

DISS. ETH NO. 23052

**CHARACTERIZATION OF GLACIER FACIES USING  
SAR POLARIMETRY AT LONG WAVELENGTHS**

A thesis submitted to attain the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by  
GIUSEPPE PARRELLA

M.sc. in Telecommunications Engineering, Università degli Studi di Napoli Federico II

born on 02.08.1984

Italian citizen

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Irena Hajnsek, examiner  
Prof. Dr. Martin Funk, co-examiner  
Prof. Dr. Alberto Moreira, co-examiner  
Prof. Dr. Helmut Rott, co-examiner

2015

---

# Abstract

The emergence of airborne and satellite remote sensing techniques has led to unprecedented improvements of glaciological observations in terms of spatial coverage as well as temporal and spatial resolution. In this domain, synthetic aperture radars (SAR) represent a powerful tool. Carrying their own illumination, they are able to operate independently of sunlight and in nearly all weather conditions, allowing continuous monitoring. At dry conditions, SAR measurements are sensitive to both surface and sub-surface features of glaciers and ice sheets, especially at long-wavelengths (e.g. L- and P-band). This qualifies SAR for the retrieval of a number of glaciological parameters, including glacier facies extent, snow and firn grain size, accumulation rate. In particular, polarimetric SAR (PolSAR) represents an extension of conventional SAR which exploits the polarization diversity of electromagnetic waves to gain sensitivity to different scattering mechanisms as well as to geometrical and dielectric properties of the illuminated objects. Nevertheless, such potential remains largely underexploited as a satisfactory physical interpretation of SAR backscattering from glaciers and ice sheets is still lacking. For instance, the relative contribution of surface and subsurface features as well as its dependence on frequency, imaging geometry and glacier zone is still not understood.

The primary objective of this thesis is to develop and invert an electromagnetic scattering model able to relate PolSAR measurables to physical quantities of glacier subsurface. Both amplitude and phase information contained in the complex backscattered signal at different polarizations are jointly taken into account. A novel three-component polarimetric scattering model is presented to describe the total backscattering as the sum of volume, surface and a newly-developed anisotropic propagation component. The latter is shown to be able to interpret polarimetric phase differences with the presence of anisotropic firn and to provide estimates of physical properties of such medium (e.g. thickness, density and degree of anisotropy). The knowledge of this kind of information would help to improve glacier facies classification and to characterize their subsurface properties. The availability of multi-temporal SAR data would allow monitoring variations of such parameters over time, which is extremely valuable for supporting mass balance estimation. Furthermore, a detailed characterization of glacier subsurface would have implication on the estimation of penetration depth which biases interferometric SAR (InSAR) and radar altimetry products.

The proposed model is used to perform a polarimetric decomposition of L- and P-band PolSAR data acquired by the DLR's E-SAR sensor over the Austfonna ice cap, Svalbard, during the SVALEX 2005 and ICESAR 2007 campaigns. The focus of the investigation is on the estimation of the thickness of the firn layer and its dependency on frequency and test site. Temporal variations over the 2005-2007 period are also assessed. Validation is carried out by comparing inversion results with ground penetrating radar and stratigraphic measurements.

---

# Kurzfassung

Die Verwendung flugzeug- wie auch satellitengetragener Fernerkundung hat die Beobachtung glaziologischer Phänomene erheblich erleichtert. Nicht nur die Möglichkeit größere Gebiete abdecken zu können, sondern auch die zeitliche und räumliche Auflösung sind ein bedeutender Vorteil. Darüber hinaus operieren Radarsysteme mit synthetischer Apertur (synthetic aperture radar – SAR) nicht nur unabhängig von Tageslicht, sondern auch unter allen Wetterbedingungen und ermöglichen somit ein kontinuierliches Monitoring. SAR Messungen, insbesondere mit langen Wellenlängen (wie z.B. L- und P-Band), sind unter trockenen Bedingungen sowohl auf Eigenschaften der Oberfläche als auch auf unterirdische Effekte von Gletschern oder Inlandeis sensitiv. Daher ist die Verwendung von SAR zur Bestimmung von glaziologischen Parametern sehr vielversprechend, wie unter anderem Gletscherfazies, Korngröße von Schnee und Firn oder Akkumulationsrate. Polarimetrisches SAR (PolSAR) ist eine Erweiterung des konventionellen SAR-Konzepts, wobei die Diversität in der Polarisation von elektromagnetischen Wellen ausgenutzt wird. Dadurch können Informationen über verschiedene Streumechanismen und auch über geometrische und dielektrische Eigenschaften gewonnen werden. Jedoch existiert keine umfassende physikalische Interpretation der SAR-Rückstreuung über Gletschern und Inlandeis, was zur Folge hat, dass das o.g. Potenzial oft nur teilweise bzw. suboptimal genutzt wird. Zum Beispiel ist nicht klar, wie sich Oberflächeneffekte im Verhältnis zu unterirdischen Strukturen verhalten, aber auch, wie dieses Verhältnis von verwendeter Frequenz, Aufnahmegeometrie und Gletschergebieten unter Beobachtung abhängt.

Das vorrangige Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und die Invertierung eines elektromagnetischen Streumodells, das PolSAR-Messungen in Abhängigkeit von physikalischen Eigenschaften der unterirdischen Gletscherstrukturen beschreibt. Das Modell berücksichtigt sowohl Amplituden- als auch Phaseninformation des komplexen Rückstreusignals in den verschiedenen Polarisationen. Das hier vorgestellte, neuartige polarimetrische Streumodell beschreibt die totale Rückstreuung als die Summe aus drei Komponenten: Volumen-, Oberflächenanteil und eine neu entwickelte Komponente, die die anisotropische Ausbreitung beschreibt. Es wird gezeigt, dass letztere in der Lage ist polarimetrische Phasendifferenzen mit Firn als anisotropisches Medium zu beschreiben und physikalische Variablen eines solchen Mediums zu schätzen (z.B. Dicke, Dichte und Anisotropiegrad). Diese Informationen sind vor allem hilfreich um Gletschergebiete zu klassifizieren und ihre unterirdischen Strukturen zu charakterisieren. Mit Hilfe von multi-temporalen SAR-Akquisitionen könnte die zeitliche Variation dieser Parameter erfasst werden, welche für die Schätzung von Eismassenbilanz von Bedeutung ist. Außerdem würde eine detaillierte Charakterisierung der unterirdischen Gletscherstrukturen die Schätzungen von

---

Eindringtiefe beeinflussen, welche Produkte aus SAR-Interferometrie und Radar-Altimetrie verfälscht.

Das vorgestellte Modell wird für eine polarimetrische Dekomposition von L- und P-Band PolSAR Daten angewandt, die vom Sensor E-SAR des DLR über der Austfonna Eiskappe in Spitzbergen im Rahmen der SVALEX2005 und ICESAR2007 Kampagnen aufgenommen wurden. Der Fokus der Untersuchung liegt auf der Schätzung der Dicke der Firnschicht und deren Variationen mit verwendeter Frequenz und Testgebiet. Außerdem werden die zeitlichen Veränderungen zwischen 2005 und 2007 behandelt. Die Ergebnisse werden mit Hilfe von Bodenradarmessungen und stratigrafischen Messungen validiert.