

Fraktale Antennenkonzepte für die Füllstandmessung mit MIMO Radarsystemen

Christoph Dahl, Lehrstuhl für Hochfrequenzsysteme, Ruhr-Universität Bochum

Die Bestimmung von Füllständen in Tanks und Silos stellt eine wichtige Messaufgabe in industriellen Anlagen dar. Aufgrund der speziellen Anforderungen an Druck und Temperatur, sowie der Robustheit gegenüber Anhaftungen, Staub und Schaumbildung, hat sich die berührungslose Füllstandmessung mit Radarsystemen in vielen Anwendungen durchgesetzt. Hierbei werden frequenzmodulierte Dauerstrich-(engl. Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW)) Radare mit stark bündelnden Antennen an der Decke der Tanks oder Silos montiert, die durch eine Laufzeitmessung der an der Oberfläche des Füllguts reflektierten elektromagnetischen Wellen eine Bestimmung des Füllstands ermöglichen. Das Füllvolumen von Flüssigkeiten kann bei bekannter Tankgeometrie aufgrund der ebenen Oberfläche mit hinreichender Genauigkeit aus der Entfernungsmessung berechnet werden. Im Gegensatz hierzu bilden Schüttgüter in Silos komplexe Oberflächenprofile, sodass für die genaue Bestimmung des Füllvolumens eine vollständige Erfassung der Oberfläche durch ein bildgebendes Radarsystem erforderlich ist. Hierzu können die Radarsysteme durch den Einsatz mechanisch geschwenkter Antennen erweitert werden. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Zuverlässigkeit einer solchen Mechanik, steigen hierdurch die Kosten des Messsystems signifikant. Radarsysteme mit aktiver elektronischer Strahlschwenkung (engl. Active Electronically Scanned Array (AESA)) kommen ohne bewegliche Teile aus, indem sie Gruppenantennen aus vielen aktiven Sende-/Empfangsmodulen bilden. Durch das Verwenden von Gruppenantennen mit getrennten Sende- und Empfangselementen ermöglichen Radarsysteme mit mehreren Sende- und Empfangskanälen (engl. Multiple Input Multiple Output (MIMO)) eine effiziente Nutzung der zur Verfügung stehenden Antennenelemente. Durch die von der Automobilindustrie getriebene steigende Verfügbarkeit integrierter MIMO Radarsysteme im Frequenzbereich von 77-81 GHz wird die Realisierung von kostengünstigen, bildgebenden Radarsystemen für die Füllstandmessung ermöglicht.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein MIMO Radarsystem mit 18 Sende- und 24 Empfangskanälen für die Füllstandmessung von Schüttgütern erforscht, das durch das Anwenden fraktaler Antennenanordnungen die Abbildungseigenschaften optimiert. Zunächst erfolgt eine Gegenüberstellung der verschiedenen bildgebenden Radarverfahren insbesondere mit Blick auf die hier betrachtete Anwendung. Dabei werden die Abbildungseigenschaften in Form von Punktzielantworten analysiert, die bei MIMO Radarsystemen über den virtuellen Gruppenfaktor gegeben sind, der sich aus der Anordnung der Sende- und Empfangsantennen ergibt.

Für die Berechnung der Radarbilder und die Detektion der Schüttgutoberfläche wird eine effiziente Signalverarbeitung durch den Einsatz der Chirp-z-Transformation (CZT) implementiert. Durch das Anwenden der Apertursynthese wird ein Messsystem entwickelt, mit dem verschiedene MIMO Antennenanordnungen getestet werden können. Hierzu werden äquivalente Messpositionen mit einem Kreuztisch angefahren, um die Punktzielantwort des MIMO Radars aus monostatischen Radarmessungen zu synthetisieren. Anhand von Messungen wird die Äquivalenz der beiden Messmethoden bestätigt. Die Eignung von MIMO Radarsystemen zur Füllstandmessung von Schüttgütern wird anhand eines anwendungsnahen Szenarios in Form eines Sandhaufens evaluiert. Hierbei werden mit dem Apertursyntheseverfahren die Anzahl der erforderlichen Sende- und Empfangselemente anhand von quadratischen Antennenanordnungen unterschiedlicher Größe ermittelt und der Einfluss auf die Messgenauigkeit des Füllvolumens untersucht.

Der Einsatz von fraktalen Antennenanordnungen zur Optimierung der Antennenanordnung von MIMO Radarsystemen stellt einen Schwerpunkt dieser Arbeit dar. Hierbei werden fraktale Antennenanordnungen auf dem quadratischen Gitter in Form des Quartett Fraktals und auf dem hexagonalen Gitter in Form des Gosper Insel Fraktals und des Fudgeflake Fraktals analysiert. Durch das Erzeugen von kreisähnlichen, fraktalen Antennenanordnungen auf dem hexagonalen Gitter können die Abbildungseigenschaften eines MIMO Radarsystems bezüglich der Nebenkeulendämpfung und der Winkelauflösung gegenüber einer herkömmlichen quadratischen Antennenanordnung deutlich verbessert werden. Ebenfalls werden Konzepte zum symmetrischen Ausdünnen der fraktalen Antennenanordnung entwickelt, die eine Steigerung der Winkelauflösung auf Kosten der Nebenkeulendämpfung ermöglichen. Anhand eines aus zwei Tripelspiegeln bestehenden Referenzszenarios können die Vorteile der fraktalen Antennenkonzepte bestätigt werden.

Die Ergebnisse der Arbeit werden durch die Entwicklung eines Demonstratorsystems in die Anwendung überführt. Hierzu werden sechs MIMO Radarchips mit jeweils drei Sende- und vier Empfangskanälen zu einer fraktalen Antennenanordnung bestehend aus 18 Sende- und 24 Empfangselementen kombiniert. Mit Hilfe von elektromagnetischen Simulationen werden Patch-Antennen für den Frequenzbereich von 77-81 GHz entwickelt. Durch die Realisierung einer Testplatine können verschiedene Speisekonzepte der Antennenelemente verifiziert werden. Die erfolgreiche Synchronisation der verschiedenen Radarchips des Demonstratorsystems wird anhand von Messungen bestätigt. Das erforschte Sensorkonzept ermöglicht eine effiziente Realisierung eines bildgebenden Radarsystems für die Füllstandmessung von Schüttgütern.