

Quantencomputing: unglaublich vielseitig, schnell und kostengünstig



Quantencomputing hat das Potenzial, hunderte Millionen Mal schneller zu sein als bestehende Lösungen, und das zu einem Bruchteil der entsprechenden Entwicklungskosten [1]. Dies wird aber nur dann der Fall sein, wenn die Entwickler von Quantencomputern sicherstellen können, dass die Qubit-Antriebsfähigkeit der Mikrowellensignalquelle genau, synchronisiert, zuverlässig und konsistent ist [2].

Moore's Law gilt nicht mehr

1975 stellte Gordon Moore, Mitbegründer von Fairchild Semiconductor und Intel, die Theorie auf, dass sich die Anzahl der Komponenten pro integriertem Gerät „alle zwei Jahre“ verdoppeln würde. Diese Vorhersage, die als „Moore's Gesetz“ bekannt ist, wurde zum Ziel der Miniaturisierung in der Halbleiterindustrie, insbesondere für die Weiterentwicklung klassischer Computer in Bezug auf Rechenleistung und -geschwindigkeit. Seit 2010 berichten Mikroprozessor-Architekten von einer branchenweiten Verlangsamung unter das von Moore's Gesetz vorhergesagte Tempo. In den letzten zwanzig Jahren hat sich das Quantencomputing als Ergänzung zu den laufenden Entwicklungen im Bereich des klassischen Computing herausgebildet. Quantencomputer haben das Potenzial, komplexe Probleme schneller und effizienter zu lösen als klassische Computer.

Rechenleistung von Quantencomputern

Die Rechenleistung klassischer Computer steigt linear mit der Anzahl der Bits/Komponenten pro integriertem Gerät. Die Rechenleistung von Quantencomputern steigt exponentiell mit der Anzahl der Qubits [1]. Ein Qubit ist ein quantenmechanisches Resonatorgerät mit zwei Zuständen, das die Eigenschaften der Quantenmechanik aufweist (unter Nutzung der Eigenschaften atomarer und subatomarer Materie) [5]. Beim klassischen Rechnen muss ein einzelnes Bit einen von zwei Zuständen annehmen, entweder 1 oder 0. Beim Quantenrechnen weist ein Qubit wellenartige, mehrdimensionale Eigenschaften auf, die sich in einer kohärenten „Superposition“ von zwei Zuständen gleichzeitig befinden müssen (die Wahrscheinlichkeit, eine 0 zu messen, ist gleich der Wahrscheinlichkeit, eine 1 zu messen). Die kohärente Überlagerung ist analog zu den Eigenschaften des Punktaustauschs bei einer einzelnen Frequenz (verschiedene Amplituden innerhalb eines wahrscheinlichen Bereichs, oder mit anderen Worten: X-Wahrscheinlichkeit misst Y-Wert) [1, 3].

Quantencomputer haben das Potenzial, komplexe Probleme schneller und effizienter zu lösen als klassische Computer.

Implementierung von Qubits

Qubits können durch einen supraleitenden mikrowellenmechanischen Resonator (d.h. einen Josephson-Kontakt mit einem großen Kondensator) implementiert werden und als LC-Schwingkreis modelliert werden (s. Bild 1) [4, 5]. Der LC-Schwingkreis funktioniert theoretisch wie ein Perpetuum mobile, bei dem das magnetische Feld des Induktors beim Laden des Kondensators schließlich zusammenbricht, wodurch sich der Kondensator schließlich entlädt und das magnetische Feld des Induktors wiederhergestellt wird und der Zyklus sich wiederholt. Qubits werden von einem DAC bei seiner resonanten Mikrowellen-LC-Frequenz angetrieben, um von einem 0-Zustand in einen 1-Zustand zu wechseln (von einem Energieniveau zum anderen). Unter den angetriebenen Bedingungen variiert die Wahrscheinlichkeit, eine 1 oder eine 0 zu sein, sinusförmig über die Zeit, unter Kontrolle und gemessen durch Größe und Phase mit einem ADC.

Quelle:

White Paper „K-Band Microwave DACs Driving Quantum Computing Technologies“
Teledyne e2v
www.teledyne-e2v.com

übersetzt und gekürzt von FS

In den letzten zwanzig Jahren hat sich das Quantencomputing als Ergänzung zu den laufenden Entwicklungen im Bereich des klassischen Computing herausgebildet.

Realistisch betrachtet, führen Verluste im Qubit, die als „Dekohärenz“ bezeichnet werden, zu einer gedämpften Sinuswellenausgabe, die durch unerwünschten Widerstand, Magnetfelder, Leckagen, thermisches Rauschen, mechanische Schwingungen usw. verursacht wird. Dies erfordert dann eine Rückkopplungseinspeisung/Kompensation zusätzlicher Antriebsenergie, die ebenfalls über den DAC erfolgt. Der Zerfall der Dekohärenz verfälscht die Überlagerungsantwort des Qubits, sodass eine Rückkopplung zur Fehlerkorrektur erforderlich ist [1].

Das Kernelement eines Quantencomputers ist das Qubit.

Während ein einzelnes Qubit der grundlegende Baustein für Quantencomputer ist, sind mehrere (parallele) Qubits erforderlich, um einen Quantencomputer zu implementieren, bei dem jedes Qubit dann separat von einem entsprechenden DAC angesteuert/moduliert werden kann. Verbundene Qubit-Paare nutzen dann die Interferenz zwischen ihren wellenartigen Quantenzuständen, die als „Verschränkung“ bezeichnet wird, wobei ein Qubit das andere auf vorhersehbare Weise direkt beeinflusst. Die Verschränkungseigenschaften von Qubit-Paaren ahmen ein Interferometer nach, bei dem zwei Muster konstruktiv (mit hoher Wahrscheinlichkeit) oder destruktiv (mit geringer Wahrscheinlichkeit) sowohl ein paralleles als auch ein Mehrweg-Informationsnetzwerk erzeugen können. Daher ermöglicht die inhärente Architektur eines Quantencomputers einfach eine riesige Anzahl von Eingaben mit nichtdiskreten/statistischen Daten, die von DACs gesteuert und von mehreren Qubits gemessen werden; aber die Korrelation und Steuerung jedes Qubits ist der treibende Faktor für einen Quantencomputer [1, 3].

Ein Qubit ist ein quantenmechanisches Resonatorgerät mit zwei Zuständen, das die Eigenschaften der Quantenmechanik aufweist.

Milliarden US-Dollar für die Entwicklung der Quantencomputertechnologie

In den letzten fünfundzwanzig Jahren haben Entwickler von Quantencomputern einen Zwei-Qubit-Computer (1998) bis hin zu einer 54-Qubit-Maschine (2019) demonstriert, die Berichten zufolge Berechnungen durchführen kann, die für einen klassischen Computer unmöglich wären (die Gültigkeit dieser Behauptungen wird noch erforscht).

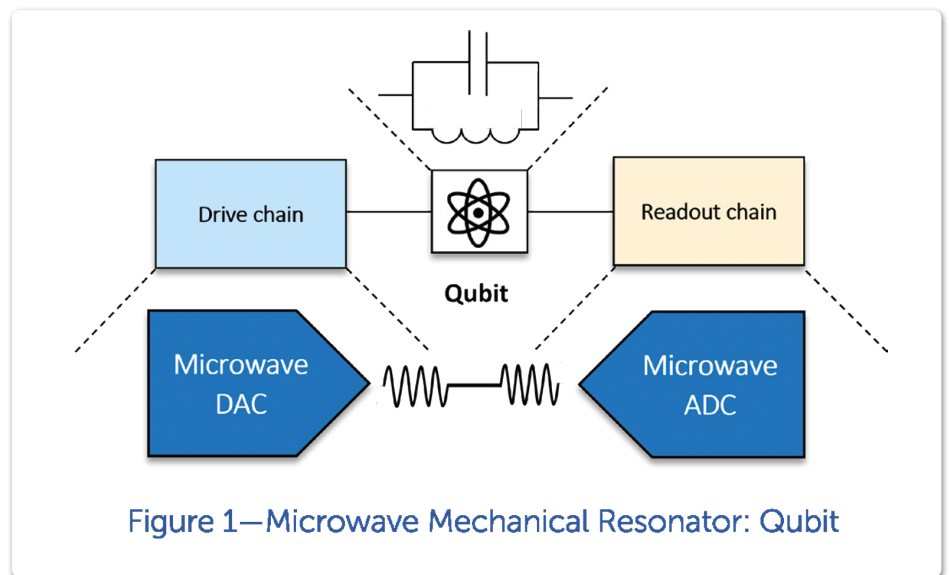


Bild 1: Microwave Mechanical Resonator: Qubit

Die Rechenleistung von Quantencomputern steigt exponentiell mit der Anzahl der Qubits.

In den letzten zehn Jahren wurden weltweit öffentliche Investitionen in Höhe von über 16 Milliarden US-Dollar in die Entwicklung der Quantencomputertechnologie getätigt [6, 7, 8, 9]. Das globale Ausmaß und die Höhe der öffentlichen und privaten Mittel für die Entwicklung funktionsfähiger Quantencomputer sind ein Indikator für die extremen Herausforderungen, mit denen die Forschung und Entwicklung im Bereich Quantencomputer konfrontiert ist [9]. Die mikrowellenmechanische Resonatorstruktur des Qubits ist die größte Herausforderung, und viele Versionen befinden sich derzeit in der Entwicklung. Es werden eine Vielzahl von atomaren und subatomaren Teilchen verwendet, sowie Techniken zu deren Manipulation. Zu diesen Teilchen und Techniken können gefangene Ionen, Photonen, elektrische Stimulation, Elektronen-/Spin, Kern-/Teilchen-Spin unter Verwendung von Lasern, Magnetismus usw. gehören, um das Qubit zu steuern [1, 2, 3].

Unabhängig von der Art der verwendeten Struktur besteht das nächste Problem in der Ansteuerung mit hochauflösenden Mikrowellensignalen, die erforderlich sind, um die Reaktion des Qubits zu verstehen, auszulösen und auszuwerten. In der Vergangenheit begann die Ansteuerung des Qubits in der Regel mit einer Basisbandsignalquelle (von einem herkömmlichen DAC), die dann tiefpassgefiltert, hochkonvertiert/gemischt, bandpassgefiltert und dann verstärkt wurde [4]. Darüber hinaus erfordert der mikrowellenmechanische Resonator

des Qubit extrem niedrige Temperaturen (nahe dem absoluten Nullpunkt), was zu Herausforderungen bei der Ansteuerung der Signalquelle führt, die eine Vorverzerrung und Vorkompensation erfordern, um verschiedene Verluste in der Signalkette (elektronisch, Verkabelung usw.) zu korrigieren [5]. Die Ansteuerung des Qubits mit einem heraufkonvertierten Basisband-Ansatz führt nur minimal zu Rausch- und Verzerrungsfehlerkomponenten durch den NCO und den Mischer sowie zu Kabelfehlanspassungen und Reflexionen usw. Modernste Mikrowellen-DACs arbeiten mit einer typischen Abtastrate von über 6 GSps und Bandbreiten von über 7,5 GHz. Die Leistung von Mikrowellen mit Direktantrieb auf diesem Niveau macht eine Aufwärtswandlung/Mischung, Tiefpassfilterung und lokale Oszillatorerzeugung (NCO) überflüssig und vereinfacht die Verkabelung und die Verbindungen. Der Qubit wird mit einer bestimmten Frequenz angesteuert, und die Reaktion der Ausgangsfrequenz des Qubits ist das Ergebnis der Berechnungen.

Die Resonanzfrequenz des Qubits variiert im Allgemeinen zwischen 4 und 12 GHz. Dieser Resonator kann aufgrund von Energieverlusten im System nur über einen bestimmten Zeitraum aufrechterhalten werden. Daher besteht das Ziel darin, in einem begrenzten Zeitraum so viele Mikrowellenimpulse zu erzeugen, dass so viele Qubit-Wechselwirkungen wie möglich entstehen.

Qubits können durch einen supraleitenden mikrowellenmechanischen Resonator implementiert und als LC-Schwingkreis modelliert werden.

Das globale Ausmaß und die Höhe der öffentlichen und privaten Mittel für die Entwicklung funktionsfähiger Quantencomputer sind ein Indikator für die extremen Herausforderungen, mit denen die Forschung und Entwicklung im Bereich Quantencomputer konfrontiert ist.

Direktsynthese-Mikrowellen-DACs mit hoher Präzision, kurzer Latenz und geringem Phasenrauschen sind für das Quantencomputing zur Steuerung des Qubits unerlässlich [4]. Darüber hinaus erfordert ein realistisches Qubit-Netzwerk eine Skalierung (mehrere Qubits arbeiten gleichzeitig parallel in Zuständen der Superposition und Verschränkung). Dies erfordert die Synchronisierung und Auslösung der Mikrowellen-DAC-Treiber.

Die Steuerung, Geschwindigkeit, Korrelation, Wiederholbarkeit und Zuverlässigkeit jedes Qubits (und Qubit-Netzwerks) ist der treibende Faktor für einen Quantencomputer.

K-Band-Mikrowellen-DACs als Antrieb für Quantencomputertechnologien

Ein Quantencomputer ist eine echte Parallelverarbeitungs-Netzwerkmaschine. Fälle, die eine große Anzahl komplexer Dateneingaben beinhalten, erfordern auch Software-Algorithmen, die Überlagerung, Verschränkung, Rückkopplungsfehlerkorrektur und Kalibrierung bewältigen können, und das alles bei Temperaturen, die sich dem absoluten Nullpunkt nähern [1, 2, 3].

Echte Parallelverarbeitung öffnet die Tür zu zahlreichen Anwendungen, die große Datensätze beinhalten, die nahezu sofortige

Berechnungen erfordern können. Beispielsweise erfordern Cybersicherheit und Kryptografie den Austausch von Informationen innerhalb einer sicheren Umgebung. Klassische Computer speichern „Bits“ parallel mit einer linearen Anzahl von Prozessoren und verwenden klassische Algorithmen, um sichere Daten zu übertragen. Quantencomputer speichern parallele „Qubits“ in einem wirklich exponentiell verarbeitenden Netzwerk und verwenden Quantenalgorithmen, um Daten zu übertragen.

Selbstverständlich erfordert jede Quantencomputeranwendung grundsätzlich einen Mikrowellen-DAC, der in der Lage ist, ein einzelnes Qubit (innerhalb des Netzwerks) mit hoher Präzision, kurzer Latenz und geringem Phasenrauschen anzusteuern.

Fazit

Das Kernelement eines Quantencomputers ist das Qubit. Die Herstellung von Qubits, die sowohl über ausreichende Quanten-Kohärenzzeiten (wie lange Qubits ihre Informationen behalten) als auch über die Mittel zur Erzeugung und Steuerung ihrer Überlagerung und Verschränkung verfügen, ist nach wie vor das Haupthindernis für den Bau eines Quantencomputers in großem Maßstab. Während die Qubit-Fertigungstechnologien an vielen Fronten weiter voranschreiten, bleiben die Anforderungen an die Ansteuerung und Steuerung des Qubits relativ konstant: K-Band-Mikrowellen-DACs,

Ein Quantencomputer ist eine echte Parallelverarbeitungs-Netzwerkmaschine.

die genau, phasenrauscharm, synchronisiert, zuverlässig und konsistent sind. ◀

Referenzen:

- [1] Gary Lerude, Dave Slack, „Times Microwave Interview: Was ist Quantencomputing und warum sollte es Mikrowelleningenieurere interessieren?“, Microwave Journal/Frequency Matters Video, Nov. 2022
- [2] Kip Pettigrew, „DACs überwinden Signalquellen-Hürden in der Quantenforschung“, Electronic Design, Feb. 2018
- [3] Surya Teja Marella, Hemanth Sai Kumar Parisa, „Einführung in das Quantencomputing“, ScienceGate, Okt. 2020
- [4] Stephane Breyse – Teledyne e2v, Saint Egrève, Frankreich, „Entwurf eines umfassenden Treibersignalfads für Quantencomputing mit EV12DS460/480“, Teledyne e2v Video, Nov. 2022
- [5] A.N. Cleland, M.R. Geller, „Mechanical Quantum Resonators“, University of Chicago
- [6] Eanna Kelly, „Germany to Invest €2 Billion in Quantum Technologies“, ScienceBusiness, Mai 2021
- [7] Daphane Leprince-Ringuet, „The EU Wants to Build Its First Quantum Computer. Dieser Plan könnte nicht ehrgeizig genug sein“, ZDNET, März 2021
- [8] Sophie Felix, „Französische Forschung im Mittelpunkt des Quantenplans“, CNRS News, Feb. 2021
- [9] Rajat Kohli, Atul Srivasta, Swapnil Keshari, Kashvi Jajodia, „Ein Quantensprung der Finanzdienstleistungsbranche“, Zinnov, Dez. 2022