

Kバンド対応マイクロ波 DAC を活用した 量子コンピュータ技術

2023年2月



概要

従来のコンピュータ技術は、もはや根本的な計算速度の限界に迫りつつあります。量子コンピュータは、より少ない開発コストで数億倍もの速度速度の高速化が実現できる可能性があります[1]。

そのためには、量子コンピュータ設計において量子ビット駆動用のマイクロ波信号源の正確性、同期性、信頼性、一貫性を確保することが必要です[2]。

Teledyne e2v の提供する K バンド対応マイクロ波 DAC (および ADC) は、今後の量子コンピュータ技術に不可欠な量子ビットの動作の判断やトリガー、評価に必要な高精度信号を供給および受信する機能を備えています[4]。



量子コンピュータの紹介

1975年、フェアチャイルド・セミコンダクターやインテルの共同創業者であるゴードン・ムーアが、集積デバイスの部品点数が「2年ごとに」倍増するという説を発表しました。この説は「ムーアの法則」と呼ばれ、半導体産業の小型化、特にコンピュータの演算能力・速度の向上の目標とされてきました。しかし2010年以降のマイクロプロセッサは、ムーアの法則のペースを下回っている状況です。また、この20年の間に量子コンピュータが登場し、従来型のコンピュータと並行して開発が進められてきました。

量子コンピュータは、従来のコンピュータに比べて複雑な問題をより速く効率的に解決できる可能性があります。従来型の場合、演算能力は集積デバイスあたりのビット数や部品数の関数として直線的に増加しますが、量子コンピュータの演算能力は、量子ビットの数の関数として指数関数的に増加します[1]。量子ビットとは、(原子・素粒子の性質を利用した)量子力学的な二つの状態をとりうる量子メカニカル共振器デバイスのことです[5]。従来型のコンピュータでは、1つのビットは1か0のどちらかの状態しかとれません。量子コンピュータの場合、量子ビットが波のような多次元的な特性を示すため、2つの状態が同時にコヒーレントに「重ね合わせ」られて、0を測定する確率と1を測定する確率が等しくなっています。コヒーレントな重ね合わせは、単一の周波数でのスポットノイズの特性(確率的な範囲に含まれる様々な振舞い、つまり、Xの確率でY値が測定される状態)に類似しています[1][3]。

量子ビットは、超伝導マイクロ波メカニカル共振器(すなわち、大容量コンデンサを搭載したジョセフソン接合)として実装できるため、LC共振回路(図1参照)としてモデル化できます[4][5]。

LC共振回路は、理論的には永久機関として動作します。つまり、コイル磁界がコンデンサを充電しながら消滅し、コンデンサがコイル磁界を回復しながら放電するというサイクルが繰り返されます。量子ビットは、DACによってマイクロ波LC共振周波数で駆動され、0状態から1状態(あるエネルギー準位から別のエネルギー準位)に遷移します。駆動状態では、1である確率と0である確率が時間経過とともに正弦波状に変化します。これを制御し、大きさと位相をADC(Teledyne e2v EV10AQ190Aなど)で制御して測定します。実際には、抵抗、磁界、リーク、熱雑音、機械的振動などにより「デコヒーレンス」と呼ばれる量子ビットの損失が起きて正弦波出力が減衰するため、DACを使用し、駆動エネルギーの追加やフィードバックの注入・補正が必要となります。デコヒーレンスによる減衰によりキュービットの重ね合わせ応答が損なわれるため、エラー訂正のためのフィードバックが必要です[1]。

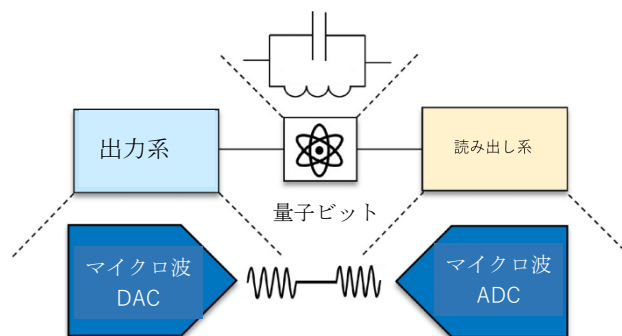


図1 - マイクロ波メカニカル共振器: 量子ビット

量子コンピュータの基本構成要素は1つの量子ビットです。量子コンピュータを実現するためには、複数の量子ビットを並列に配置し、それぞれの量子ビットに個別にDACを割り当てて駆動・変調することが必要です。結合した量子ビット対では、波動の性質による量子状態間の干渉が起きて、一方の量子ビットが他方の量子ビットに直接影響を与える「もつれ」と呼ばれる現象が予測可能な状態で発生します。量子ビット対のもつれは干渉計を模倣しており、2つのパターンによって建設的(高密度の確率)または破壊的(低密度の確率)に、並列およびマルチパスの情報ネットワークを作り出

Kバンド対応マイクロ波 DAC を活用した 量子コンピュータ技術

2023年2月



することができます。つまり、量子コンピュータ固有のアーキテクチャは、DAC で駆動する複数の量子ビットで非離散／統計的データを測定することで、膨大な数の入力を可能にするというシンプルなものなのです。ただ、各量子ビット間の相関と制御が、量子コンピュータの駆動因子となります[1][3]。この25年間で、量子コンピュータの開発者は、2量子ビットのコンピュータ（1998年）から54量子ビットの装置（2019年）までを実証しており、従来型コンピュータでは不可能だった計算が可能になったと報告しています（この主張の妥当性は現在調査中です）。現在、量子コンピュータ技術開発に対する公的資金は、過去10年間で約160億米ドル以上に達しています[6][7][8][9]。

駆動用量子ビット

実用的な量子コンピュータ開発には莫大なコストがかかり、量子コンピュータの研究開発が極めて困難だと言えます[9]。量子ビットのマイクロ波メカニカル共振器の構造は最も難しく、現在様々なものが開発されています（図2参照）。利用する原子・素粒子、それらを操作する技術もさまざまです。例えば、イオントラップ、光子、電気刺激、電子・スピン、核・粒子スピンなどを利用し、レーザーや磁気による量子ビットの制御が研究されています [1][2][3]。

	光子	電子			原子		
	光子	超伝導	シリコン	NV センター	マヨラナ・フェルミオン	冷却原子	イオントラップ
量子ビットサイズ	(100 μ) ²	(100 μ) ²	(100nm) ²			atomes	(1mm) ²
2ゲートフィデリティ	98%	99,4%	>98%	92%		98%	99,9%
読み出しフィデリティ	50%	95%	98%	93%		99%	99,9%
速度	1ms	250 ns	=5ms				100ms
温度	光子発生器および検出器 4K/10K	15 mK	1K	300K	15mK	15mK	10K
量子もつれ状態の量子ビット	20 (Chine)	65 (IBM)	4 (Delft)	6		51	32(IonQ)
スケーラビリティ	100s	100s	millions	100s	?	100s	100

図2 - 量子ビット技術展開

どのような構造を用いるにせよ、量子ビットの応答について、判断、トリガー、評価するため、高分解能のマイクロ波信号で駆動することが次の課題となります。これまでの量子ビットは、（従来の DAC からの）ベースバンド信号源により駆動を開始し、ローパスフィルターを通過し、アップコンバートやミキシングを行って、バンドパスフィルターを通し、増幅するという流れで行うことが一般的でした（図3参照）[4]。

さらに、量子ビットのマイクロ波メカニカル共振器は極低温（絶対零度付近）での駆動が要求されるため、信号チェーン（電子、ケーブルなど）で生じる様々な損失を補正する必要があります。このため、前置歪や前補正を必要とする信号源駆動の課題が出てきます[5]。

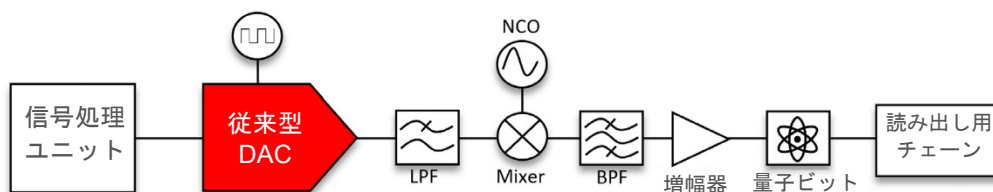


図3 - 従来のベースバンド DAC 量子ビット駆動回路

Kバンド対応マイクロ波 DAC を活用した 量子コンピュータ技術

2023年2月



アップコンバートベースバンド方式で量子ビットを駆動することにより、NCO やミキサーを介したノイズや歪みの誤差成分、ケーブルの不整合や反射などの影響を最小限に抑えることができます。Teledyne e2v の 12 ビット K バンド対応 DAC ファミリー（例えば、DAC ファミリー EV12DS4x0: <https://semiconductors.teledyneimaging.com/en/products/digital-to-analog-converters/ev12ds480>）など、最先端のマイクロ波 DAC は、標準的な 6GSps 以上のサンプルレートで 7.5GHz を超える帯域幅で動作します。このような高いレベルの直接駆動マイクロ波性能があるため、アップコンバージョン/ミキシング、ローパスフィルタリング、局部発振器生成 (NCO) が不要になり、ケーブル配線や相互接続もシンプルになります (図 4 参照)。

量子ビットをある特定の周波数で駆動したとき、その量子ビットの出力周波数の反応が計算結果になります。量子ビットの共振周波数は、一般的に 4~12GHz の間で変化します。この共振器は、システム内のエネルギー損失があるため、ある一定期間しか維持できません。そこで、限られた時間内に大量のマイクロ波パルスが発生させ、できる限り多くの量子ビットの相互作用を引き起こしながら、駆動回路から入るノイズを最小限に抑えることで、量子コンピューティングの性能と信頼性を向上させることを目指しています。量子コンピュータでは、量子ビットを制御するために、高精度、低レイテンシ、低位相ノイズのダイレクトマイクロ波合成用の DAC が不可欠です[4]。

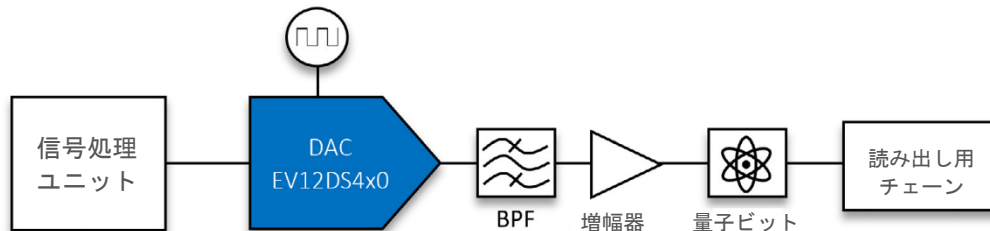


図 4 - EV12DS4x0 マイクロ波 DAC 量子ビット駆動回路

さらに、実際の量子ビットネットワークでは、スケーリング（複数の量子ビットが重ね合わせやもつれの状態で同時に並列に動作すること）が必要です。それには、マイクロ波 DAC 駆動回路の同期とトリガーが必要です (図 5 参照)。各量子ビット（および量子ビットネットワーク）の制御、速度、相関性、再現性、信頼性が量子コンピュータの駆動因子となります。同期されたマイクロ波 DAC 駆動回路により、性能とコストの両方の制約を受けながらも、こうした要件を満たす量子コンピュータの設計が可能になります[1] [2] [3]。

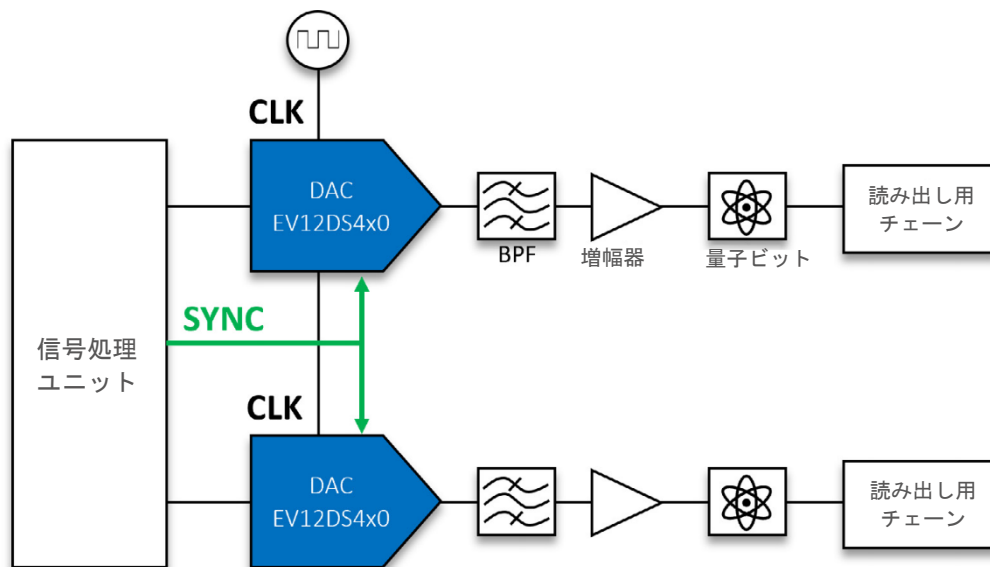


図 5 - EV12DS4x0 同期 DAC 量子ビット駆動回路

TELEDYNE E2V DAC QUBIT DRIVERS AND APPLICATIONS

前述したように、量子もつれは、局所的な量子コンピュータネットワークに含まれる他の量子ビットの出力に実効的に影響を与えません。従って、量子ビット対やネットワークの出力のもつれ具合は、各量子ビットの入力が本質的に他の量子ビットの入力から影響を受ける、入力参照型であると言えます。もつれが作りだす量子ビットのネットワーク内の環境のなかで、膨大な数の入力（の統計データ）が受信され、処理・解析されます。

Kバンド対応マイクロ波 DAC を活用した 量子コンピュータ技術

2023年2月



このようにして量子コンピュータは、真の並列処理ネットワーク・マシンとして機能しているのです。また、多数の複雑なデータを入力するケースでは、重ね合わせ、もつれ、フィードバックエラー補正、および校正をすべて絶対零度に近い温度で処理できるソフトウェア・アルゴリズムが必要となります [1] [2] [3]。

真の並列処理により、膨大なデータセットを扱う多くのアプリケーションに門戸が開かれ、ほぼ瞬時に計算を行うことが可能になります (図 6 参照)。例えば、サイバーセキュリティや暗号技術では、安全な環境下での情報共有が必要です。従来のコンピュータは、「ビット」を一定数のプロセッサを用いて並列に格納し、古典的なアルゴリズムで安全なデータ転送を行います。量子コンピュータは、「量子ビット」を全くの指数関数的な並列処理ネットワークに格納し、量子アルゴリズムを用いてデータの転送を行います。これは、他のすべてのアプリケーションにも当てはまります [9]。



図 6 - 量子コンピュータアプリケーション

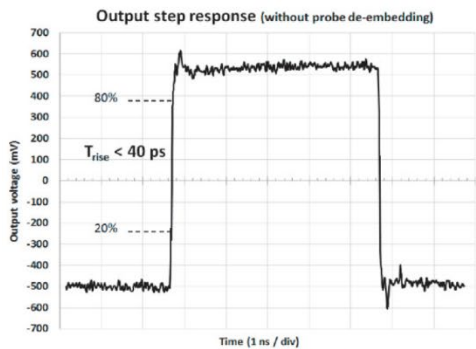
もちろん、量子コンピュータのアプリケーションには、個々の量子ビットに対して（ネットワーク内で）高精度、低レイテンシ、低位相ノイズで駆動できるマイクロ波 DAC が欠かせません。テレダイン e2v の DAC DS4x0 ファミリーでは、1つまたは複数の量子ビットの制御が可能です。DAC DS4x0 ファミリーは、6GHz でのサンプリングが可能で、7.5GHz 以上の出力帯域幅（とそれ以上の周波数でのフラットな応答）となっています。また、高精度な量子ビット駆動要求をダイレクトに合成できるため、設計アーキテクチャと校正および相関要件の両方をシンプルに（アップコンバージョンの必要がないように）できます [4]。

Kバンド対応マイクロ波 DAC を活用した 量子コンピュータ技術

2023年2月



DACDS4x0 の時間領域のステップ応答は、図 7 に示すように、立ち上がり・立ち下がり時間がどちらも 30ps と対称になっています。図 8 は、1nsec 以下の極めて低いレイテンシを実現したものです。どちらも高速で短いマイクロ波パルスを発生させることが可能です[4]。



After the oscilloscope probe de-embedding, $T_{rise} \approx 30 \text{ ps}$ → DAC bandwidth $\approx 7.5 \text{ GHz}$

図 7 - DAC DS4x0/EV12DS460A 時間領域ステップ応答

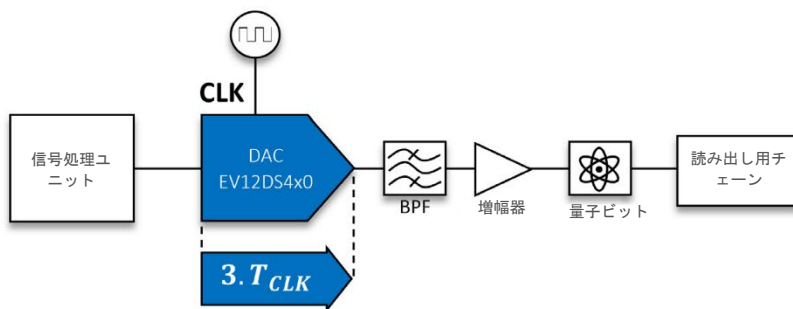


図 8 - DAC DS4x0/EV12DS460A レイテンシ (3 クロックサイクル)

図 9 に DAC DS4x0 ファミリーの位相ノイズ特性を示します。もちろん、超低位相ノイズの測定では、クロックの位相ノイズも合わせて測定します。そのため、元々低位相ノイズの DAC と合わせて、低位相ノイズのクロック発生器を設計し、特性評価することが重要です (図 9 右参照) [4]。

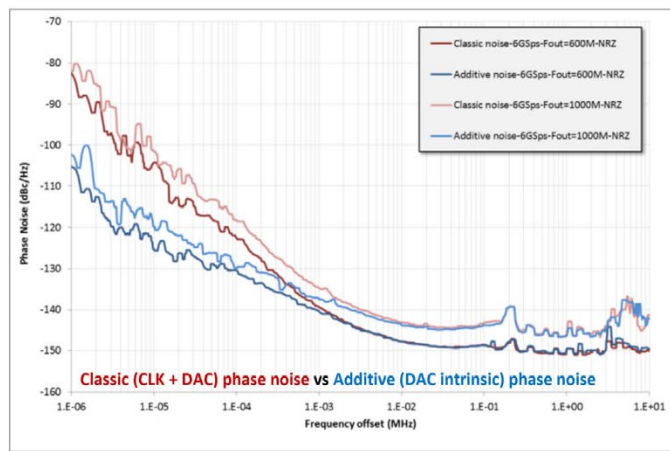
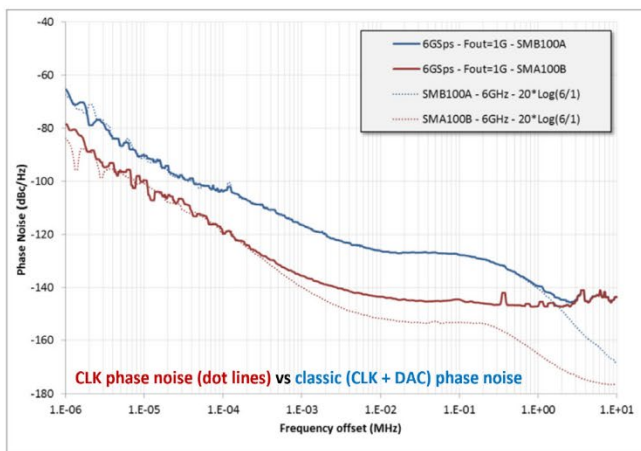


図 9 - DAC DS4x0/EV12DS460A 位相ノイズ性能

図 10 に、DAC DS400 評価ボードを使用した DAC DS4x0 の時間領域の測定性能を示します。信号発生器で 6GHz の DAC 入力クロックを駆動します。DAC 出力は Marki (BAL0036) マイクロ波バランを駆動して差動信号からシングルエンド信号に変換し、Marki (B1050) マイクロ波バンドパスフィルタで対象帯域を選択します。10.5GHz を中心とした帯域を使用し、10.5GHz で 150ns の短い連続パルス (左)、さらに小さい 15ns のパルス (右) を直接発生させました[4]。

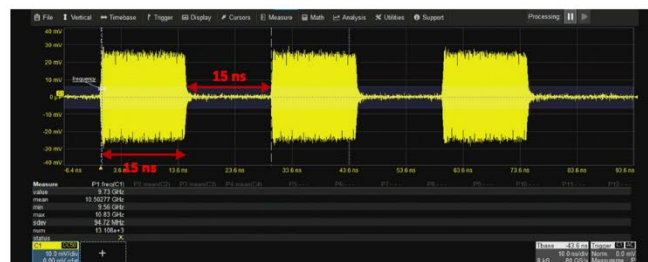
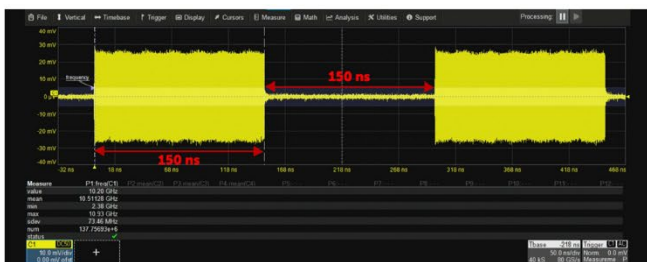


図 10 - DAC DS4x0/EV12DS460A 時間領域性能

Kバンド対応マイクロ波 DAC を活用した 量子コンピュータ技術

2023年2月



特に、Teledyne e2v の EV12DS460A は、Kバンドマイクロ波 12 ビット 6.0 GSps DAC で、4:1 または 2:1 マルチプレクサと 7.5 GHz 出力帯域を内蔵し、標準 FPGA と簡単に接続できます。また 4 種類の出力モード (NRZ、RTZ、NRTZ、RF) を内蔵しており、目的のナイキストゾーンに応じて性能を最適化できます。EV12DS480A は EV12DS460A と同様ですが、最大 8.0GSps、出力帯域幅は 7.5GHz 以上でも動作します[4]。

結論

量子コンピュータの中核は「量子ビット」です。十分な量子コヒーレンス時間枠（量子ビットが情報を保持する時間）を確保する手段、そして量子ビットの重ね合わせやもつれを生成・制御する手段が、大規模量子コンピュータ構築の最大の障害となっています。量子ビットの製造技術は多くの面で進歩し続けていますが、実際に量子ビットを駆動し、制御するための要件は依然として変わりません。高精度、低位相ノイズ、同期性、信頼性、一貫性を備えた K-Band マイクロ波 DAC が必要なのです。Teledyne e2v の DAC DS4x0 ファミリーには十分な性能があるため、将来にわたって変化し続ける量子ビット開発技術を推進することが可能です（図 11 の EV12DS460A の性能を参照）。

PERFORMANCES @ 6.0 GSps

- SFDR
 - 1st Nyquist (NRTZ - 2940 MHz): SFDR = 56 dBc
 - 2nd Nyquist (RF - 5940 MHz): SFDR = 58 dBc
 - 3rd Nyquist (RF - 8940 MHz): SFDR = 49 dBc
 - 4th Nyquist (RF - 11950 MHz): SFDR = 49 dBc
 - 7th Nyquist (RF - 18070 MHz): SFDR = 43 dBc
 - 8th Nyquist (RF - 23950 MHz): SFDR = 38 dBc
- IMD3 Dual-tone
 - 1st Nyquist (NRTZ - 2850 & 2860 MHz): IMD3 = 73 dBc
 - 2nd Nyquist (RF - 5750 & 5760 MHz): IMD3 = 64 dBc
 - 3rd Nyquist (RF - 8850 & 8860 MHz): IMD3 = 57 dBc
 - 4th Nyquist (RF - 11850 & 11860 MHz): IMD3 = 58 dBc
- Broadband NPR at -14 dBFS Loading Factor (90% of full Nyquist zone)
 - 1st Nyquist (NRTZ): NPR = 44 dB, 8.8 Bit Equivalent
 - 2nd Nyquist (NRTZ): NPR = 39.5 dB, 8.1 Bit Equivalent
 - 3rd Nyquist (RF): NPR = 36.5 dB, 7.6 Bit Equivalent

図 11 - 周波数特性

参考文献

- [1] Gary Lerude, Dave Slack, “Times Microwave インタビュー: 量子コンピュータとは何か、マイクロ波技術者が関心を持つべき理由とは”, マイクロ波ジャーナル/周波数問題の動画, 2022年11月
- [2] Kip Pettigrew, “DAC が量子研究の信号源問題を解決する”, エレクトロニクスデザイン, 2018年2月
- [3] Surya Teja Marella, Hemanth Sai Kumar Parisa, “量子コンピューティングの紹介” サイエンスゲート, 2020年10月
- [4] Stephane Breyse -- Teledyne e2v, サンテグレーブ, フランス, “EV12DS460/480 を利用した量子コンピューティングのための総合的な駆動用シングルパスの設計”, Teledyne e2v 動画, 2022年11月
- [5] A.N.Cleland, M.R.Geller, “メカニカルな量子共振器”, シカゴ大学
- [6] Eanna Kelly, “ドイツ政府, 量子技術に 20 億ユーロを投資” サイエンスビジネス, 2021年5月
- [7] Daphane Leprince-Ringuet, “EU、初の量子コンピュータの構築を目指す。しかし、計画はまだ十分ではないかもしれない。”, ZDNET, 2021年3月
- [8] Sophie Felix, “量子プランで核となるフランスの研究”, CNRS ニュース, 2021年2月
- [9] Rajat Kohli, Atul Srivasta, Swapnil Keshari, Kashvi Jajodia, “金融業界の大きな変化,” Zinnov, 2022年12月



詳細は、私にお問い合わせください

Yuki Chan,

マーケティング&コミュニケーション マネージャー

Yuki.chan@teledyne.com



詳細は、私にお問い合わせください

Marc Stackler,

セールス兼アプリケーションエンジニア

Marc.stackler@teledyne.com

