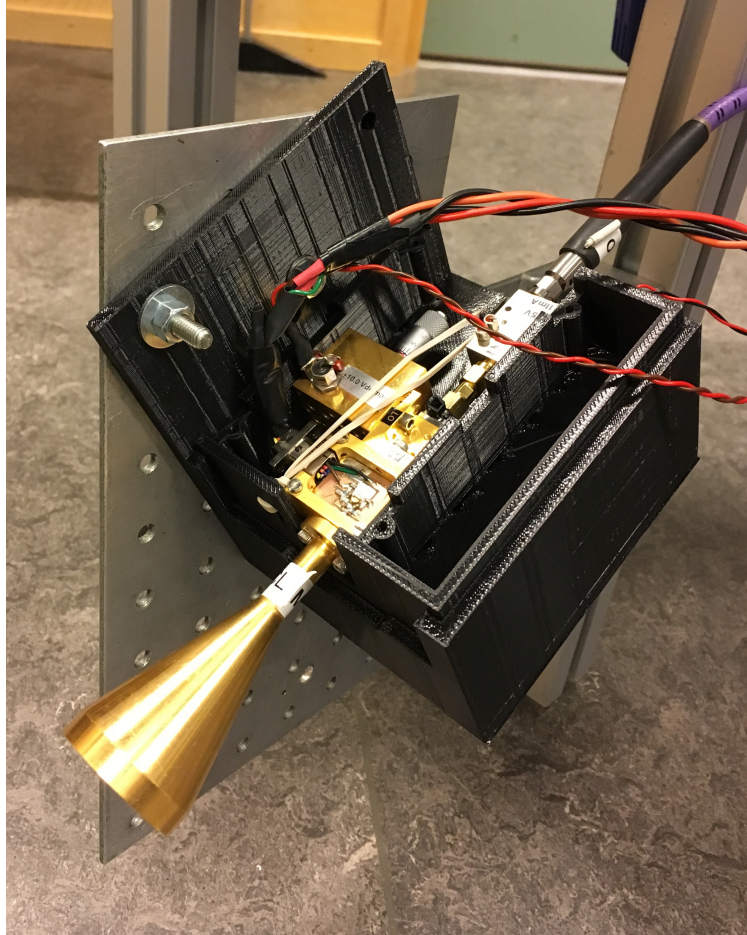




CHALMERS



Radiometrisk fjärrmätning av isbildning på vägytor

Kandidatarbete vid Chalmers tekniska högskola

MARTIN AXELSSON
GUSTAV FORSBERG
ARON LAURELL HÅKANSSON
EDVIN LIDHOLM
SIMON SMEDBERG
JOAKIM SÄLLBERG

Radiometrisk fjärrmätning av isbildning på vägytor

MARTIN AXELSSON
GUSTAV FORSBERG
ARON LAURELL HÅKANSSON
EDVIN LIDHOLM
SIMON SMEDBERG
JOAKIM SÄLLBERG



CHALMERS

Institutionen för mikroteknologi och nanovetenskap
Avdelningen för mikrovågselektronik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2017

Radiometrisk fjärrmätning av isbildning på vägytor

MARTIN AXELSSON

GUSTAV FORSBERG

ARON LAURELL HÅKANSSON

EDVIN LIDHOLM

SIMON SMEDBERG

JOAKIM SÄLLBERG

© MARTIN AXELSSON, GUSTAV FORSBERG, ARON LAURELL HÅKANSSON,
EDVIN LIDHOLM, SIMON SMEDBERG, JOAKIM SÄLLBERG, 2017.

Handledare: Vessen Vassilev, Institutionen för mikroteknologi och nanovetenskap

Peter Forkman, Institutionen för rymd- och geovetenskap

Examinator: Vessen Vassilev, Institutionen för mikroteknologi och nanovetenskap

Kandidatarbetsrapport 2017:MCCX02-17-02

Institutionen för mikroteknologi och nanovetenskap

Avdelningen för mikrovågselektronik

Chalmers tekniska högskola

SE-412 96 Göteborg

Telefon +46 31 772 1000

Omslag: Radiometerns front-end placerad i den mekaniska designen.

Typsatt i L^AT_EX

Göteborg, Sverige 2017

Radiometric Remote Sensing of Ice Formation on Road Surfaces

MARTIN AXELSSON

GUSTAV FORSBERG

ARON LAURELL HÅKANSSON

EDVIN LIDHOLM

SIMON SMEDBERG

JOAKIM SÄLLBERG

Department of Microtechnology and Nanoscience

Chalmers University of Technology

Abstract

This report investigates the ability to determine road conditions with radiometric remote sensors, in order to detect ice or water at a distance. The project consists of the development of a theoretical model, with associated assumptions and delimitations, numerical simulations in COMSOL Multiphysics as well as experimental measurements to verify or dementiate the theoretical model. The concept of detection uses the surface dielectric constant's dependance of material, which means that radiation from the atmosphere will be polarized differently upon reflection. Experiments were made using artificial road surfaces similar to real road conditions. In order to carry out the experimental measurements, a radiometer was constructed.

The conclusion is that the concept has the potential to differentiate between the road surfaces asphalt, water and a thick and smooth layer of ice. Some exact thresholds for polarization difference require further measurements. For layer structures that have a rough uppermost layer the theoretical model of the project has great difficulty to predict the polarization difference, but potentially further development can help model these cases better.

Keywords: radiometry, microwaves, vehicle, ice, black ice, road, dielectric constant, ice detection.

Radiometrisk fjärrmätning av isbildning på vägytor

MARTIN AXELSSON

GUSTAV FORSBERG

ARON LAURELL HÅKANSSON

EDVIN LIDHOLM

SIMON SMEDBERG

JOAKIM SÅLLBERG

Institutionen för mikrovågteknik och nanovetenskap

Chalmers tekniska högskola

Sammandrag

Denna rapport utreder möjligheterna att avgöra vägunderlag med radiometrisk fjärrmätningar, för att på avstånd kunna detektera is eller vatten. Projektet består av framtagande av en teoretisk modell, med tillhörande antaganden och avgränsningar, numeriska simuleringar i COMSOL Multphysics samt experimentella mätningar för att verifiera eller dementera den teoretiska modellen. Konceptet om detektion nyttjar att markens dielektriska konstant beror på material, vilket medför att strålning från atmosfären kommer att polariseras olika vid reflektion. Experiment gjordes med hjälp av konstgjorda vägunderlag som liknar riktiga vägförhållanden. För att kunna genomföra de experimentella mätningarna konstruerades en radiometer.

Slutsatsen är att konceptet har potential att skilja på vägunderlagen asfalt, vatten respektive ett tjockt och slätt lager is. Några exakta tröskelvärden för polarisationsskillnad kräver vidare mätningar. För lagerstrukturer som har grovt toppskick har projektets teoretiska modell svårare att förutspå polarisationsskillnad, men potentiellt kan en vidareutveckling modellera dessa fall bättre.

Nyckelord: radiometri, mikrovågor, fordon, is, blixthalka, väg, dielektrisk konstant, is-detektion.

Förord

Vi skulle vilja tacka våra handledare Vessen Vassilev och Peter Forkman för kunskap, värdefulla tips och den vägledning vi har fått under projektet. Er hjälp har varit till mycket stor hjälp och utan er hade projektet inte blivit av.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Projektets syfte och avgränsningar	1
1.2	Radiometri	1
2	Teori	2
2.1	Växelverkan mellan elektromagnetisk strålning och material	2
2.1.1	Permittivitet och dielektrisk konstant	2
2.1.2	Reflektion och refraktion	3
2.1.3	Emission	3
2.1.4	Propagationskonstant	4
2.2	Apparent temperature	4
2.3	Trelagerstruktur	4
2.4	Ytgrovhet	5
2.5	Atmosfärisk opacitet och sky temperature	6
2.6	Teoretisk modell	7
2.7	Numeriska simuleringar	8
3	Implementering av radiometer	9
3.1	Front-end	9
3.1.1	Antenn	9
3.1.2	LNA	9
3.1.3	Mixer	10
3.1.4	IF-förstärkare	11
3.2	Back-end	11
3.2.1	Bandpassfilter	11
3.2.2	Effektdetektor	12
3.2.2.1	Val av effektdetektor	12
3.2.2.2	LT5534	12
3.2.2.3	Kretsdesign	12
3.2.2.4	Effektdetektorns modell	13
3.2.3	Programmering	13
3.3	Mekanisk design	14
4	Mätningar	14
4.1	Provberedning	14
4.2	Mätprocedur	14
4.2.1	Kalibrering	15
4.2.2	Länkbudget	16
5	Resultat	16

6	Diskussion	18
6.1	Felkällor vid mätningar	19
6.2	Framtida utveckling av konceptet	20
7	Slutsatser	20
	Referenser	21
A	Appendix	i
A.1	Modell för dielektrisk konstant för is och vatten	i
A.2	Brewstervinkel	ii
A.3	Modell i COMSOL Multiphysics	ii
A.4	Fördjupning i antenn, spotsize, riktning	iii
	A.4.1 Spotize	iii
A.5	Effektdetektor	iv
A.6	Mätdata	v

1 Inledning

Halka är ett stort problem i den svenska trafiken. Enligt myndigheten Trafikanalys skedde 2 252 trafikolyckor med svår personskada eller dödlig utgång i Sverige under 2015. 239 av olyckorna inträffade när vägytan var täckt av snö och/eller is och 47 % av dessa var direkt orsakade av blixthalka, även kallad svart is [1].

Blixthalka uppstår vid underkyllt regn eller tät dimma, ibland redan vid lufttemperaturer på $3 - 4^{\circ}\text{C}$. I fallet med tät dimma genomgår vattnet en *sublimering*, d.v.s. en fasövergång från vattenångor direkt till is, där molekylerna binds samman till en tunn hinna över asfalten innan de fryser till is. Det tunna, helt genomskinliga islagret följer asfaltens grova ytstruktur likt en tunn vattenyta. Många förare misstar därför vägunderlaget för att vara fuktigt vid blixthalka.

Många moderna fordon har varningssystem för halka som endast bygger på temperatur. Genom att varna när temperaturen når under $3 - 4^{\circ}\text{C}$ uppmanas föraren att iakttaga försiktighet. Detta varningssystem kontrollerar alltså inte att det finns faktiska isfläckar på vägytan utan endast att det finns en risk för isbildning.

Mer avancerade halkvarningssystem använder även fordonets antispinnssystem för att, genom beräkning av friktionen mellan däck och vägbanan, identifiera is [2]. Problemet med detta detektionssystem är att fordonet måste tappa greppet för att upptäcka halka och då kan det vara för sent att undvika olyckan. Ett system som upptäcker is innan bilen fått sladd är att föredra. En potentiell lösning är radiometri, det vill säga att passivt mäta elektromagnetisk strålning för att avgöra vägunderlaget.

1.1 Projektets syfte och avgränsningar

Projektets syfte är att utreda om mikrovågsradiometrar monterade på vägfordon kan användas för att avgöra vägbanans beskaffenhet framför fordonet. Vägbanans beskaffenhet kategoriseras i istäckt, blöt respektive torr vägbanan.

Projektet som redovisas i denna rapport är en del av ett större utvecklingsarbete vars syfte är att ta fram en färdig produkt som kan monteras på fordon. Den del av utvecklingsarbetet som behandlas i detta projekt syftar till att testa om den tilltänkta konceptet fungerar.

1.2 Radiometri

Radiometri är ett samlingsbegrepp för passiv mätning av elektromagnetisk strålning. Begreppet är brett, men detta projekt har inriktats på hur strålningsintensitet från marken framför ett fordon varierar beroende på underlaget samt hur detta kan mätas.

I projektet utnyttjar en mikrovågsradiometer att skillnaden i strålningsintensitet som reflekteras i horisontell och vertikal polarisation varierar mellan olika material. Genom att mäta mikrovågsstrålning i både horisontell och vertikal polarisation kan potentiellt vägunderlagets karaktär framför fordonet avgöras, oavsett väder och tid på dygnet.

Aktiva mätmetoder som exempelvis RADAR utnyttjar objektets bakåtspridning för att avgöra objektets egenskaper, i radarns fall position. Bakåtspridningen från blank is- eller vattenyta är nästintill obefintlig redan vid små infallsvinklar vilket omöjliggör detektion framför fordonet.

Radiometri är en passiv mätmetod vilket innebär att ingen strålning sänds ut från mätutrustningen. Nackdelen med att mäta passivt är att förhållandet mellan signal och brus i allmänhet är lägre än för aktiva mätmetoder. Fördelen med att använda passiv jämfört med aktiv teknik i detta projekt är att en passiv teknik har en möjlighet att mäta framför fordonet.

Att valet för våglängd föll på mikrovågor beror bland annat på att atmosfären släpper igenom mikrovågor relativt bra, något som utvecklas vidare i 2.5. Även för synligt ljus är atmosfären genomtränglig men till skillnad från mikrovågor kan intensiteten hos synligt ljus bli låg vid molnigt väder och nästintill obefintlig på natten. Majoriteten av det synliga ljuset som når jorden kommer från solen. Mikrovågor har dessutom högre inträngningsdjup än synligt ljus och skulle således potentiellt kunna detektera is även när isen är täckt med snö. Viktiga faktorer vid frekvensvalet var också att komponenterna för mikrovågsradiometri är relativt billiga samt att en mikrovågsantenn har hög direktivitet redan vid relativt små diametrar.

2 Teori

Grunden för projektet är att elektromagnetisk strålning växelverkar olika med olika material beroende på materialens egenskaper. Detta ger upphov till fenomen som reflektion, refraktion, absorption och emission, inuti och i gränsskikten mellan material. Fenomenen beskrivs närmare för att härleda en modell för hur strålningsintensiteten som tas emot av radiometern beror på bland annat markens material, lagerstruktur, ytgrovhet samt avstånd och vinkel mellan radiometern och marken.

2.1 Växelverkan mellan elektromagnetisk strålning och material

Ett materials växelverkan med elektromagnetisk strålning bestäms främst av tre egenskaper; elektrisk *permittivitet* (ε), magnetisk *permeabilitet* (μ) och elektrisk *konduktivitet* (σ) [3]. De material som förekommer på vägytor är i regel inte paramagnetiska, varav permeabiliteten kan uppskattas vara samma som för vakuum, $\mu = \mu_0$. För de mesta har materialen även låg konduktivitet. Således räcker det ofta att studera materialens permittivitet för att kunna beskriva växelverkan. Permittiviteten är materialberoende och kan variera med till exempel frekvens och temperatur.

2.1.1 Permittivitet och dielektrisk konstant

Permittivitet för ett isotropt material brukar faktoriseras enligt $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ där ε_0 är vakuumpermittiviteten och ε_r och relativ permittivitet, ofta benämnd *dielektrisk konstant* även om den egentligen varierar [3, s. 53–54]. Relativ permittivitet är ett komplext tal och delas ofta in i real- och imaginärdel enligt $\varepsilon_r = \varepsilon' - i\varepsilon''$. En djupare beskrivning och modell för hur ε_r beror på olika parametrar för vatten och is finns i appendix A.1. Asfalt antas ha en reativ permittivitet på $\varepsilon_{\text{Asfalt}} = 4,250 - i \cdot 0,250$ [4] och luft antas ha en relativ permittivitet på $\varepsilon_{\text{Luft}} = 1.00054$ [5].

2.1.2 Reflektion och refraction

När strålning infaller mot ett plant gränsskikt mellan atmosfär och mark kommer en del av den infallande strålningen att refrakteras och en del reflekteras. Eftersom de flesta molekylerna i atmosfären befinner sig på ett mycket långt avstånd från marken kommer emitterad strålning kunna betraktas som plana vågor. Den mot marken infallande strålningen kommer också kunna betraktas som opolariserad.

För refraction mellan två material med dielektriska konstanter ε_1 respektive ε_2 gäller enligt Snells lag att

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}} \quad (1)$$

där θ_1 och θ_2 är infallande respektive transmitterade strålningens vinkel mot normalen [6, s.61]. I de fall där minst en av $\varepsilon_{1,2}$ är komplex skrivs ekvation (1) om till

$$\theta_2 = \text{Re} \left\{ \arcsin \left(\sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \sin \theta_1 \right) \right\}. \quad (2)$$

Fältreflektionskoefficienten för en sådan gränssyta för horisontell respektive vertikal kan skrivas

$$\rho_{12}^h = \frac{\eta_2 \cos \theta_1 - \eta_1 \cos \theta_2}{\eta_2 \cos \theta_1 + \eta_1 \cos \theta_2} \quad (3)$$

$$\rho_{12}^v = \frac{\eta_2 \cos \theta_2 - \eta_1 \cos \theta_1}{\eta_2 \cos \theta_2 + \eta_1 \cos \theta_1} \quad (4)$$

där η_1 och η_2 är de luftens respektive markens intrinsiska impedans [7]. Dessa ges av

$$\eta_{1,2} = \frac{\eta_0}{\sqrt{\varepsilon'_{1,2}}} \left(1 - i \frac{\varepsilon''_{1,2}}{\varepsilon'_{1,2}} \right). \quad (5)$$

Från ekvation 3 och 4 fås effektreflektionskoefficienten för samma gränssyta till

$$\Gamma_{12}^{h/v} = \left| \rho_{12}^{h/v} \right|^2 \quad (6)$$

där h/v motsvarar horisontell alternativt vertikal polarisation hos den infallande strålningen.

För normalt infall ($\theta_1 = 0$) i ekvationerna (3) och (4) fås $\rho_{12}^v = \rho_{12}^h$. För samtliga andra vinklar $0^\circ < \theta_1 < 90^\circ$ kommer istället $\rho_{12}^v < \rho_{12}^h$. För vissa kombinationer av material finns en specifik vinkel θ_1 som medför att $\rho_{12}^v = 0$, det vill säga att endast horisontalpolariserad strålning reflekteras. Denna vinkel kallas Brewstervinkeln och beskrivs närmare i appendix A.2. För en skrovlig yta kommer infallsvinkeln att variera, varför ingen tydlig Brewstereffekt uppstår.

2.1.3 Emission

En svartkropp absorberar all infallande strålning och reflekterar ingen. Motsatsen till svartkropp är vitkropp, vilken reflekterar all infallande strålning och absorberar ingen.

Beroende på material och temperatur kommer absorberad energi att emitteras som strålning. Ett materials absorptionsförmåga hänger ihop med dess förmåga att emittera, och vid termisk jämvikt är emitterad och absorberad intensitet lika.

Emissionsförmåga beskrivs med emissivitet, e , vilken definieras som kvoten av strålningen ett material emitterar och emissionen från en svartkropp av samma fysiska temperatur. Emissiviteten är således ett tal i intervallet $0 \leq e \leq 1$. Om materialet är i termisk jämvikt gäller dessutom $\Gamma + e = 1$, där Γ är effektreflekskonstanten [3, s.60].

2.1.4 Propagationskonstant

Propagationskonstanten γ är materialspecifik och påverkar materialets transmission och absorption. Vidare gäller $\gamma^2 = -\omega^2 \mu \varepsilon$, där ω är strålningens vinkelfrekvens. Propagationskonstanten brukar för enkelhetens skull uttryckas enligt

$$\gamma = \alpha + i\beta \quad (7)$$

där $\alpha = -\omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} \operatorname{Im}\{\varepsilon_r\}$ är dämpningskonstanten och $\beta = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} \operatorname{Re}\{\varepsilon_r\}$ är faskonstanten för mediet som propagationen sker i och i är den imaginära enheten.

2.2 Apparent temperature

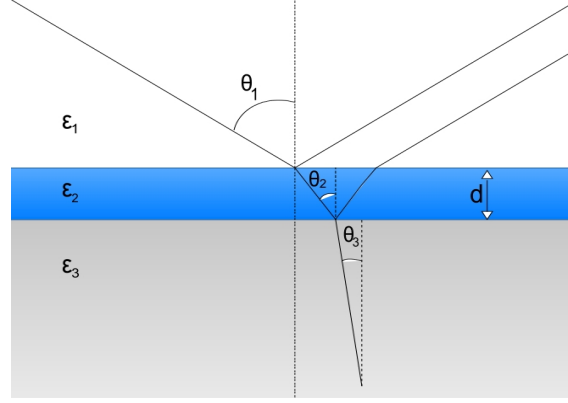
Ett centralt begrepp för detta projekt är *apparent temperature* (skenbar temperatur), vilken betecknas T_{Ap} .

Apparent temperature är ett mått på hur varmt något förefaller att vara vid mätning utifrån intensiteten det strålar. All strålning (emitterad, reflekterad och transmitterad) inkluderas. Apparent temperature är alltså den fysiska temperatur som en svartkropp skulle behöva ha för att emittera samma intensitet.

För en svartkropp är T_{Ap} samma som materialets fysiska temperatur. För andra material utgörs den totala intensiteten av strålning som reflekterats vid ytan, strålning som emitterats på ytan, samt strålning som emitterats inuti eller bakom materialet och transmittas genom det. T_{Ap} är beroende på av frekvensen och kan mätas vid en specifik frekvens eller i ett frekvensband.

2.3 Trelagerstruktur

Reflektiviteten för ett system med fler än två lager påverkas av de reflektioner och den dämpning som sker i de mellanliggande materialen.



Figur 1: Brytningsvinklar vid övergång mellan olika lager i ett trelagerssystem.

När tre helt släta lager staplas på varandra ges fältreflektionskoefficienten enligt Ulaby [7] av

$$\rho^{h/v}(\theta_1) = \frac{\rho_{12}^{h/v} + \rho_{23}^{h/v} \exp(-2\gamma_2 d \cos \theta_2)}{1 + \rho_{12}^{h/v} \rho_{23}^{h/v} \exp(-2\gamma_2 d \cos \theta_2)} \quad (8)$$

där h/v är horisontell respektive vertikal polarisation hos strålningen och $\rho_{12,23}^{h/v}$ är fältreflektiviteterna för övergångarna mellan de olika individuella materialen från ekvation (3) och (4). Det mellersta lagrets tjocklek betecknas d och γ_2 är propagationskonstanten för den strålning som transmitteras igenom första gränsen och uttrycks enligt ekvation

$$\gamma_2 = i \frac{2\pi}{\lambda} \varepsilon_2. \quad (9)$$

Effektreflektiviteten, Γ , ges av

$$\Gamma^{h/v}(\theta_1) = \left| \rho^{h/v}(\theta_1) \right|^2 = \left| \frac{\rho_{12}^{h/v} + \rho_{23}^{h/v} \exp(-2\gamma_2 d \cos \theta_2)}{1 + \rho_{12}^{h/v} \rho_{23}^{h/v} \exp(-2\gamma_2 d \cos \theta_2)} \right|^2. \quad (10)$$

Under approximationen att $\Gamma + e = 1$ skrivs trelagerstrukturens totala emission som

$$e^{h/v}(\theta_1) = 1 - \Gamma^{h/v}(\theta_1) = 1 - \left| \frac{\rho_{12}^{h/v} + \rho_{23}^{h/v} \exp(-2\gamma_2 d \cos \theta_2)}{1 + \rho_{12}^{h/v} \rho_{23}^{h/v} \exp(-2\gamma_2 d \cos \theta_2)} \right|^2. \quad (11)$$

2.4 Ytgrovhet

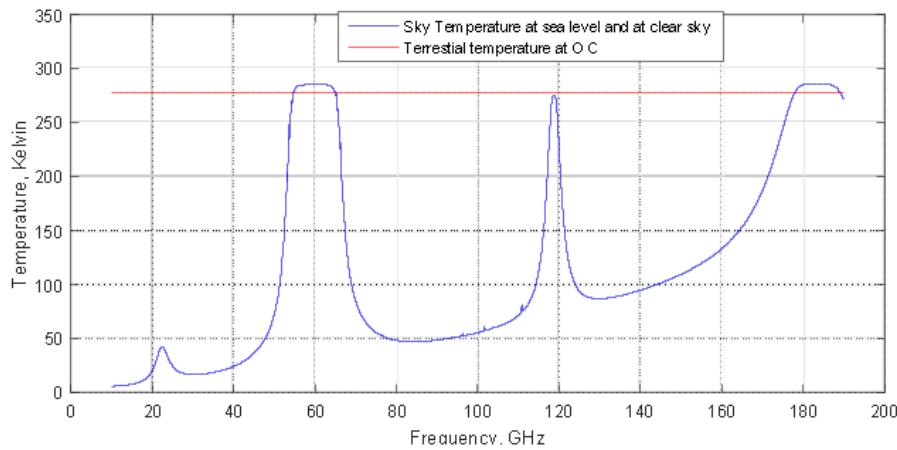
En yta är i verkligheten aldrig helt slät, i synnerhet inte vägytor där små stenar i asfalten skapar en väldigt oregelbunden yta. Denna grovhet definieras vanligen genom ett så kallat rms-värde, σ , på avvikelser från någon genomsnittlig höjd. Effekten av grovheten i ytskiktet mellan två lager representeras med en skalfaktor som multipliceras med effektreflektionskoefficienten enligt [8, s.830]

$$\Gamma_{\text{Grov}} = \exp \left(-4 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \cdot \sigma^2 \cdot \cos^2(\theta_1) \right) \cdot \Gamma_{\text{slät}}. \quad (12)$$

2.5 Atmosfärisk opacitet och sky temperature

Luften i atmosfären består av en blandning av olika atomer och molekyler, där alla har en egen absorptionskarakteristik. För atmosfären som helhet blir dämpningen en kombination av alla atomslags absorptionsspektrum, så kallad *atmosfärisk opacitet*. Hur stor atmosfärens dämpning är varierar således med luftsammansättningen, och kan även bero på andra faktorer som exempelvis temperatur och lufttryck. *Sky temperature* är den apparent temperature som mäts med en radiometer riktad mot himlen. Sky temperature beror bland annat på atmosfärisk dämpning.

Att sky temperature är lägre än markens temperatur är kritiskt eftersom utan en temperaturskillnad mellan sky temperature och marken skulle radiometern mäta upp samma temperatur oavsett material och reflektivitet. Radiometern måste därför arbeta i ett frekvensband där atmosfären har låg opacitet, vilket ger en låg sky temperature. I figur 2 visas sky temperature som funktion av frekvensen. För frekvenser mellan cirka 70 GHz och 110 GHz har atmosfären relativt låg opacitet [6, s. 16].



Figur 2: Sky temperature vid klart väder som funktion av frekvens. Bild: P. Forkman och V. Vassilev, personlig kommunikation, 17/1-2017.

Atmosfärens opacitet kan approximeras med en elektrisk *dämpare* (eng. attenuator). Atmosfären kommer dämpa bakgrundsstrålningen från rymden till viss grad, och till viss grad emittera strålning själv. Den strålningen som uppmäts vid marken, T_{sky} , beror på de ingående strålningbidragen. Ingående strålningsbidrag utgörs av den kosmiska bakgrundsstrålningen, T_{B} , samt brustemperaturen för atmosfären, T_{SN} . T_{SN} ges av

$$T_{\text{SN}} = T_{\text{S}} \cdot \frac{1 - G}{G} \quad (13)$$

där G är atmosfärens dämpningsfaktor, $0 < G < 1$, vilken beror på atmosfärens fysiska temperatur, T_{S} .

T_{sky} ges av

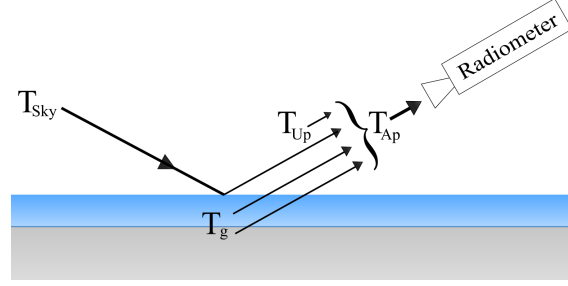
$$T_{\text{sky}} = G \cdot T_{\text{B}} + G \cdot T_{\text{SN}}. \quad (14)$$

För våglängder med hög grad av absorption kommer apparent temperature vara nära atmosfärens fysiska temperatur, vilket vid marknivå är strax under 300 K. För vågläng-

der med låg grad av absorption kommer apparent temperature vara nära den kosmiska bakgrundsstrålningen.

2.6 Teoretisk modell

För att beskriva temperaturen som mäts upp används följande beteckningar; T_{Up} för atmosfärisk uppåtemission, T_{Sky} för sky temperature, T_g för markens fysiska temperatur samt T_{Ap} för apparent temperature (se avsnitt 2.2). Bidragen till T_{Ap} illustreras i figur 3.



Figur 3: Schematisk bild över bidragen till T_{Ap} .

T_{Up} är strålning som emitteras från luften som finns mellan marken och antennen. T_{Sky} innefattar all strålning som når antennen när den riktas mot himlen, vilket innebär kosmisk bakgrundstrålning och emission från atmosfären, med hänsyn tagen till dämpningen från atmosfären (se avsnitt 2.5). Om himlen skymms av byggnader, vegetation etcetera, måste även strålning från dessa beaktas.

Apparent temperature som uppmäts av en radiometer riktad mot en en slät, horisontell yta, beskrivs av Ulaby et al. [9, s. 219-230] enligt

$$T_{Ap}^{h/v}(\theta_1; H) = \frac{1}{L_a(\theta_1; H)} \left\{ \left[1 - \Gamma_1^{h/v}(\theta_1) \right] T_g + \Gamma_1^{h/v}(\theta_1) T_{Sky}(\theta_1) \right\} + T_{Up} \quad (15)$$

där $L_a(\theta_1; H) = \frac{1}{G}$ är dämpningsfaktor för luften mellan marken och radiometern, och H är antennens höjd över marken.

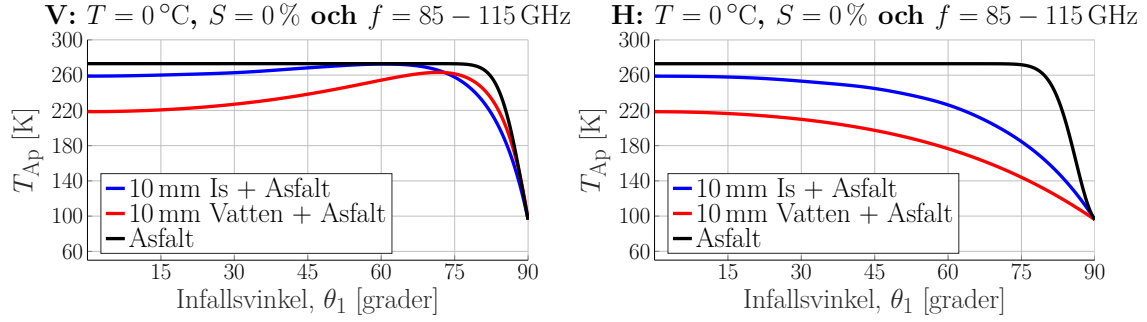
För dämpningsfaktorn antas $L_a = 1$ eftersom H är litet. Vidare antas att $1 - \Gamma = e(\theta_1; p)$, ty hög dämpning och antagande om termisk jämvikt. T_{Up} försummas ty både emissionsdelen, $\left[1 - \Gamma_1^{h/v}(\theta_1) \right] T_g$, och reflektionsdelen, $\Gamma_1^{h/v}(\theta_1) T_{Sky}$, i ekvation (15) är betydligt större än T_{Up} . Med dessa antaganden kan ekvation (15) förenklas till

$$T_{Ap}^{h/v}(\theta_1) = e T_g + \Gamma^{h/v}(\theta_1) T_{Sky}(\theta_1). \quad (16)$$

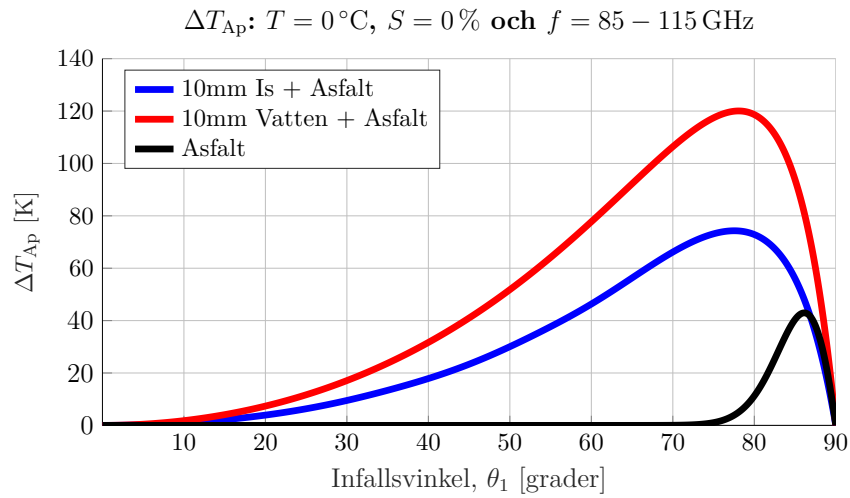
Med insättning av ekvationerna (10), (11) och (12) i ekvation (16) ges T_{Ap} av

$$T_{Ap}(\theta_1; p) = e_{Gro}^{h/v}(\theta_1) T_g + \Gamma_{Gro}^{h/v}(\theta_1) T_{Sky}(\theta_1). \quad (17)$$

Denna modell visualiseras i figur 4 och figur 5 för olika lagerstrukturer.



Figur 4: Apparent temperature för vertikal- respektive horisontalpolariserad strålning med $\sigma = 2$ mm för asfalten och $\sigma = 1$ mm för det övre ytskiktet.



Figur 5: Temperaturskillnad mellan vertikal- & horisontell polarisation som visas i figur 4, med $\sigma = 2$ mm för asfalten och $\sigma = 1$ mm för det övre ytskiktet.

Det är med hjälp av ΔT_{Ap} som visas i figur 5 som konceptet i denna rapport förväntas kunna urskilja is från vatten och asfalt.

2.7 Numeriska simuleringar

För att validera den teoretiska modellen gjordes numeriska simuleringar i COMSOL Multiphysics. I COMSOL Multiphysics skapades en 2D modell som fokuserade på att beräkna reflektiviteten hos system på en mängd olika lagerkombinationer. De numeriska beräkningarna visade sig stabilast för $45^\circ < \theta < 65^\circ$ och begränsades därför till värden inom detta intervall för majoriteten av simuleringarna.

COMSOL Multiphysics använder sig av finita elementmetoden (FEM) som är en numerisk metod för att approximera lösningar till partiella differentialekvationer genom att dela upp en kontinuerlig domän till många underdomäner. Detta gör det möjligt att approximera den totala lösningen genom att summera lösningen för en ändlig mängd underdomäner. Mer om COMSOL Multiphysics-modellen finns i appendix A.3.

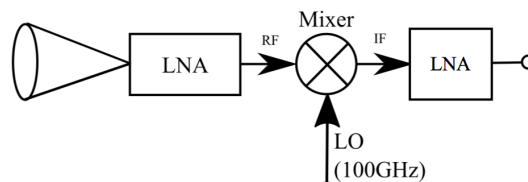
3 Implementering av radiometer

Den radiometer som användes för att mäta den reflekterade strålningen kan delas upp i två delar, front-end och back-end. Front-end består av de komponenter som tar in, förstärker och nedkonverterar mikrovågorna till en signal av mer lätthanterlig frekvens, medan back-end ses som de komponenter som mäter och behandlar den nedkonverterade signalen.

I detta kandidatarbete ingick att konstruera en egen back-end. Detta kandidatarbete är en del i ett större projekt som har som mål att utarbeta en kommersiell produkt. Eftersom det är möjligt att använda stora, dyra effektmätare med bättre prestanda för att verifiera teorin, är projektets egenkonstruerade back-end framförallt avsedd för framtida användning. Utvecklingen har bedrivits parallellt med det teoretiska arbetet, men ses inte som kandidatarbetets huvudfokus.

3.1 Front-end

Vid projektets början erhöles en redan färdig front-end av projektetshandledare. Systemet består av en hornantenn kopplad i serie med en LNA (Low Noise Amplifier), en mixer och därefter ytterligare en LNA som IF-förstärkare (Intermediate Frequency). Efter IF-förstärkaren kopplas front-end till back-end. I figur 6 visas en schematisk skiss över front-end.



Figur 6: Front-end för radiometern bestående av antenn, Low Noise Amplifier, mixer, lokaloscillator samt IF-förstärkare.

3.1.1 Antenn

Antennen i radiometern är en cirkulär korrugerad hornantenn med öppningsdiameter 32 mm, som tar emot mikrovågor i intervallet 90 – 130 GHz. Korrugerade hornantennar har stor bandbredd och små sidlobor, vilket passar bra för att upptäcka små isbildningar på vägytor [10]. Antennens egenskaper är viktiga för beräkning av storleken på mätytan, spotsize. Spotsize förklaras djupare i appendix A.4. Antennens vågledare är konstruerad för att endast transmittera en polarisation och antennen kommer därför behöva roteras manuellt mellan de olika polarisationsmätningarna.

3.1.2 LNA

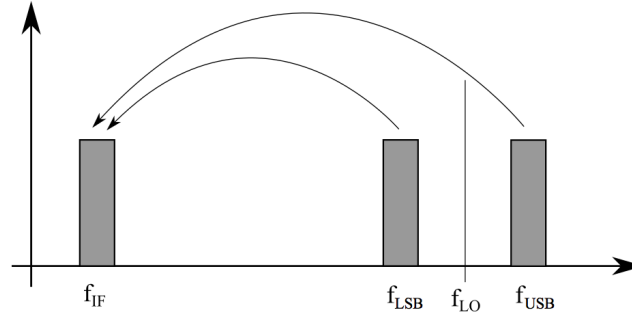
LNA är en typ av förstärkare som ger bra signal-brusförhållande vid höga frekvenser, till skillnad från vanliga förstärkare. Förstärkaren har användbar bandbredd 80 – 120 GHz och förstärker med cirka 20 dB i det intervallet [11, s. 59]. Syftet med att ha en LNA kopplad direkt efter antennen och precis före mixern är att förstärka de av antennen mottagna

signalerna så att signalerna blir signifikanta i jämförelse med det brus som genereras i övriga delar av systemet.

3.1.3 Mixer

Genom att använda en mixer nedkonverteras frekvensen på insignalen för att göra signalen mer lätthanterlig samtidigt som signalens karakteristik kvarstår [12]. Konverteringen är viktigt för att erhålla bästa prestanda av komponenterna seriekopplade till mixern, till exempel för att frekvensen ska ligga i effektdetektorns arbetsområde. Mixern som används i radiometern är en passiv Wide-Band Balanced Mixer av modellen 970 W med konverteringsförlust på 10 dB [13]. Mixern har tre portar, allmänt benämnda RF, LO samt IF, se figur 6. Lokaloscillator, LO, inställd på 100 GHz användes för att konvertera ned frekvensen på radiofrekvens-ingången, RF, från en bandbredd kring 100 GHz till en lägre frekvens. Nedkonverteringen sker genom att summan och differensen av LO-frekvensen och RF-frekvensen blir utsignalen Intermediate Frequency, IF-frekvens.

Eftersom mixern inte används för att konvertera endast en signal, utan för signaler över ett brett intervall finns det flera frekvenser vars differens kommer att konverteras ned till efterföljande komponenters arbetsområde [12, s.135]. Det kallas "image response" eller spegelfrekvens, vilket gör att mixern får ett Upper Sideband, USB, och Lower Sideband, LSB, och dess brus beskrivs därav som Double Sideband, DSB. Detta illustreras i figur 7.



Figur 7: Mixerns DSB nedkonvertering av frekvens.

En mixer som initialt är DSB kan illustreras genom

$$\begin{aligned} IF_{\text{Utsignal}} &= A(t) \cdot \cos(\omega_{\text{RF}}t) \cdot \cos(\omega_{\text{LO}}t) = \\ &= A \left[\frac{1}{2} \cos((\omega_{\text{RF}} - \omega_{\text{LO}})t) + \frac{1}{2} \cos((\omega_{\text{RF}} + \omega_{\text{LO}})t) \right] \end{aligned} \quad (18)$$

där $A(t)$ representerar en DSB undertryckt bärvåg och $\cos(\omega_{\text{LO}}t)$ samt $\cos(\omega_{\text{RF}}t)$ representerar LO- respektive RF-insignalerna [12, s.3]. Genom filtrering på IF-utgången kommer summafrekvensen försvinna, vilket ger

$$IF_{\text{Utsignal}} = A \frac{1}{2} \cos((\omega_{\text{RF}} - \omega_{\text{LO}})t). \quad (19)$$

Anledningen till att det ändå uppstår en spegelfrekvens är att

$$\cos((\omega_{\text{RF}} - \omega_{\text{LO}})t) = \cos(-(\omega_{\text{RF}} - \omega_{\text{LO}})t) = \cos((\omega_{\text{LO}} - \omega_{\text{RF}})t) \quad (20)$$

gäller, vilket ger två frekvensband av f_{RF} , f_{LSB} och f_{USB} , som konverteras till f_{IF} .

Frekvensen för USB, f_{USB} , respektive LSB, f_{LSB} , kan betecknas som

$$f_{\text{USB}} = f_{\text{LO}} + f_{\text{IF}} \quad (21)$$

$$f_{\text{LSB}} = f_{\text{LO}} - f_{\text{IF}}. \quad (22)$$

På grund av spegelfrekvensen ska beräkningen av T_{Ap} inkludera dubbel bandbredd. Detta är en central del i beräkningen av T_{Ap} , som kan ses i 4.2.1.

Även mixerns konverteringsförlust blir dubbel på grund av spegelfrekvensen. Konverteringsförlusten specificeras som 10 dB för SSB, men eftersom mixern är DBS delas förlusten upp på både USB och LSB. Effekttutsignal för mixern kan ses som

$$P_{\text{Out}} = \frac{1}{L_{\text{SSB}}} P_{\text{In}} = 2 \frac{1}{L_{\text{DSB}}} P_{\text{In}} \quad (23)$$

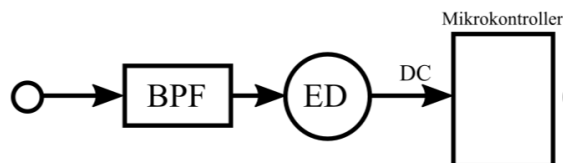
där P är effekt och L är förlusterna. Därav är konverteringsförlusten för DSB dubbel och blir därmed 13 dB.

3.1.4 IF-förstärkare

IF-förstärkaren är i detta fallet en LNA som förstärker den konverterade signalen och kallas IF eftersom den är kopplad till mixerns IF-utgång. Förstärkaren är optimerad för frekvenserna 0,001 – 1,5 GHz men är användbar upp till 5 GHz [14]. Förstärkningen är 40 dB i samma frekvensintervall som det efterföljande bandpassfiltrets bandbredd.

3.2 Back-end

Radiometerns egenkonstruerade back-end består av ett bandpassfilter, en effektdetektor och en mikrokontroller som kopplas till en dator för att tolka de uppmätta värdena.



Figur 8: Back-end för radiometern bestående av bandpassfilter, effektmätare samt Arduino, i bilden mikrokontroller

3.2.1 Bandpassfilter

Bandpassfiltret består av ett seriekopplat låg- och högpasfilter som tillsammans har ett passband på 300 – 2400 MHz och är främst till för att filtrera bort de lägre frekvenserna 0 – 300 MHz. Genom tester med spektrumanalysator upptäcktes att de lägre frekvenserna hade mycket större amplitud än frekvenserna inom passbandet. De lägre frekvenserna förändrades också mindre vid mätning med olika last vilket försvårar identifiering av underlaget.

3.2.2 Effektdetektor

För att mäta effekten från front-end beslutades att konstruera en egen effektdetektorkrets istället för att köpa en befintlig. Detta gjordes för att få de specifika egenskaper som krävs för projektet och för att kunna konstruera en mobil effektdetektor som kommer vara smidig och lätthanterlig i framtida användning av radiometern. Huvuduppgiften för effektdetektorn är att mäta effekten av de inkommande mikrovågorna och konvertera det till en likspänningsignal. Utsignalen samplas därefter med hjälp av en mikrokontroller, i detta fall en Arduino Due. För att möjliggöra uppgiften var effektdetektorn tvungen att innehålla några viktiga egenskaper utifrån mikrokontrollerns specifikationer och front-ends egenskaper. För att ta reda på kraven för dessa egenskaper genomfördes testmätningar med Y-faktormetoden på front-end. Y-faktormetoden finns beskriven i avsnittet om kalibrering, 4.2.1.

Viktiga egenskaper för effektdetektorn är frekvens-insignalområde, effekt-insignalområde, utsignalområde och responsivitet. Effektdetektorns frekvens-insignalområde önskades ha ett intervall liknande bandbredden på front-end, 0,3 – 2,4 GHz. Effekt-insignalområdet för effektdetektorn önskades vara runt -30 dBm vilket erhöles från testmätning med front-endens specifika förstärkning och brustemperatur. För att läsa av effektdetektorns utsignal användes en Arduino Due som samplar analoga signaler från 0 – 3,3 V. Effektdetektorns utsignalområde önskades vara inom samma intervall. Avgörande för att mäta små effektskillnader är, tillsammans med Arduinos analoga upplösning, en hög responsivitet hos effektdetektorn. Responsiviteten är utsignalens respons på en given insignal och kan också förklaras som förändringshastigheten, derivatan av utsignalen med avseende på insignalen och mäts i mV/dB . Skillnaden på de effektnivåer som detektorn mätte är så pass små att responsiviteten blev den viktigaste egenskapen som valet slutligen avgjordes kring.

3.2.2.1 Val av effektdetektor

För kravet angående frekvens-insignalområdet finns många effektdetektorer som har arbetsområde runt 0 – 3 GHz, vilket även gällde kravet på utsignalområdet. Angående effekt-insignalområdet eliminerades dock många effektdetektorer som inte ligger i rätt intervall. Den viktigaste och slutgiltiga egenskapen är responsiviteten, som gjorde att ett fåtal alternativ kvarstod.

Med dessa egenskaper i åtanke framstod ett alternativ lämpligt. LT5534 från Linear Technology uppfyller kraven och har responsivitet på 40 mV/dB .

3.2.2.2 LT5534

LT5534 är en sluten integrerad Dual Flat Package-krets som mäter inkommande frekvenssignal i logaritmisk decibelskala och konverterar den till likspänning [15].

Specifikationerna för LT5534 som kan ses i appendix A.5 visar att effektdetektorn uppfyller de uppsatta kraven, se avsnitt 3.2.2, och har en hög responsivitet, 40 mV/dB . Ström- och spänningskraven stämmer även bra överens med vad en Arduino Due kan avge vilket gör att effektdetektorn kan använda mikrokontrollern till biasering.

3.2.2.3 Kretsdesign

För att mäta effekt med den valda effektdetektorn samt för att anpassa till övriga komponenter i front-end och back-end krävs ytmontering på ett mönsterkort tillsammans med

passiva kretskomponenter. För att designa kretsen beaktades den rekommenderade “test-kretsen” från tillverkaren Linear Technology som kan ses i appendix A.5. Testkretsen består av en krets med de komponenter företaget rekommenderade för att effektdetektorn ska fungera på bästa sätt. En anledning till att LT5534 väljs, utöver passande egenskaper, är även att denna rekommenderade krets är simpel och effektiv för ändamålet. Utöver effektdetektorn består kretsen endast av ett fåtal passiva komponenter.

En SMA kontakt sitter på RF-ingången för att koppla ihop effektdetektorkretsen med det bandpassfilter som är placerat före. En kondensator är kopplad i serie för att filtrera bort eventuellt likström. För att ta bort små störningar och variationer på utgången placerades en kondensator även där.

3.2.2.4 Effektdetektorns modell

För att kunna tolka den uppmätta effekten behöver man karakterisera effektdetektorns överföringsfunktion. I detta fallet fastställdes modellen empiriskt genom mätningar med signalgenerator och voltmeter. För att karakterisera effektdetektorn mättes $\frac{V_{out}(mV)}{P_{in}(dBm)}$ som också representerar effektdetektorns responsivitet. Tester på 50 MHz gav en lutning på 42,3 mV/dB medan tester på 1,9 GHz gav en lutning på 35,4 mV/dB. Detta visar att effektdetektorn förstärker lägre frekvenser mer än högre frekvenser. Det innebär att modellen kan bli en felkälla om den spektrala uppsättningen förändras mellan olika material och polarisationer. Slutligen fastställs modellen genom att generera bandpassfiltrets mittfrekvens 1,35 MHz vilket ger karakteristiken

$$V_{out} = 35,7P_{in} + 2376,8. \quad (24)$$

Resultatet jämfördes sedan med responsiviteten given i databladet och ytterligare tester gjordes under verkliga förhållanden med komplett bandbredd för att verifiera dess giltighet. Det är viktigt att notera att detta är en approximativ modell där effektdetektorns funktion antas vara helt linjär.

3.2.3 Programmering

För att tolka effektdetektorns utsignal kopplades den till en Arduino Due. Till Arduinon skrevs ett mycket simpelt program i C++ för att sampla den signal som motsvarar effektdetektorns utsignal och presentera resultatet som apparent temperature. Detta görs med en while-loop som läser av Arduinons analoga input i varje iteration. Den samplade signalen skickas sedan via den kopplade datorns USB-port till ett MATLAB-program där den representeras i form av enhetslösa “steg” i form av 12 bitar data. I analog-till-digital konverteringen (ADC) går en del av informationen förlorad och ett steg motsvarar $3300 \cdot 2^{-12} \text{ mV} \approx 0,8 \text{ mV}$, vilket representerar upplösningen efter sampling.

Avläsningen aktiverades genom att ett MATLAB-script som kommunicerar med Arduinon körs. I MATLAB tas ett medelvärde av 200 samples för att filtrera bort brus och värdet omvandlas sedan till dBm enligt en sammansatt modell som består av konvertering från steg till dBm enligt Arduinons upplösning, tillsammans med en modell av effektdetektorns funktion. Detta förloppet sker inne i en bestående while-loop och det uppmätta värdet presenteras i en dialogruta. Efter loopen återstår att omvandla detta till apparent temperature enligt formeln för Y-faktorn, som finns beskriven i avsnitt 4.2.1, Kalibrering.

3.3 Mekanisk design

För att fixera front-end i den infallsvinkel och rotationsvinkel som önskas vid mätningarna tillverkades en mekanisk konstruktion, se omslagsbild. Konstruktionen har designats ganska primitivt eftersom projektets fokus inte ligger i att ta fram en slutgiltig produkt utan snarare undersöka om konceptet fungerar. Fixturen har designats i CAD och skrivits ut med en 3D-printer. Den är fäst på en rigg baserad på FlexLink, som är ett enkelt monteringsställningssystem. Fixturen har designats så att den enkelt kan rotera antennen 90° runt dess symmetriaxel för hand. Detta är nödvändigt för att växla mellan att ta emot horisontal- respektive vertikalpolariserat strålning eftersom vägledaren endast transmitterar vågor i en polarisation.

Riggen har konstruerats så att antennens höjd lätt kan justeras för att hamna på önskat avstånd från marken. Även infallsvinkeln kan justeras med hjälp av FlexLink-riggen, utöver de två fasta lägen på 60° och 45° som fixturen erbjuder.

4 Mätningar

För att verifiera modellens giltighet och radiometerns prestanda genomfördes experimentella mätningar. För dessa skapades lagerstrukturer som skulle återspegla verkliga vägförhållanden. Tre huvudsakliga kategorier undersöktes; asfalt, vatten på asfalt samt is på asfalt. Dessa kan dessutom förekomma i olika tjocka lager ovanpå varandra, samt med olika ytgrovheter.

4.1 Provberedning

För att kunna simulera olika vägunderlag användes två stycken asfaltsplattor tillräckligt stora för att täcka spotsize, enligt beräkningar i Appendix A.4. För att kunna mäta på kall, torr asfalt samt på istäckt asfalt frystes plattorna in i -18°C . För att minska uppvärmningshastigheten när asfaltsplattorna hade lämnat frysen kylde plattorna med flytande kväve. För att simulera svart is sprejades vatten på en torr, kall asfaltsplatta varpå vattnet frös. För att simulera tjockare lager av is, 0,5 – 1,5 cm, hällde vatten på en asfaltsplatta före infrysning. Förutom att denna is blev tjockare än den som bildades vid sprejning hade isen från frysen sprickor och var inte lika klar som den sprejade isen. För mätningar på räfflad is raspades isen som tillverkats i frysen.

4.2 Mätprocedur

Platsen för mätning valdes så att antal föremål som täckte vyn mot himlen minimerades. För att kalibrera radiometern användes Y-faktormetoden, beskriven i 4.2.1, med en kall och en varm last av känd temperatur. Lasterna var båda gjorda av samma material, Eccosorb AN 73, som liknar en svartkropp i mikrovågsspektrat. För att få den kalla lasten kylde materialet genom att doppa det i flytande kväve. Genom att mäta på kall och varm last kunde systemets brustemperatur och förstärkning beräknas med Y-faktormetoden, vilken sedan användes för att från den uppmätta effekten beräkna apparent temperature.

Efter kalibrering mättes sky temperature. För några av mätningarna mättes sky temperature genom att vinkla radiometern mot himlen med 30° vinkel mot marken. För några av

mätningarna mättes sky temperature genom att placera en metallplatta på marken där proverna senare placerades. Metallplattan reflekterar idealt all mikrovågsstrålning, men för att kontrollera mättes både horisontellt och vertikalt polariserat strålning.

Under olika mättillfällen har olika bandbredd använts. Under alla mättillfällen användes en Agilent Power Meter för att mäta effekten, eftersom den egenutvecklade back-end var under utvecklingsstadiet och mindre pålitlig. På grund av den varma årstiden har inga mätningar gjorts i luft med temperatur under 0 °C. Inga mätningar har heller kunnat göras på naturlig is.

4.2.1 Kalibrering

Eftersom det är omöjligt att urskilja om den uppmätta effekten kommer från mikrovågor mottagna av antennen eller som brus genererat i radiometern, gjordes kalibreringar under mätningarna. Detta för att beräkna radiometerns brustemperatur och förstärkning och därigenom bestämma apparent temperature. För att göra detta användes Y-faktormetoden [12, s.172]. Y-faktormetoden går ut på att, under test, mäta strålningen från svartkroppar med olika kända temperaturer, rumtemperatur T_{Hot} och flytande kväve T_{Cold} , och beräkna Y-faktorn.

Y-faktorn definieras som

$$Y = \frac{P_{\text{Hot}}}{P_{\text{Cold}}} = \frac{T_{\text{Hot}} + T_{\text{Brus}}}{T_{\text{Cold}} + T_{\text{Brus}}} \quad (25)$$

där P_{Hot} och P_{Cold} är de av radiometern uppmätta effekterna för de kända temperaturerna och T_{Brus} är systemets brustemperatur. Sambandet mellan effekt och temperatur ges av

$$P_{\text{Hot}} = k_B 2BG (T_{\text{Hot}} + T_{\text{Brus}}) \quad (26)$$

där k_B , T och B är Boltzmanns konstant, apparent temperature respektive bandbredden. Dubbel bandbredd, $2B$, används på grund av att mixerns brus är DSB, se 3.1.3. För att beräkna brustemperaturen användes Y-faktorn och de kända temperaturerna i ekvationen

$$T_{\text{Brus}} = \frac{T_{\text{Hot}} - T_{\text{Cold}} Y}{Y - 1}. \quad (27)$$

Förstärkningen för hela systemet kan beräknas med ekvationen

$$G = \frac{P_{\text{Hot}} - P_{\text{Cold}}}{P_{290\text{ K}} - P_{80\text{ K}}} \quad (28)$$

där $P_{290\text{ K}}$ är bruseffekten över en viss bandbredd vid 290 K,

$$P_{290\text{ K}} = k_B 2B \cdot 290 \quad (29)$$

och analogt för $P_{80\text{ K}}$ [12, s.115].

När både brustemperatur och förstärkning är beräknat kan apparent temperature tas fram på följande sätt

$$T_{\text{Ap}} = \frac{P}{k_B 2BG} - T_{\text{Brus}}. \quad (30)$$

I mätproceduren gjordes kalibreringar kontinuerligt mellan de olika mätningarna för att kunna iakttaga förändringar både i systemets brustemperatur och förstärkning. Eftersom det är skillnaden i temperatur, ΔT_{Ap} , som beaktas vid bedömning av detektion kommer brustemperaturens variation cancelleras och därmed inte påverka. Förstärkningens variationer kommer dock inte försvinna utan kan att vara en felkälla.

4.2.2 Länkbudget

För att kontrollera om det, under kalibrering, uppmätta värdet på systemets förstärkning stämde överens med de olika komponenternas teoretiska förstärkning gjordes en länkbudget enligt

$$G_{\text{System}} = G_{\text{LNA}} G_{\text{Mix}} G_{\text{IF}}. \quad (31)$$

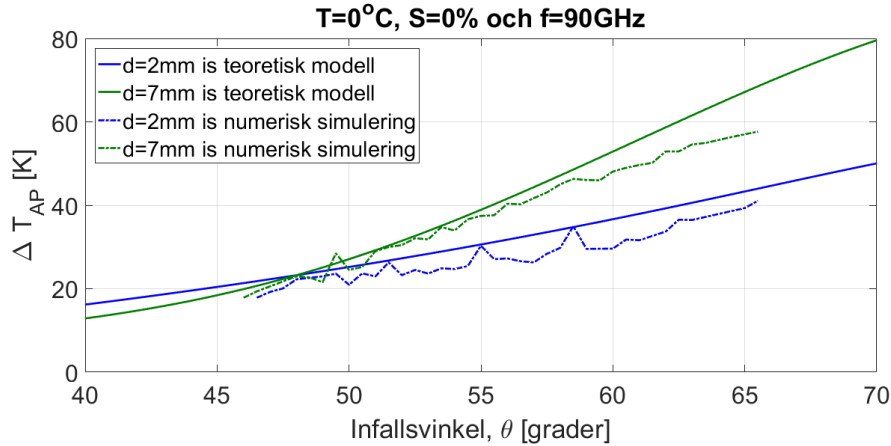
I Appendix A.6 ses att systemets förstärkning vid kalibrering var cirka 44 dB. Teoretisk beräkning av länkbudgeten blir

$$G_{\text{System,dB}} = 20 - 13 + 40 = 47 \text{ dB}. \quad (32)$$

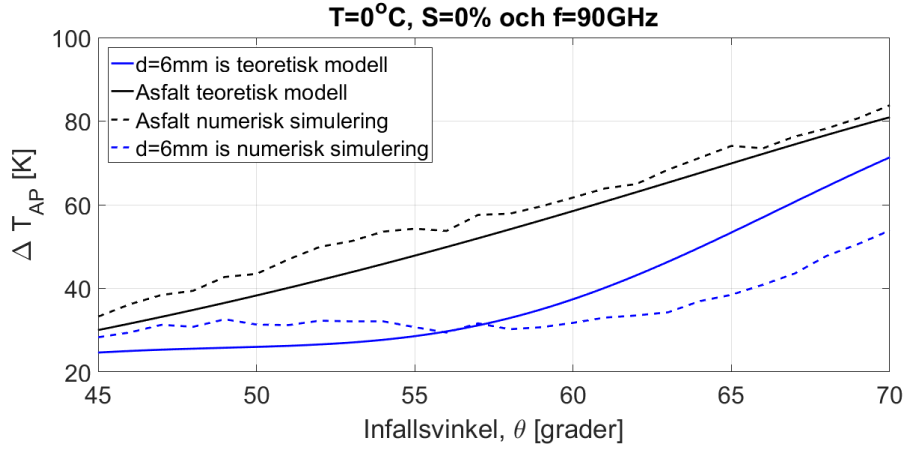
Eftersom endast 3 dB skiljer den teoretiska och uppmätta förstärkningen kan länkbudgeten antas stämma väl. Kvarvarande skillnad beror troligtvis på ledningsförluster eller otillräcklig biasering av komponenterna.

5 Resultat

För att verifiera den framtagna teoretiska modellen jämförs den med numeriska datorsimuleringar, vilket visas i figur 9 och 10.

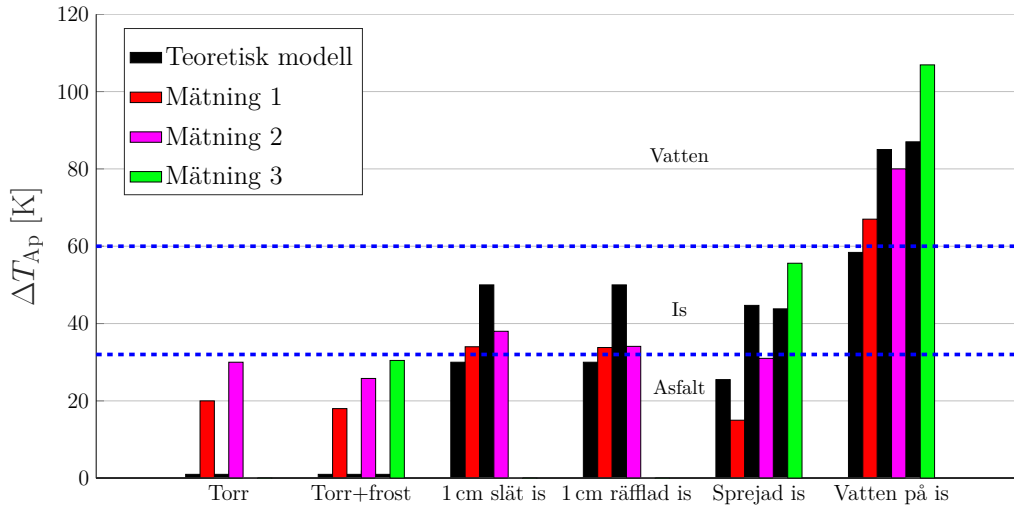


Figur 9: Apparent temperature som funktion av vinkeln för teoretisk modell och numerisk simulering. För $d = 2 \text{ mm}$ och $d = 7 \text{ mm}$ slät is ovanpå asfalt med $\sigma = 2 \text{ mm}$.



Figur 10: Apparent temperatur som funktion av vinkeln för teoretisk modell och numerisk simulering. För $d = 0$ mm och $d = 6$ mm slät is ovanpå slät asfalt.

Kombinationen av mätningarna och den teoretiska modellen visas i figur 11 där de teoretiska värdena är tagna ur den vinkelberoende modellen med det insatta värdet $\theta_1 = 60^\circ$. Frost har inte lagts in i modellen. Värdena från teoretisk modell för “Torr” och “Torr + frost” är lika i figur 11. Analogt för “1 cm slät is” och “1 cm räfflad is”.



Figur 11: Teoretisk modell och mätningar för skillnaden i T_{Ap} för horisontell polarisation och vertikal polarisation för infallsvinkeln $\theta_1 = 60^\circ$ och $\sigma = 2$ mm för asfalten. Alla mätningar är gjorda med en asfaltsplatta i botten. De blå streckade linjerna representerar uppskattade tröskelvärden för is.

Varje mätning har ett tillhörande teoretiskt värde i vilket sky temperature vid måttillfället applicerats till modellen. Stapeln som representerar det teoretiska värdet står direkt till vänster om stapeln för mätningen det teoretiska värdet hör ihop med. För numeriska värden se tabeller i appendix A.6.

6 Diskussion

Syftet med projektet var att testa polarisationsbaserad mikrovågsradiometri för isdetektion. I detta avsnitt diskuteras implikationerna av resultatet hos projektet som helhet och möjliga förklaringar till observationer som gjorts.

Det observerades att vinkelberoende teoretiska modellen stämmer väl överens med de numeriska simuleringar som genomfördes vilket kan ses i figur 9 och 10. Avvikelserna mellan de numeriska simuleringarna och modellen kan bero på att de numeriska beräkningarna är approximationer samt att de bygger på en mycket förenklad modell för att minska beräkningarna.

Från de mätningar som genomfördes i projektet dras slutsatsen att radiometern kan skilja på följande vägunderlag; torr asfalt, slät is på asfalt och vattentäckt is på asfalt. Skillnaderna mellan dessa ytors ΔT_{Ap} är relativt stora och förhållandena mellan dessa tre vägunderlag är konsekvent i alla tre mätningar samt i modellen vilket kan ses i figur 11. En jämförelse med modellen visar att den stämmer överens med mätningarna för vattentäckt is på asfalt, slät is på asfalt och räfflad is på asfalt. Modellens ΔT_{Ap} avviker däremot från de värden som uppmättes för torr asfalt och sprejad is. Vägunderlagen torr asfalt och sprejad is har gemensamt att de båda har en grov toppyta. Modellen verkar alltså skilja sig från mätresultaten när topplagret är en grov yta. Troligtvis har modellen som använts en större grovhet än vad asfalten har. Grovheten på asfalten kan behöva approximeras på ett annat sätt, till exempel antas vara en slät yta med spridda grovheter.

Trots den grövre ytan på räfflad is jämfört med den lika tjocka släta isen, skiljer den räfflade isen sig förvånansvärt lite från slät is. ΔT_{Ap} för sprejad is skiljer sig däremot tydligt från slät och räfflad is. Att ΔT_{Ap} för räfflad is hamnar nära ΔT_{Ap} för slät is vid mätningarna skulle kunna bero på att den räfflade isen framställts från en slät yta. Den räfflade isen kan ha inslag av släta områden som är tillräckliga för att den inte ska kunna urskiljas från slät is med likvärdig tjocklek. Denna egenskap påverkar inte projektets ändamål negativt eftersom även räfflad is kan bidra till halka.

Vatten konstaterades ha en hög optisk tjocklek. Med mer än 0,03 mm vatten som del i en flerlagerstruktur kommer underliggande material inte påverka den totala reflektiviteten eftersom den strålning som transmitteras genom vattnet kommer dämpas. Det innebär att is som täcks av vatten inte kommer kunna detekteras, vilket är en brist för konceptet. En annan brist med konceptet är att torr asfalt inte tycks kunna skiljas från sprejad is, se figur 11. Den sprejade isen är tunn och följer asfaltens form varför den antas vara mycket lik blixthalka bildad på naturlig väg.

De blå linjerna i figur 11 representerar uppskattade tröskelvärden för ΔT_{Ap} för is. Under den nedre linjen förväntas endast asfalt och över den övre linjen förväntas vatten som topplager. Att uppskatta fasta tröskelvärden för detektion av is som ska gälla för alla mätningar och variationer på sky temperature är inte optimalt. Jämförelsen av ΔT_{Ap} för olika material bör göras under tester med samma mätförhållanden för att ge tillförlitlig information om materialen. Med de olika felkällor som fanns under mätningarna är det mycket att ta hänsyn till.

6.1 Felkällor vid mätningar

De felkällor som förmodas ha haft stor inverkan vid mätningarna i detta projekt är väderskiftningar samt emission och reflektion från objekt runt antennen. Vid jämförelse mellan mätningar är varierande mätförhållanden viktig felkälla att beakta.

En annan viktig aspekt är hur radiometerns funktion varierar. Systemets förstärkning är inte konstant eftersom förstärkningen från LNA kan variera vilket påverkar mätvärdena. Detta är potentiellt en stor felkälla.

Avvikelsen mellan teoretiska värden och mätresultat kan till stor del ha påverkats av antagandet om markens temperatur eftersom den antas vara 0°C i modellen för samtliga mätningar. Dessutom finns en stor osäkerhet i vad sky temperature var för varje mätning. Mätsessionerna pågick ofta under flertal timmar för att inkludera många olika scenarion. Under den tiden har vädret och temperaturen varierat. Om temperatur, lufttrycket samt luftfuktighet i atmosfären varierar kan T_{Sky} ändras mitt i en mätning, vilket medför ändrad intensitet av reflekterad strålning mellan horisontell och vertikal mätning och därmed felaktigt ΔT_{Ap} . Även markens temperatur påverkar intensiteten av reflekterad strålning och kan också förändra ytskiktet genom att smälta is eller orsaka frostbildning på asfalt eller is.

En upptäckt som gjordes var att uppmätt T_{Ap} vid några tillfällen ökade när solen gick i moln. Solen i sig emitterar mestadels strålning av högre frekvens, så om det är ett faktiskt samband eller bara slumpmässig variation är svårt att veta. Däremot kan solen ha bidragit till att värma upp atmosfären, samt den markyta på vilken mätningar skedde. När termisk jämvikt inte längre gäller kommer vissa antaganden för metoden inte vara fullt giltiga, t.ex. förhållandet mellan reflektion och emission. Vid det tredje mättillfället var vädret mer stabilt, och himlen var i princip fri från moln.

Under projektets olika mätningar användes i största möjliga mån samma utrustning. Biaseringen av radiometern och LO-frekvensen var i princip likvärdiga under varje mättillfälle, men kan ha varierat något mellan mättillfällena. Den tredje mätningen hade ett annat bandpassfilter med större frekvensband, vilket tros ha bidragit till att mätvärdena blev avsevärt stabilare. Dock kan det faktum att det var konstant klarblå himmel utan väderförändringar under mätningen spela in i stabiliteten.

Den egenkonstruerade effektdetektorkretsen användes inte för datainsamling, men testades ändå under det tredje mättillfället. Med Arduinon kopplad till en dator så noterades en transient på effektdetektorns utsignal vid aktiverad mätning. Värdet på utsignalen mättes med en multimeter kopplad parallellt med Arduinon och en ökning med i genomsnitt 30 mV avläses under cirka 1 sekund vid överföring av data från Arduinon till datorn. Detta tros bero på att Arduinon biaseras via USB av en dator, vilket kan ge en ojämn och otillräcklig biasering. Om transienten påverkar mätningarna så kan detta åtgärdas genom att koppla Arduinon direkt till en display och göra alla beräkningar internt i mikrokontrollen.

Vid framtagning av modell för effektdetektorns funktion så antas den vara linjär. Detta är inte helt korrekt och leder till att den av MATLAB uträknade effekten kan variera något från det verkliga värdet. Även Arduinons ADC och effektdetektorn har en viss mätosäkerhet som kan bidra till ytterligare fel. Ett sätt att kompensera för detta är att använda en adaptiv modell som skiljer sig mellan olika intervall. Vid testning av effektdetektorn med signalgenerator och multimeter så noteras mätfel av samma storleksordning som de fel som observerades med Arduinon inkopplad till datorn. Detta tyder på att det är effektdetektorns modell som har brister och att transienten som upptäcktes på utsignal vid

aktiverad mätning med MATLAB ej bidrar till ytterligare mätfel av betydande storlek.

6.2 Framtida utveckling av konceptet

För den färdiga produkten som är tänkt att monteras på ett fordon krävs framförallt en automatiserad kontinuerlig kalibrering samt möjlighet att mäta de båda polarisationerna utan att manuellt vrida på antennen. Detta skulle kunna lösas genom att fokusera två antenner som mäter olika polarisation på samma spot. Det kommer möjliggöra mätning på samma isyta i båda polarisationerna under färd. Då varierar även inte T_{sky} mellan mätningarna av de olika polarisationerna och ΔT_{Ap} kommer således vara mer exakt.

Radiometern kommer även behöva anpassas med en annan antenn för att klara av en bra storlek på spotsize flera meter framför fordonet. Vidare kommer också en mjukvara med förbestämda tröskelvärden att behövas för att utifrån datan som radiometern samlar in avgöra vägunderlaget. Tröskelvärden för olika vägunderlag kan tas fram från en modell som är verifierad med mätdata från en stor mängd mätningar.

7 Slutsatser

Arbetet om radiometrisk fjärrmätning av isbildning på vägytor gav följande observationer och slutsatser:

1. En radiometer kan skilja 1 cm slät is, vatten på is och asfalt från varandra.
2. ΔT_{Ap} kan modelleras med säkerhet för flerlayersystem när översta lagret är slätt.
3. Konkreta tröskelvärden för detektion kräver en större mängd empiriska studier.
4. På grund av vattnets korta inträngningdjup så kan reflektionsbidrag från underliggande lager försummas.
5. Konceptet att använda mikrovågsradiometri för detektion av is på vägytor har potential men kräver vidare arbete.

Referenser

- [1] Trafikanalys. *Vägfrikadskador 2015*. http://www.trafa.se/globalassets/statistik/vagtrafik/vagtrafikskador/vaeg_trafikskador_2015.pdf?, Juni 2015.
- [2] Sveriges Television. *Uppkopplade fordon varnar för halka*. <http://www.svt.se/nyheter/lokalt/vast/uppkopplade-fordon-varnar-for-halka>, Februari 2017.
- [3] Iain H. Woodhouse. *Introduction to Microwave Remote Sensing*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006.
- [4] Finklele R. *Detection of Ice Layers on Road Surfaces Using a Polarimetric Millimetre Wave Sensor at 76 GHz*. 1997.
- [5] Physics Resources Database. *Electrical, Magnetical & Optical Properties*. http://www.physics.usyd.edu.au/teach_res/db/d0006c.htm, Maj 2017.
- [6] David G. Long Fawwaz T. Ulaby. *Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing*. The University of Michigan Press, 2014.
- [7] F. Ulaby, R. Moore, and A. Fung. *Microwave Remote Sensing Active and Passive Volume III*. Addison-Wesley Publishing Company, 1986.
- [8] F. Ulaby, R. Moore, and A. Fung. *Microwave Remote Sensing Active and Passive Volume II*. Addison-Wesley Publishing Company, 1982.
- [9] F. Ulaby, R. Moore, and A. Fung. *Microwave Remote Sensing Active and Passive Volume I*. Book-Mart Press, Inc., 1981.
- [10] Paul F. Goldsmith. *Quasioptical Systems: Gaussian Beam Quasioptical Propagation and Applications*. Wiley-IEEE Press, 1998.
- [11] Vessen Vassilev et al. *Integrated Front-ends up to 200 GHz*. 2011.
- [12] Stephen A. Maas. *Microwave Mixers*. Artech House, Inc., 1986.
- [13] Mi-Wave Millimeter Wave Products Inc. *970 Series Wide-Band Balanced Mixers*. https://miwv.com/drawings/970/MIWV_Series970.pdf, 2017.
- [14] Inc. Cosmic Microwave Technology. *CITLF1 Cryogenic SiGe Low Noise Amplifier*. 2009.
- [15] Linear Technology Corporation. *Linear Technology - LT5534*. <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/5534fc.pdf>, 2004.
- [16] George Hufford. *A Model for the Complex Permittivity of Ice at Frequencies Below 1 THz*. 1991.
- [17] Michael Ware Justin Peatross. *Physics of Light and Optics*. Brigham Young University, 2014.
- [18] A.M.I.E.E R.J. Wylde, M.A. *Millimetre-wave Gaussian beam-mode optics and corrugated feed horns*. Vol.131, 1984.

A Appendix

A.1 Modell för dielektrisk konstant för is och vatten

Följande modell är giltig i temperaturintervallet -40 till 0°C . Empiriska studier har visat att realdelen av permittiviteten för is kan approximeras som konstant över både temperatur (T) och frekvens (f) enligt[16]

$$\varepsilon' = 3,15. \quad (33)$$

Imaginärdelen kan skrivas som

$$\varepsilon'' = \frac{\alpha}{f} + \beta \cdot f, \quad (34)$$

där

$$\beta = (0,445 + 0,00211T) \times 10^{-4} + \frac{0,585 \times 10^{-4}}{\left(1 - \frac{T}{29,1}\right)^2} \text{ GHz}^{-1} \quad (35)$$

och

$$\alpha = (50,4 + 62\Upsilon) \times 10^{-4} \cdot e^{-22,1\Upsilon} \text{ GHz}. \quad (36)$$

I ekvationen ovan är $\Upsilon = \frac{300}{273,15+T} - 1$.

För vatten gäller att realdelen av den dielektriska konstanten kan skrivas [7, s.2022]

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 + (2\pi\tau f)^2}, \quad (37)$$

där $\varepsilon_\infty = 4,9$; $\varepsilon_0 = A(a_1 + a_2T + a_3T^2 + a_4T^3)$ och $\tau = \frac{B}{2\pi}(a_5 + a_6T + a_7T^2 + a_8T^3)$.

$$A = 1 + 1,613 \times 10^{-5}T \cdot S - 3,656 \times 10^{-3}S + 3,210 \times 10^{-5}S^2 - 4,232 \times 10^{-7}S^3 \quad (38)$$

$$B = 1 + 2,28 \times 10^{-5}T \cdot S - 7,638 \times 10^{-4}S - 7,760 \times 10^{-6}S^2 + 1,105 \times 10^{-8}S^3 \quad (39)$$

Imaginärdelen kan skrivas som

$$\varepsilon'' = \frac{2\pi\tau f(\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty)}{1 + (2\pi\tau f)^2} + \frac{\sigma}{2\pi\epsilon_0 f}, \quad (40)$$

där

$$\sigma = S(b_1 + b_2S + b_3S^2 + b_4S^3) \cdot e^\Phi. \quad (41)$$

$$\Phi = D(b_5 + b_6D + b_7D^2 - S(b_8 + b_9D + b_{10}D^2)) \quad (42)$$

och $D = 25 - T$. Frekvensen, f , ovan anges i GHz; temperaturen, T , i $^\circ\text{C}$ och salthalten, S , i %. Kurvanpassningsparametrarna finns i tabell 1.

Tabell 1: Parametrar för kurvanpassning av dielektrisk konstant för flytande vatten

a_1	88,045	b_1	0,18252
a_2	0,4147	b_2	$1,4619 \times 10^{-3}$
a_3	$6,295 \times 10^{-4}$	b_3	$2,093 \times 10^{-5}$
a_4	$1,075 \times 10^{-5}$	b_4	$1,282 \times 10^{-7}$
a_5	$1,1109 \times 10^{-10}$	b_5	$2,033 \times 10^{-2}$
a_6	$3,824 \times 10^{-12}$	b_6	$1,266 \times 10^{-4}$
a_7	$6,938 \times 10^{-14}$	b_7	$2,464 \times 10^{-6}$
a_8	$5,096 \times 10^{-16}$	b_8	$1,859 \times 10^{-5}$
		b_9	$2,551 \times 10^{-7}$
		b_{10}	$2,551 \times 10^{-8}$

A.2 Brewstervinkel

Brewstervinkeln ges av

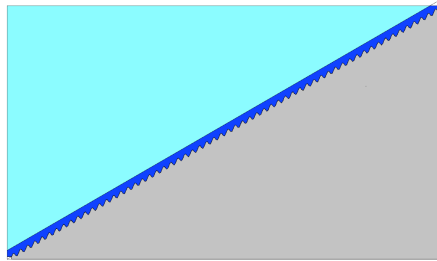
$$\theta_B = \arctan \frac{n_t}{n_i}, \quad (43)$$

där n_i och n_t är brytningsindex för de aktuella medierna i vilka infallande och transmittande strålning utbredd i [17, s.79]. Vid Brewstervinkeln är vinkeln mellan reflekterad och transmitterad stråle 90 grader.

I och med att brewstervinkeln varierar med brytningsindex kommer den vara olika för olika material. I detta projekt är det särskilt relevant med Brewstervinkeln för is och vatten (och att det är skillnad mellan dem), samt vårt antagande att det inte finns någon direkt brewstervinkel för asfalt.

A.3 Modell i COMSOL Multiphysics

I COMSOL Multiphysics skapades en modell likt den i figur 12 som består av tre olika lager där infallsvinkeln kunde varieras. I modellen simulerades infallande strålning från vänstra delen av modellen. För att beräkna reflektiviteten hos lagerstrukturerna så divideras mängden strålning som träffar den övre kanten med mängden strålning som skickas in i modellen. Detta görs för både horisontell och vertikal polarisation. Genom att använda ett Scattering Boundary Conditions på randen av modellen så passerar all infallande strålning genom randen utan reflektion som kan störa beräkningarna. Grovheten på asfalten gjordes periodisk efter försök att skapa en slumpad yta misslyckades.



Figur 12: COMSOL Multiphysics modell med ljusblå luft, mörkblå is och grå asfalt med grovhet.

A.4 Fördjupning i antenn, spotsize, riktning

Ett korrugerat horn som vågledare skickar ut vågor som är mycket lika gaussiska strålar. Med hjälp av detta så kan intensitetsfördelningen som hornet tar upp beräknas som en gaussisk stråles intensitetsfördelning [18, s.258-262]. För dessa så ges intensitetsfördelningen enligt

$$I(r) = I_0 \exp\left(-2\frac{r^2}{\omega_0^2}\right) \quad (44)$$

För $r = \omega_0$ så får man intensiteten $\frac{1}{e^2} = -8,7dB$, för att få med så mycket som möjligt av intensiteten så sätts $r = 2\omega_0 \rightarrow I = I_0(-34,7dB)$.

A.4.1 Spotize

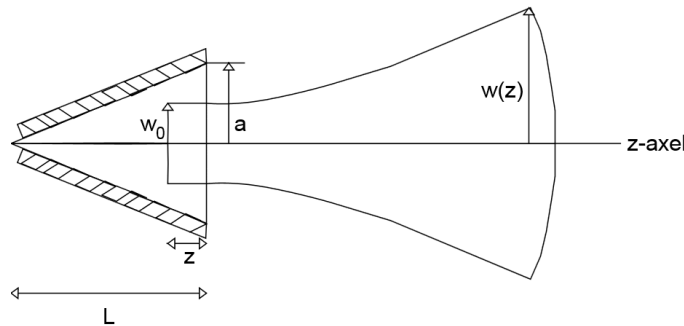
Med propagation i z-led så ges radien för en gaussisk stråle enligt [10, s.13] av

$$\omega(z_p) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z_p}{\pi \omega_0^2}\right)^2} \quad (45)$$

I ekvation (45) kan man inte bara ta myningen på hornantennen som ω_0 , denna beror nämligen på fler faktorer enligt:

$$M = \frac{2\pi a}{\lambda} \frac{a}{L + \sqrt{L^2 + a^2}}, \quad \omega_0 = \frac{\tau a}{\sqrt{1 + (M\tau^2)^2}}, \quad z_m = L \left[1 - \frac{1}{1 + (M\tau^2)^2} \right]$$

Där, enligt figur 13, L är hornets längd, a är hornets radie vid mynningen, $\tau = 0,6435$ [18, s.259], z_m är propagationslängden fram till mynningen och λ är våglängden.



Figur 13: Korrugerat Horn och dess strålradii.

Med dessa ekvationer och med hjälp av MATLAB så fås 2ω till att vara 7,686cm efter 20cm propagation från mynningen av hornet. För att räkna ut den totala spotsizen vid $z_p = 20\text{cm}$ propagation med ett vinkelberoende, θ så löses ekvationssystemet:

$$\begin{bmatrix} y_0^2 + z_0^2 = x_{n/b}^2, & \frac{y_0}{z_0} = \tan(90 - \theta) \end{bmatrix}$$

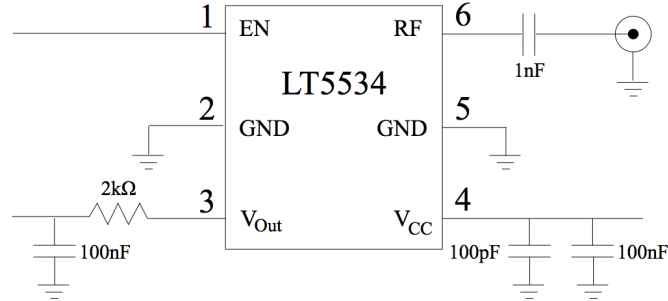
$$y_0 = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z_{n/b}}{\pi \omega_0^2} \right)^2}, \quad z_{n/b} = z_m + z_p \mp z_0.$$

Där z_n och z_b är propagationssträckan som strålen propagerat när radien når backen närmast respektive längst ifrån antennen. Detta ger x_n och x_b som är avståndet till cent-rumpunkten och därmed radier hos spoten.

A.5 Effektdetektor

Tabell 2: Specifikationer för LT5534.

Frekvens-insignalområde	50 MHz – 3 GHz
Effekt-insignalområde (Dynamiskt område)	−60 dBm – 0 dBm
Utsignalområde	0,3 – 2,4 V
Responsivitet	40 mV/dB
Biaseringsspänning	2,7 – 5,25 V
Biaseringsström	5 – 9 mA



Figur 14: Kopplingsschema för effektdetektorkretsen.

A.6 Mätdata

Tabell 3: Värden från kalibrering av radiometern och sky temperature vid mätningarna.

Mätning	1	2	3
Gain	44,150	43,931	42,767
Y-faktor	1,545	1,578	1,534
Y-faktor (dB)	1,89	1,98	1,86
Brustemperatur (K)	305,14	283,57	312,80
Sky temperature (K)	160	75	79

Tabell 4: Teoretisk modell samt medelvärden av mätdata för T_{Ap} givet i K.

Scenario	Modell 1	Mät 1	Modell 2	Mät 2	Modell 3	Mät 3
Asfalt, torr (frost)						
T_{Ap} Horisontellt	272	229,9	272	230,2	272	247,4
T_{Ap} Vertikalt	273	242,3	273	255,9	273	277,8
ΔT_{Ap}	1	12,5	1	25,7	1	30,5
Asfalt, sprejad is						
T_{Ap} Horisontellt	247,2	246,5	227,7	252,2	228,7	230,0
T_{Ap} Vertikalt	272,7	262,6	272,5	283,8	272,5	285,6
ΔT_{Ap}	25,5	16,0	44,7	31,7	43,8	55,6
Asfalt, 1 mm is, 1 mm vatten						
T_{Ap} Horisontellt	-	-	167	214,4	165	165,5
T_{Ap} Vertikalt	-	-	252	294,7	252	272,4
ΔT_{Ap}	-	-	85	80,2	87	107,0
Asfalt, slät is (frost)						
T_{Ap} Horisontellt	243	219,0	223	261,6	221	229,2
T_{Ap} Vertikalt	273	237,5	273	288,4	272	292,5
ΔT_{Ap}	30	18,5	50	26,8	51	63,3
Asfalt, slät is (utan frost)						
T_{Ap} Horisontellt	243	207,7	223	264,2	-	-
T_{Ap} Vertikalt	273	241,6	273	301,9	-	-
ΔT_{Ap}	30	33,9	50	37,7	-	-
Asfalt, räfflad is						
T_{Ap} Horisontellt	243	211,3	223	265,0	-	-
T_{Ap} Vertikalt	273	245,1	273	299,1	-	-
ΔT_{Ap}	30	33,7	50	34,1	-	-
Asfalt, slät is, vatten						
T_{Ap} Horisontellt	201	174,8	167	190,5	-	-
T_{Ap} Vertikalt	259	242,0	252	285,4	-	-
ΔT_{Ap}	58	67,2	85	94,9	-	-
Asfalt, torr (utomhustemp.)						
T_{Ap} Horisontellt	272	239,5	272	270,6	-	-
T_{Ap} Vertikalt	273	258,3	273	301,9	-	-
ΔT_{Ap}	1	18,8	1	31,3	-	-