

Slutrapport Atmosfärseffekter och vågutbredning 2022–2024

P. BERGANDER, D. BRATTGÅRD, F. LAURÉN,
L. NORIN, M. RAHM OCH N. WELLANDER



P. Bergander, D. Brattgård, F. Laurén, L. Norin, M. Rahm och N. Wellander

Slutrapport Atmosfärseffekter och vågutbredning 2022–2024

Titel	Slutrapport Atmosfäreffekter och vågutbredning 2022–2024
Rapportnummer	FOI-R--5697--SE
Månad	November
Utgivningsår	2024
Antal sidor	34
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare	FM
Forskningsområde	Sensorer och signaturanpassning
FoT-område	Sensorer och signaturanpassningsteknik
Projektnummer	E51548
Godkänd av	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Telekrig
Omslagsbild:	Carolina Ståhlberg

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

Sammanfattning

Den här rapporten sammanfattar resultaten från det treåriga forskningsprojektet *Atmosfärs effekter och vågutbredning* som pågått från 2022 till och med 2024. Arbetet gjordes inom Försvarmaktens samlingsbeställning för forskning och teknikutveckling inom *Sensorer och signaturanpassning* (FoT SoS, AT.9220424). Projektet studerade atmosfärens inverkan på hur elektromagnetiska vågor, som används för radar och elektrooptiska (EO) system, utbreder sig i atmosfären. Atmosfären kan under vissa förhållanden medföra både kortare och längre räckvidder än normalt. Kännedom om atmosfärens elektromagnetiska egenskaper och dess inverkan på egna och motståndares sensorer kan utnyttjas taktiskt. Projektet undersökte, med hjälp av numeriska väderprognoser, hur långa förutsägelser av atmosfärens vågutbredningsegenskaper man kan göra som är användbara för radar och EO-system. Projektet undersökte också hur man på bästa sätt modellerar vågutbredning i atmosfären. Förbättrade prediktions och vågutbredningsmodeller ger bättre underlag för bedömning av egna och motståndares spanings- och vapensensorers tillgängligheter och räckvidder. För validering av modellerna användes väderdardata och meddelanden från AIS (*Automatic Identification System*), liksom insamlad data av optisk turbulens.

Nyckelord

Telekrig, radar, elektrooptiska system, elektromagnetisk vågutbredning, numeriska väderprognoser, optisk turbulens, anomal vågutbredning, ledsikt, avdunstningsledsikt.

Abstract

This report summarizes the results from a three-year research project *Atmospheric effects and wave propagation* that lasted 2022 to 2024. This research was funded by the Swedish Armed Forces R&D programme for *Sensors and low observables* (FoT SoS, AT.9220424). The project studied the impact of the atmosphere on the propagation of electromagnetic waves that is used in radar and electro optical (EO) systems. The atmosphere may, during certain conditions, cause shorter or longer detection ranges. Knowledge of the electromagnetic properties of the atmosphere and the corresponding impact on our own sensor and an opponent's sensors can be used tactically. The project explored, using numerical weather forecasts, the duration for which it is possible to predict the wave propagation properties of the atmosphere relevant for radar and EO systems. The project also investigated the most appropriate way to model wave propagation in the atmosphere. Improved prediction and propagation models provide a better foundation for assessing the performance of our own sensors and those of an opponent, particularly in terms of availability and detection ranges. Weather radar data, AIS (*Automatic Identification System*) messages, and collected optical turbulence data was used to validate the models.

Keywords

Electronic warfare, radar, electro optical systems, electromagnetic wave propagation, numerical weather predictions, optical turbulence, anomalous wave propagation, ducting layer, evaporation ducting layer.

Innehåll

1	Introduktion	7
1.1	Bakgrund	7
1.2	Forskningsfrågor	7
1.3	Samarbeten och samverkan	10
2	Vågutbredning för mikrovågor	13
2.1	Observationer	13
2.2	Modellering	15
2.3	Tillämpning	18
3	Elektrooptik	21
3.1	Observationer	22
3.2	Modellering	25
4	Slutsatser	29
5	Fortsatt arbete	31
	Referenser	33

1 Introduktion

1.1 Bakgrund

Alla radarsystem och elektrooptiska (EO) sensorer baseras på elektromagnetisk vågutbredning i atmosfären. Atmosfärens tillstånd (tryck, temperatur och luftfuktighet) varierar över tid, vilket styr förekomsten av moln och dimma, nederbörd i form av regn, snö och hagel, liksom vindar och turbulens. Tillsammans medför det en betydande påverkan av vågutbredningsförhållandena, vilket i sin tur gör att sensorernas prestanda, t.ex. räckvidder, varierar med tidpunkt och plats. Kännedom om atmosfärens egenskaper och dess inverkan på egna och motståndares sensorer kan utnyttjas taktiskt. Förbättrade prediktionsmodeller och modeller för vågutbredning i atmosfären ger säkrare underlag för bedömning av egna och motståndares spanings- och vapenssensorers tillgängligheter och räckvidder.

Projektet *Atmosfärseffekter och vågutbredning* adresserar vågutbredning för mikrovågor (radar) och optiska våglängder (EO). På grund av den stora skillnaden i våglängd mellan radarvågor och optiska vågor (dm/cm till μm) kommer helt olika fysikaliska processer i atmosfären att spela roll för hur signalerna utbreder sig. Radar påverkas t.ex. inte så mycket av moln och dimma men desto mer av luftfuktighetsgradienter. Ljusets utbredning, däremot, påverkas av lufttemperaturgradienten. För att förstå atmosfärens inverkan på Forsvarsmaktens (FM) sensorer behöver vi förstå både hur atmosfärens olika tillståndsp parametrar varierar och hur dessa påverkar vågutbredningsegenskaperna.

Den här slutrapporten redovisar aktiviteter och resultat för det treåriga projektet *Atmosfärseffekter och vågutbredning 2022–2024*. Formella leverabler till FM utgörs av ett antal vågutbredningsscenarier beskrivna i [1] liksom redovisning av årliga workshoppar [2]–[4]. Dessutom har projektet producerat eller bidragit till följande publikationer [5]–[9].

1.2 Forskningsfrågor

Projektet har följande frågeställningar:

1. För hur lång tid är prognoser av atmosfärens elektromagnetiska egenskaper (radar och EO) baserade på numeriska vädermodeller användbara?
2. Hur modellerar man vågutbredning för radar och EO-system för att nå bästa användbarhet i spelsimuleringar, i planering av uppdrag och i taktiska beslutsstöd?

Ett exempel som visar att det kan vara viktigt för FM med korrekta vågutbredningsprognoser ges i avsnitt 2.3 där väder och vågutbredningsförhållandena analyseras vid Ukrainas sänkning av robotkryssaren *Moskva* i april 2022. Arbetet publicerades i [6] och har fått stor internationell uppmärksamhet.

Övergripande svar på forskningsfrågorna

Båda frågeställningarna är komplexa och kan inte få sina slutliga svar av ett projekt med starkt begränsad budget som täcker både radar- och EO-vågutbredning. Svaren beror på vilken sensor det gäller, radar eller EO. Svaren beror också på hur sensorerna skall användas, t.ex. påverkas en spaningsradar för långa avstånd genom atmosfären mer av atmosfärens egenskaper jämfört med en stridsfältss radar för relativt korta av-

stånd. En satellitburen radar med brant infallsvinkel mot jorden påverkas på ett annat sätt än en radar riktad parallellt med jordytan.

Radar

För att undersöka om det är möjligt att använda numeriska väderprognoser för att prognostisera atmosfärens radarvågutbredningsegenskaper användes samma data som Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI), Meteorologisk Institutt (Norge) och Finlands meteorologiska institut (FMI) använder för de dagliga väderprognoserna. De numeriska prognoserna ger värden på en rad tillståndsvariabler för atmosfären vilka användes för att beräkna atmosfärens brytningsindex för mikrovågor enligt formel (2.1) i avsnitt 2.2.

För att bedöma prognosernas träffsäkerhet beräknades vågutbredning i atmosfären med hjälp av en parabolisk vågekvation [10]. Resultatet av beräkningen jämfördes med data från några väderradarstationer placerade i närheten av Sveriges kuster. En väderradar är konstruerad för att framförallt upptäcka nederbörd i atmosfären. Under anomala vågutbredningsförhållanden kan det dock hända att radarn tar emot marken, t.ex. från andra sidan Östersjön. Styrkan på dessa marken jämfördes med vågutbredningsberäkningar gjorda för motsvarande sträcka.

Figur 2.9 i avsnitt 2.2 visar relativt god överensstämmelsen i juni 2021, för upp till 5 timmars prognoslängd, för vågutbredning mellan väderradarn på Gotland och förekomsten av marken på Öland. I Figur 2.11 framgår det att, som förväntat, prognoserna blir något sämre när prognoslängden ökar. Resultaten är preliminära men visar att det går att göra förutsägelser baserade på numeriska väderprognoser som kan vara av värde för FM. Studien behöver utökas med prognoser för flera geografiska platser med olika topografi, på olika breddgrader, för olika radarsystem och för längre prognostider.

Ett fenomen som behöver specialstuderas är om det går att förutsäga förekomsten av avdunsningsledskikt. Det kan förväntas att förmågan att prognostisera vågutbredningsförhållandena för radarfrekvenser varierar med årstiderna. I avsnitt 2.1 analyseras väderradardata och meddelanden från AIS (*Automatic Identification System*). Analysen visar att det förekommer anomal vågutbredning framförallt under sommarhalvåret [5]. Under vissa förhållanden får sensorerna förkortad räckvidd. Dessa utbredningsfall är svårare att utvärdera med hjälp av väderradardata och återstår att studera i framtiden.

Svaret på den andra frågeställningen baseras på projektgruppens erfarenhet av numeriska algoritmer t.ex. [11]–[13] och på publicerad litteratur, exempelvis [10]. Först och främst beror svaret på hur stora beräkningsresurser som finns tillgängliga och hur lång tid man kan vänta på resultatet av beräkningen. Tyvärr räcker inte dagens datorresurser för att lösa de ekvationer (Maxwells fältekvationer) som fullständigt beskriver elektromagnetisk vågutbredning i atmosfären. Anledningen är att vid de frekvenser (från mikrovågor och uppåt) och stora avstånd som vi är intresserade av blir det numeriska problemet för stort för att rymmas på någon dator och beräkningen skulle i så fall ta orimligt lång tid.

För att beräkna vågutbredning för radarsystem har vi använt en parabolisk vågekvation som endast tar hänsyn till utbredning i ett vertikalt plan och i endast en riktning. Trots förenklingen kan även sådana beräkningar ta lång tid. Ekvationen kan lösas numeriskt med olika tekniker. Över öppet hav, och andra horisontella ytor kan metoden *Fourier split-step* användas. Den är snabb jämfört med till exempel finita differensmetoder,

och är lämplig att använda i taktiska tillämpningar. För att snabba upp beräkningarna ytterligare hänvisas till hybridmetoder, där olika approximationer används, t.ex. strålgångsmetoder, i olika delar av beräkningsdomänen.

För beräkningar över land och skärgård måste andra långsammare tekniker användas, t.ex. finita differenser eller finita element. Som vid alla numeriska beräkningar finns ett val mellan noggrannhet och snabbhet. Ju noggrannare resultat desto längre tid tar det. Det finns dock ingen mening med att räkna med större numerisk noggrannhet än vad de osäkerheter som finns i modellen medger, t.ex. osäkerhet i topografi eller atmosfärens elektromagnetiska egenskaper.

Om beräkningarna skall vara meningsfulla behövs en tillräckligt bra beskrivning av beräkningsdomänen. Det innebär att topografi och skrovlighet hos markytan eller havsytan beskrivs på ett sätt som kan tas om hand i den numeriska algoritmen. Normalt är den rumsliga uppdelningen av beräkningsdomänen grövre än normal skrovlighet hos mark- och havsytan. Vegetation är ett annat problem som är besvärligt då det saknas full kunskap om vegetationens geometri och dess elektriska egenskaper. Ofta beskrivs vegetationen som ett dielektriskt homogent medium med en fiktiv elektrisk förlust för att modellera de elektromagnetiska spridningsförlusterna. För att hitta bra dielektriska parametrar för det fiktiva mediet måste omfattande mätdata samlas in vid olika årstider och väderförhållanden.

Ett sätt att hantera dessa osäkerheter är att beskriva dem med stokastiska modeller. Det ger partiella differentialekvationer med stokastiska koefficienter. Med bra stokastiska modeller kan inte bara förväntade räckvidder för t.ex. ett radarsystem beräknas utan också konfidensintervall för upptäcktsavstånd för ett givet mål. Att göra dessa beräkningar är dock inte enkelt.

Ett klassiskt sätt är att med Monte Carlo-simuleringar beräkna många realiseringar. Problemet är att det ofta krävs väldigt många beräkningar vilket tar orimligt lång tid. Forskningsområdet som handlar om fortplantning av stokastiska osäkerheter är aktivt och det finns alternativa metoder till Monte Carlo-simuleringar som bör kunna anpassas till vågutbredningstillämpningar. En metod som kan användas när den stokastiska modellen har endast en stokastisk variabel testades i [12] och [13]. Det finns andra metoder som kanske är effektivare, särskilt om modellen har flera stokastiska dimensioner. Om kvalitativa resultat duger kan man snabba strålgångsmetoder användas.

EO

I avsnitt 3.1 och 3.2 diskuteras arbete med en väderprognosbaserad modell för marknära optisk turbulens. Litteraturstudier visar att långtidsmätningar av optisk turbulens som kan kopplas till väderprognoser i svensk miljö saknas [7].

Projektet har utvecklat utrustning för att kunna genomföra långtidsmätningar av optisk turbulens. Denna utrustning har installerats i Karlskrona med hjälp av *Försvarsmaktens meteorologiska och oceanografiska centrum* (METOCC) och därefter registrerat optisk turbulens under ett års tid. Inom projektet har en modell för att skatta marknära optisk turbulens med väderprognoser utvecklats. Initiala resultat tyder på att flera olika aspekter, som dygnsvariation och skillnad mellan vatten och land kan predikteras med modellen. Arbetet har dokumenterats i [8].

Slutsatsen är att modellen för marknära turbulens baserad på väderprognoser är en lovande kandidat för framtida utbredningskoder för optiska våglängder. Den är värd att fortsätta att utveckla och integrera med annan programvara. Framtida arbete behö-

ver fokusera på långtidsvalidering mot mätdata och att knyta ihop modellen med en turbulensmodell som är giltig högre upp i atmosfären.

I avsnitt 3.2 diskuteras en modell för långvågsinfraröda kameror baserat på väderprognoser som utvecklats av projektet i samarbete med FOI-projektet *Koncept EO-TDA 24–26*, vilket adresserar den andra forskningsfrågan. Modellen använder sig av den egenutvecklade turbulensmodellen, väderprognoser, kamerakarakteristik, en signaturmodell, och en detektionsmodell. I dagsläget används information om tryck, temperatur, luftfuktighet, sikt, molnhöjd, nederbörd och vindhastighet för att beräkna transmission genom atmosfären med den kommersiella programvaran MODTRAN6. Modellen är nyutvecklad och har ännu inte jämförts mot mätdata.

Slutsatsen är att modellarbetet är ett första steg mot en integrerad modell för atmosfärspåverkan på infraröda kameror. Framtida arbete behöver dels innefatta validering mot experimentella data, men även arbete för att kunna handskas med olika typer av aerosoler och nederbörd i form av snö.

1.3 Samarbeten och samverkan

Projektet arrangerar årliga referensgruppsmöten där framförallt olika delar av FM och Försvarets Materielverk (FMV) deltar. Mötena är organiserade som workshopar och samarrangeras med forskningsprojektet *Radiokanalmodeller för framtida militära system*. Mötena redovisas i [2]–[4]. Syftet har varit att få en referensgrupp som kan ge relevant information till projektet bland annat från slutanvändarna hos FM om vad som är viktigt för dem. Mötena har varit uppskattade som ett forum att diskutera atmosfärs effekter för både mikro- och EO-vågutbredning.

Samarbete med Försvarsmakten

Projektet samarbetar med FM/METOCC som bidrar med meteorologikompetens och egna högupplösta numeriska väderprognoser. Samarbetet sker inom det internationella projektet DUCTING under ICE-PPR (se nedan).

Projektet har gett två bidrag vid de metodkonferenser som FM och SMHI arrangerade 2022 och 2024. Projektet gav även presentationer vid Marinen METOCC-avnämarmöte 2023, som hölls i FOI:s lokaler 14 november 2023.

Övriga samarbeten i Sverige

Genom samarbete med meteorologer vid Uppsala universitet får projektet tillgång till meteorologiska data och expertkunskap om atmosfäriska gränsskikt, som är viktiga för att förstå avdunsningsledskikt. Samarbetet sker genom det internationella projektet DUCTING under ICE-PPR (se nedan).

Genom samverkan med SMHI får projektet tillgång till numeriska väderprognoser som används för att prognostisera atmosfärens vågutbredningsegenskaper. Dessa har sedan validerats med hjälp av radar och radiodata (se kapitel 2). Samverkan med SMHI har resulterat i publikationen [6].

I samarbete med Lunds universitet har teorin och numerisk kod för modellering av koherent multipelspridning i partikelmoln utvecklats. Det har resulterat i en gemensam publikation [9].

I svensk miljö är spridning av optisk strålning mot snö viktiga aspekter för FM:s EO-system. FOI har tidigare undersökt framåtspridning i fallande snö i relation till

LIDAR-system, men inte undersökt sido- och bakåtspridning [14]. Projektet kontaktade forskare vid Luleå tekniska universitet (LTU) som har stor erfarenhet inom snö-forskning men även inom optiska mätmetoder. En idé för hur sido- och bakåtspridning skulle kunna mätas formulerades. Kandidatarbeten vid LTU som undersökte olika designaspekter av det tänkta mätinstrumentet har genomförts vilket gav viktiga insikter till nödvändiga designkriterier. Former för hur samarbetet skall kunna vidareutvecklas diskuteras för närvarande.

Projektets radardel samverkar med projekten *Vidmakthållande LBM* och *US BAS 1 Vågutbredning* som utreder frågor om vad anomal vågutbredning kan innebära för FM:s framtida sensorsystem, *Sensorsystem Ny*.

Internationella samarbeten

En relativt stor del av arbetet kring radarvågutbredning görs i samarbete med Finland (FDRA) och Norge (FFI) under avtalet *The International Cooperative Engagement Program for Polar Research* (ICE-PPR) i det gemensamma projektet *Improved radio frequency propagation awareness in the Nordics* med korttiteln *DUCTING*. Förutom FOI bidrar FM/METOCC och Uppsala universitet med meteorologisk kompetens och meteorologimätplats (Östergarnsholm). Samarbetet löper över fem år, 2023–2027.

För att få ytterligare medel till området har FOI tillsammans med de andra parterna i *DUCTING*-projektet under 2023 deltagit i ansökan av projektet *FESPAN (Forecasting Electromagnetic Signal Propagation ANomalies)* som svar på en utlysning av *European Defence Fund* (EDF) (*EDF-2023-RA-SENS-EMSP: Electromagnetic signal propagation*). Ansökan blev godkänd och arbete med projektavtalet pågår under hösten 2024 med planerad projektstart december 2024.

Under 2023 och 2024 har informationsutbyte av atmosfärs effekter för vågutbredning (radar och EO) gjorts, under avtal IEA 5427, med *Naval Information Warfare Center (NIWC) Pacific* i San Diego, USA.

Projektet har även engagerat sig i en forskningsgrupp inom Nato, SET-291 *Environmental Sensitivities to EO-TDAs*, som behandlar atmosfärs effekter för elektrooptiska taktiska beslutsstöd. Anledningen till engagemanget är att knyta kontakter med de forskningsinstitut som under Nato-paraplyet intresserat sig för liknande frågor. Förhoppningen är att FOI genom att delta i gruppen skall få ta del av *best practice*, och på så vis lättare återuppta forskningen om atmosfärs effekter inom EO-området.

2 Vågutbredning för mikrovågor

2.1 Observationer

Väderradar

En typ av radarsystem som påverkas av anomal vågutbredning är väderradar. Emellanåt kan ekon från kuster på andra sidan Sveriges omringliggande hav (Östersjön, Bottenviken, Kattegatt) synas i sådana data. Dessa ekon kan inte uppstå om atmosfärens tillstånd motsvaras av standardatmosfär. Om ekon uppstår är det alltså en indikation på förekomsten av anomala vågutbredningsförhållanden.

SMHI har 12 väderradarstationer som sänder på C-bandet (ca 5,6 GHz). Dessa väderradarstationer moderniserades från och med ca 2017. De moderniserade anläggningarna sparar både filtrerad och ofiltrerad data, vilket ökar möjligheterna att se eventuella effekter av anomal vågutbredning. Projektet begärde, och fick, tillgång till data från ca år 2000 till juni 2021 av SMHI. Genom att undersöka hur ofta kustekon förekommer i radardata kan förekomsten av anomala vågutbredningsförhållanden i Sveriges närområde kartläggas, se Figur 2.1.

Resultaten av analysen visar att en tydlig årscykel i kustekon syns för alla radarstationer som når kuster på andra sidan hav. Ekostyrkan har stor variation men kustekon är vanliga under sommaren och ovanliga vintertid. Vid en detaljerad analys kan även en mindre tydlig dygns cykel konstateras. Ekon är något vanligare under eftermiddagen än på morgonen. Säsongen för anomal vågutbredning tycks vara något kortare i norr jämfört med i söder, se Figur 2.2.

Resultaten har publicerats i en vetenskaplig tidskrift [5] och har även presenterats vid flera konferenser¹.

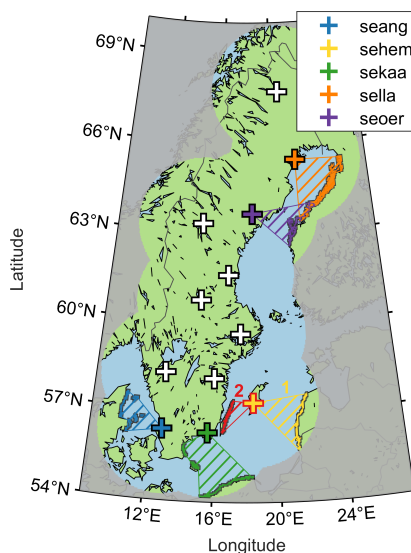
AIS

AIS (*Automatic Identification System*) är ett transpondersystem över vilket fartyg kan meddela information om sin egen position, hastighet, destination, etc. Alla fartyg över en viss storlek måste sedan 2005 använda AIS. En viktig användare av AIS-meddelanden är olika länders kustbevakningsmyndigheter som genom landbaserade basstationer kontinuerligt kan övervaka sjötrafiken. I Sverige är det Sjöfartsverket som förvaltar de ca 40 basstationer som finns utplacerade längs Sveriges kuster, se Figur 2.3. AIS-meddelanden sänds på VHF-bandet (ca 162 MHz).

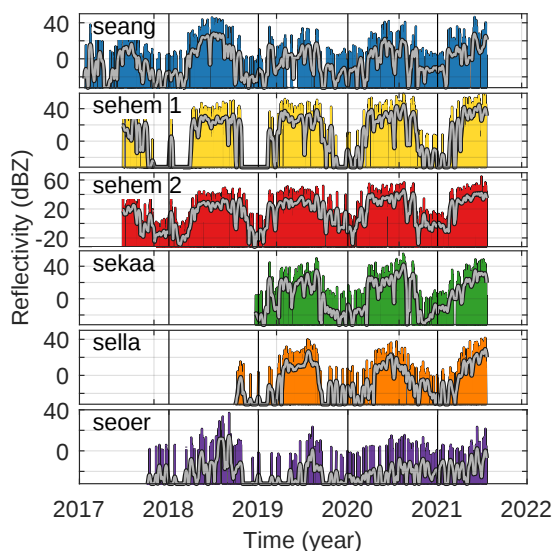
FOI har tillgång till AIS-data och kunde använda dessa för att analysera eventuella effekter av anomal vågutbredning. Eftersom både sändare och mottagare är mark- eller havsbaserade begränsas överföringen oftast av radiohorisonten, vilken dock förväntas kunna ändras beroende på vågutbredningsförhållandena.

Den metod som användes för att analysera AIS-data var att för varje timme extrahera den självrapporterade positionen för alla meddelanden och sedan räkna ut avståndet till en utvald basstation. För dessa avstånd beräknades sedan den 80:e avståndspersentilen, vilket motsvarar den radie inom vilken 80 % av alla mottagna meddelanden

¹Metodkonferensen i Uppsala 2022, Nato SET-311 Military Sensing Symposium i London 2023, Nato SCI-SET-358 Electromagnetic Operations i Prag 2024.



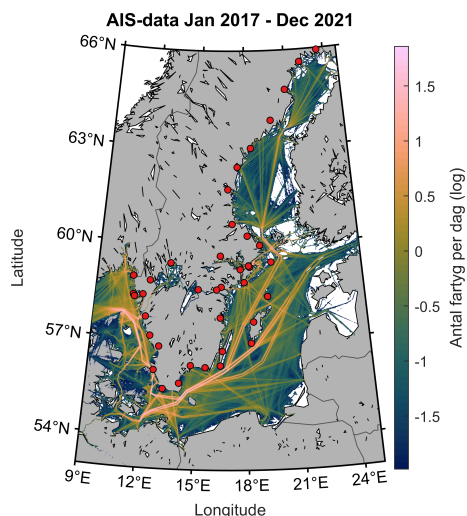
Figur 2.1: Karta över svenska väderradarstationer. Fem stationer valdes ut och ekon från markerade kustområden analyserades.



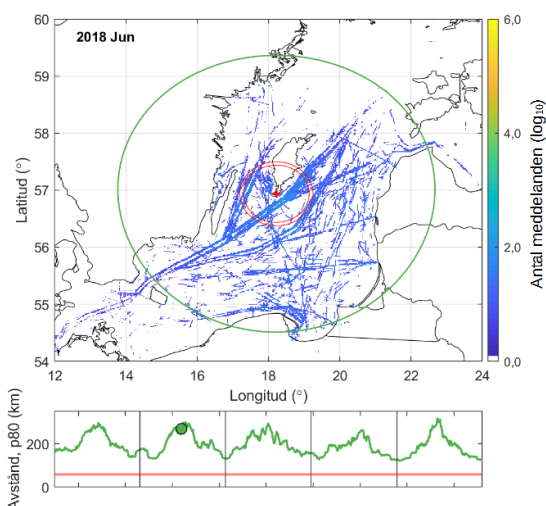
Figur 2.2: Tidsserier av kustekon från de fem utvalda väderradarstationerna. En tydlig årsykel syns.

befinner sig. Valet av 80 % percentilen gjordes för att få ett robust mått som inte blir orimligt känsligt för enstaka avlägsna sändare. Andra mått är möjliga, t.ex. medianavståndet. Denna radie kan följas över tid för att se eventuella förändringar och trender.

På samma sätt som för väderradardata konstaterades att radien följer en mycket tydlig årsykel, se Figur 2.4, där meddelanden tas emot med lång räckvidd under sommaren och med betydligt kortare avstånd vintertid. Någon dygnsykel har ännu inte kunnat påvisats tydligt. Även dessa resultat presenterades vid samma konferenser som resultaten för väderradardata.



Figur 2.3: Histogram över antal fartyg per dag 2017–2021, enligt AIS-data. Sjöfartsverkets basstationer är markerade med röda cirklar.



Figur 2.4: Överst: Histogram över antal AIS-meddelanden mottagna av Sjöfartsverkets basstation på södra Gotland. Röda cirklar visar radiohorisonten för normalatmosfär för ett par olika höjder för AIS-transpondrarna. Grön cirkel visar den radie inom vilken 80 % av alla meddelanden togs emot. Underst: Tidsserie över radien inom vilken 80 % av AIS-meddelandena tagits emot. En tydlig årscykel syns där radien är större sommartid och mindre vintertid.

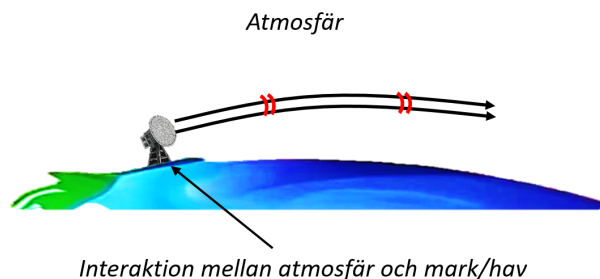
2.2 Modellering

Problemformulering

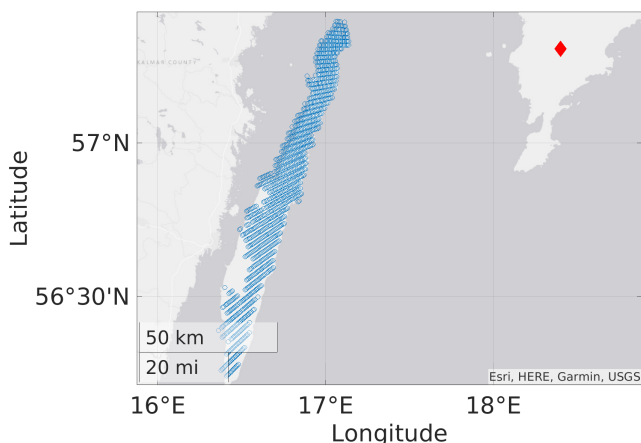
Syftet och den underliggande frågeställningen för denna undersökning är:

Är den paraboliska vågekvationen, med brytningsindex beräknat från numeriska väderprognoser, användbar för att prediktera utbredningsförutsättningar för radarvågor i atmosfären över Östersjön?

Figur 2.5 illustrerar ett typiskt underliggande scenario för undersökningen. En radar som är placerad nära kusten är vänd mot havet. De utgående radarsignalerna intera-



Figur 2.5: Ett typiskt underliggande scenario för studien. En radar är placerad nära kusten och är vänd mot havet. Radarsignalerna interagerar med havet och atmosfären.



Figur 2.6: Positionen för väderradarstationen på Gotland (röd diamant) och de givna positionerna på Öland där styrkan från markekon är uppmätta (blå cirklar).

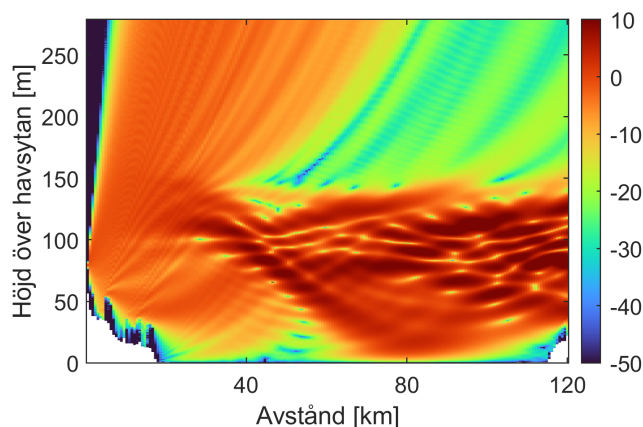
gerar med atmosfären och med havet. Brytningsindexet i atmosfären förväntas ha stor inverkan på utbredningen.

Mer specifikt fokuserade denna underökning på den väderradar som är placerad på Gotland. Stundvis tar radarn emot markekon från Öland. Öland ligger dock långt bortom radarhorisonten och om markekon från Öland tas emot indikerar det på anomala vågutbredningsförhållanden. Figur 2.6 visar positionen på väderradarstationen (röd diamant) och de punkter (blå cirklar) där markekon på Öland är uppmätta. För att utvärdera modelleringen användes de observationer som beskrivs i avsnitt 2.1. Observationerna består av ekostyrka från de utvalda positionerna på Öland i Figur 2.6, som uppmäts av väderradarn på Gotland. Hittills har observationer från tidsperioden januari 2021 – juni 2021 använts.

Målet är att undersöka hur väl vågutbredningsförhållandena kan predikteras genom att använda den paraboliska vågekvationen [10] med brytningsindex beräknat från numeriska väderprognoser (NWP, eng. *Numerical Weather Prediction*).

Numerisk lösare och numeriska väderprognoser

För att lösa den paraboliska vågekvationen användes den FOI-utvecklade koden Detvag [11]. Som indata anges radarns position, frekvens, elevationsvinkel, polarisation och lobbredd. Utdata från Detvag är envelopefunktionen för det reducerade EM-fältet som är proportionellt mot antingen E eller H beroende på polarisation. Det används för



Figur 2.7: Utbredningsfaktor för en atmosfär med ledskikt. Väderradarn är placerad på Gotland till vänster och är riktad mot Öland.

att beräkna utbredningsfaktorn (PF, eng. *propagation factor*) [10] för radarsignalen i atmosfären. Ett exempel visas i Figur 2.7 där utbredningsfaktorn beräknades för en atmosfär med ett tydligt ledskikt. Röd färg indikerar starkare signal, medan blå är svagare signal. I exemplet är radarn placerad enligt Figur 2.6 (vid 0 km) och Öland finns i utbredningsriktningen (vid 120 km avstånd).

De NWP-data som använts är nedladdade från Meteorologisk Instituttt [15] där prognoser från *The MetCoOp Ensemble Prediction System* (MEPS) finns publikt tillgängliga. I undersökningen har prognosmodellens kontrollmedlem använts, vilken har en prognostid på upp till 65 timmar. Kontrollmedlemmen i en ensamblekörning för väderprognoser ska vara konstruerad från den ”bästa” analysen för initialvillkor. Det är utifrån kontrollmedlemmen som övriga medlemmar perturberas i en ensamblekörning. Den laterala upplösningen är 2,5 km och modellen innehåller totalt 65 höjdnivåer. Notera att MEPS är ett samarbete för att ta fram operationella prognoser mellan SMHI, Meteorologisk Instituttt och FMI. Från prognoserna kan brytningsindex för elektromagnetisk utbredning i atmosfären beräknas enligt [10]

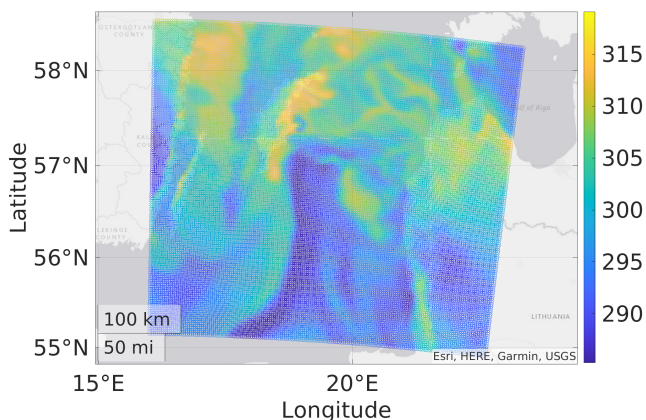
$$n(x,z) = 1 + 77.6 \cdot 10^{-6} \frac{p}{T} + 3.73 \frac{e}{T^2}, \quad (2.1)$$

där T är lufttemperatur, p är lufttryck och e är vattenångtryck. Nya prognoser släpps var 6:e timme som predikterar vädret för upp till 65 timmar framåt i tiden. Figur 2.8 visar ett exempel på den beräknade refraktiviteten [10] för 8 juni 2021 klockan 12:00 för 550 meters höjd över havet. Refraktiviteten i Figur 2.8 är beräknad från väderprognosen som är utgiven samma tid. Området för den beräknade refraktiviteten täcker Gotland, Öland, delar av Sveriges sydöstra kust samt Baltikum.

Resultat

Undersökningen genomfördes enligt följande metod:

- i) Från väderradarobservationerna av markekon på Öland (Figur 2.6), extraheras ekon från utvalda radarceller för varje timme för tidsperioden januari 2021 – juni 2021.
- ii) För samma tidsperiod beräknas brytningsindex från numeriska väderprognoser. Först används prognoslängder på maximalt 5 timmar (Figur 2.9 och Figur 2.10) för att sedan utökas upp till 65 timmar.



Figur 2.8: Refraktiviteten för tiden 8 juni 2021 klockan 12:00, beräknad från väderprognosen som är utgiven vid samma tidpunkt. Området täcker Gotland, Öland, delar av Sveriges sydöstra kust samt Baltikum.

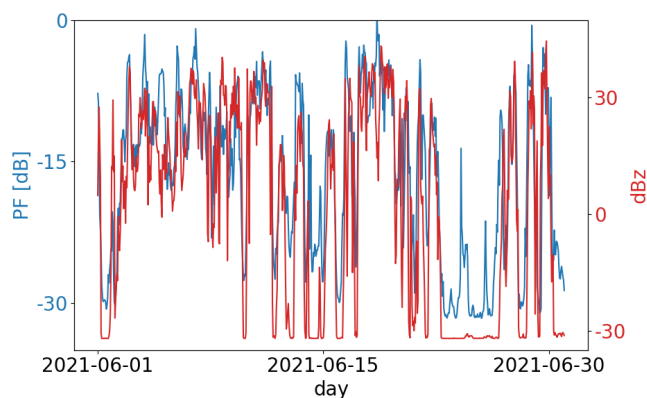
- ii) Brytningsindex används som indata till Detvag för att beräkna PF i de utvalda radarcellerna.
- iv) För varje timme beräknas medelvärdet av den uppmätta ekostyrkan (observationer) och medelvärdet för PF (prediktioner). Således erhålles ett värde för varje timme i tidsserien för både observationer och prediktioner. För ett helt dygn erhålls 24 värden.
- v) Korrelationskoefficienten, σ beräknas mellan de två datamängderna observationer och prediktioner för varje månad. Notera att $|\sigma| \rightarrow 1$ indikerar en starkare korrelation (Figur 2.11).

Först används prognoslängder upp till 5 timmar för att beräkna brytningsindexet för prediktionerna. Prediktionerna och observationerna för juni 2021 visas i Figur 2.9. En god överensstämmelse mellan de två datamängderna kan noteras, dock finns det även tidpunkter där överensstämmelsen är sämre. I Figur 2.10 visas prediktioner och observationer för januari 2021. Enbart svaga signaler är uppmätta, vilket stämmer väl överens med prediktionerna. Korrelationskoefficienten för juni 2021 är $\sigma = 0,83$, vilket tyder på stark överensstämmelse. För januari 2021 erhålls $\sigma = -0,14$, detta eftersom det huvudsakligen är brus som är både predikterat och uppmätt, vilket är okorrelerat.

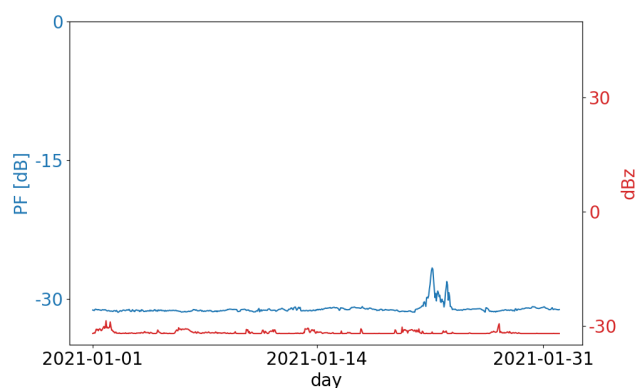
Det är av intresse att se hur väl prediktionerna stämmer överens med observationerna när prognoslängden ökar, eftersom prognoserna sträcker sig upp till 65 timmar. Figur 2.11 visar korrelationskoefficienterna för olika prognoslängder för olika månader under året 2021. När prognoslängderna ökar är trenden en svagt minskande korrelation.

2.3 Tillämpning

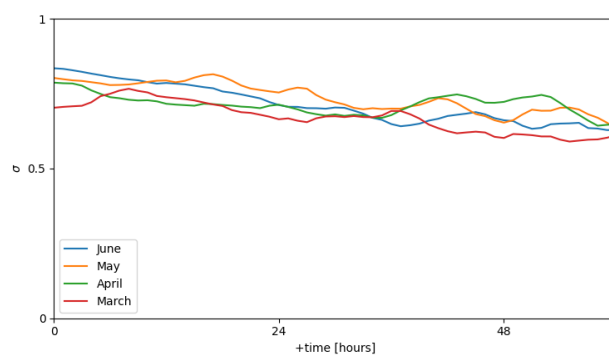
Den 13 april 2022 träffades den ryska svarta havs-flottans flaggskepp, robotkryssaren *Moskva*, av två ukrainska sjömålsrobotar av typen *Neptun R-360*, vilket ledde till att fartyget sänktes. Ukraina använde en samlokaliserad markbaserad eldledningsradar, *Mineral-U*, för att upptäcka sjömål vars koordinater sedan kunde ges till sjömålsrobotarna. När *Moskva* träffades låg emellertid fartyget mer än 120 km från den troliga positionen för *Mineral-U*, vilket är mer än dubbelt så långt som avståndet till radarhorisonten om standardatmosfär skulle råda, se Figur 2.12. Detta ledde till spekulationer om att Ukraina hade fått hjälp av amerikanska patrullflygplan att positionera *Moskva*, vilket dock förnekades officiellt av USA.



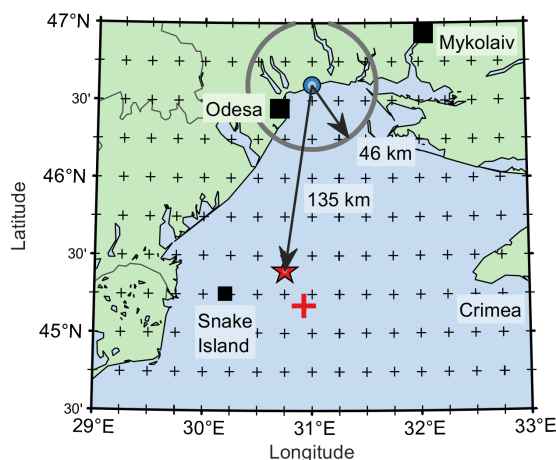
Figur 2.9: Prediktioner av utbredningsfaktor (blå linje) och observationer av radarreflektivitet (röd linje) för juni 2021 för radarstationen placerad på Gotland, vänd mot Öland (se Figur 2.6). Prognoslängder upp till 5 timmar har använts som underlag för prediktionerna. Notera att datamängderna har olika skalor.



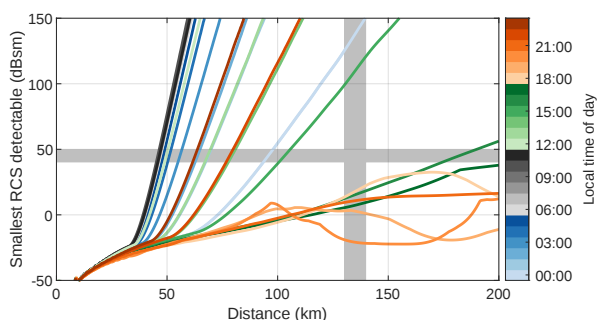
Figur 2.10: Prediktioner (blå linje) och observationer (röd linje) för januari 2021 för radarstationen placerad på Gotland, vänd mot Öland (se Figur 2.6). Prognoslängder upp till 5 timmar har använts som underlag för prediktionerna. Notera att datamängderna har olika skalor.



Figur 2.11: Korrelationskoefficienterna för mars 2021 – juni 2021 för olika prognoslängder.



Figur 2.12: Ungefärliga positioner för radarsystemet *Mineral-U* (blå cirkel, nära Odesa) och robotkryssaren *Moskva* (röd stjärna nära Ormön i Svarta havet). Radarhorisonten vid normalatmosfär är markerad med en grå cirkel. Ett rött plustecken i Svarta havet visar var *Moskva* observerades av satellit några timmar efter den träffats av ukrainska sjömålsrobotar.



Figur 2.13: Bilden visar minsta radarmålyta som kunde detekteras av radarsystemet *Mineral-U* för olika avstånd. Grå horisontell linje visar *Moskvas* antagna radarmålyta och grå vertikal linje markerar det antagna avståndet från radarsystemet. De olika färgade linjerna visar resultatet för olika timmar under 13 april 2022. Under några timmar, från 16:00 till 21:00 kunde radarsystemet upptäcka *Moskva*.

En nyhetsartikel i den ukrainska tidskriften *Ukrainska Pravda* från december 2022 hävdade dock, baserat på intervjuer med personal som deltagit i bekämpningen av *Moskva*, att de inte alls fått hjälp med positioneringen utan att det var rådande väderläge som gjorde att de kunde upptäcka fartyget. Eftersom denna utsaga kan undersökas vetenskapligt beslöt projektet att analysera hur det förhöll sig.

Genom att använda återanalysdata (numeriska väderprognoser som i efterhand förbättrats) kunde det atmosfäriska tillståndet som rådde vid tidpunkten för bekämpningen återskaps. Tillsammans med vågutbredningsmodellen *Detvag* konstaterades att ledskiktsförhållanden uppstod vid den tidpunkt då de ukrainska soldaterna sa att de upptäckte fartyget och analysen bekräftade att de utan problem borde ha kunnat se *Moskva* på sin radar, se Figur 2.13.

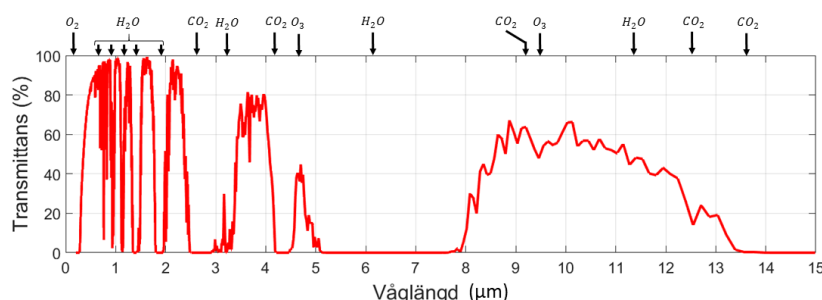
Resultatet publicerades i en vetenskaplig meteorologisk tidskrift [6] och rönt stor internationell uppmärksamhet. De båda tidskrifterna *Nature* och *Science* skrev om artikeln, liksom ett stort antal nyhetsmedier. För projektet var det mycket nyttigt att få metodiken granskad i detalj, vilket bekräftade att vi är på rätt väg.

3 Elektrooptik

Den optiska delen av det elektromagnetiska spektrumet sträcker sig från ultraviolett (UV, 100 nm – 400 nm) till långvågsinfrarött (LWIR, 8 μm – 12 μm). Strålning i detta band påverkas kraftigt av väder. Påverkan på optisk vågutbredning kan delas in i fyra olika moder:

- Absorption
- Spridning
- Turbulens
- Ledsikt

För absorption och spridning kan atmosfären delas upp i gaser och partiklar. Absorption uppkommer då strålning omvandlas till värme. Absorption från atmosfärsgaser har ett kraftigt våglängdsberoende. Exempel på spektral transmission på grund av absorption i atmosfärens gaser visas i Figur 3.1. Här ses tydligt vilken variation i transmission som finns för olika optiska våglängder. Kameror som är känsliga i långvågsinfraröda bandet, även kallad det termiska IR-bandet, detekterar strålning med våglängder i intervallet 8–12 μm . I detta våglängdsband påverkar luftfuktighet till stor del hur stor absorptionen är, vilket gör att termiska IR-kameror är känsliga för variationer i luftfuktigheten.



Figur 3.1: Exempel på spektralt upplöst transmittans efter 10 km utbredning nära havsytan. I bilden indikeras viktiga absorptionsband och vilka gaser som ger upphov till dem.

Spridning orsakas av både gaser och partiklar och innebär att strålning byter utbredningsriktning. Det är främst spridning mot partiklar som signifikant påverkar militära optiska system. Atmosfärspartiklar inkluderar aerosoler, nederbörd, dimma och moln. Påverkan från aerosoler och dimma har tydliga våglängdsberoenden som kopplar till partiklarnas storlekar i relation till våglängden hos den optiska strålningen. För nederbörd, både regn och snö, är dropparna och flingorna så stora att deras storleksvariationer i sig inte ger upphov till våglängdsberoende effekter. Däremot har de diffraktiva loberna som uppkommer runt nederbördspartiklarna en våglängdsberoende lobbredd, vilket kommer påverka optisk spridning i framåtriktningen [16].

Med optisk turbulens menas slumpmässiga brytningsindexvariationer i atmosfären som påverkar utbredningen hos den optiska strålningen. Styrkan i den optiska turbulensen brukar ofta kvantifieras med den så kallade strukturparametern för brytningsindex, C_n^2 , vilken har enheten $\text{m}^{-2/3}$ och typiskt antar värden i intervallet 10^{-15} – 10^{-12} . För avbildande system ger turbulens upphov till bildansning, bilddeformation och upplösningsförlust. För laserstrålar ger turbulensen upphov till scintillationer,

strålvandring och strålbreddning. Temperaturvariationer är den dominerande faktorn till optisk turbulens, men i våglängdsband med absorption på grund av vattenånga kan även fuktighetsfluktuationer påverka.

Med optiska ledskikt menas sammanhållna brytningsindexgradienter som gör att den optiska strålningen utbreder sig längs krökta banor, precis på samma sätt som för radar- och radiovågutbredning. Beroende på riktningen på brytningsindexgradienten kommer initialt horisontell strålning krökas mot eller från markytan, och därmed ge upphov till kortare eller längre sikthorisonter än vid normal utbredning.

För att få en grund att utgå ifrån gjordes en genomgång av vilka atmosfärsegenskaper som påverkar optisk strålning mest. Genom litteraturstudier, i samverkan med projektet *Långtidsmätningar av EO-väderprestanda*, undersöktes vad i atmosfären som påverkar optiska våglängder mest, och om det finns långtidsmätningar av dessa [7]. Sammanfattningsvis identifierades regn, dimma, moln, luftfuktighet, aerosollast, ozon, optisk turbulens, optiska ledskikt och snöfall som de atmosfärsegenskaper som mest påverkar optisk vågutbredning i försvarstillämpningar.

3.1 Observationer

Observationsdata kopplade till väderprognoser kan för EO-system vara tidsserier av transmissionsdata i relevanta våglängdsband, optisk turbulens och strålavböjning. Ett exempel är visuell sikt. Långa tidsserier av visuell sikt (vilket har en invers relation till transmission i det visuella bandet) har uppmätts från ett flertal platser av SMHI. Den visuella sikten är dock starkt beroende av aerosollasten i atmosfären och kunskap om dess storleksfördelning behövs för att kunna dra slutsatser om transmission i andra våglängdsband än det visuella. Därför behövs tidsserier med uppmätt transmission i relevanta våglängdsband för att kunna dra slutsatser om prognosticerad sikts användbarhet för utbredningsmodellering i dessa band. Det finns aerosolprognosmodeller för aerosollast som funktion av aerosolkällor, aerosolsänkor och meteorologi. Exempel på dessa är SMHI:s MATCH¹ och nederländska TNO:s LOTUS EUROS². En intressant framtida möjlighet är att kombinera väderprognoser med aerosolspridningsmodeller för att med den sammantagna effekten modellera optisk vågutbredning.

Optisk turbulens

Projektet samlade in data för optisk turbulens. Som mätinstrument valdes en ultraljudsanemometer (vindmätare) vilken utan frekvent tillsyn kan registrera styrkan på den optiska turbulensen i en punkt. Det utvecklade instrumentet består av en ultraljudsanemometer, en datalogger och ett 4G-modem, vilket möjliggör nerladdning av data via mobilnätet.

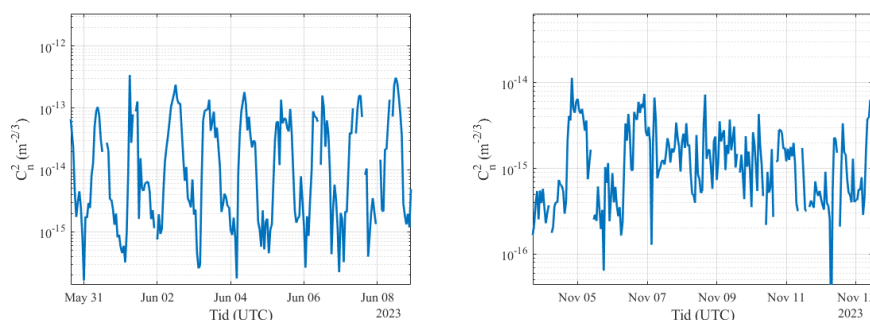
Figur 3.2 visar ett fotografi av mätinstrumentet. Under ett fältförsök i april 2023 installerades systemet på Lindholmen i Karlskrona med hjälp av FM/METOCC och Försvarmaktens telekommunikations- och informationssystemförband (FMTIS). Instrumentet registrerade sedan data på Lindholmen fram till april 2024. Exempel på tidsserier av uppmätt turbulens på Lindholmen i Karlskrona visas i Figur 3.3. I figuren visas tidsserier för juni respektive november. Skillnaden i dygnsvariation mellan sommar och höst är tydlig. I juni då solinstrålningen är stark dagtid är turbulensen som kraftigast mitt på dagen. I november är solinstrålningen mycket svagare, och som en konsekvens är dygnsvariationer i turbulensstyrkan i princip frånvarande.

¹www.smhi.se/forskning/forskningsenheter/meteorologi/spridningsmodellen-match-1.601

²<https://airqualitymodeling.tno.nl/lotos-euros/>

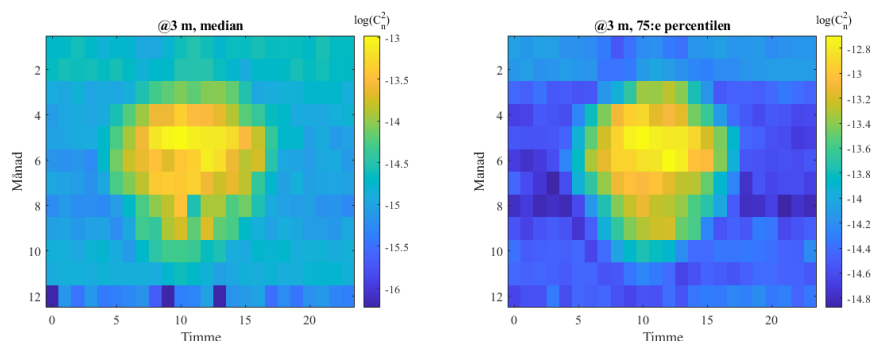


Figur 3.2: Bild på mätinstrument för registrering av optisk turbulens som installerades i Karlskrona tillsammans med FM/METOCC.



Figur 3.3: Tidsserier av uppmätt turbulens. Figur till vänster visar juni 2023 och figur till höger visar november 2023.

Baserat på dessa tidsserier kan statistik över hur turbulensen varierar med månad och tid på dygnet skapas. Exempel visas i Figur 3.4. Figuren visar tydligt att kraftig dygnsvariation fås på sommaren medan dygnsvariationen är frånvarande vintertid.

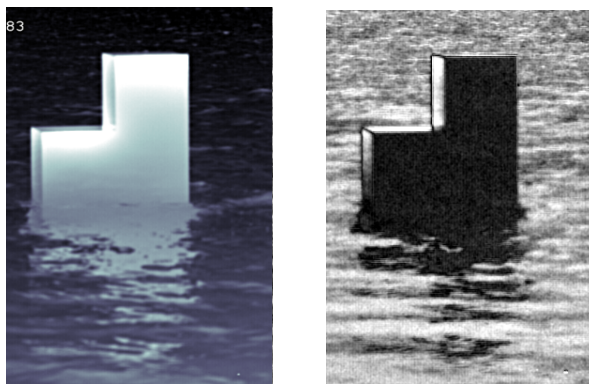


Figur 3.4: Medianvärde (vänster) och den 75:e percentilen (höger) för den uppmätta optiska turbulensen som funktion av tid på dygnet och månad.

Polarimetrisk avbildning i det långvågsinfraröda bandet

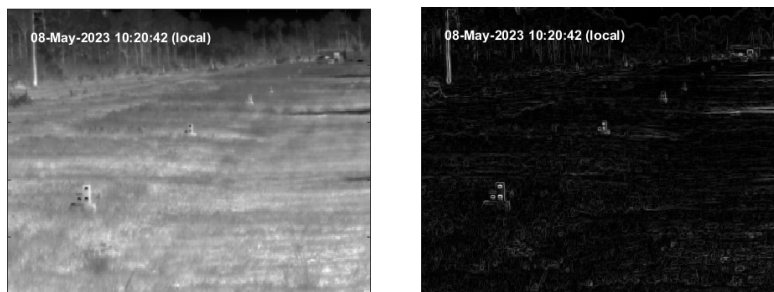
Inom ramen för Natogruppen SET-291 deltog FOI med personal på ett fältförsök i Florida. Gruppens ambition var att skaffa mätdata i varm och fuktig miljö. Mätobjekten var så kallade CUBI:s, vilket är L-formade metallblock målade i väl karakteriserade

färger. Dessa CUBI:s används som modelleringsobjekt för signaturmodeller. FOI bidrog med en polarisationskänslig långvågsinfraröd kamera. Det finns ett intresse inom gruppen att arbeta med polariserad vågutbredning i atmosfären, och ett dataset med jämförande signaturer kan bidra till detta. Exempel på klassisk intensitetsbild och polarisationskänslig (DOLP, eng. *Degree of Linear Polarization*) bild i långvågsinfrarött av en CUBI som är placerad i vattenbrynet visas i Figur 3.5.

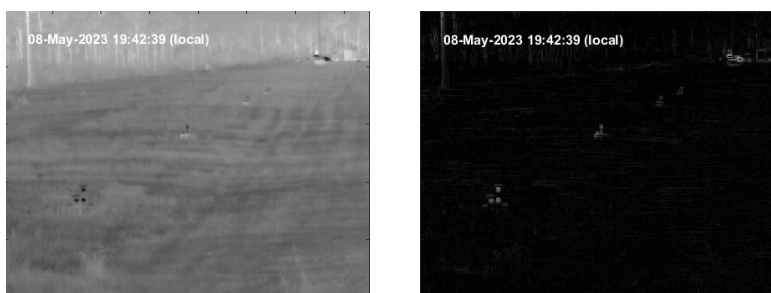


Figur 3.5: Exempel på intensitetsbild och DOLP-bild av en CUBI, placerad i vattenbrynet.

Under försöket studerades CUBIs på avstånd mellan 50 m och 700 m med den polarisationskänsliga kameran (50 mm objektiv). Givet pixelstorlek täckte CUBI:n längst bort 1 pixel i kameran, och kunde aldrig detekteras på grund av klotter. Resultat för två representativa tidpunkter visas i Figur 3.6 och Figur 3.7. Tidpunkterna är kl. 10:20 och kl. 19:42 lokal tid. Man ser tydliga skillnader i kontrast mellan en tidpunkt där solen belyser scenen och värmer upp objekten och efter solnedgång när objekten svalnar av. Ingen tydlig skillnad i kontrast kunde ses mellan intensitets- och DOLP-bild någon gång under försöket. Det skall dock noteras att DOLP-bilden av CUBI är dominerad av så kallade kanteffekter som uppkommer när polarisationsdata för angränsande regioner med olika DOLP möts. Det är svårt att på ett enkelt sätt beräkna ett kontrastmått i närvaro av dessa kanter. En tentativ slutsats är att för små objekt bidrar inte DOLP-kanalen till ökad räckvidd. Styrkan ligger i att kunna detektera större släta ytor där DOLP-skillnader mot en klottrig bakgrund blir tydlig. Natogruppens slutrapport om fältförsöket är under sammanställning.



Figur 3.6: CUBIs på olika avstånd från den polarisationskänsliga kameran kl. 10:20 lokal tid. Bild till vänster är intensitetsbild och bild till höger är DOLP.



Figur 3.7: CUBIs på olika avstånd från den polarisationskänsliga kameran kl. 19:42 lokal tid. Bild till vänster är intensitetsbild och bild till höger är DOLP.

3.2 Modellering

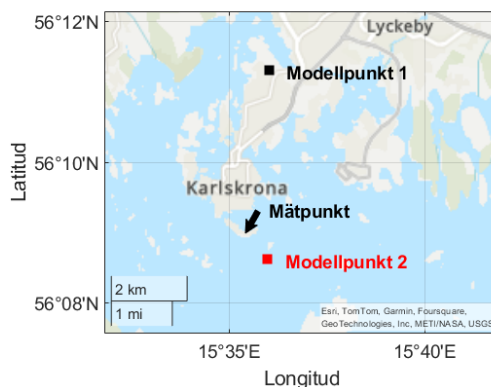
Optisk turbulens

Projektet undersökte optisk turbulens och möjligheten till att modellera det med data från numeriska väderprognoser. Litteraturstudier indikerade att en tänkbar väg för att modellera optisk turbulens nära mark/havsytan är att utgå från Monin-Obukhovs similaritetsteori. Projektet utvecklade en egen modell baserad på Monin-Obukhov och väderprognoser. Kortfattat går det att få värmeflöden och karakteristik på det turbulenta gränsskiktet från numeriska väderprognoser. Värmeflöden i atmosfären drivs av temperaturgradienter och flöden av luftfuktighet. Kopplas dessa värmeflöden ihop med en stokastisk beskrivning av brytningsindexvariationer kan den optiska turbulensen skattas. Modellen beskrivs i [8].

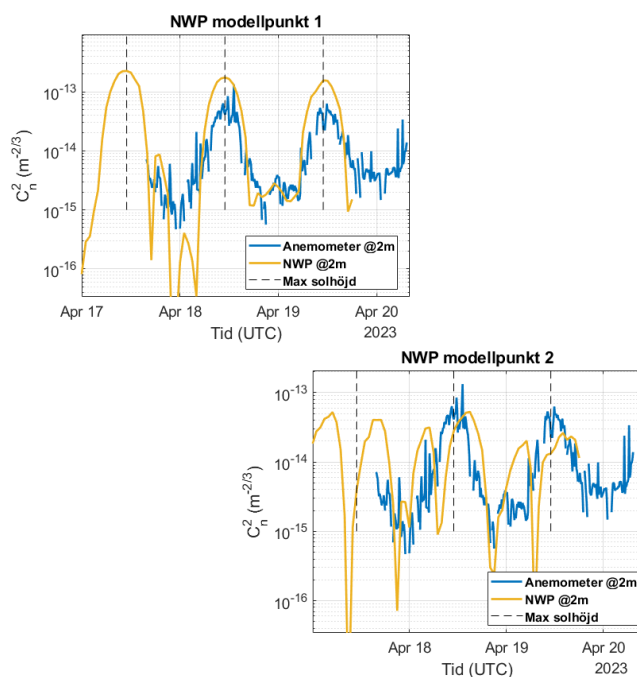
Initiala jämförelser mellan modell och mätdata indikerade att baserat på väderprognoser kunde både dygnsvariationer och variationer mellan land och kust predikteras i modellen. Mätdata insamlade på Lindholmen jämfördes mot prognosbaserade resultat från två gridpunkter. De använda gridpunkterna visas i Figur 3.8. Gridpunkten som i Figur 3.8 kallas Modellpunkt 1 är i prognosdata definierad som liggandes på land och gridpunkten som i Figur 3.8 kallas Modellpunkt 2 är i prognosdata definierad som liggandes över vatten. Mätdata samlades in med en anemometer som var monterad på en mast på Lindholmen vilken indikeras med "Mät punkt" i Figur 3.8. Dvs. anemometern var placerad ovanför fast mark. Jämförelsen mellan modell och mätdata visas i Figur 3.9. Uppmätt optisk turbulens avtar symmetriskt runt tidpunkten för maximal solhöjd. Detta innebär att turbulensen domineras av direkta bidrag från solstrålningen, och är vad som förväntas sommardag över fast mark. Samma symmetri återfinns i modellresultat för modellpunkt 1. Däremot överskattas i denna gridpunkt styrkan på turbulensen mitt på dagen relativt mätdata. På natten tenderar modellen att underskatta turbulensnivån relativt mätdata. I Modellpunkt 2 i Figur 3.8, som ligger över vatten, ger modellen att turbulensmaxima inträffar efter att solen nått sin högsta höjd. Orsaken är att turbulensen inte domineras av direkta bidrag från solinstrålningen, istället ger solinstrålningen en uppvärmning av ytvattnet som svarar för värmetransporten upp i atmosfären. Denna uppvärmning har en längre tidskonstant än den som fås vid fast mark. Turbulensmaxima underskattas i modellen jämfört med mätdata. Nattetid ger modellen lokala maximum som inte återfinns i mätdata.

Dagtid ligger mätdata mellan de värden som modellen predikterar för gridpunkten över land och gridpunkten över vatten. Nattetid genererar den gridpunkt som ligger över land bättre överensstämmelse med mätdata än den som ligger över vatten.

Baserat på väderprognoser kan en karta över turbulenskaraktistik skapas. Exempel visas i Figur 3.10. Här kan en tydlig skillnad ses mellan hav och land, där turbulensen



Figur 3.8: Två gridpunkter i väderprognosmodell där turbulensprognos jämfördes mot mätdata från Lindholmen.



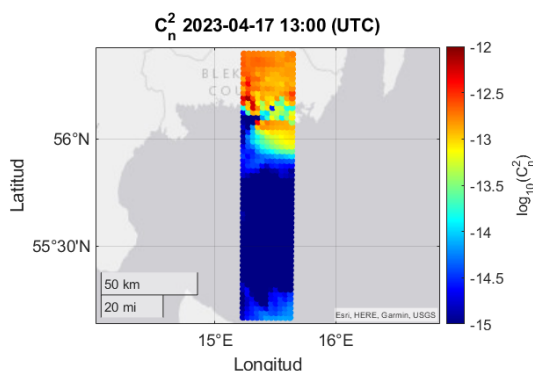
Figur 3.9: Jämförelse mellan mätning med anemometer och väderprognosbaserad modell.

mitt på dagen är kraftigare över land än över hav.

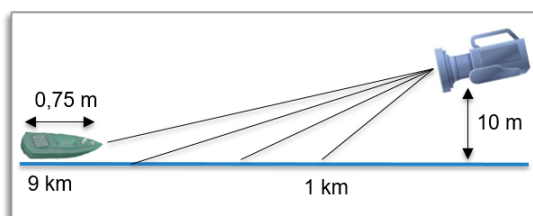
Transmissionsmodell

En räckviddsmodell baserad på NWP för en långvågsinfraröd kamera har utvecklats i samarbete med demonstrator-/transferprojektet *Koncept EO-TDA 23-25*. En schematisk beskrivning av geometrin för modellen visas i Figur 3.11. Modellen grundar sig i transmissionsberäkningsdata från den kommersiella programvaran MODTRAN6 [17] tillsammans med den FOI-utvecklade turbulensmodellen som diskuteras i avsnittet ovan om optisk turbulens.

Givet spektralt upplöst radians från ett tänkt mål och dess bakgrund, används följande parametrar från väderprognoser för att beräkna transmission genom atmosfären:



Figur 3.10: Exempel på turbulenskaraktistik 2 m ovan vattenytan den 17 april kl. 13 baserat på väderprognoser.



Figur 3.11: Geometri för räckviddsmodell för långvågsinfraröd kamera.

- Temperatur
- Tryck
- Luftfuktighet
- Molnhöjd
- Dimma
- Nederbörd.

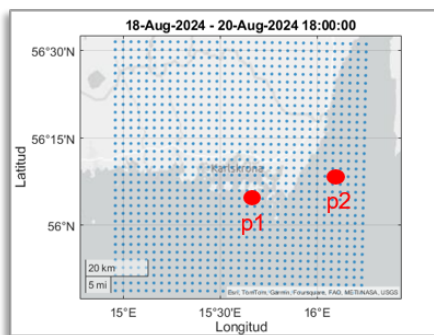
Då modellen är utvecklad med tanke på marin miljö används en marin aerosolmodell baserad på aktuell vindhastighet och vindhastighetens historik som indata. Om en landbaserad aerosolmodell skall användas får siktdata från väderprognoser användas för att styra aerosolkoncentrationen (trots de brister i aerosolmodellering hos nuvarande väderprognoser som noterats tidigare).

Givet storlek på mål, kamerakarakteristik, turbulensnivå och transmission beräknas en sannolikhet för upptäcktsavstånd med hjälp av TTP-metoden (eng. Targeting task performance) [18]. TTP utvecklades av amerikanska försvarsmakten på 00-talet och är en metod för att givet genererad bildkvalitet och komplexiteten i ett spaningsuppdrag ge en sannolikhet för möjligheten att genomföra det. En undersökning, baserad på väderprognoser, gjordes för området runt Karlskrona 18–20 augusti 2024. Följande parametrar ansattes för modellkörningen:

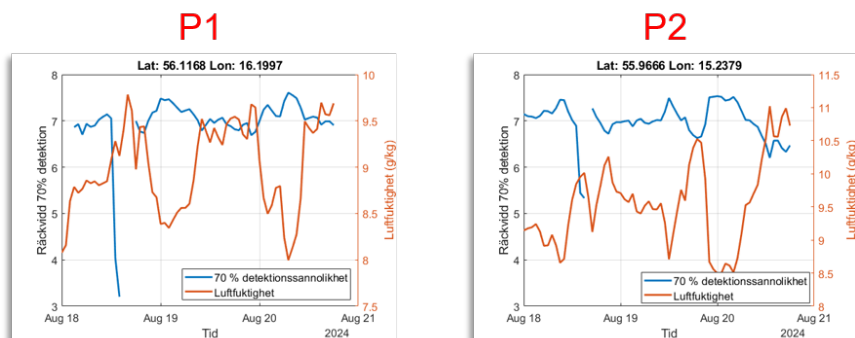
- Statisk radians från mål och bakgrund
- 0,75 m i karakteristisk storlek på mål
- 150 mm brännvidd på kameraobjektiv
- 17 μm pixelstorlek
- Känslighetsband för kamera är 8–12 μm .

Användandet av en statisk radians gör att de modellerade räckvidderna inte med nödvändighet är realistiska, men beräkningarna visar om effekter av atmosfären påverkar modellens räckviddsskattning. Två gridpunkter undersöktes extra noggrant, p1 och p2

i Figur 3.12. Då kameran är känslig i det långvågsinfraröda bandet bör man kunna förvänta sig en påverkan från variationer i luftfuktigheten. Tidsserier för räckvidd givet 70 % detektionssannolikhet och specifik luftfuktighet i p1 och p2 visas i Figur 3.13. Här ses ett inverterat samband mellan räckvidd och luftfuktighet. Det skall noteras att modellen i dagsläget inte har jämförts med mätdata, utan endast är att betrakta som ett första steg mot att prediktera räckvidder för kamerasystem baserade på väderprognoser.



Figur 3.12: Område runt Karlskrona som använts för att beräkna räckvidder för en långvågsinfraröd kamera.



Figur 3.13: Tidsserier för räckvidd givet 70 % detektionssannolikhet baserat på TTP-metoden och specifik luftfuktighet.

4 Slutsatser

Arbetet har lärt oss mycket om vågutbredning över framför allt Östersjön, både hur förhållandena varierar över året och möjligheter att med numeriska väderprognoser förutsäga hur vågutbredningen kommer att vara de närmaste dagarna.

De två frågeställningar formulerade för projektet kan ännu inte fullständigt besvaras, dvs:

1. För hur lång tid är prognoser av atmosfärens elektromagnetiska egenskaper (radar och EO) baserade på numeriska vädermodeller användbara?
2. Hur modellerar man vågutbredning för radar och EO-system för att nå bästa användbarhet i spelsimuleringar, i planering av uppdrag och i taktiska beslutsstöd?

För att adressera projektets första frågeställning har jämförelser gjorts mellan mätdata och modellresultat. För radarfrekvenser fanns data tillgängliga vilket gjorde att jämförelser med väderprognoser snabbt kunde komma igång vilket visade att numeriska väderprognoser kan förutsäga hur vågutbredningen, för radarsystem som arbetar vid 5,6 GHz (väderadar), kommer att vara under de närmaste dygnet. För att kunna bedöma kvaliteten av prognoser för elektrooptisk vågutbredning behövs också data, men ingen sådan fanns tillgänglig. Projektet har därför påbörjat egen datainsamling av optisk turbulens. De jämförelser som genomförts hittills för EO-system tyder på att prognoser kan vara användbara.

Projektets andra frågeställning berör modellering av vågutbredning. För att modellera utbredning av radarsignaler behövs—beroende på geografi, vegetationstäck, sjöstillstånd och elektromagnetisk frekvens—olika typer av numeriska algoritmer för att lösa PE-modeller. För komplexa miljöer som bäst beskrivs med stokastiska parametrar behövs metoder som är särskilt anpassade för stokastiska partiella differentialekvationer. Sådana problem är inte deterministiska i den mening att det räcker att göra enstaka beräkningar för att få ett svar som alltid är korrekt. I bästa fall kan en sådan modell ge ett väntevärde med konfidensintervall. Sådana svar kan vara mycket användbara för att bedöma upptäcksavstånd för givet mål och radar. Forskningsområdet är mycket aktivt och refereras ofta till som *Uncertainty Quantification*. Sådana modeller kommer att studeras i EDF-projektet FESPAN.

För enklare vågutbredningsfall, t.ex. över öppet isfritt hav med måttligt sjöstillstånd, är *Fourier split-step* lösare av PE-modeller lämpliga att använda. Den typen av lösare är relativt snabba och kan kombineras i hybridkoder [10] med andra metoder för att ytterligare snabba upp beräkningarna.

För att modellera utbredning av EO-signaler har projektet utvecklat en modell för att skatta marknära turbulens baserat på väderprognoser och påbörjat en utveckling av transmissionsmodeller för kamerasystem. Ambitionen är att fortsätta utveckla modellerna under nästa projektperiod.

5 Fortsatt arbete

För kommande treårsperiod (2025–2027) föreslås projektet innehålla tre delar: **radar**-vågutbredning, **EO/IR**-vågutbredning och **atmosfärens** egenskaper.

Frågeställningarna utökas till tre:

1. För hur lång tid är prognoser av atmosfärens elektromagnetiska egenskaper (radar och EO) baserade på numeriska vädermodeller användbara?
2. Hur modellerar man vågutbredning för radar och EO-system för att nå bästa användbarhet i spelsimuleringar, i planering av uppdrag och i taktiska beslutsstöd?
3. Hur varierar atmosfärens vågutbredningsförhållanden över tid (timmar, dygn, månader, årstider) i Sverige och i Östersjöområdet?

Radardelen av projektet görs till största del inom det internationella samarbetet *ICE-PPR Ducting* där FOI i huvudsak skall undersöka hur bra numeriska väderprognoser är för att förutsäga när anomal vågutbredning förekommer. I detta ingår att undersöka hur kvaliteten på prognoserna beror på väderförhållanden och årstider. Baserat på resultaten kommer FOI att vidareutveckla befintliga vågutbredningsmodeller.

EO/IR-delen av projektet inriktar sig på ytterligare studier av möjligheten att prognostisera optisk turbulens med hjälp av numeriska vädermodeller, men kommer även gå vidare med modellbyggande och jämförelser mot mätdata för transmission i atmosfären. Projektet kommer att fortsatt verka för att etablera ett samarbete med Luleå tekniska universitet för att karakterisera EO-spridning från fallande snö.

I **atmosfärsdelen** skall projektet bland annat undersöka om högupplösta numeriska väderprognoser från FM/METOCC kan ge bättre prognoser av anomal vågutbredning i atmosfären, samt undersöka effekter av vakar bakom havsbaserade vindkraftparker. Projektet skall också med hjälp av återanalysdata och klimatmodeller studera hur vågutbredningsförhållanden har varierat historiskt och hur de förväntas ändras i framtiden. Projektet planerar också att utveckla elektromagnetiska modeller för multipelspridning i atmosfären.

Referenser

- [1] N. Wellander and M. Rahm, "Vågutbredningsscenarier," Totalförsvarets forskningsinstitut, Linköping, FOI memo 8097, 2023.
- [2] N. Wellander, "Redovisning av milstolpe nr. 1 2022 för projekt Atmosfäreffekter och vågutbredning AF.9220422," Totalförsvarets forskningsinstitut, Linköping, FOI memo 7908, 2022.
- [3] N. Wellander, "Redovisning av milstolpe 1 2023 för projektet Atmosfäreffekter och vågutbredning, AT.9220423 Sensorer och signaturanpassning FOI 23, DNR FOI-2022-9," Totalförsvarets forskningsinstitut, Linköping, FOI memo 8184, 2023.
- [4] N. Wellander, "Redovisning av milstolpe 1 2024 för projekt Atmosfäreffekter och vågutbredning AF.9220424," Totalförsvarets forskningsinstitut, Linköping, FOI memo 8588, 2024.
- [5] L. Norin, "Observations of anomalous propagation over waters near Sweden," *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 16, no. 7, pp. 1789–1801, 2023. DOI: 10.5194/amt-16-1789-2023.
- [6] L. Norin, N. Wellander, and A. Devasthale, "Anomalous propagation and the sinking of the Russian warship Moskva," *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 104, no. 12, E2286–E2304, 2023. DOI: 10.1175/BAMS-D-23-0113.1.
- [7] M. Rahm, M. Henriksson, J. Berneland, D. Bergström, and M. Björkman, "Långtidsmätningar av EO-väderprestanda," Totalförsvarets forskningsinstitut, Linköping, FOI memo 8229, 2023.
- [8] M. Rahm, V. Håkansson, J. Berneland, and L. Allard, "Uppbyggnad av utrustning LOST (Långtidsmätning av Optisk Spridning och Turbulens) och initial jämförelse mellan mätningar i Karlskrona och beräkningar baserade på väderprognoser," Totalförsvarets forskningsinstitut, Linköping, Report FOI-D--1265--SE, 2024.
- [9] G. Kristensson, M. Gustavsson, and N. Wellander, "The coherent electromagnetic field and the effect of the pair distribution function," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 285, p. 108 178, 2022, ISSN: 0022-4073. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2022.108178.
- [10] M. Levy, *Parabolic equation methods for electromagnetic wave propagation*. IET, 2000.
- [11] B. Asp, G. Eriksson, and P. Holm, "Detvag-90 – final report," FOA, Linköping, Report FOA-R--97-00566-504--SE, 1997.
- [12] M. Enstedt and N. Wellander, "A spectral expansion-based Fourier split-step method for uncertainty quantification of the propagation factor in a stochastic environment," *Radio Science*, vol. 51, no. 11, pp. 1783–1791, 2016. DOI: 10.1002/2016RS006064.
- [13] M. Enstedt and N. Wellander, "Uncertainty quantification of propagation in evaporation ducting," in *2016 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS)*, 2016, pp. 794–796. DOI: 10.1109/URSI-EMTS.2016.7571522.

- [14] M. Rahm, P. Jonsson, and M. Henriksson, "Laser attenuation in falling snow correlated with measurements of snow particle size distribution," *Optical Engineering*, vol. 60, no. 9, 2021. DOI: 10.1117/1.OE.60.9.094102.
- [15] Norwegian Meteorological Institute, *NWPdocs*, <https://github.com/metno/NWPdocs>, 2024.
- [16] M. Rahm, F. Kullander, M. Björck, and L. Sjöqvist, "Turbulence and transmission effects on laser beam propagation in the SWIR and LWIR bands," in *Environmental Effects on Light Propagation and Adaptive Systems VI*, K. Stein and S. Gladysz, Eds., International Society for Optics and Photonics, vol. 12731, SPIE, 2023, 127310G. DOI: 10.1117/12.2678535.
- [17] A. Berk, P. Conforti, R. Kennett, T. Perkins, F. Hawes, and J. van den Bosch, "MODTRAN6: a major upgrade of the MODTRAN radiative transfer code," in *Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XX*, M. Velez-Reyes and F. A. Kruse, Eds., International Society for Optics and Photonics, vol. 9088, SPIE, 2014, 90880H. DOI: 10.1117/12.2050433.
- [18] R. H. Vollmerhausen and E. L. Jacobs, "The targeting task performance (TTP) metric a new model for predicting target acquisition performance," Modeling, Simulation Division, Night Vision, and Electronic Sensors Directorate, U.S. Army CERDEC, Fort Belvoir, VA, Technical Report AMSEL-NV-TR-230, 2004.

