



TECHNICAL UNIVERSITY OF MUNICH  
Department of Aerospace and Geodesy  
Photogrammetry and Remote Sensing

Mapping of urban scenes by single-channel mmW  
FMCW SAR on circular flight and curved car  
trajectories

Stephan Palm

Dissertation

2021

---

# Abstract

---

The image based acquisition of the current situation in urban areas is of great importance for various applications. Due to the independence of weather and daylight conditions, SAR is very suitable for time-independent scene acquisition. Typically, a scene is recorded from single-channel or multi-channel sensors from a single or several temporally shifted aspect angles along linear trajectories. This thesis presents new mapping methods for comprehensive ultra-high-resolution images of urban scenes by operating a mmW SAR along circular flight trajectories (CSAR) and along curved car trajectories.

For the acquisition of a comprehensive data set with an airborne mmW SAR sensor on circular trajectories a method for a beam-stabilized sensor concept is presented. An optimized focusing method for the special geometry and high carrier frequency is described and a Video-CSAR method (ViCSAR) for the optimized visualization of many registered views by processing overlapping subapertures is proposed. The maximum resolution in the center and at the edges of the illuminated scene is derived that allow a sharp imaging of objects of a certain height.

For the reconstruction of 3d information of individual objects from single-channel CSAR data, the determined aspect-dependent movement of scattering centers above the focussing plane in the ViCSAR amplitude image sequences is evaluated. In contrast, another method is described that focuses the data on different reference heights while the circular trajectory is divided into circular arcs of larger subapertures. The 3d information is extracted by means of a proposed kurtosis and a spectral operator from the amplitude images. Two alternative approaches are presented for the fusion of a georeferenced 3d point cloud that allows a  $360^\circ$  view of the scene. Based on the point cloud, the data is refocused and several aspect views are merged into a single high-resolution SAR image. For carborne SAR acquisitions (mobile mapping), a method optimizing the focusing of street and facade surfaces is proposed.

For the validation of the CSAR and mobile mapping methods, for the first time experimental measurements along circular flight trajectories with an ultralight aircraft (94 GHz FMCW SAR) over suburban areas and a reflector field, and measurements along curved street trajectories with a van (300 GHz FMCW SAR) in the rural area and a test field were carried out.

The results demonstrate that from single-channel W-band CSAR data both high-resolution SAR images with a azimuth resolution of up to approx. 1 cm (corresponds to a coherent integration of up to  $10^\circ$ ) and 3d point clouds can be derived. The point cloud was validated with LiDAR measurements and indicates that height accuracies of isolated point objects of up to 10 cm are feasible. From the circular flight trajectories, both roofs and parts of facades could be reconstructed by 3d point clouds. ViCSAR allows not only a  $360^\circ$  scene and signature acquisition of backscatterers but also the visualization of moving objects based on the movement of their shadows in the image sequence. The movement of smaller cars and even individual people can be observed.

By mobile mapping of streets and facades, images with a resolution of up to 5 mm could be generated. In the process, structures of objects such as paving stones or clinker bricks or small cracks in road surfaces become visible. The application of the extremely small wavelengths proved to be beneficial due to the diffuse scattering characteristics in the mapping of street details and only makes the detection of moving objects based on their radar shadows on streets possible.

---

# Kurzfassung

---

Die bildliche Erfassung der aktuellen Situation urbaner Gebiete ist für verschiedene Anwendungen von hoher Bedeutung. Für eine zeitunabhängige Szenenerfassung ist der Einsatz eines SAR Systems aufgrund der Beleuchtungs- und Wetterunabhängigkeit sehr gut geeignet. Typischerweise wird eine Szene durch ein- oder mehrkanalige Sensoren aus einem einzelnen oder mehreren zeitlich versetzten Aspektwinkeln entlang linearer Trajektorien aufgenommen. Diese Arbeit präsentiert neue Mapping-Verfahren zu umfassenden ultra-hochauflösten Abbildungen urbaner Szenen durch ein mmW SAR entlang zirkularer Flugtrajektorien (CSAR) sowie entlang gekrümmter Fahrzeugtrajektorien.

Zur Aufnahme eines umfassenden Datensatzes mit einem flugzeuggetragenen mmW SAR Sensors auf kreisförmigen Trajektorien wird ein Verfahren für ein beamstabilisiertes Sensorkonzept präsentiert. Es wird eine optimierte Fokussierungsmethode für die spezielle Geometrie und Trägerfrequenz beschrieben sowie ein Video-CSAR-Verfahren (ViCSAR) zur optimierten Darstellung vieler registrierter Ansichten durch Prozessierung überlappender Subaperturen vorgeschlagen. Die maximale Auflösung im Zentrum sowie an den Rändern der beleuchteten Szene wird hergeleitet um Objekte bestimmter Höhe noch scharf abzubilden.

Zur Rekonstruktion von 3D Informationen einzelner Objekte aus einkanaligen CSAR-Datensätzen werden in einem Verfahren sowohl theoretisch als auch experimentiell die ermittelte aspektabhängige Bewegung von Streuzentren oberhalb der Fokussierungsebene in den ViCSAR-Amplitudenbildsequenzen ausgewertet. Im Gegensatz dazu wird ein weiteres Verfahren beschrieben, welches die Daten auf unterschiedlichen Referenzhöhen fokussiert, wobei die zirkulare Trajektorie in Kreisbögen größerer Subaperturen unterteilt wird und die 3D Informationen mittels eines vorgeschlagenen Kurtosis- und eines spektralen Operators aus den Amplitudenbildern extrahiert wird. Zur Fusion einer georeferenzierten 3D Punktwolke, die eine 360° Betrachtung der Szene erlaubt, werden zwei alternative Ansätze vorgestellt. Basierend auf der Punktwolke wird eine Refokussierung der Daten und die Fusion mehrerer Ansichten in einem einzigen hochauflösten SAR Bild durchgeführt. Für fahrzeuggetragene SAR Aufnahmen (Mobile-Mapping) wird ein Verfahren zur Optimierung der Fokussierung von Straßen- und Fassadenoberflächen vorgestellt.

Für die Validierung der CSAR- und Mobile-Mapping-Verfahren wurden erstmalig experimentielle Messflüge entlang zirkularer Flugtrajektorien mit einem Ultraleichtflugzeug (94 GHz FMCW SAR) über vorstädtischem Bereich und einem Reflektorfeld, sowie Messfahrten entlang gekrümmter Strassentrajektorien mit einem Van (300 GHz FMCW SAR) im dörflichen Bereich und einem Testfeld unternommen.

Die Ergebnisse demonstrieren, dass von CSAR Datensätzen im einkanaligen W-Band sowohl fokussierte hochauflöste SAR Bilder mit bis zu ca. 1 cm Azimuth Auflösung (entspricht einer kohärenten Integration von bis zu 10°) sowie 3D Punktwolken abgeleitet werden können. Die Punktwolke wurde mit LiDAR-Messungen validiert und zeigt, dass Höhengenaugigkeiten von isolierten punktförmigen Objekten bis zu 10 cm möglich sind. Aus den kreisförmigen Befliegungen konnten sowohl Dächer als auch Teile von Fassaden durch 3D Punktwolken rekonstruiert werden. ViCSAR erlaubt neben einer 360° Szenen- und Signaturerfassung von Rückstreuern auch die Visualisierung von bewegten Objekten anhand der Bewegung ihrer Schatten in der Bildsequenz. Es kann sowohl die Bewegung kleinerer Fahrzeuge wie auch einzelner Personen beobachtet werden.

Beim Mobile-Mapping von Straßen und Fassaden konnten Bilder mit bis zu 5 mm Auflösung erstellt werden. Dabei werden Strukturen von Objekten wie Pflaster- oder Klinkersteine oder Risse in Straßenoberflächen sichtbar. Die Verwendung der extrem kleinen Wellenlängen erwies sich durch das diffuse Streuverhalten bei der Abbildung von den Straßendetails als vorteilhaft und ermöglichte erst das Erkennen von bewegten Objekten anhand ihrer Radarschatten auf Straßen.