

Radarbasiertes Bildgebungsverfahren mit hoher Winkelauflösung für Messsysteme mit geringer Antennenanzahl

Stephan Kolb

Radarsysteme sind bei einer Vielzahl von Applikationen äußerst nützliche Sensoren. Bei der von dieser Arbeit adressierten Anwendung der industriellen Füllstandsmesstechnik vereinen sich die Eigenschaften einer hohen Präzision, einer Autarkie von Sichtverhältnissen und der Möglichkeit einer kontaktlosen Messung bei Einsatz eines radarbasierten Messsystems. Allerdings können etablierte monostatische Systeme teilweise nicht zwischen der Reflexion des eigentlichen Füllstands und weiteren Störreflexionen, verursacht z. B. durch Tankeinbauten, unterscheiden. Dieser Umstand hat eine reduzierte Zuverlässigkeit der Messeinrichtung zur Folge. Die Schlüsselfunktion zur Verbesserung der Ausfallsicherheit liefert ein abbildendes Radarsystem durch die Bereitstellung von mehrdimensionalen Messdaten. Die Anforderungen an die Genauigkeit für die erweiterten Dimensionen definieren die Ausdehnung des eingesetzten Sensors in seiner Realisierung als Gruppenantenne. Im Allgemeinen darf der Abstand der Einzelantennen dabei nicht die halbe Wellenlänge der Mittenfrequenz überschreiten, so dass eine hohe Aperturausdehnung gleichbedeutend ist mit einer hohen Antennenanzahl. In entsprechendem Maß steigen die Kosten für ein derartiges System. Infolgedessen sind Ansätze zur Reduzierung der Antennenanzahl für eine wirtschaftliche Umsetzung von bildgebenden Radarsystemen erforderlich und werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersucht.

Eine Verletzung der Einzelabstandsregel führt zu unterbesetzten Gruppenantennen, die bei schmalbandigen Messungen aufgrund von Mehrdeutigkeiten nicht einsetzbar sind. Es kann jedoch gezeigt werden, dass mit Anhebung der Messbandbreite jene Sekundärmaxima des Abbildungsverhaltens in ein erhöhtes Nebenmaximaniveau umgewandelt werden können. Dieser vermeintliche Nachteil ist allen Maßnahmen zur Reduzierung der benötigten Einzelantennen gemein (z. B. Antennengeometrien mit minimaler Redundanz) und führt unweigerlich zur Maskierung von Radarzielen mit niedriger Reflektivität durch dominante Reflexionen. Der Zusammenhang ist deterministisch und kann mithilfe eines systemtheoretischen Ansatzes beschrieben werden. Zu diesem Zweck wird das frequenzabhängige Verhalten der Gruppenantenne und des nachfolgenden Radarsystems in Form einer Zielimpulsantwort zusammengefasst, die Radarziele im Raum und die resultierenden Messdaten miteinander verknüpft. Somit kann eine lineare Abhängigkeit zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße eines bildgebenden Systems angegeben werden, die der Operation einer Faltung folgt. Mit Durchführung einer inversen Faltung kann aus den Messdaten auch auf maskierte Radarziele zurückgeschlossen werden.

Zunächst erfolgt isoliert von der Anwendung bei Radarsystemen die Präsentation inverser Verfahren für die ein- und mehrdimensionale, diskrete, finite Faltung. Rauscheinfluss verbietet dabei die Anwendung einer simplen Matrixinversion und motiviert die Einprägung von Nebenbedingungen für die gesuchte Lösung. Neben der Vorgabe eines Störabstands von Nutz- und Rauschsignal begünstigt insbesondere die Suche nach einer dünnbesetzten Lösung die vollständige Rekonstruktion der Anregungsfunktion. Eben jene dünnbesetzten Lösungen korrespondieren ausgezeichnet mit der Situation bei Radarsystemen, da in Relation zu dem zu beobachtenden Raum meist eine verhältnismäßig geringe Anzahl von Punktzielen vorliegt. Auf Basis eines frequenzbereichsmessenden Radarsystems werden dann exemplarische Untersuchungen anhand unterschiedlicher Antennengeometrien bei Variation der Messbandbreite durchgeführt. Simulationsgestützte Testreihen belegen anhand typischer Fehlerkriterien die Anwendbarkeit von unterbesetzten Antennensystemen in Verbindung mit breitbandig messenden Radarsystemen. Darüber hinaus ist die Praxistauglichkeit des Verfahrens mit geeigneten Messungen zu bestätigen. Zu diesem Zweck werden Messdaten einer multistatischen, synthetischen Apertur bei einer Mittenfrequenz von 10.3 GHz und einer Bandbreite von etwa 4 GHz sowohl konventionell als auch mit der vorgestellten Methode zur Lösung des inversen Problems unter der Annahme von wenigen Zielen im Raum verarbeitet. Während das herkömmliche Verfahren durch die unterbesetzte Struktur der Gruppenantenne Mehrdeutigkeiten aufweist, zeigt das Ergebnis der neuen Methode eine trennscharfe und eindeutige Reflexionsverteilung. Das größte Einsparpotential kann dabei mittels einer Antennengeometrie mit minimaler Redundanz erzielt werden, deren Grundabstand der Einzelantennen zu einer unterbesetzten Struktur skaliert wurde.