



QUANTENKORRELATION VERBESSERT RADAR- TECHNIK

Die Radartechnologie wird seit Jahrzehnten immer weiter vorangetrieben und perfektioniert. Aktuelle Forschungen zielen nun darauf ab, sogar deren fundamentale Leistungsgrenzen zu verschieben. Potenzielle Anwendungsfelder reichen von der Luftfahrt bis hin zur Medizintechnik. Das Mittel dazu: Quantentechnologie.

Radar (Radio Detection and Ranging) ist eine leistungsfähige Messmethode zur berührungsfreien Nah- und Fernerkundung mit elektromagnetischen Wellen im Mikrowellenbereich. Es bildet die Basis für eine Vielzahl praktischer Anwendungen, die sich von der Weltraumerkundung über die Erschließung von Rohstoffen bis hin zur Detektion, Identifikation und Verfolgung von Objekten erstrecken.

Grundlagen der Radartechnik

Das Funktionsprinzip ist einfach: Eine Quelle sendet ein gerichtetes Mikrowellensignal in die Umgebung. Objekte im Ausbreitungspfad reflektieren Teile des Signals, die ein Empfänger registriert. Aus dem detektierten Signal kann dann auf die Existenz des Objekts und weitere Eigenschaften geschlossen werden, etwa die Entfernung zum Empfänger, die Bewegungsrichtung und die Geschwindigkeit. In der Praxis treffen auf den Empfänger leider nicht nur die eigentlichen Nutzsignale, sondern immer auch Störsignale, zum Beispiel durch unvermeidbares Umgebungsrauschen. Insbesondere kann das Nutzsignal durch Absorption, geringe Reflektivität oder große Entfernung des Objekts so schwach sein, dass es im Rauschhintergrund untergeht. Unterhalb dieser Nachweisgrenze ist

die Detektion eines Objekts nicht mehr möglich. Deshalb basiert heutige Radartechnik auf modernen Signalverarbeitungsverfahren, die das Nutzsignal effizient aus dem Rauschhintergrund herausfiltern. Besonders wirkungsvoll sind Methoden, die Korrelationen zwischen Sende- und Empfangssignal ausnutzen. Sie verbessern das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SRV) und erhöhen damit die Reichweite und Güte einer Radarmessung. Hierbei gibt es allerdings eine theoretische Grenze.

Klassische SRV-Grenze quantenmechanisch ausweiten

Nach den riesigen Fortschritten im Bereich der Quantenwissenschaften ergab sich sofort die Frage, ob diese theoretische Grenze durch den Einsatz von Quantentechnologien weiter verschoben werden kann. Die Antwort sei hier gleich vorweggenommen: Ja, durch Ausnutzen von Quantenkorrelationen ist das prinzipiell möglich. In der Fachliteratur ist dann von einem Quantenvorteil die Rede. Dieser Quantenvorteil ist nicht auf den Mikrowellenbereich und Radarsysteme im engen Sinn beschränkt, sondern ist prinzipiell für alle Anwendungen zu erwarten, die auf einem Abbildungsprinzip analog zur Radartechnik basieren. Hierzu zählen bildgebende Verfahren aus der Medizintechnik sowie spektroskopische Methoden wie die Elektron- (ESR) und Kernspinresonanz (NMR). Besonders attraktiv ist der Einsatz von Quantentechnologien für diejenigen Anwendungen, die bereits nahe an der klassischen Grenze des SRVs betrieben werden.

Quantenkorrelationen und ihre Anwendungen im Quantenradar

Faszinierende und rein quantenmechanisch erklärbare Korrelationen sind Verschränkung und Diskord. Ein aktuell verfolgter Ansatz für ein Quantenradar basiert auf beiden Effekten. An Stelle von klassischen Mikrowellen werden

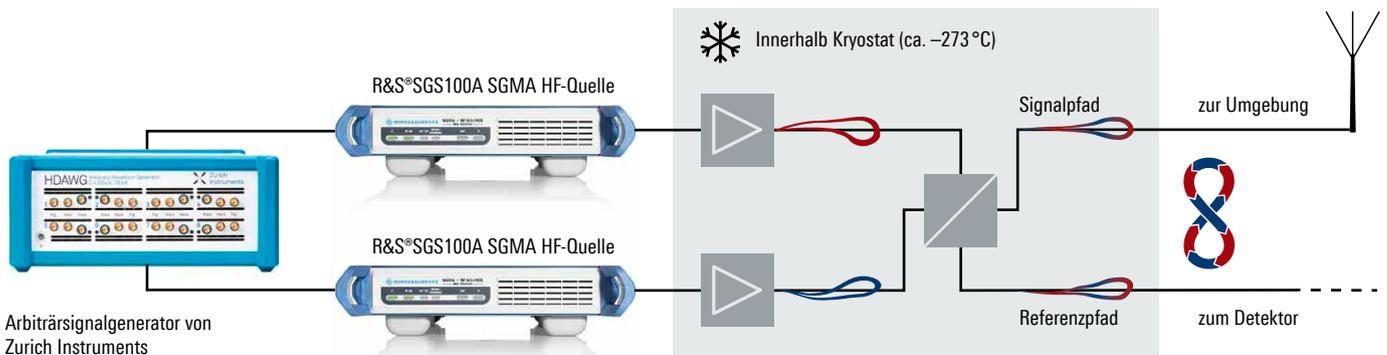
Objekte mit Hilfe von verschränkten Mikrowellensignalen detektiert. Forschende am Walther-Meißner-Institut erzeugen solche Signale bereits seit über zehn Jahren mit Hilfe von supraleitenden Schaltkreisen. Die gleichen Schaltkreise inklusive ihrer komplexen Kühltechnik bilden auch die Basis für supraleitende Quantencomputer, was einen weiteren Forschungsschwerpunkt des Instituts darstellt. Dadurch ergeben sich erhebliche Synergieeffekte bei der Technologieentwicklung.

Auf dem Quantendiskord basiert eine besonders praxisrelevante Eigenschaft des Quantenradars: Es büßt den Quantenvorteil auch dann nicht vollkommen ein, wenn ein Teil der Quantenkorrelationen im Verlauf des Detektionsprozesses verloren geht. Das ist fundamental wichtig, da die Quantenverschränkung inhärent fragil ist und durch Interaktion mit dem unvermeidbaren Rauschhintergrund oder bei der Reflexion des Signals am Objekt leicht zerstört wird. Trotzdem kann noch mit einem Quantenvorteil gerechnet werden. Diese Robustheit lässt sich intuitiv so verstehen, dass selbst nach dem Brechen der Verschränkung noch allgemeinere Quantenkorrelationen – der Quantendiskord – zwischen Sende- und Referenzsignal bestehen.

Verschränkte Mikrowellen im Quantenradar

Für eine Implementierung des Quantenradars werden zwei sogenannte gequetschte Zustände (siehe Infobox „Gequetschte Zustände“ am Ende des Artikels) erzeugt und in einem Strahlteiler überlagert. Dieser Vorgang resultiert in zwei räumlich getrennten und stark quantenkorrelierten Pfaden, dem Signal- und Referenzpfad (Bild 1). Der Signalpfad wird analog zum klassischen Radar in die Umgebung entsandt, der Referenzpfad hingegen führt

Bild 1: Signalpfad und Referenzpfad sind in einem Quantenradar stark quantenkorreliert.



direkt zu der Detektionseinheit des Quantenradars. Die beiden Pfade, präziser gesagt, die Feldquadraturen P und Q , sind quantenverschränkt (siehe Infobox „Verschränkung“). Eine wiederholte lokale Messung des Signalpfads oder des Referenzpfads gibt keinerlei Informationen über den jeweiligen Pfad preis, die Messergebnisse sind vollkommen normalverteilt und sehen damit aus wie ein Rauschen. Interessanterweise gibt jedoch eine Messung von P in einem Pfad direkten Aufschluss über Q in dem anderen Pfad. Wie kann man sich dieses interessante Phänomen aber zunutze machen?

Quantendetektor für einzelne Mikrowellen-Photonen

Dafür bedarf es der sogenannten gemeinsamen Messung. Hier werden in einem Quantendetektor Empfangssignal und Referenzsignal auf eine spezifische Art und Weise gemischt und dann in Einzelphotonendetektoren eingekoppelt. Das Überlagern der beiden Signalkomponenten in einem speziellen Mischer wandelt die verbleibenden Quantenkorrelationen in eine messbare Größe. In diesem Fall ist die Messgröße die Anzahl an detektierten Photonen. Einzelne Mikrowellenphotonen zu zählen ist aufgrund der kleinen Energieskalen eine anspruchsvolle Messaufgabe, deshalb sind Mikrowellen-Einzelphotonendetektoren Schlüsselkomponenten im Quantenradar. Sie können mit Hilfe von supraleitenden Quantenbits (Bild 2) realisiert werden und sind so empfindlich, dass sie die kleinste Energieeinheit der elektromagnetischen Welle – ein einzelnes Photon – auflösen können.

Eine wiederholte Messung mit dem Quantendetektor liefert zwei unterschiedliche Messverteilungen, je nachdem ob das Empfangssignal einen Teil des Sendesignals enthält, also von einem Objekt reflektiert wird, oder das

Sendesignal verloren geht, also nicht auf ein Objekt trifft. Können wir nun ein Messergebnis einer dieser Verteilungen zuordnen, so lässt sich direkt auf die Präsenz oder Absenz eines Objekts schließen. Bemerkenswert ist an dieser Stelle, dass diese Unterscheidung im Quantenempfänger möglich ist, obwohl die empfangene Signalstärke in beiden Fällen identisch sein kann. Die gewonnenen Informationen resultieren demnach rein aus den Korrelationen zwischen Empfangssignal und Referenzsignal.

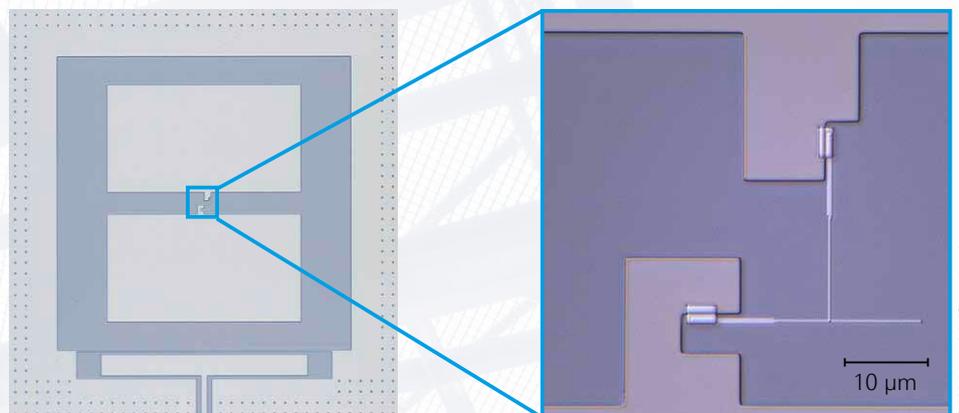
Zusammengenommen bilden verschränktes Sendesignal und Quantenempfänger ein Quantenradar, das bei gleicher Sendeleistung durch das Ausnutzen von Quantenkorrelationen ein verbessertes SRV aufweist. Für den vorgeschlagenen Detektor beträgt dieser Quantenvorteil einen Faktor zwei (3 dB) bezogen auf das bestmöglich SRV ohne Quantenkorrelationen. Weitere Verbesserungen sind möglich. So gilt der diskutierte Quantenvorteil von 3 dB nur für den einfachsten Fall der Verschränkung von zwei Signalmoden. Prinzipiell kann aber auch eine größere Anzahl an Moden miteinander verschränkt werden. In diesem Fall wird erwartet, dass sich der Quantenvorteil proportional zur Anzahl der verschränkten Moden erhöhen lässt. Aktuell arbeiten zahlreiche Forschungsgruppen auf der ganzen Welt daran, diese noch offenen Fragen zu klären.

Herausforderungen und das Engagement von Rohde & Schwarz

Das Ausnutzen von Quantenkorrelationen beim Quantenradar erfordert eine Erweiterung der klassischen, auf Korrelationsfiltern und Ambiguitätsfunktion basierenden Radartheorie. Hierbei treten einige physikalische und technologische Herausforderungen auf, insbesondere wenn der Blick auf einen feldtauglichen Einsatz der Quantenradartechnologie gerichtet wird. So kann beim heutigen

Bild 2: Mikroskopaufnahme eines supraleitenden Qubits. Die beiden hellen Rechtecke (links) aus Niobium liefern die passenden Kapazitäten, die über eine nichtlineare Induktivität mittels eines Josephson-Kontakts aus Aluminium gekoppelt sind (rechts). So entsteht ein LC-Schwingkreis, der effektiv ein Zweizustandssystem bildet.

-  Parametrischer Verstärker
-  Strahlteiler
-  Gequetschter Mikrowellenpuls
-  Gequetschter Mikrowellenpuls
-  Verschränkte Mikrowellenpulse
-  Mikrowellenkabel
-  Quantenkorrelationen



© Waelther-Meißner-Institut

Stand der Technologie ein Quantenvorteil nur für ausgesprochen niedrige Signalleistungen erreicht werden. Deshalb wird ein Quantenradar zunächst für Anwendungen in Frage kommen, bei denen bei kleinen Reichweiten der Sender unerkannt bleiben möchte oder eine breitbandige Störung unserer mobilen Kommunikationsinfrastruktur vermieden werden soll. Mittelfristig muss aber nach Lösungen gesucht werden, wie der Signalpegel signifikant angehoben werden kann, ohne dabei die Quanteneigenschaften zu zerstören. Klassische Verstärkerkonzepte sind hierzu nicht verwendbar. Als Nahziel steht der experimentelle Nachweis eines Quantenvorteils in Laborexperimenten im Vordergrund, bei denen das gesamte Experiment in einer Tieftemperaturapparatur durchgeführt wird (Bild 3 rechts). Während die Erzeugung von quantenverschränkten Mikrowellensignalen und der Quantendetektor hier bereits in ihrer Funktion vollständig implementiert werden, können der Umgebungseinfluss und das Objekt durch passende Komponenten simuliert werden.

Zur Durchführung dieser Experimente spielen Geräte von Rohde&Schwarz und Zurich Instruments eine zentrale Rolle. So kann eine Kombination aus R&S®SGS100A SGMA HF-Quellen und HDAWG 750 MHz Arbiträrsignalgeneratoren zur Erzeugung quantenverschränkter

Mikrowellen mit einer Frequenz von einigen Gigahertz mit supraleitenden Quantenschaltkreisen eingesetzt werden.

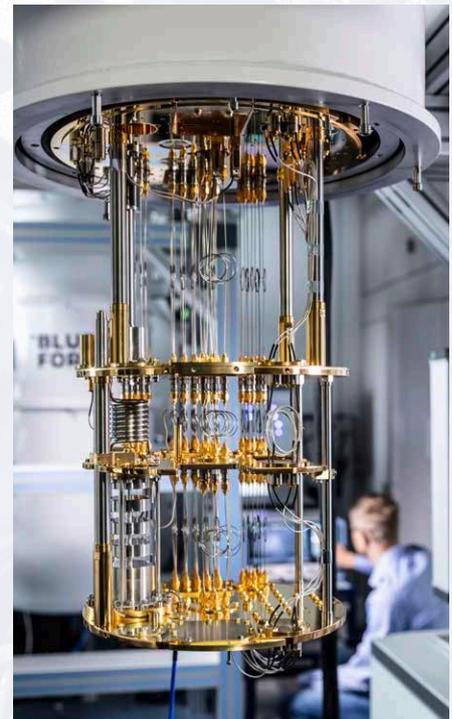
Auch für die Realisierung des Quantenempfängers spielen diese Komponenten eine zentrale Rolle, sowohl im Mischer als auch in den Einzelphotonendetektoren. Außerdem ermöglichen Vektornetzwerkanalysatoren, Spektrumanalysatoren und Oszilloskope von Rohde&Schwarz die Kalibrierung und Vorcharakterisierung des Aufbaus.

Auf dem Weg zu potenziellen Anwendungen müssen noch zahlreiche technische Herausforderungen überwunden werden. Sie reichen von der Signalaufbereitung und der Signalübertragung von den Tieftemperatur- auf die Raumtemperaturkomponenten bis hin zum Betrieb eines Systems unter Alltagsbedingungen. Diese Herausforderungen geht ein Münchner Team aus Wissenschaft und Industrie in dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojekt QUARATE an. Rohde&Schwarz gehört dem Projekt als Partner und Projektkoordinator an.

FABIAN KRONOWETTER, ROHDE & SCHWARZ



Bild 3: Messaufbau am Walther-Meißner-Institut mit Kryostat (rechts) und einem R&S®ZNA Vektornetzwerkanalysator (links) zur Analyse der Resonanzen supraleitender Schaltkreise.



GEQUETSCHTE ZUSTÄNDE

Am Walther-Meißner-Institut werden verschränkte Mikrowellen-signale für Quantenradare mit Hilfe von sogenannten gequetschten Zuständen erzeugt. Dafür kommt ein supraleitender parametrischer Verstärker zum Einsatz. Er funktioniert analog zu einer Schaukel, bei der Kinder durch eine periodische Hoch-Tief-Bewegung intuitiv die effektive Seillänge der Schaukel variieren und dadurch die Schwingungsamplitude parametrisch verstärken. Dem Parameter Seillänge entspricht beim supraleitenden parametrischen Verstärker die Induktivität eines elektrischen Schwingkreises, die mit einem Pumpsignal periodisch moduliert wird. Damit lässt sich eine Quadratur P des Mikrowellensignals $P \cdot \sin\omega t + Q \cdot \cos\omega t$ verstärken, während gleichzeitig die dazu orthogonale Quadratur Q abgeschwächt wird. Gemäß der Heisenbergschen Unschärferelation sind P und Q nicht gleichzeitig beliebig genau messbar, sondern das Produkt $\Delta P \cdot \Delta Q$ ihrer Unschärfen muss immer einen minimalen Wert übersteigen. Mit Hilfe eines parametrischen Verstärkers lässt sich aber die Unschärfe der einen Quadratur zu Ungunsten der dazu orthogonalen

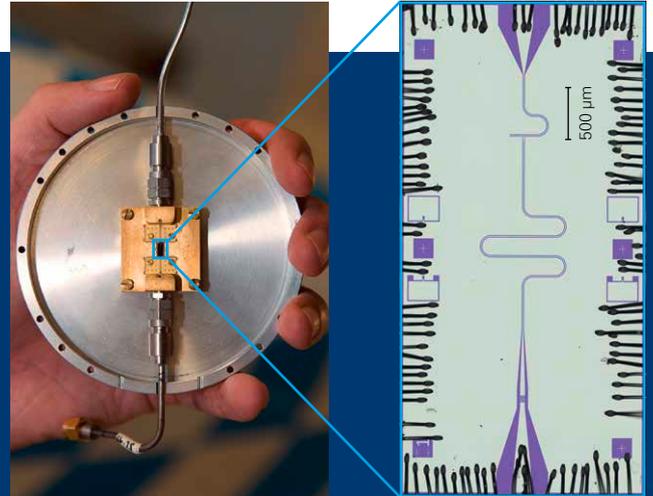


Bild 4: Struktur eines supraleitenden parametrischen Verstärkers.

sogar unter den Wert der Nullpunkts- oder Vakuum-Fluktuationen reduzieren. In diesem Fall liegt ein gequetschter Zustand vor. Das Unterschreiten der Nullpunkts-Fluktuationen ist eine Vorbedingung zum Erreichen eines Quantenvorteils.

VERSCHRÄNKUNG

Quantenphysikalische Korrelationseffekte wie die Verschränkung sind uns im Alltagsleben fremd. In der klassischen Physik lässt sich ein Gesamtsystem, das zum Beispiel aus zwei Teilen zusammengesetzt ist, immer trennscharf in seine beiden Komponenten zerteilen. Der Zustand der beiden Komponenten, charakterisiert durch beispielsweise die Eigenschaften rot und blau, ist dabei immer wohldefiniert und das Zusammenwirken beider Komponenten erklärt das Verhalten des Gesamtsystems vollständig. In der Quantenwelt trifft dies nicht mehr zu. Hier kann ein verschränkter Zustand des Gesamtsystems vorliegen, der zwar auch wohldefiniert ist, sich aber nicht mehr durch zwei Teilsysteme mit jeweils eigenen, wohldefinierten Zuständen (rot und blau) beschreiben lässt. Vielmehr befinden sich die Teilsysteme in einer Überlagerung aus möglichen Zuständen. Verschränkung bedeutet nun, dass jedem Zustand des einen Teilsystems der korrespondierende Zustand des anderen Teilsystems zugeordnet ist.

Ergibt eine Messung, dass das eine Teilsystem im Zustand rot ist, weiß ein Beobachter oder eine Beobachterin sofort, dass sich das andere Teilsystem im Zustand blau befindet. Die Messergebnisse an den Komponenten eines verschränkten Systems sind also korreliert. Wären sie völlig unabhängig, könnten bei einer Messung auch beide Systeme im Zustand blau oder beide Systeme im Zustand rot sein und aus dem Wissen über das eine Teilsystem ließe sich nicht mit Sicherheit auf das andere Teilsystem rückschließen.

Nachdem dieses Phänomen den Horizont der klassischen Physik übersteigt, ist die Rede von Quantenkorrelationen. Da die beiden Subsysteme beliebig weit voneinander entfernt sein können, hat Albert Einstein das Phänomen der Verschränkung als spukhafte Fernwirkung bezeichnet und versucht, es durch Gedankenexperimente zu widerlegen. Seine Existenz ist heute aber gesichert und wird bereits in Anwendungen technisch genutzt.

QUARATE

Seit Februar 2021 arbeiten Rohde&Schwarz, das Walther-Meißner-Institut, die Technische Universität München und das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) zusammen im dreijährigen Verbundprojekt QUARATE (kurz für Quantenradar-Team). Sie ermitteln die wissenschaftlich-technischen Grundlagen für ein quantenbasiertes Radar und bewerten die Perspektiven für die feldtaugliche Umsetzung. Von den erarbeiteten Erkenntnissen können auch Nachbarbereiche wie Metrologie oder Bildgebung profitieren. Dafür steht ein Projektvolumen von 3,1 Millionen Euro zur Verfügung, rund drei Viertel davon stellt das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) bereit.