

# Kurzbericht Teil I für 6G-ICAS4Mobility zum Teilvorhaben von Hensoldt

Autor: V. Winkler

Förderkennzeichen 6G-ICAS4Mobility: 16 KISK 236

Die Arbeiten von Hensoldt im Rahmen des Forschungsprojekts „6G-ICAS4Mobility“ waren in zwei große Themenblöcke gegliedert: Zum einen ist die Sensorfusion für multi-statische Radarsysteme mit bewegten Sendern und Empfängern untersucht worden (siehe [1]), zum anderen sind Verfahren für die Radarsignal-verarbeitung bei Verwendung von MIMO- und MISO-Signalen entwickelt worden (siehe [2]). Diese Signalformen werden im Mobilfunkbereich verwendet, um die Robustheit der Datenübertragung (MISO=Multiple Input Single Output, Spatial Diversity) oder die Datenrate (MIMO=Multiple Input Multiple Output, Spatial Multiplexing) zu erhöhen. Daneben wurden weitere Signalverarbeitungsthemen wie STAP (Space Time Adaptive Processing) zur Detektion von Zielen innerhalb von Bodenclutter beleuchtet. Die Parametrisierung von Simulationen bzw. Auswertung von Messdaten basierte auf Versuchen mit Drohnen, welche von der TU Ilmenau durchgeführt worden sind. Eine Fragestellung war dabei, ob der von Hensoldt definierte Anwendungsfall „Synthetisches Apertur Radar“ auch im Rahmen der Versuche abgedeckt werden kann, also die Generierung von Luftbildern unter Erkennung von Objekten wie Fahrzeugen auf dem Boden. Es konnte gezeigt werden, dass dies mit den verwendeten omni-direktionalen Antennen nicht möglich ist, da es zu einer Überlagerung der Reflexionen aus verschiedenen Gebieten kommt. Da die auf den Drohnen installierten Empfänger aufgrund der begrenzten Traglast nur einkanalig waren, konnten STAP-Verfahren nicht experimentell überprüft werden.

Im Laufe des Forschungsprojekts wurden zusätzlich Arbeiten zur Mikro-Doppler-Klassifikation aufgenommen, um das Ausscheiden eines Partners aus dem Konsortium zu kompensieren.

Bei den Arbeiten zur Sensorfusion wurden zunächst verschiedene Architekturen betrachtet bzw. die Cramer-Rao-Schranken für multi-statische und monostatische Radarsysteme und deren Fusion hergeleitet, womit sich die Detektions- und Track-Genauigkeiten herleiten lassen. Der innovative Ansatz der Untersuchungen bestand darin, dass auch bewegte Sender (TX) und Empfänger (RX) berücksichtigt worden sind, was bislang in der Literatur in Bezug auf konkrete Realisierungen kaum zu finden ist. Dazu wurde zunächst die theoretische Erweiterung des im Tracking benutzten Kalman-Filters betrachtet, wobei die Erweiterung des bistatischen Dopplers um TX- und RX-Geschwindigkeitsvektoren und Berücksichtigung zusätzlicher Ungenauigkeiten aufgrund von INS-Fehlern bei RX und TX vorgenommen werden musste. Die Erweiterungen wurden in echtzeitfähiger Software implementiert, welche mit simulierten bistatischen Detektionen getestet wurde. Final wurde auch ein Messdatensatz aus Feldversuchen mit Drohnen getestet. Hier hat sich gezeigt, dass die Winkelpeilung zum Ziel essenziell ist, um die Anzahl der möglichen Zielhypothesen zu reduzieren, was anderweitig für den praktischen Einsatz zu einer hohen Zahl von Falschtracks führen würde. In Summe hat sich damit gezeigt, dass einkanalige Empfänger bzw. einzelne Antennen zu viele Einschränkungen aufweisen und in Zukunft die Anordnung komplexerer Antennengruppen untersucht werden muss.

Falls für die Kommunikation MIMO- oder MISO-Verfahren eingesetzt werden, besteht die Schwierigkeit zur Nutzung als Radarbeleuchter darin, dass unterschiedliche Signale gleichzeitig gesendet werden und sich überlagern, z.B. unter Verwendung unterschiedlich polarisierter

Sendeantennen. Um diese Signale auch zur Detektion von Zielen nutzen zu können, muss die Überlagerung berücksichtigt werden. Dieses fundamentale Problem ist in den meisten Veröffentlichungen bislang ignoriert oder nur teilweise adressiert worden. Daher wurden entsprechende Signale simuliert und die Mehrdeutigkeitsfunktionen berechnet. Dabei hat sich gezeigt, dass die Pilot- oder Referenzsymbole zusätzliche Maxima erzeugen, was zu Falschzielen führt bzw. einer generellen Beeinträchtigung der Detektionsleistung. Die Position der Nebenmaxima hängt von der verwendeten Kodierung bei den Pilotsymbolen ab, wobei „Walsh-Hadamard-Encoding“ und „Null Pilot Encoding“ beim LTE- und 5G-NR-Standard zum Einsatz kommen. Es konnten Filter gefunden werden, welche die Nebenmaxima unterdrücken und nur zu geringen Verlusten in Bezug auf das Signal-zu-Rauschverhältnis führen. Da der Dynamikbereich der Mehrdeutigkeitsfunktionen, also der Abstand des Hauptmaximums zu den Nebenkeulen, in realen Szenarien zu gering ist, werden zusätzlich CLEAN-Verfahren benötigt, welche Direktsignale und starke Mehrwegeausbreitungskomponenten von den Zielsignalen entfernen. Ein erweitertes CLEAN-Verfahren wurde entwickelt und die überlegene Detektionsleistung im Vergleich zur Prozessierung mit einem einzelnen überlagerten Sendesignal gezeigt. Zur Rekonstruktion der Sendesignale müsste der 5G-NR-Standard modifiziert werden, da für die Auswertung von Symbolen bei der Kommunikation bestimmte Informationen wie die Precoding-Matrix bei MIMO oder Referenzsymbole nach dem Precoding nicht notwendig sind. Diese werden aber für eine kohärente Integration bzw. Rekonstruktion der Sendesignale im Radarbetrieb benötigt.

In Bezug auf die Mikro-Doppler-Klassifikation wurden auch Feldversuchsdaten von Drohnen der TU Ilmenau ausgewertet. Dazu wurde eine Applikation entwickelt, welche Range-Doppler-Matrizen aus den aufgezeichneten Impulsantworten berechnet und ein Range-Doppler-Tracking mit den Zieldetektionen durchführt. Da das Doppler-Spektrum einer Drohne zusätzliche Maxima aufweist, konnten die resultierenden Detektionen bei derselben bistatischen Entfernung zu Gruppen-Tracks zusammengefasst werden und das Maximum vom Drohnenkörper von den Maxima, welche durch die Rotoren entstehen, unterschieden werden. Ein Gruppentrack wurde dabei bei Vorhandensein mehrerer Detektionen bei derselben Entfernung und Symmetriemerkmale im Spektrum initialisiert. Die Gruppengeschwindigkeit konnte mit Hilfe eines geeigneten Kalman-Filters geschätzt werden. Durch die Unterscheidung des Hauptmaximums von den Nebenmaxima können Falsch-Tracks vermieden werden, was in Veröffentlichungen typischerweise nicht diskutiert wird. Durch Aufsammeln von Doppler-Spektren über der Zeit konnte Spektrogramme gebildet werden, aus denen Merkmale extrahiert werden konnte. In den Daten zu den Feldversuchen waren keine verschiedenen Zieltypen vorhanden, so dass für die Anwendung von Deep Learning-Verfahren auf die Spektrogramme Daten aus einer Messkammer der TU Ilmenau mit bistatischer Messanordnung herangezogen worden sind. Dabei gab es die Zielklassen Fußgänger, Fahrradfahrer und zwei unterschiedliche Drohrentypen. Die Zielklassen konnten sehr gut voneinander unterschieden werden, allerdings würden in Außenversuchen zusätzliche Effekte wie vermindertes Signal-zu-Rauschverhältnis oder Mehrwegeausbreitung auftreten, so dass in Zukunft entsprechende Daten gesammelt und weitere Test durchgeführt werden sollten.

[1] V. Winkler and B. Knoedler, "Performance Limits for Drone Applications With Integrated Communication and Sensing in 6G Networks," *2024 International Radar Symposium (IRS)*, Wroclaw, Poland, 2024, pp. 200-205.

[2] V. Winkler, "Waveform Design Aspects for 6G-Integrated Communication and Sensing," *2025, 26th International Radar Symposium (IRS)*, Hamburg, Germany, 2025, pp. 1-10, doi: 10.23919/IRS64527.2025.11046149.