått på de småskaliga brytningsindexvariationerna i rummet, som kallas *strukturkonstanten för brytningsindex* och betecknas C_n^2 [Zeisse m.fl., 1999; Beland 1993]. Typiska värden för C_n^2 är $10^{-15} - 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$. C_n^2 minskar med höjden över havsytan samt antar låga värden om lufttemperatur och havsytans temperatur är lika, se figur 5.6 och figur 5.9. Omfattningen av scintillation, oskärpa och ”dansande bilder” kan beräknas om man känner C_n^2 .

C_n^2 kan bestämmas med en meteorologisk bulkmodell liknade den som används för att bestämma hur temperatur och fuktighet varierar med höjden i LBM. Samma indata från 10 m höjd och havsytan som används för LBM kan också användas för C_n^2 -modellen. Tillgången till internationell programvara för C_n^2 -modeller är dock begränsad, varför arbete har påbörjats för att anpassa LBM för beräkning av C_n^2 . Modellanpassningen föreslås fullföljas i kommande projekt och därefter provas på fartyg (jfr kap 3.5).



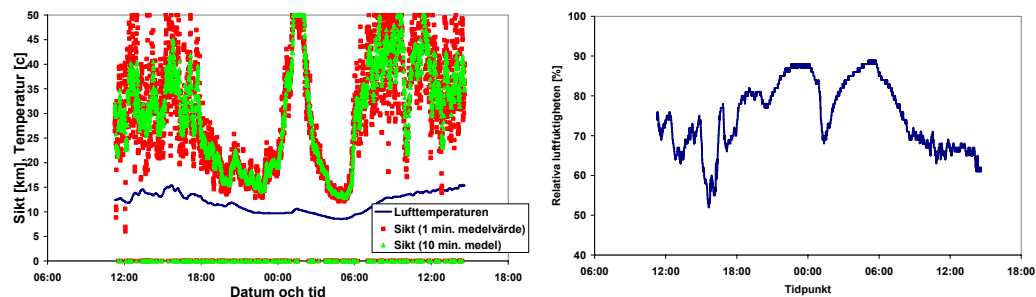
Figur 5.6: C_n^2 på en viss höjd som funktion av temperaturskillnader mellan luft och hav [från Frederickson m.fl., 2000].

Försök att använda koherent lidar-mätning för samtidig mätning av vind och turbulensparameter har diskuterats, se [Karlsson m. fl. 1999]. En inledande litteraturstudie av ämnet föreslås för kommande projekt.

5.6 Turbulensmätningar strax ovan vattenytan

Turbulensen mättes som medelvärde över en längre sträcka, ca 900 m, med en scintillometer från Scintec av typen Large Aperture Scintillometer, LAS900. Dessa mätningar är de första av denna typ gjorda över svenska farvatten. Mätningar genomfördes på höjder som varierade mellan 1,5 och 3,0 meter över vattenytan. Provet genomfördes i inomskärsmiljö den 14-15 maj 2002 mellan Äggsjär och Bergsholmen, i Stockholms södra skärgård.

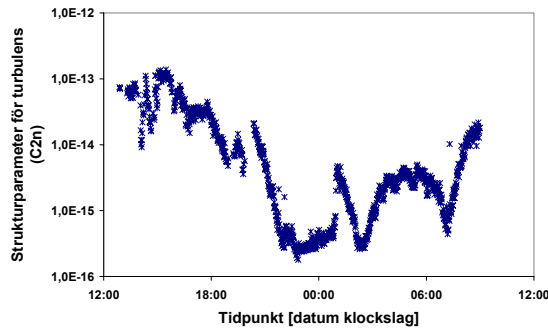
Scintillometern är tillverkad för att mäta turbulens, heat flux, sidvind över stora avstånd och arbetar med principen scintillationsmätning, dvs. mätningar av intensitetsvariationen som funktion av tid.



Figur 5.7: Sikt och temperatur till vänster och relativa luftfuktigheten för tiden vid mättillfället.

Vid provtillfället mättes meteorologiska parametrar som temperatur, luftfuktighet, tryck, vind och dessutom sikten med en väderstation. Vädret var typiskt för en fin försommardag i maj med stark solinstrålning och god sikt (varierade mellan 12 km upp till mer än 50 km), se figur 5.7. En väderstation placerades med sensorerna ca 4,3 m över vattenytan, på bryggan vid Äggsjär några meter från mätsträckan. Vattentemperaturen mättes inte kontinuerligt utan en

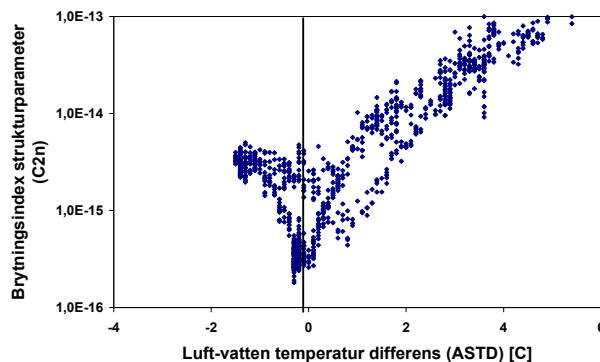
termometer doppades i vattnet vid bryggan. Vattentemperaturen varierade mellan 10,5 - 11,2 °C under den tiden som termometern avlästes.



Figur 5.8: Turbulensmätningar genomförda med Scintec scintillometer strax över vattenytan mellan Äggskär och Bergholmen, Östersjön. Mätsträckan var ca 0,9 km.

I figur 5.8 visas brytningsindexstrukturparameter, C_n^2 , som funktion av tiden för hela mätserien. Utrustningen lämnades igång under kvällen och natten, då inte heller några vattentemperaturer noterades. Turbulensen sjönk markant under eftermiddagen mot kvällen och steg på morgonsidan och fram mot förmiddagen.

En förenklad analys har gjorts där C_n^2 plottas som funktion av ett approximativt ASTD-värde. Detta ASTD-värde uppskattades genom att anta att vattentemperaturen höll sig stabil samtidigt som lufttemperaturen loggades för mätperioden. Resultatet redovisas i figur 5.9 där spridningen för ASTD-värdena är relativt stora.



Figur 5.9: Brytningsindex strukturparameter som funktion av differensen luft-vattentemperatur från mätningar i maj 2002.

Denna typ av mätning av optisk turbulens över långa sträckor bör genomföras tillsammans med mätningar med en treaxlig ultraljudsanemometer. Punktmätningar av turbulens kan då jämföras med medelvärdesbildande mätningar över långa sträckor, jämför avsnitt 3.5 och 5.5.

6 Internationellt samarbete inom Western European Armament Group (CEPA-projekt)

För att få tillgång till resultat från ett vidare forskningsområde än vad vi skulle klara på egen hand började Sverige och FOI år 2000 söka samarbete inom WEAG /CEPA (Western European Armament Group/Common European Priority Area). Ett projektförslag (CEPA1.19) rörande vädrets inverkan på radarutbredning har gemensamt utarbetats av Frankrike (lead nation), Sverige, Storbritannien, Nederländerna och Tyskland. Projektets titel är ”*Duct mapping improvement based on atmospheric data fusion for naval purpose*”. Varje land deltar med ca 4,5 Mkr fördelat på 3 år. Projektet planeras pågå från hösten 2003 till hösten 2006 och finansieras för Sveriges del inom FoT-projekt vid FOI. Projektets syfte är att utarbeta förslag till förbättrade metoder för 3-dimensionell kartläggning av ledskikt- och radarutbredningsförhållanden över större ytor (några hundra km). Projektförslaget omfattar sju delprojekt (Work Packages, WP):

- WP1: Kartläggning av operationella krav
- WP2: Virtuella sensorer för kartläggning och prognos av ledskikt och radarutbredning (behandlar meteorologiska mätmetoder och meteorologiska prognosmodeller)
- WP3: Bestämning av ledskiktsparametrar med hjälp av radio/radar-signaler genom invers metodik
- WP4: Förbättring av databas för ledskikt med hjälp av vertikalsonderingar.
- WP5: Samband mellan väderobservationer och markledskikt.
- WP6: Värdering av genomförbarhet
- WP7: Ledning

FOI planerar medverka i WP1, WP2, WP3 och WP6. Inom WP1 kartlägger vi svenska operationella krav på bestämning och prognos av ledskikt och radarutbredningsförhållanden. Inom WP2 undersöker vi egenskaper hos några tillgängliga sk mesoskaliga väderprognosmodeller i Sverige (HIRLAM och ev. MM5) och möjligheten att använda dessa för beräkning av ledskiktsprognoser.

WP3 behandlar problemet att från radio- och radarsignaler plocka fram brytningsindex för att sedan kunna uppskatta ev. ledskikt över hav. FOI har den ledande rollen i delprojektet vilket innebär en del extra administrativt arbete i form av ansvar för kvartalsvisa lägesrapporter.

Inom WP3 har FOI bl.a. förbundit sig att utveckla och/eller förbättra metoder för att genom invers beräkningsteknik uppskatta brytningsindexprofiler. Detta arbete har påbörjats och kommer att vara en väsentlig och tidskrävande del inom CEPA-arbetet.

Inom WP6 studerar vi möjligheten att integrera utdata från väderprognosmodeller med vågutbredningsmodellen APM (Advanced Propagation Model).

7 Slutsatser och förslag

LBM är redan idag ett verktyg som ger en taktisk fördel i duellsituationen, se [Ivarsson, 2002]. Detta kan sägas trots en begränsad användning och trots att systemet ger en begränsad information om ledskikt och radarhorisont. Därför finns en stor anledning att vidareutveckla systemet och förbättra både indataparametrarna liksom att förbättra beräkningsmetoden för att vinna förbättrad noggrannhet och säkerhet.

Studien har visat att:

Noggrannheten hos LBM kan förbättras väsentligt genom att förbättra beräkningsmetoden samt genom att förbättra kvalitén och upplösningen i de meteorologiska väderparametrarna, som modellen behöver.

Raketsondering av temperatur och luftfuktighet har visat sig vara en metod att förbättra indata, som ger betydligt bättre bestämning av ledskikt än tidigare varianter av LBM. Metoden ger möjlighet att bestämma markbaserade och höjdedskikt, vilket tidigare metod inte klarade. Ytterligare arbete med att anpassa metoden inklusive beräkningsmetodik bör genomföras. Ytterligare verifikation av metoden, både praktiskt och teoretiskt behöver genomföras.

Genomförda prov visar att data från mesoskaliga meteorologiska modeller också kan kopplas till vågutbredningsmodeller. Dessa tester indikerar positiva resultat, men det är dock ännu för tidigt att avgöra om och hur stor förbättring eller nytta man kan ha av detta.

Prov med IR-termometer för mätning av havsytans temperatur har visat att metoden fungerar bra med lovande resultat trots att litteraturuppgifter pekar på problem med reflektion av himmelstrålning. En slutlig analys av proven skall göras och därefter föreslås att prov med IR-termometer för vattenytans temperatur fortsätter så att fler typer av väder och vattentemperaturförhållanden erhålls, speciellt från vår, försommar och nattetid.

Det finns internationell programvara som beräknar effekten av brytning (refraktion, mirage etc.) för optiska våglängder, s.k. strålbaneprogram. Dessa är för närvarande inte tillgängliga, mer än som beta-versioner utan tillgång till källkod. Därför föreslås att förutsättningarna för att införskaffa någon sådant program, genom internationella kontakter. Alternativt kan ett program skapas som en utveckling av LBM programmet.

Fortsatta försök med Lidar för aerosol och strålbaneondering bör genomföras. Möjligheten att använda koherent Lidar för mätning av turbulensparametern C_n^2 och vind bör undersökas.

Turbulensmätningar bör fortsätta, där koppling mellan punktmätning och optisk turbulensmätning med långa mätavstånd undersöks vidare. Vidare bör litteraturstudier om turbulensmätning mha koherent Lidar-teknik genomföras.

Tillgången till internationell programvara för *strukturkonstanten för brytningsindex*, C_n^2 , är begränsad, varför egen modellutveckling behövs. Prov med bulkmodell för C_n^2 (*strukturkonstanten för brytningsindex*) och turbulensmätningar föreslås på fartyg.

Kontakter med WEAG/CEPA visar att det finns internationellt intresse för samarbete med Sverige rörande vågutbredning.

Beräkningsmodeller för vågutbredning av radio och radarvågor av typen Parabolisk Ekvationslösning (PE) ger en väsentligt bättre beskrivning av vågutbredningen för låga höjder (upp till 500 m -1000 m) i havsmiljö, både i kustnära områden och öppet hav, än tidigare strålbaneberäkningsmodeller för radio-, radarvåglängder.

Vågutbredningsmodellen FDPE ger ett bättre resultat än APM för en varierande topografi. Detta har konstaterats bero på två orsaker. För det första modellerar inte APM reflektioner mot icke plan mark på ett korrekt sätt, vilket bland annat beror på att sluttande terräng modelleras med hjälp av trappstegsfunktioner. Här skulle en "shift map"-teknik kunna användas istället för en trappstegsmetod för att ta hand om en varierande topografi, vilket görs i FDPE. För det andra verkar APM välja beräkningssteg mer eller mindre oberoende av hur terrängen ser ut. Detta är inte bra eftersom ett betydligt mindre beräkningssteg krävs för en terräng med kraftig lutning än för en terräng med liten lutning. Fortsatta studier behövs för att undersöka möjligheter till förbättringar.

Aerosolmodeller för marin miljö bör undersökas och anpassas för Östersjöområdet samtidigt som bevakningen av utvecklingen av aerosolmodeller för andra hav och havsområden bör fortsätta. Några av dessa modeller bör inkorporeras i strålbaneprogram för optisk strålning.

Studie av prestandamodeller för bildgenererande och andra optiska system bör genomföras.

Användningen av prestandamodeller som beslutstöd för alla typer av sensorer bör studeras. Detta skulle försvarsmakten kunna genomföra i separata studier som endast använder FOI som fackstöd och som inbegriper hela frågan om vinster (fördelar) vid planering och taktisk användning i operationer etc.

Programvaran för hantering av raketsond och överföring av data till LBM föreslås utvecklas för att bli smidigare och mer användarvänlig. Praktiska prov på krigsfartyg bör inledas.

Fortsatta försök för att verifiera förbättringar i diagnos/prognos av vågutbredningsförhållanden med hjälp av mesoskaliga meteorologiska modeller föreslås inom ramen för CEPA 1.19 projektet "*Duct mapping improvement based on atmospheric data fusion for naval purpose*".

Bestämning av ledskiktsp parametrar med hjälp av radio-/radar-signal genom invers metodik föreslås också inom CEPA 1.19- projektet.

8 Referenser

Beland R.R., (1993) Propagation through atmospheric optical turbulence. Chapter 2 of Atmospheric Propagation of Radiation.in Volume 2 of The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook. Editor Fredrick G. Smidt. ERIM and SPIE Optical Engineering Press.

Born M., and Wolf E., (1983) Principles of Optics. Electromagnetic theory of propagation interference and diffraction of light. (Sixth (corrected) edition) Pergamon Press, Oxford.

Bolander Göran, Karlsson Kjell, Allard Lars, Carlsson Tomas, Berglund Folke, och Steinvall Ove (2003) Kommande FOI rapport beskrivande LYSA-prov genomförda i Berga 2003.

Dion D., Gardenal L., Gilbert J., Forand L., Duffy M. and Lahaie P. (2001) IR Boundary Layer Effects Model (IRBLEM), Version3.6.1, DREV Quebec, Canada.

van Eijk A.M.J. and Kunz G.J. (2001) ARTEAM A ray tracing model for EO-applications, a background and status report, TNO-report FEL-00-A285.

Frederickson Paul A., Davidson Kenneth L., Zeisse Carl R. and Bendall Charles S., (2000), Estimating the refractive index structure parameter (C_n^2) over the ocean using bulk methods. J. of Applied Meteorology, 39, 1770-1783.

Gathman S.G., (1989) A preliminary description of NOVAM, the Navy Ocean Vertical Aerosol Model, NRL Rep. 9200, Natl. Res. Lab, Washington D.C., USA.

Gathman S. G., (1983) Optical properties of the marine aerosol as predicted by the Navy aerosol model, Optical Eng., 22, p. 57–62.

Gathman S. G., and Davidson K. L., (1993) NOVAM "The Navy Oceanic Vertical Aerosol Model", Technical Report 1693, (Rapporten finns i PDF format på CD-ROM distributionen av PcModWin4.0), December 1993.

Gathman Stuart G., and Van Eijk Alexander M. J., (1998), Electro-optical propagation just above wave tops as predicted by ANAM, the Advanced Navy Aerosol Model. Paper presented at the RTO SET Symposium on "E-O Propagation, Signature and System Performance under adverse meteorological condition considering out-of-area operations", held at the Italian Air Force Academy, Naples, Italy, 16 – 19 March 1998.

Gustafsson Ove, Hågård Arne, Karlsson Edvard och Persson Rolf, (2002), Vågutbredningsanalys för elektrooptiska system,. Förstudie. FOI-R--0513--SE, June 2002.

Holm Peter och Eriksson Gunnar, (2002), "Parabolisk ekvationsteknik för vegetation," FOI, Linköping, FOI-R--0637--SE, Dec. 2002 (in Swedish).

Hågård Arne och Persson Rolf, (1997), Aerosol Extinction Measurements with Lidar at 10.6 and 1.5 μm , Advances in Atmospheric Remote Sensing with Lidar, Selected papers of the 18th International Laser Radar Conference (ILRC), Berlin, 22-26 July 1996; Editors: A. Ansmann, R. Neuber, P. Rairoux and U. Wandinger; Springer-Verlag.

Ivarsson Urban, (2002), Framfört vid kort anförande på förberedelsemöte för projektet CEPA 1.19 "Duct mapping improvement based on atmospheric data fusion for naval purpose", FOI, Umeå, 20-21 september 2002.

De Jong A.N., Winkel J., Hågård A., Persson R., Nelsson C. and Nilsson P., (1999), Common Preliminary report on Swedish Netherlands 'Baltic99' IR Experiments, May 1999, TNO report FEL-99-1160.

Karlsson Christer., Steinvall Ove. och Olsson Fredrik (1999) Reserapport från "Tenth Biennial Coherent Laser Radar Technology and Applications Conference". FOA-R-- 99-01263-408--SE, December 1999.

Karlsson Edvard, Asp Börje, Eriksson Gunnar och Rundgren Marcus, (2001), Vågutbredningsanalys för radio och radar, Förstudie. FOI-R- - 0099 - - SE, June 2001.

Nilsson Bertil A., (1994), Model of the relation between aerosol extinction and meteorological parameters. Atmospheric Environment 28 (5), 815 – 825.

Kneizys F.X., Abreu L.W., Anderson G.P., Chetwynd J.H., Shettle E.P., Berk A., Bernstein L.S., Robertson D.C., Acharya P., Rothman L.S., Selby J.E.A., Gallery W.O., Clough S.A., (1996), The MODTRAN2/3 Report and LOWTRAN 7 MODEL, från Ontar corporation, 9 Village Way, North Andover, MA 01845, USA; WWW.Ontar.com.

Kunz G.J., Moerman M.M., van Eijk A.M.J., Doss-Hammel S.P. and Tsintikidis D., (2003), EOSTAR: an electro-optical sensor performance model for predicting atmospheric refraction, turbulence and transmission in the marine surface layer, SPIE paper number 5237-13.

Nordstrand Melker, (2002), Manuskript över utprovning av raketsond och IR-instrument för vattenytans temperatur.

Nordvall L., (1999), Personlig kommunikation i oktober. FM vädercentral.

Persson Rolf och Kaurila Timo, (2002), Aerosoldämpningsmodell för skandinavisk miljö - baserad på mätningar vid Lövsättra i Uppland. FOI-R--0689--SE

Piazzola Jacques, Bouchara Frederic, de Leeuw Gerrit and van Eijk Alexander M.J., (2003), Development of the Mediterranean extinction code (MEDEX), Optical Engineering 42(4).

Renhorn Ingmar, Carlsson Göran, Engquist Isak, Hallberg Tomas, Holm Lennart, Hågård Arne, Lindell Roland, Nelsson Claes, Persson Rolf, (2000), IRST: Flygburen sensor för taktiska tillämpningar. FOA-R--00-01437-408--SE.

Zeisse C.R., Nener B. D. And Dewees R. V., (1999), Measurement of low-altitude infrared transmission, Technical report 1797, June 1999, SPAWAR System Center, San Diego.

Zilitinkevich S. S., (1972), On the determination of the height of the Ekman boundary layer. Boundary layer meteorology, 3, p. 141-145.