

第5部

特集5 Quantum Internet

永山 翔太

Abstract

本報告書では、2024年におけるWIDEプロジェクトの量子ネットワーク関連活動を総括する。AQUAワーキンググループが取り組む量子インターネットタスクフォース(QITF)やムーンショット目標6テストベッド(KBIC拠点)との連携のもと、産学官連携による量子ネットワーク構築の最新状況を示す。エンタングルド光子ペア源によるMSM方式の実装・評価、リンクの異種混在下での性能解析、ベル状態解析器の同期拡張、およびドラゴンフライ型インターコネクタ「Q-Fly」の設計と検証を通じ、光学損失・確率的成功率・高精度同期といった課題への対処とスケラビリティ向上を目指す取り組みを報告する。さらに、WQRN・QIRGといった国際会議への参加、教育プログラム(Q-LEAP)との連携状況なども概説する。

第1章 Networking

1.1 経緯

WIDEプロジェクトでは、AQUAワーキンググループの立ち上げ以来、量子コンピューティングシステムのアーキテクチャの研究開発に取り組んでいる。近年の量子コンピュータ技術への注目を受けて、AQUAの活動は拡大している。AQUAチェアのVan Meterとコチェアの永山は、2019年に、量子インターネットに取り組む全国の研究者らとともに、産学官連携で量子インターネットの実現を目指す量子インターネットタスクフォース(QITF)^{*1}を立ち上げた。2024年には、産学官連携の量子インター

ネットタスクフォースとの連携のもと、国プロであるJSTムーンショット型研究開発プロジェクト目標6におけるプロジェクト「スケーラブルで強靱な統合的量子通信システム」や、文科省光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)人材育成プログラム「量子技術高等教育拠点標準プログラムの開発」に取り組んだ。本稿では、上記の取り組みを含む、AQUAワーキンググループが貢献する最新の成果について報告する。まず大枠の活動や国際連携について報告し、特筆すべき論文について報告する。

1.2 量子インターネットタスクフォース

QITFは、システムアーキテクチャ（プロトコルアーキテクチャと設計を含む）に関する技術的作業を継続しており、実験的な都市圏規模のテストベッド構築に向けて前進している。また、財政的支援と技術的専門知識の双方を提供するメンバーの募集を継続している。

1.3 テストベッド

WIDEプロジェクトボードメンバー永山翔太がムーンショット目標6のプログラムマネージャー^{*2}に選出された結果、QITFはKBIC (Kawasaki Business Incubation Center)^{*3}にラボラトリを開設している。本ラボの目的は、大規模でフォールトトレラントな量子コンピュータの開発を支援することである。自然なアーキテクチャとしてはマルチコンピュータ、あるいはデータセンターネットワークが想定される。ほとんどの物理的要素はなお手作業で組み立てる必要があるが、本ラボにおける焦点は新たな物理概念の実験ではなく、ネットワークのアーキテクチャとエンジニアリングを前進させることにある。従って、真に分散型の制御を強調し、完全なオンラ

*1 <https://qitf.org/>*2 Moonshot 目標6 永山プロジェクト。 <https://sniq.org/>*3 かわさき新産業創造センター。 <https://kbic.jp/>

イン・リアルタイムの制御システムとプロトコルを目指している。

WIDEのメンバーであるShota Nagayama, Rodney Van Meter, Toshihiko Sasaki, Takahiko Satoh, Michal Hajdušek, Hiroyuki Ohno各氏および彼らの学生らが本テストベッドに貢献している。PI、学生、スタッフを含め、複数機関から成るこの大規模共同プロジェクトには合計で約150名が参加している。

テストベッドでの開発の進捗についてはSebsec.1.10で詳述する。

1.4 2024年5月WIDE研究会

2024年5月のWIDE研究会は、量子インターネットテストベッドを置いているかわさき新産業創造センターで開催した。この際、量子インターネットラボツアーを開催し、約60人が参加した。本研究会の詳細については本報告書の当該の章で報告する。

1.5 国際会議での活動

1.5.1 Workshop for Quantum Repeaters and Networks

量子インターネットに関する唯一の専門会議であり、国際的に活躍する研究者が集うWorkshop for Quantum Repeaters and Networks (WQRN)^{*4}において、永山が招待講演を行った。日本を代表して、日本の量子インターネットテストベッド活動について報告した。Van MeterはWQRNの開始以来Steering Committeeを務めていたが、今回をもって交代した。

1.5.2 Quantum Internet Research Group

IRTFに設置されているQuantum Internet Research Group (QIRG)^{*5}において、先導役を継続している。Van Meterは引き続きQIRGのco-chairを務めている。

2024年3月に開催されたIETF 119 Brisbaneと、2023年11月に開催されたIETF 121 Dublinにおいて、QIRGのBoFを開催した。IETF119Brisbaneにおいては2つの発表を行った。

- A Link-Level Multiplexing Mechanism, Rodney Van Meter, Ryosuke Satoh, Makoto Nakai, Shota Nagayama.光子探知で通信を行っており、量子通信チャンネルにパケットヘッダのような管理情報を付加できない量子通信において、量子リンクを多重化するためのメカニズムについて報告した。
- Timing regimes in Quantum networks, Michal Hajdušek, Rod Van Meter, Monet Tokuyama, Akihito Soeda, Shota Nagayama.量子インターネットにおいて必要となる時間精度についてまとめ、そのwork in progressについて報告した。

1.6 An Implementation and Analysis of a Practical Quantum Link Architecture Utilizing Entangled Photon Sourcesの概要

本論文では、量子ネットワークにおける長距離ベル対生成を効率化するためのリンクアーキテクチャとして、エンタングルド光子ペア源(Entangled Photon Source; EPPS)を活用したMemory-Source-Memory (MSM)方式を取り上げている。従来、量子リピータの研究では量子メモリから光子を放出し、中央のベル状態解析器(BSA)で干渉させるMIM (Memory-Interference-Memory) や、片側ノードにBSAを内蔵したMM (Memory-Memory)とといった方式が広く検討されてきた。本研究で焦点となるMSM方式は、中間に置かれたEPPSから両方向へ光子ペアを送出し、各ノード(量子メモリを保持)に内蔵されたBSAで局所的なベル測定を行うことでメモリ間もつれを生成する点の特徴である。著者らはこのMSMプロトコルの実装手順を明確に定義し、シミュレーションツールQuISPを用いて性能評価を行うことで、他の方式との比較やスループット飽和現象の起因を理論モデルと合わせて検証している。

1. 背景と目的

量子ネットワークにおける長距離もつれ共有には、量子リピータ技術が必須である。古典通信の場合は中継点で信号を増幅・複製できるが、量子情報ではノー・クローニング定理により同様の手法が用いられない。そこで、複

*4 <https://www.wqrn.org/>

*5 <https://datatracker.ietf.org/group/qirg/about/>

数の短距離リンクで局所的なベル対を生成し、エンタングルメントスワッピングによって長距離にもつれを拡張する仕組みが研究されている。リンクアーキテクチャの設計は、中央のBSA配置や光子源の配置によってMIM・MM・MSMと大きく分類されるが、MSMは理論上、高い耐損失性と試行効率を両立できる可能性が指摘されてきた。しかし、実際の実装プロトコルが明示的に示されておらず、本研究ではMSM方式の「具体的なメッセージの交換と局所動作」を定義し、性能を数値的に検証することで、大規模・実運用に向けた見通しを得ることを目的としている。

2. MSM方式の概要

Memory-Source-Memory (MSM)方式では、図1のように中間に置いたEPPS (Entangled Photon Pair Source)から、両端ノードへ光子ペアを連続的に送出する。各ノードは内部にBSAを備えており、ローカルな測定成功・失敗に応じてメモリを即座に開放または保持できる。これにより、無駄な待ち時間を最小化しつつ高頻度での試行を可能にしている。ただし、成功時には相手ノードとの古典通信を介して測定結果を照合し、初めてベル対生成が確定するため、ノード間距離が大きい場合には往復遅延が生じる。著者らは、EPPSのパルスレートやメモリ数との兼ね合いによってMSM方式の性能が飽和する現象があること

を指摘し、そのメカニズムを理論モデルで説明している。

3. プロトコル実装とシミュレーション

論文では、MSMにおける実装手順を詳細に示す。まず、EPPSが隣接ノードに対してタイミング通知を送り、指定された間隔で光子ペアを生成・送信する。ノード側はAlgorithm 1に従ってメモリから光子をBSAに向けて放出し、結果(成功・失敗・測定基底など)を古典通信で交換する(Algorithm 2、3)。これら一連の手続きが図2のようなシーケンスとして示されており、実運用時のメッセージフローを明確化している。本研究ではQuISPシミュレータ上にこのプロトコルを実装し、(1)チャンネル誤差を加味した忠実度の評価、(2)リンク距離やメモリ数、光子レートが異なる場合の鍵生成レート、(3)MIMリンクとの比較、などを多角的に測定している。

4. 結果と議論

実験1 (忠実度とPurification): まず、チャンネルにデポライズ誤差を仮定し、初期状態がWerner状態(忠実度0.7)である場合に、MSMとMIMの両方式でどの程度のベル対忠実度が得られるかを比較している。図3 (fidelities. pdf)によれば、若干の誤差分散はあるものの、基本的には両方式とも類似した振る舞いを示し、これは測定率の違いではなく、光学損失やエラー訂正の段階で性能が決

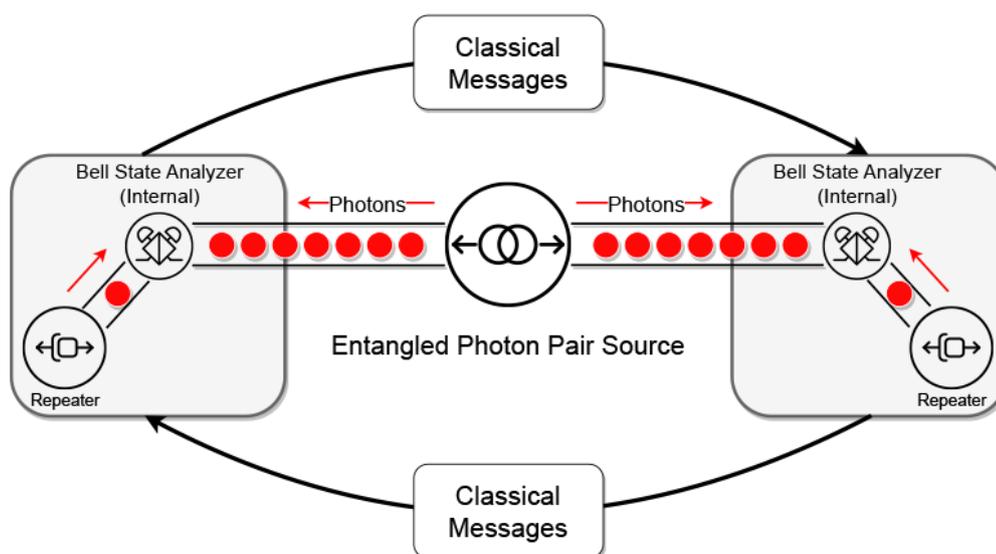


Figure1: MSMリンクアーキテクチャの概念図(本論文Fig.2に相当)。中央のEPPSから光子ペアが送出され、各ノード内部でのBSAによる測定結果に基づきメモリをロックする。

まることを意味する。

実験2 (ベル対生成時間とメモリ数): リンク距離を1km および20kmとし, メモリ数を1から128まで増やした際の100組ベル対生成時間をMIMとMSMで比較した(図 1.7, 1.7)。1kmの場合, MIMはメモリ数を増やすほど時間がリニアに短縮する一方, MSMは少数メモリではMIMより遅く, 多数メモリでは逆に高速になるが, さらにメモリ数を増やしても大きく改善しない飽和領域が存在することが分かった。20kmのケースでも同様に, MSMで一定メモリ数以上になると性能向上が頭打ちになる現象が観測されている。

5. 飽和現象の理論モデル

こうしたMSM特有の飽和について, 論文では簡易モデルを示し, EPPSからの光子パルスレートや往復遅延時間に対して最低限必要なメモリ数 N が存在することを定式化している。すなわち,

$$\mathcal{N} \geq \left\lceil \frac{2L}{c_{\text{fiber}}} p_{\text{success}} f_{\text{EPPS}} \right\rceil$$

と表せる。この範囲を超えてメモリを増やしても, さらに高速な光子送出を吸収しきれず, 結果として試行衝突や古典通信の遅延が増え, リンク全体の生成レートは飽和するという。実際のシミュレーション結果もこの理論的下限とよく整合している。

6. まとめと展望

本研究は, MSM方式における具体的な実装プロトコルを初めて提示し, MIM方式と比較して「メモリ数が十分な場合に高スループットを達成し得るが, 極端に多くしても飽和領域に突入する」という性能特性をQuISPによる数値実験で実証した。飽和現象の理論的根拠も示され, 特に長距離リンクではパルスレートや古典通信遅延との兼ね合いが重要となる。一方, MSMでは毎回の光子到着ごとに測定成功情報を交換するため, 古典通信メッセージ数がMIMやMMより増加する点も指摘されている。さらに, 本論文で想定した誤差モデルは比較的単純であり,

実際の大規模ネットワークにはノードごとのゲート誤差や高次の光学損失などを加味した最適化が不可欠であるとしている。著者らは, 衛星搭載型EPPSの活用や異種リンクアーキテクチャ (メモリレスリピータ, あるいは他種実装)との相互接続が量子インターネットの将来的な姿になると見通しており, 本研究を「多様な技術要素を取り込みながらも効率的なベル対生成を実現するための一歩」と位置づけている。

1.7 Performance of Quantum Networks Using Heterogeneous Link Architecturesの概要

本研究では, 量子ネットワークにおけるリンクアーキテクチャの異種混在(heterogeneity)が通信性能に与える影響を解析している。伝統的に, 量子リピータを用いた遠隔ノード間のもつれ生成方式としては, 光子を両端ノードから同時送信して中央のベル状態解析器(Bell State Analyzer; BSA)で干渉させるMIM (Memory-Interference-Memory)や, 片側ノードにBSAを内蔵したMM (Memory-Memory)などが提案されてきた。しかし, 近年ではMemory-Source-Memory (MSM)と呼ばれる方式も注目されており, もつれ光子ペア源(Entangled Photon Pair Source; EPPS)を中間に置くことで, 両端ノード各自がローカル測定の結果を素早く判断し, メモリを効率的に再利用できる利点をもつ。本論文は, MIMとMSMを中心に, 複数の異なるリンクアーキテクチャが混在する量子ネットワーク(以下, ヘテロジニアス構成)を考慮した場合のもつれ生成率を, シミュレータQuISP^{*6}を用いて評価している。

まず, 著者らはMSM方式の詳細を解析するため, 従来の研究[19]で示唆されていた“光子パルスレートを高くすれば常に性能が向上するわけではない”という点を再検証している。具体的には, MSMリンクにおいてEPPSの発生レート(f_{EPPS})を可変とし,

$$\mathcal{N} \geq \left\lceil \frac{2L}{c_{\text{fiber}}} p_{\text{success}} f_{\text{EPPS}} \right\rceil$$

という理論式を基に, 最適パルスレートを導出した。こ

*6 <https://aqua.sfc.wide.ad.jp/quisp/website/>

れにより、ノード間距離やメモリ数が少ない場合にはむしろレートを下げた方が衝突や待ち時間が減少し、結果的にもつれ生成速度が向上する現象を確認した。著者らはこの現象を「過度なパルスレートが“mutual latch-fail”

を引き起こす」と呼び、図6 (chain reaction.drawio.pdf) で模式的に説明している。

次に、論文ではMIM方式とMSM方式を比較し、さらに両

Algorithm 1 Photon emission in MSM setting

Require: Interval of emission specified by the EPPSTimingNotification: interval

```
0: function EMIT_PHOTONS_MSM(interval)
0:   photon_index ← photon_index + 1
0:   if There exist initialized memory qubits then
0:     Emit photon from one of the memory qubits
0:   end if
0:   Call EMIT_PHOTONS_MSM(interval) after waiting for interval
0: end function=0
```

Algorithm 2 Handle the click result (BSM result)

Require: BSM success result: success, BSM correction operation: correction, Memory qubit which emitted photon for this BSM: qubit

```
0: function HANDLE_CLICK_RESULT(success, correction, qubit)
0:   if success then
0:     success_map[photon_index] ← qubit, correction
0:   else
0:     Reset qubit
0:   end if
0:   Send (success, correction, photon_index) to partner
0: end function=0
```

Algorithm 3 Handle incoming classical messages

Require: Partner BSM success result: success, Partner BSM correction operation: correction, Photon index the partner performed BSM with: photon_index

```
0: function HANDLE_MSM_RESULT(success, correction, photon_index)
0:   if found photon_index in success_map then
0:     self_correction ← success_map[photon_index].correction
0:     qubit ← success_map[photon_index].qubit
0:     if success then
0:       if correction = self_correction and parnter_address <
self_address then
0:         Apply Pauli Z Gate to qubit
0:       end if
0:       Save Bell pair information
0:     else
0:       Reset qubit
0:     end if
0:   end if
0: end function=0
```

者を組み合わせたヘテロジニアス構成でのエンタングルメント生成性能を評価している。例えば、Experiment 1では1km/20kmの単一リンクを対象に、メモリ数を増やしたときのベル対生成率を測定している(図1.7や図1.7)。結果として、MIMはメモリ数にほぼニアに比例して性能が向上するのに対し、MSMは一定数を超えると飽和し、更なるメモリ増加による効果がほとんど得られないことが示された。

Experiment 2では、ノードが2ホップで接続されたネットワークを対象に、(1)全ホップをMSMで構成、(2)全ホップをMIMで構成、(3)一部のみ異なる方式を組み合わせるヘテロジニアス構成、という3パターンを比較し、図8のようなトポロジで性能を測定した。その結果、遅いリンク(たとえばMIMとMSMのどちらかが極端に遅い場合)が全体のボトルネックとなるため、生成率は「速いリンクと遅いリンクの中間程度」に落ち着くことが分かった。すなわち、ヘテロ構成だからといって劇的に性能が

落ちるわけではなく、むしろ最悪リンクの特性をどう改善するかが重要であると結論づけられている。

また、Experiment 3では10ノードのチェーンネットワークにおいて、大半をMSMとしつつ特定のリンクだけMIMに置き換えた場合のベル対生成率を検討している(図9)。ノード間距離やメモリ数の設定次第で、端ノード側のリンクをMIMにすると明らかに性能が劣化するケースがある一方、中間リンクを置き換えると大きな差が生じないことが観測された。これはエンタングルメントスワッピングの順序や各ノードのメモリ保持時間との兼ね合いによるものであり、「末端リンクがボトルネック化する場合がある」という知見が示されている。

以上の検討から、著者らは次の3点を強調している。第一に、MSM方式では光子ペア発生率を安易に増やせば性能が向上するわけではなく、むしろ衝突や古典通信待ちが増加して逆効果となり得る。第二に、ヘテロジニアス

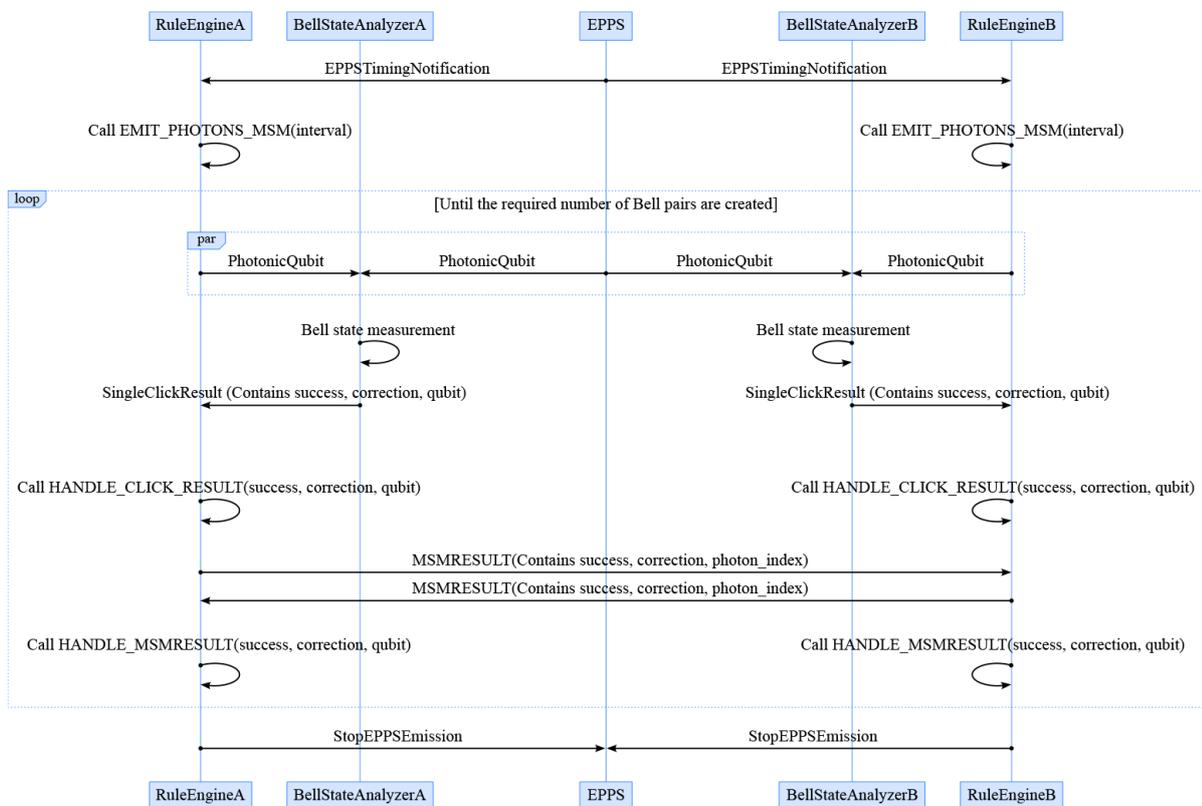


Figure2: MSMプロトコルの実装シーケンス例(本論文Fig.4に相当)。EPPSによる光子放出タイミングの通知から、各ノード内部での測定と古典通信を経てベル対が確立するまでの流れが示されている。

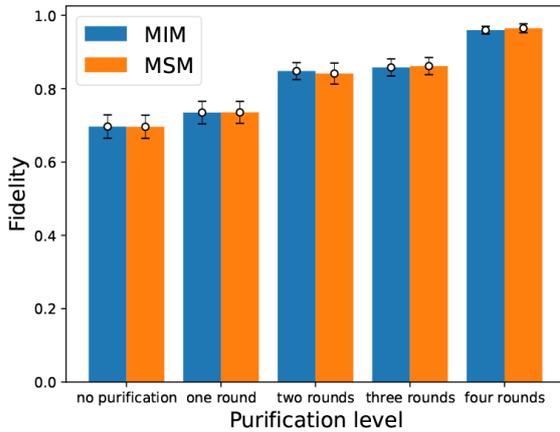


Figure3: MIM方式とMSM方式における忠実度比較(本論文 Fig.6相当)。Purificationラウンドを重ねるごとに、ほぼ同等の精度向上が得られる。

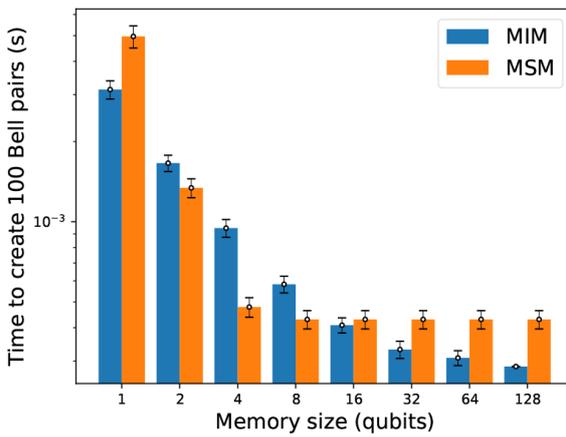


Figure4: MIMとMSMの比較(短距離1km)。メモリ数が増えるほどMSMがMIMを上回るが、ある閾値で飽和する(本論文 Fig.9相当)。

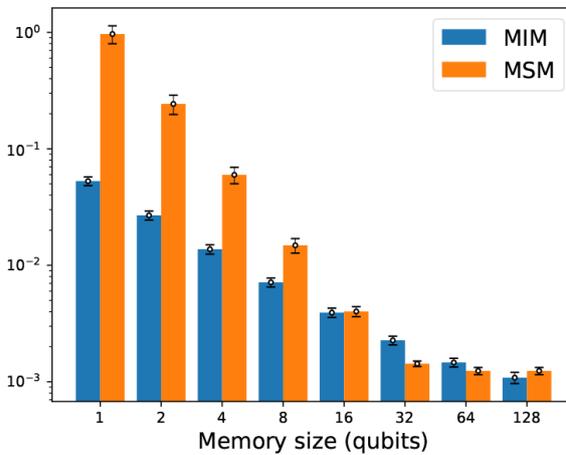


Figure5: MIMとMSMの比較(長距離20km)。MSMは一定メモリ数を超えると性能が横ばいになる(本論文 Fig.10相当)。

構成では理想的には遅いリンクの改善が鍵となり、リンク全体の平均性能は最悪リンクの影響を受ける。第三に、ノード間距離やメモリ資源を総合的に最適化する必要がある、特にエンドノード付近のリンク設計がネットワーク全体のもつれ生成率を左右する。これらの結論は、今後の量子ネットワーク拡張において複数技術の混在が避けられないことを考えると有用な示唆を与えるものである。

最終的に、本研究は実験1～3で得た結果から「複数リンクアーキテクチャが混在しても大きく性能を損なわないが、各リンクの特性差を理解し、調整することが不可欠」であると結論づけている。また、より大規模なノード数やメモリレス方式(all-photonic repeater)との組み合わせなど、さらなる研究課題も提示している。著者らは、量子インターネットの初期段階において多様な技術が併存するであろう現実を念頭に、適応的なリンク制御やスワッピング戦略を確立することが重要であると指摘している。

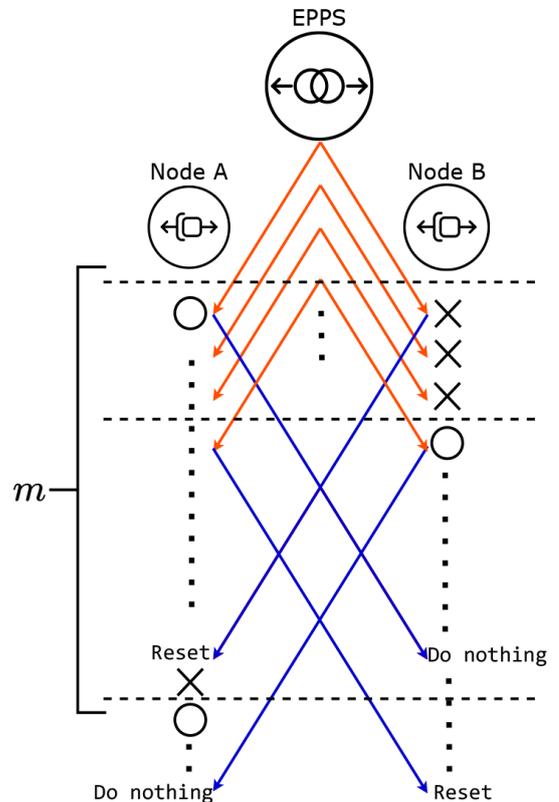


Figure6: MSMリンクでのmutual latch-failの模式図。赤線はもつれ光子ペア、青線は古典通信を示す。

1.8 Optimal Switching Networks for Paired-Egress Bell State Analyzer Poolsの概要

本論文では、量子ネットワークにおける光学スイッチング構造を「ペアドエグレス(pairedegress)」という新しい要件に合わせて最適化する方法を提案している。ペアドエグレスとは、ある光学スイッチの出力ポートが隣接し合う形でベル状態解析器(Bell State Analyzer; BSA)に接続され、入力側で選択した任意の2つの光子を同じBSAに振り分ける仕組みを指す。これにより、量子ノード間のもつれ生成(エンタングルメントスワッピング)を高効率に行うことが可能となる。本研究の結果、ペアドエグレス要件を満たしつつ、大規模化に適した平面(planar)構造で最少限のスイッチ数を実現する手法が示されている。

1. 背景と課題

近年、大規模量子計算機や量子インターネットを構築する上で、複数の量子ノードを相互に接続する量子ネットワークが不可欠である。しかし、古典的な通信のように、すべてのノード間を直接配線(リンク)で結ぶのは資源コスト面から現実的ではない。そこで、スイッチングネットワークを介して可変的にリンクを接続する方式が期待されている。一方で、量子通信では「エンタングルメントを共有する」という要件が従来のパケット転送モデルとは異なる。特に、長距離でももつれ生成を想定する場合は、中間に置かれたベル状態解析器(BSA)によって光子ペアの状態を測定することで、量子ノード同士のベル対(Bell pair)を確立する。本論文では、スイッチ出力側の

ポートがペア単位でBSAに接続されるアーキテクチャ(ペアドエグレス)を想定し、任意の入力光子ペアを任意のBSAに振り分けるための平面スイッチ設計の最適化を目指している。

2. ペアドエグレスと設計要件

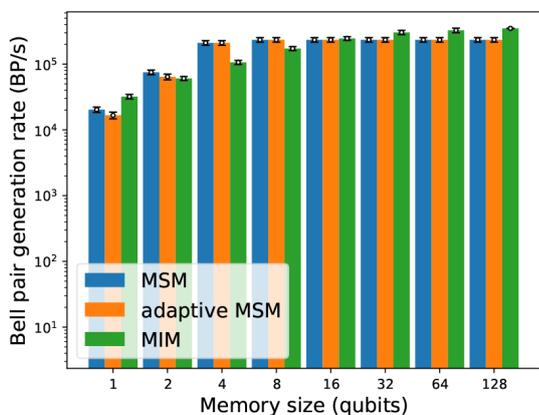
従来の全入出力間を実現できる「フルパーミュテーション」向けスイッチでは、大規模化すると非常に多くのスイッチ素子が必要となり、平面集積(photonic integrated circuit)での実現が困難となる。本研究では、任意の2光子を同じBSAに集めるというペアドエグレス条件だけを満たせばよいと割り切り、スイッチ規模を大幅に削減できることを示している。具体的には、N個の入力ポートに対して最小限必要となるスイッチ素子数は

$$\frac{N(N-2)}{4}$$

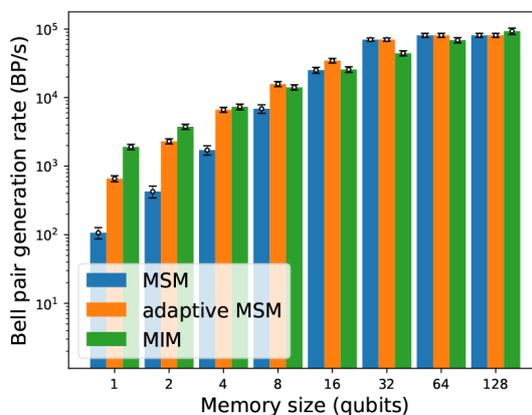
であることが証明されている。これはフルパーミュテーションスイッチ($N(N-1)/2$ 個)よりも半分以上少なく、量子ネットワークに特化した効率的な設計を可能にする。

3. 提案する3つの平面設計

著者らは上記の下限数を達成する3種類の平面スイッチアーキテクチャを提案している。以下はそれぞれの大きな特徴である。



1 km におけるリンク比較



20 km におけるリンク比較

Figure7: Experiment 1: MIMとMSM(アダプティブ/ノンアダプティブ)リンクのベル対生成レート。縦軸は対数スケールで、メモリ数が増加してもMSMでは早期に飽和領域に入る。

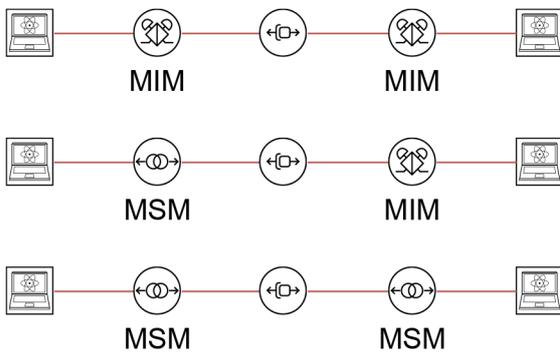


Figure8: Two hop networks where the link architectures are of various mixtures, which we simulated in experiment two.

- Triangular Design: 入力ポートから対角方向にスイッチ素子を配置した「三角形」状の構成である。スイッチ深度(最大で通過する素子数)は最大で $N-2$ となり、実装が単純でルーティングアルゴリズムも比較的容易に書ける。

- Chevron Design: 三角形のスイッチを上下に対称配置することで、スイッチ内部を「山形」に組み合わせたデザインである。Triangularよりもペア生成パスを短縮できる場合があり、ルーティングは少々複雑だが依然として $O(N^2)$ 時間で求められる。

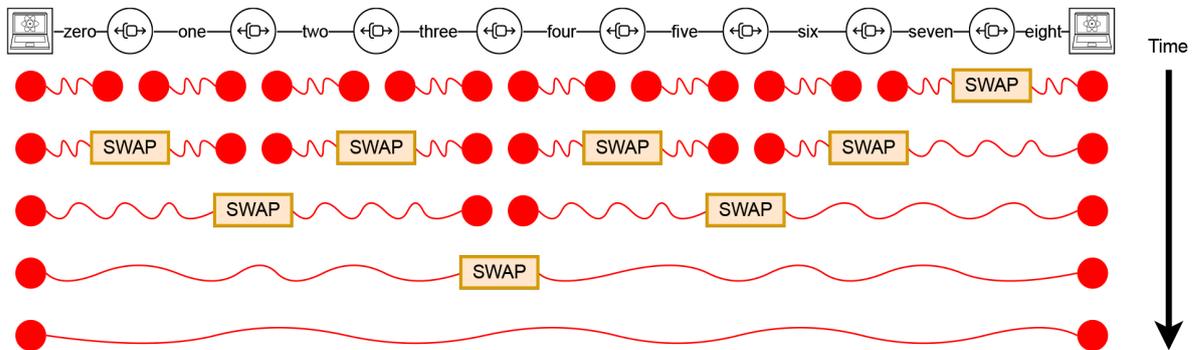


Figure9: The 10 node chain network. We name the links as shown in the top line, labeling them from link zero to link ten. They are all MSM links, but an MIM link replaces one specified link except for the homogeneous case. The lower portion of the figure illustrates the entanglement swapping sequence used in our simulations.

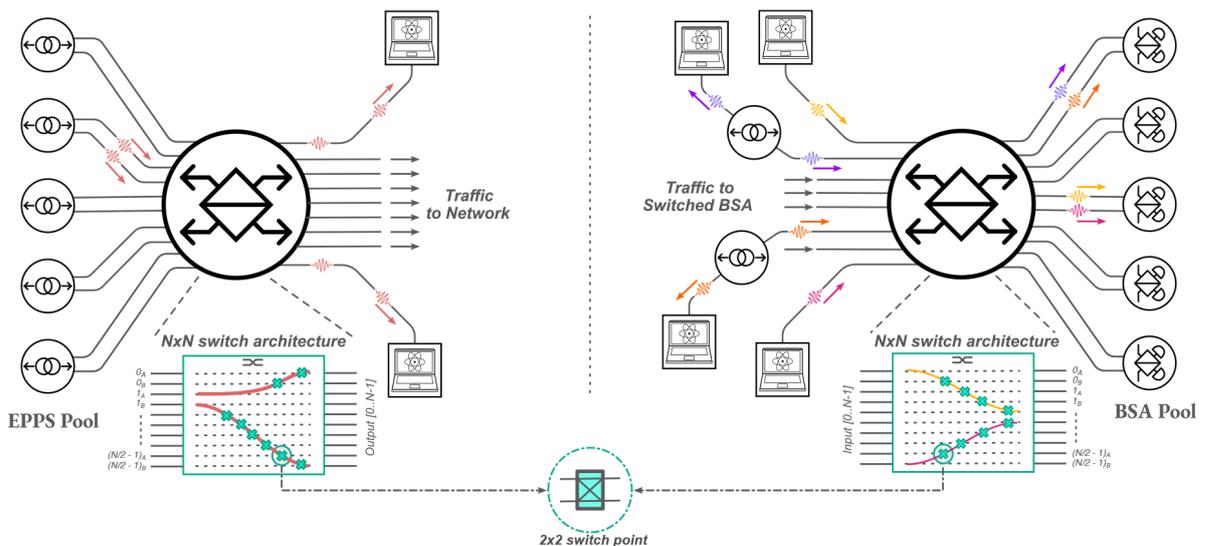


Figure10: 量子ネットワークでのスイッチ配置例(本論文Fig.1相当)。左は中央のEntangled Photon Pair Source(EPPS)プールから光子ペアを出力し、両端ノードへ分配する例。右はノード側から入射した光子をスイッチでペアリングし、共通のBSAプールに送る例。

- Brickwork Design: 上下交互にスイッチ素子を並べる「レンガ積み」状の構造であり、最大スイッチ深度はおおよそ $N/2$ に抑えられる。特に大規模化した場合、Triangularよりも通過損失を低減できる可能性が高い設計である。

いずれも平面配置を保ったまま最小限のスイッチ素子数 ($\frac{N(N-2)}{4}$) を満たす点で共通している。また、どの設計もすべてrearrangeably non-blocking (いかなる入力ペア組みでも詰まらずにルーティング可能) であることが示されている。

4. 動作イメージ

図10に示すように、スイッチは入力ポートから来る光子を内部の 2×2 スイッチ素子で必要に応じて交差(Cross)あるいは直進(Bar)させ、出力ポート側では常に2ポートがセットになってBSAへ接続される。このため、出力ポートのペアごとに測定を行えば、対応する入力光子が同一BSAに送られ、ベル測定によりもつれが生成される。加えて、光子源を中央に置く逆問題(EPPS Pool)にも同じ論理を反転させて適用することが可能である。

5. 評価と考察

最大スイッチ深度の観点でみると、Brickwork Designが最も浅い($N/2$ 程度)ため、すべての入力ポート間で損失をある程度均一に保ちやすい。一方、TriangularやChevronでは一部のポートがほぼ素子を通らない(深度0)代わりに、最悪ポートは $N-2$ 程度の深度を通ることになる。アプリケーション要求によっては「最悪ケースを抑えたい(Brickworkが有利)」「特定ポートだけ優先度が高い(Triangularで浅いポートを選択)」という使い分けも想定される。また、いずれの設計もルーティングに $O(N^3)$ の計算量が必要となるが、量子スイッチとしては実用的な範囲であり、時間ごとに再構成して多様なペアを並列生成可能であると考えられる。

6. 結論と今後の展望

本論文の主な貢献は以下の通りである。

- ペアドエグレス出力を想定した $N \times N$ 平面スイッチについて、下限スイッチ数が $\frac{N(N-2)}{4}$ であることを示し、

これを達成する3種類の設計を提示。

- 各設計に対して効率的($O(N^2)$)なルーティングアルゴリズムを提供し、rearrangeably non-blocking特性を保証。
- Triangular, Chevron, Brickworkといった異なる深度分布を持つ構造を提示し、ネットワーク損失のばらつきや優先度設計などの観点で一長一短があることを示唆。

これらの結果は、「BSAプールを共有する」量子ネットワークで高効率なもつれ生成を実現する上で重要である。特に大規模フォトニック集積回路(PIC)上での実装を視野に入れる場合、本研究のような平面設計の最適化が不可欠となる。また、EPPSプールを活用した逆方向のリンク構成や、衛星通信・ホログラフィック導波路など平面に留まらない構成でも参考になると考えられる。将来的には、メモリレス型リピータとの連携や大規模ノード数への拡張など、多様な物理実装と組み合わせる研究が期待されている。

1.9 Scalable Timing Coordination of Bell State Analyzers in Quantum Networksの概要

本論文は、量子ネットワークにおける光学的なベル状態解析器(Bell State Analyzer; 以下BSA)のタイミング同期機構を多ノード規模へ拡張する際の問題を検討し、どのように制御すれば大域的な同期の破綻を回避しつつ高い効率でエンタングルメント生成を行えるかを論じている。量子ネットワークは、ノード間でベル対(Bellペア)を共有し、そのもつれをエンドツーエンドに拡張することで量子テレポーテーションなどの応用を実現するものであるが、フォトン損失や同時到着性の確保といった問題を含むため、古典ネットワークとは異なる新たな手法が必要である。特に、BSAを用いたもつれ交換の成功率を最大化するには、2つの光子が同時刻かつ同じ空間モードで干渉することが必須となる。本研究では、BSA側がタイミング調整を担うという方針をとることで、個々のリンク単位に同期領域(Photonic Synchronization Domain, PSD)を閉じ込め、ネットワーク全体へと不要な同期情報の伝搬が生じないようにする手法を提案している。以下に要点をまとめる。

1. 背景と問題設定

量子ネットワークは、もつれ生成に基づく長距離量子通信や分散量子計算を実現する基盤技術である。ところが、光子は損失が大きく、古典的なリピータのように中継増幅を行えないため、もつれ交換(entanglement swapping)という操作が必要になる。具体的には、複数ノードから送られる光子を中間ノードにて干渉測定(BSA)し、その古典的測定結果に応じてもつれを拡張する。ここで干渉が生じるには、光子の同時到着とモードの一致が重要である。

従来の提案では、光子発生のタイミングをノード間で直接同期させる、あるいは中間ノードから励起レーザーパルスを送るなどの方法が想定されてきた。しかし、複数リンク(多ホップ)でこの方法を適用すると、各リンクが他リンクの同期に影響を与え合う「同期カスケード」が発生する。また、量子メモリを用いないオールフォトニクス型リピータでは、各段階でのタイミング制御がよりシビアになる。本論文では、BSA側での光路長(あるいは光学ディレイライン)による調整を中心に据え、ネットワーク全体への悪影響を回避する設計指針を示している。

2.2ノード間のBSA同期: 4つのシナリオ

まずは2ノード+1つのBSA(サポートノード)という単純な構成を想定する。ベルペア光子の同時到着を実現するための方法を、以下の4種類に分類している。

- (1)BSAが励起レーザーを送信(古典チャンネル・赤矢印)ネットワークノードは受信したタイミングで光子を生成し、その光子(青矢印)をBSAへ送る。BSA側は光路上のディレイラインで遅延調整を行い、同時到着を図る。
- (2)もつれ光子の光路長を調整ノードが独立に光子を生成し、BSA側で光学ディレイラインを挿入しつつ2本の光路を合わせる。量子メモリを簡易的なバッファとして扱う場合もこれに相当する。
- (3)オフセット調整BSAから送られる測定用古典信号の到着に対して、ノードが光子発生を意図的に遅延させる。BSAの指示に従って発射タイミングを少しずらし、最終的に同時到着を合わせる。

- (4)ノード同士の周波数同期ノードAとBの光子発生周波数をビート同期し、BSAでは光路調整だけを行う。ノード間同期がとれていれば、到着タイミングの補償量を小さくできる。

実際には、量子チャンネル上でディレイラインを挿入するのは損失増大を招くため、(1)あるいは(3)のように「古典チャンネル側で制御し、BSAで最終的に確認する」形が好ましい。

3.多ノード拡張時のスケラビリティ問題

次に、図11や12のように複数ノード・多ホップ構成に拡張すると、ノード間でのタイミング制御が隣接リンクを超えて伝播する可能性がある。例えば、BSA1への同期のための調整がBSA2にも影響し、さらに次のBSA3にも波及するような「同期カスケード」を招きかねない。

本研究の結論としては、各ノードは基本的に独立したタイミングで光子生成を行い、BSA側が光学ディレイラインで最終調整をするのが最も実装しやすいと指摘している。これにより、個々のリンク(PSD)は局所的な同期制御で完結し、ネットワーク全体の複雑な伝播が不要となる。

4.量子メモリ導入による効果

量子メモリは、光子を一時的に格納し後で再度取り出せるデバイスであり、メモリ時間が十分に長く可変であれば、別々のタイミングで生成された光子を後から同時測定できる。これは大域的な同期をさらに簡素化し、リソース制御の柔軟性を高める。たとえば、ネットワーク上で少しずつ確率的に成功したもつれを徐々に溜め込み、最終的にエンドツーエンドのもつれ交換を高確率で成功させる仕組みが実現しやすくなる。

5.ループ構造・複数経路の問題

さらに大規模化すると、図13のように複数の経路を同時利用したり、ループ構造をもつネットワークが考えられる。この場合、各経路でタイミング同期を取る際に「すべての経路で同時にフォトン到着させる」ことは、光学ディレイラインのレンジが限られると難しく、ループ全体を完全同期させるのは一般に不可能である。同期の不一致は多パーティもつれ生成などにも影響を与えるた

め、マルチパスの扱いでは全経路同時同期を必ずしも前提としない設計が必要になる。

- 個々のノードは継続的に独立タイミングで光子を生成する
- BSAでディレイライン調整を行い、複数ノードから到着する光子の同時性を確保する

6. 結論

本論文は、BSA同期メカニズムによって量子ネットワークのもつれ交換を行う際に、BSAノード側での光路調整が最もシンプルかつ拡張性が高いと結論付けている。具体的には、

という設計をとれば、多ホップ環境であっても同期情報がカスケード的に伝搬せず、局所リンクに閉じた制御で済む。

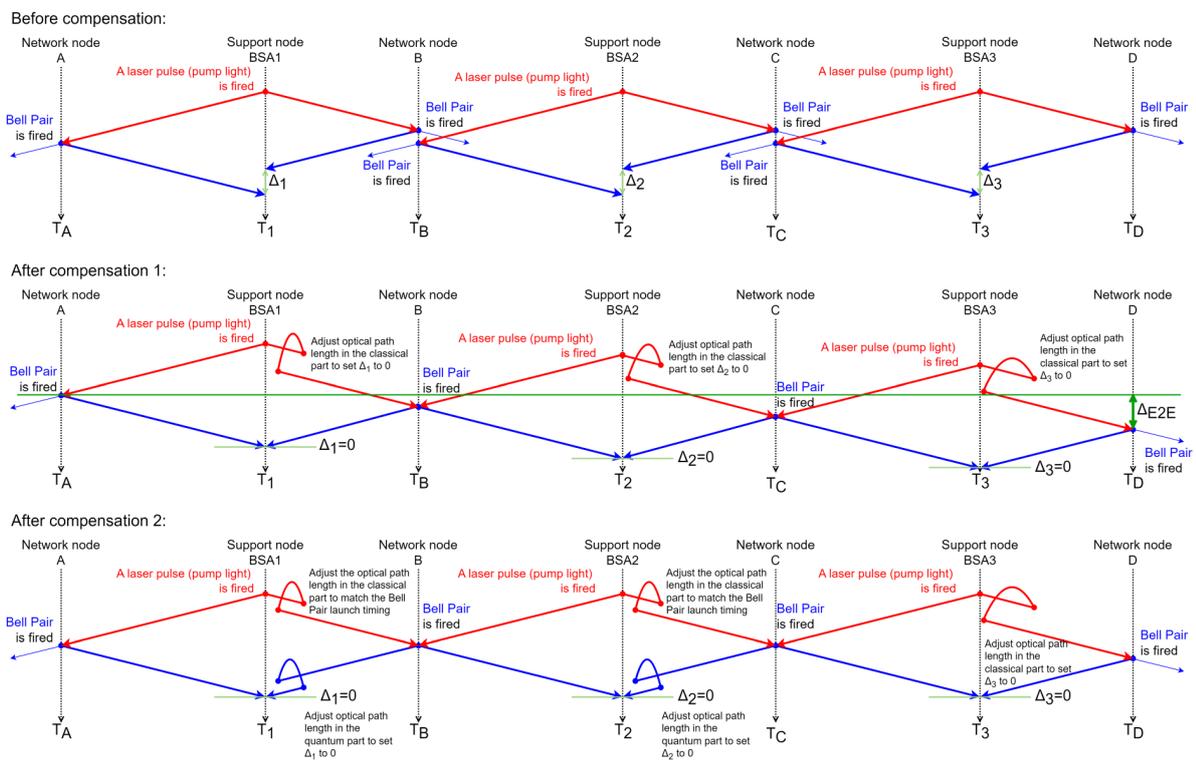


Figure11: 4つのネットワークノードの場合であっても、各サポートノードは、隣接するネットワークノードにレーザーパルスを放射してベルペア光子を生成するか、そのネットワークノードにベルペア光子を生成するよう指示を出す(赤い矢印で表現)。その結果、ベルペア光子は、各ネットワークノードからサポートノードに向けて発射される(青い矢印で表現)。発射タイミングを同期させるため、古典的な光路の調整が行われる。古典的な光路調整のみを使用すると、BSA1の同期情報が伝播し、ベルペア光子の発射タイミングが変化する(補償後1)。さらに、ネットワークノードで生成されたエンタングルメント光子がBSAに到達するまでの光路を補償することで、タイミングが調整される(補償後2)。

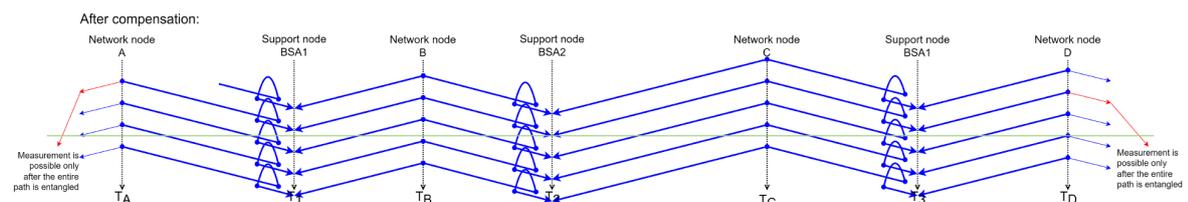


Figure12: 各ネットワークノードは、一定のタイミングでベルペア光子を連続的に出力し、これらの光子はサポートノードのBSAに導かれ、そこで光路調整が行われてタイミングが揃えられ、適宜エンタングルメントスワッピングが実行される。

さらに、量子メモリを導入すればメモリ時間内でタイミングを「好きなときに合わせる」ことができるため、エンドツーエンドの成功率が向上し、ネットワーク規模の拡大に耐えやすくなる。

将来的なオールフォトニック型リピータや、大規模ループネットワークでの冗長経路利用などにも、本研究で示された「BSAドリブンの光学ディレイ調整」という基本戦略は応用可能である。本知見によって、タイミング同期の難度を低減し、量子ネットワーク実装におけるエンタングルメント生成効率と信頼性を高めることが期待される。

1.10 Q-Fly: An Optical Interconnect for Modular Quantum Multicomputers

本稿では、量子コンピュータを大規模化するうえで不可欠とされるモジュール型アーキテクチャを実現するための新たな光学インターコネクタ「Q-Fly」を提案している。従来の古典的なマルチコンピュータアーキテクチャでは、大規模システムにおけるノード間接続にDragonflyのようなスイッチングトポロジがしばしば用いられてきたが、量子系においては単一光子の損失が可逆的に補償できない、操作が確率的である、フォトン検出器に高精度かつ低温環境が必要になるなど、古典システムとは大きく異なる制約が存在する。本研究では、そうした問題を踏まえつつ、各グループ内にスイッチング装置とBell State Analyzer (BSA)を集約し、グループ間を低ホップで結ぶ「fly」型のネットワークを量子用に再構築している。

まず、量子ネットワークにおいて鍵となるのは、遠隔ノード間でのベルペア(もつれ)分配である。これは線形光学に基づくBell測定が最大50%の成功率しか持たないという確率的特性をはじめ、単一光子の損失が論理レベルでの誤りに直結する点や、同時到着を要求するHong-Ou-Mandel干渉のような厳しい同期精度など、多くの困難を伴う。本論文が提案するQ-Flyは、こうした問題に対応するために、グループスイッチの挿入損失をできるだけ抑えつつ、ノード間のもつれスワップを柔軟に制御できる構造を目指している。具体的には、単方向接続のみを用いたsingle-path, quasi-half duplex、双方向に敷設したdual-path, quasi-half duplex、ノードが二つの光学ポートをもつdual-path, quasi-full duplexという三種類のトポロジを提案している。図示された全体像としては、たとえばsingle-path構成ではグループを円環的に並べ、スイッチの出力ポートのうち一部がBSAに、残りが他のグループに接続される仕組みをとる。

図14上の画像は、実験で実際に構築したうちのローカルグループ部分を強調した模式図である。ここでは3ノード(A、B、C)からなる小規模系を作り、それぞれのノードでエンタングルド光子対(EPPS)を生成し、片方の光子をノード側で測定、もう片方の光子を光学スイッチ(MEMSなど)とBSAが配置されたサポートノードに送って干渉させる。これにより、どのペアのノードに対しても動的にもつれを配分することが可能である。実際に本実験系では約数Hzレベルの生成速度ではあるが、2ホップ経由の

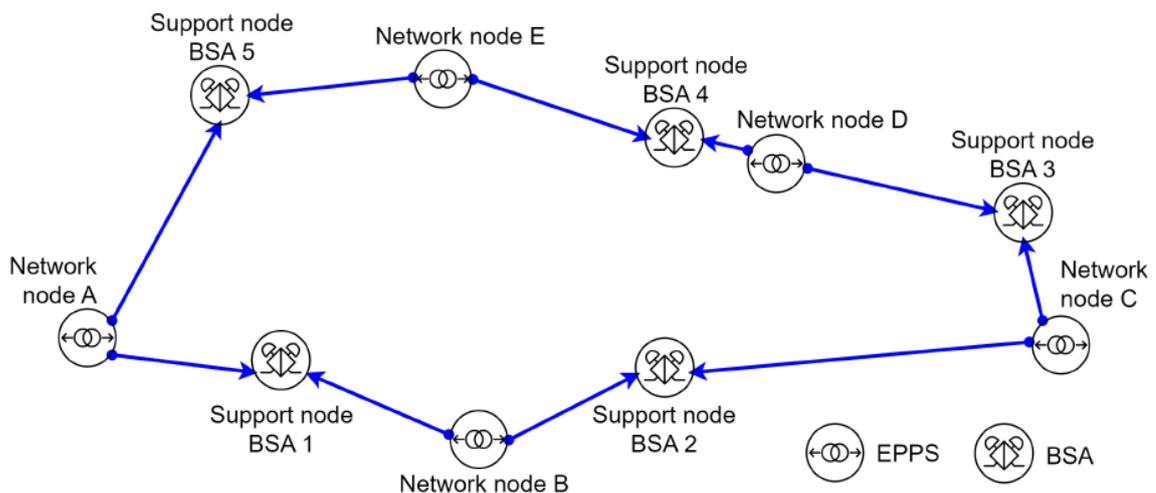


Figure13: ループ構造のあるネットワーク

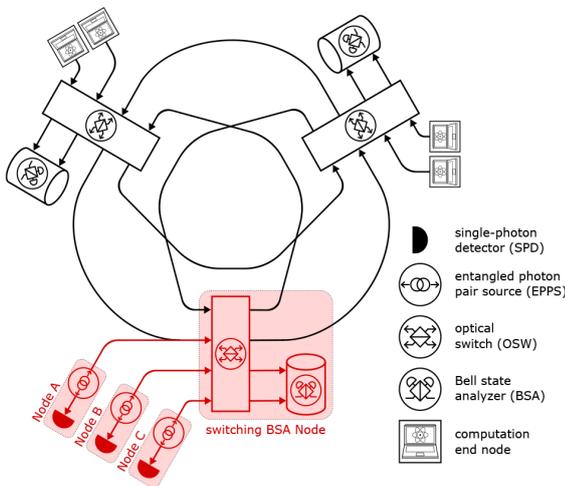


Figure 14: A three-group Q-Fly with the experimental demonstration shown in red. Entangled pairs of photons are generated at the EPPS nodes. One photon of each pair is measured by the single-photon detectors (SPDs). The remaining photons are guided to the switching BSA node, composed of an optical switch (OSW) and a Bell state analyzer (BSA). The BSA and other detectors are housed inside a cryostat, represented by the cylinder.

ベルペアにおいてFidelityが0.60 ~ 0.64という良好な結果を得ている。これは現在の光学素子の損失(60dB以上)やBSA成功率(理論上0.25)がボトルネックとなる一方で、同期や偏光補償を適切に行えば十分にエンタングルメントを確立し得ることを示唆する。

図15は、ローカルグループの実証に用いた実験概要図である。

さらに大規模化を念頭に、著者らは論理レベルの量子フーリエ変換(QFT)を例としたシミュレーション評価を行っている。複数ノード間でのリモートCNOTゲートを行うには、まず物理ベルペアを多数生成しエラー検出(purification)を経て高忠実度の論理ベルペアを確保する必要があるが、その繰り返し速度やスイッチ制御による遅延が実行性能を左右する。本稿では、ノード数やグループサイズ、スイッチのラジックスに応じて推定される損失量(dB)をもとに、所要時間の変化を比較している。結果として、ホップ数を削減できるトポロジほど単一チップ実装と比べた際のオーバーヘッドが小さく、最適な構成では2倍程度の遅延増で済むケースを見出している。つ

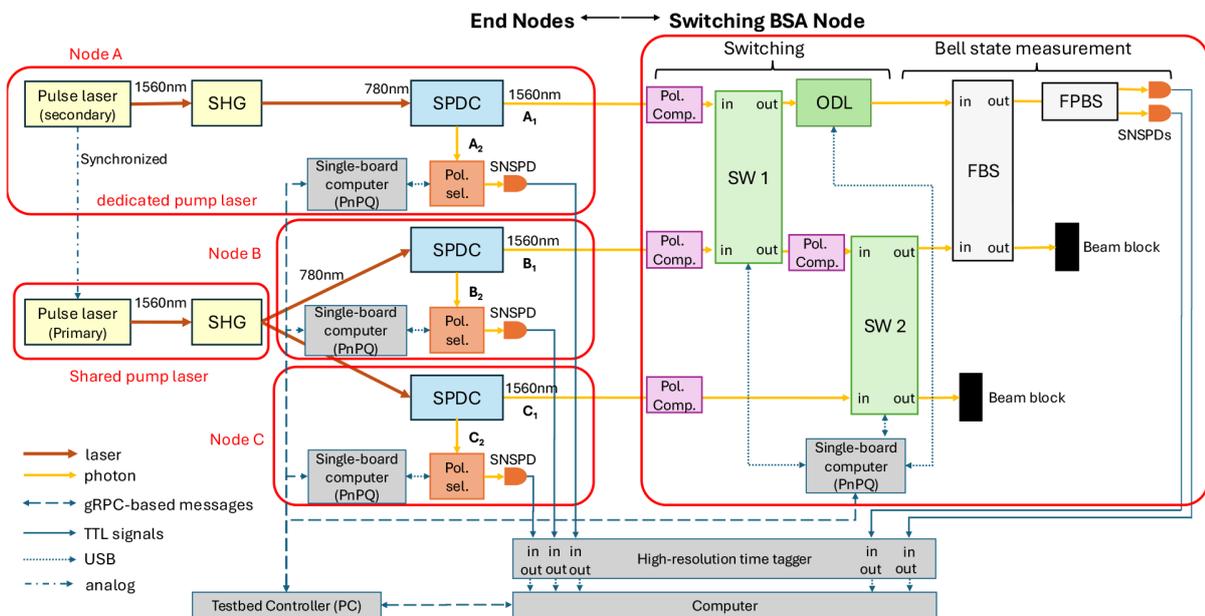


Figure 15: Optical system, analog and digital control systems corresponding to the red portions of Fig. 14. FBS, fiber beam splitter. FPBS, fiber polarizing beam splitter. ODL, optical delay line. Pol. comp., polarization compensator. Pol. sel., polarization selector. SHG, second harmonic generation (frequency doubler). SNSPD, superconducting nanowire single photon detector. SPDC, spontaneous parametric down conversion. SW, switch.

まり、論理キュビットを多数格納するノードを少数配置するよりも、小さめのノードを多くグループ化して双方向ファイバを通じてダイレクトにもつれ交換を行う方が高い並列度を得られ、結果的に高速化が見込まれる。

図16の画像のように、各ノードで生成された2光子が高い忠実度(例として約94%など)であることも示しており、これが最終的にもつれスワップ後の論理ベルペアにも反映される。本論文ではさらに、SNSPDなどの高性能検出器が必要なことや、光学ディレイラインや偏光補償器による再調整に数秒オーダーがかかるなど、実装上の課題と将来的な見通しについても議論している。総じて、Q-Flyはスイッチ規模やノード数を変動させやすいDragonfly型アーキテクチャを量子向けに再設計し、分散量子計算において生じる大きな課題(損失、エラー率、確率的成功率など)を軽減できるネットワーク基盤を提供し得るという主張を立てている。とりわけ、大規模化に対して「各グループでBSAとスイッチを共有する」構成は、複数ノード間のもつれ交換を柔軟に制御する観点で大きな優位性を持つと結論づけている。

以上より、Q-Flyは現状のハードウェア技術でも実現可能な範囲でありながら、将来的に数百～数千ノード規模の

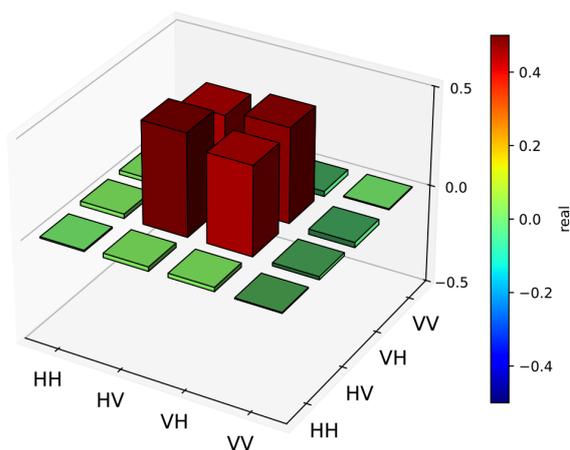


Figure 16: Real part of the reconstructed density matrix $\rho_{A_1A_2}$, characterizing the entangled pairs of photons produced at node A. This shows clearly that entangled pairs with opposite polarizations are produced with high probability (high fidelity). For this data, photon A_1 is measured before being sent to the switching BSA node.

量子マルチコンピュータを構築する際の実装指針を与えているものとしている。実験およびシミュレーションの結果は、光学スイッチ(MEMS、シリコンフォトニクス等)の種類や検出器の性能がネットワーク全体の損失と同期精度に大きく影響する一方で、適切な制御プロトコルやトポロジ設計により、分散量子計算での実用的な性能を期待できることを示唆している。本研究は量子ネットワークアーキテクチャと分散アプリケーション実行との橋渡しを行う包括的な試みと位置づけられ、今後の標準化(RFC9340への準拠など)も視野に入れ、複数の研究グループや企業との相互運用性を高める意義が強調されている。

1.11 Repeater Graph State Designs

A repeater graph state (RGS) is a special form of entangled quantum state designed to be tolerant of loss of qubits in the graph state [15]. This tolerance makes it attractive for communications. One of the biggest challenges in quantum communications is the need for round-trip messaging to signal success or failure of entanglement creation. If RGS can be leveraged effectively, then those round-trip delays can be eliminated and the rate of entanglement generation could be boosted substantially. Ideally, the RGS would be generated using only single photons entangled as they are emitted by some system. However, an RGS is extremely challenging to make.

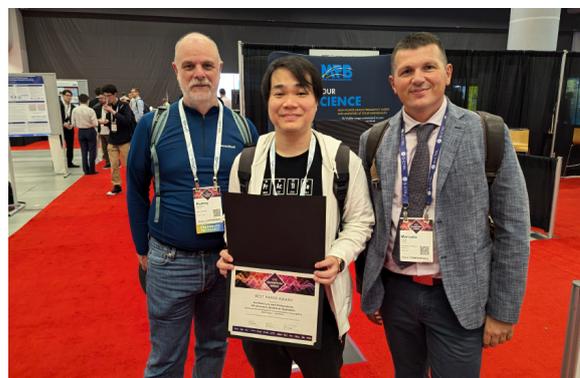


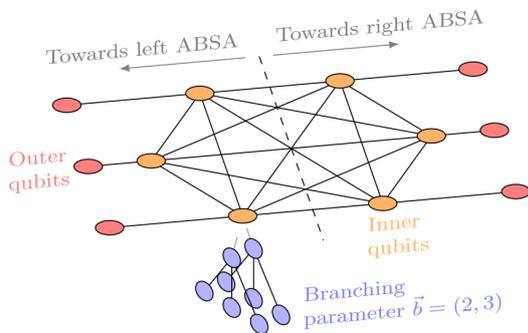
Figure 17: Rodney Van Meter, Naphan Benchasattabuse and Marcello Caleffi (IEEE QCE 2024 Communications Track program chair). Our RGS paper was awarded Best Paper Second Place.

In 2024, we proposed a new emitter-photonic qubit building block and an RGS protocol that addresses several key considerations: end node involvement in connection establishment, decoding of logical qubits within the RGS, and computing the Pauli frame corrections at each participating node to ensure the desired correct end-to-end Bell pair state [16]. Our proposed building block significantly reduces the total

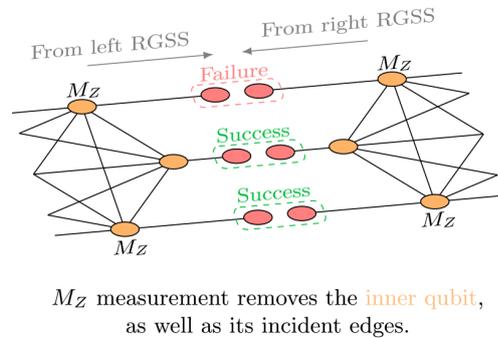
number of emissive quantum memories required for end nodes and seamlessly integrates all-photonic and memory-based repeaters under the same communication protocol. We also present an algorithm for decoding logical measurement results, employing graphical reasoning based on graph state manipulation rules.

The IEEE Quantum Week paper in which these results

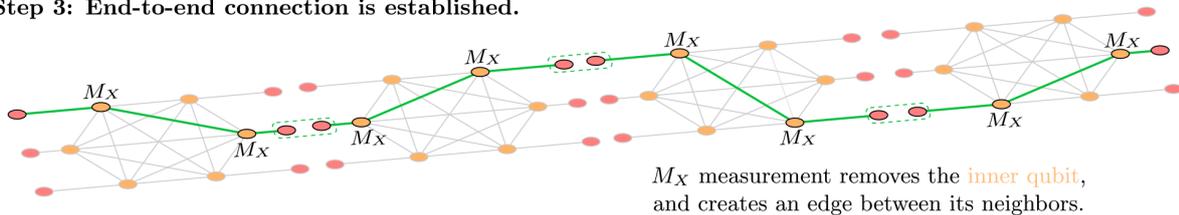
Step 1: Repeater graph state source (RGSS) creates the RGS.



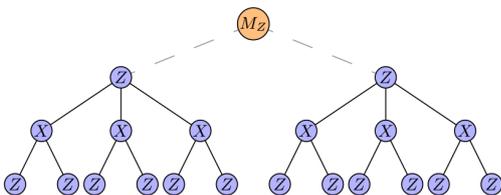
Step 2: Advanced Bell state analyzer (ABSA) splices two RGS together.



Step 3: End-to-end connection is established.



M_z measurement of the inner qubit:



Indirect M_z measurement of the inner qubit:

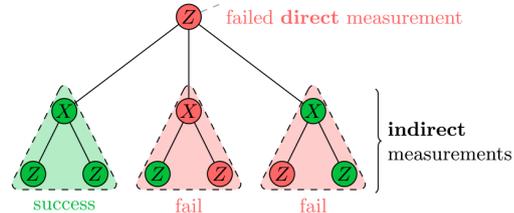


Figure 18: An overview of the RGS scheme. The three steps shown here have corresponding actions to the memory-based repeater scheme, where inner encoded qubits correspond to the memories while outer qubits correspond to the emitted photons. RGS generation in step 1 (at RGSS) mirrors the entanglement swapping of quantum memories but without actually choosing which inner qubits will be paired up. Step 2 (at ABSA) illustrates the link-level generation process through the BSM between each pair of outer qubits. The Z measurement on inner qubits in step 2 and the X measurements in step 3 signify the choosing of which pairs are swapped. Logical measurement of inner qubits in the Z basis is depicted at the bottom. The Z and X labels inside the blue physical qubits indicate the actual physical measurement bases. For logical X measurement, the Z and X measurement bases of physical qubits are swapped. The indirect Z basis measurement of a physical qubit in the tree encoding is shown in the bottom right. If a direct Z measurement on a qubit fails due to photon loss, the result can still be inferred from the eigenvalue parity of qubits within any of the dotted triangles.

were presented received the Best Paper Second Place Award on the Communications track (Fig. 17).

The RGS is made of $2m$ inner qubits, forming a complete graph, and $2m$ outer qubits, linked to an inner qubit, as depicted in Fig. 18. This complete graph of inner qubits encodes the entanglement swap, and is done before the RGS are sent out to the measurement devices generating the link-level entanglement, thus it is considered a “time-reversed” procedure.

Some of the advances in our work are shown in Fig. 19, depicting the use of the Repeater Graph State Source (RGSS) and Advanced Bell State Analyzer (ABSA) nodes.

Additional engineering work showing how to reduce the classical communication cost by orders of magnitude was published in IEEE Network[17].

In 2024, WIDE members Rodney Van Meter and Michal Hajdušek supervised the creation of an online course on quantum entrepreneurship, created by Kanetaka Maki and his team at Waseda University. This course is part of the Quantum Academy of Science and Technology ^{*7}, funded by the government’s Q-Leap program administered by JST ^{*8}.

This course follows on from our prior courses, “Overview of Quantum Communications”, “From Classical to Quantum Light”, and “Quantum Internet”. These first three courses are available on YouTube ^{*9} as well as the limitedaccess learning management system available to students of selected universities.

In 2025, we expect to release an introductory quantum

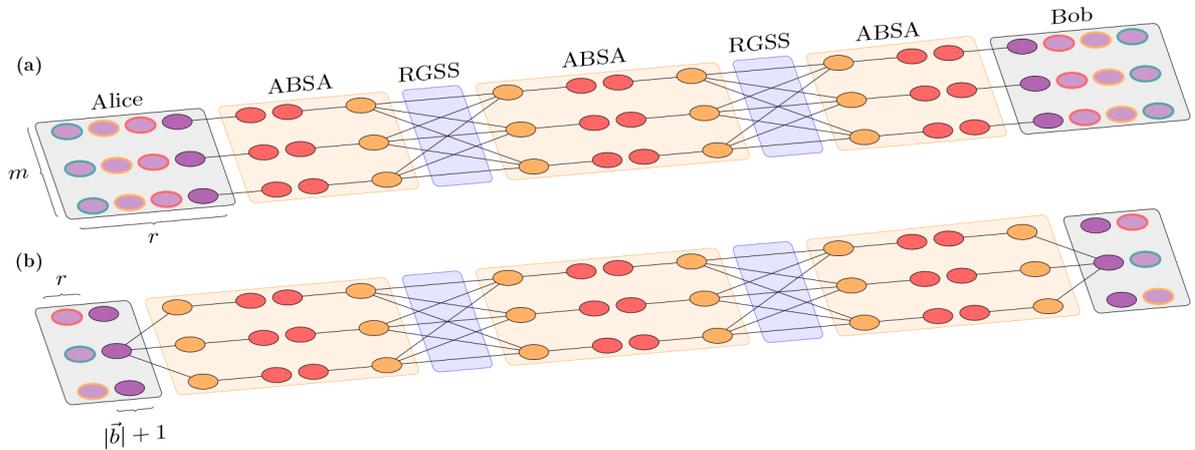


Figure 19: Prior to our work, RGS was understood mostly as an abstraction. Our work proposes specific node roles and actions that will implement RGS. This figure shows architectures supporting the RGS scheme where the photonic states generated at end nodes are different. (a) The architecture proposed in [20], where end nodes require m emissive memories for each trial, along with m idle memories that have already been utilized in prior trials and are awaiting messages from all ABSAs. (b) Proposed architecture, featuring end nodes equipped with half-RGS building blocks. In this setup, end nodes require $|\vec{b}|+1$ quantum emitters (where $|\vec{b}|$ represents the depth of the tree encoding plus one), while reserving r memories awaiting notification messages from prior trials. Purple circles with black borders represent the quantum emitters utilized in the current trial. Purple circles with colored borders in both (a) and (b) indicate idle memories awaiting messages from ABSAs, with the same colors denoting memories participating in the same trials.

*7 <https://qacademy.jp/>

*8 <https://www.jst.go.jp/stpp/q-leap/en/index.html>

*9 <https://www.youtube.com/c/QuantumCommEdu>

optics laboratory course. filmed in the laboratory where the Q-Fly described above is being conducted.

At Keio University's Shonan Fujisawa Campus, Prof. Van Meter taught the new undergraduate course "Quantum Internet" for the second time in fall 2024. We believe this is the first course on quantum Internet for undergraduates anywhere in the world.

In November, 2023, Hajdušek and Van Meter released a draft of their undergraduate textbook Quantum Communications under a Creative Commons license^{*10}. We are currently negotiating with a major international publisher to produce a print edition of the book.

Throughout 2024, Van Meter continued to serve the community as Editor in Chief of IEEE Transactions on Quantum Engineering. His first three-year term ends in March 2025, and he may be reappointed for a second term.

第3章 Quantum Computation

In quantum computation, WIDE members work mostly on system software and concepts: debugging and software engineering practice; compilers and compilation techniques for both NISQ and fault-tolerant quantum computers; and error management techniques. We also conduct some algorithms research and development.

In fall 2024, Prof. Van Meter's student Sara Metwalli of SFC's Graduate School of Media Design completed her Ph.D. work with a thesis titled A Suite For Testing and Debugging Quantum Programs^{*11}. This may be the world's first Ph.D. thesis on debugging quantum programs, and represents a significant contribution to the emerging field of quantum software engineering.

To debug quantum programs, we begin by slicing a circuit into pieces with a particular characteristic impact on superpositions. The following three categories cover the possible behavior:

- **Amplitude-Permutation (AP) Blocks** permute the amplitudes of quantum states. These circuits mimic the operation of reversible classical logic within the quantum realm. Hence, only rearranging the amplitudes associated with the quantum states without redistributing them or altering their phases. An example is a quantum adder or Grover's oracle. Those blocks are essentially classical reversible logic [18]. Mathematically, for set of states $\alpha_j |j\rangle$, an AP block can be defined as

$$\sum_j \alpha_j |j\rangle \rightarrow \sum_j \alpha_{\Pi(j)} |j\rangle. \quad (1)$$

Where $\Pi(j)$ is a permutation function. A permutation matrix has exactly one 1 in each row and column. An example of a 2-qubit AP block unitary is

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

- **Phase-Modulation (PM) Blocks** Quantum circuits that focus exclusively on altering the phases of quantum states without changing their amplitudes. The primary function of these circuits is to introduce phase shifts based on values of certain qubits. Mathematically, for set of states $\alpha_j |j\rangle$, a PM block can be defined as

$$\sum_j \alpha_j |j\rangle \rightarrow \sum_j \alpha_j e^{i\pi f(j)} |j\rangle. \quad (3)$$

where $f(j)$ is a function that calculates the phase shift of a state $\theta_j, f(j) \in R$. The unitary of a PM block will be a diagonal matrix D with $D_{jj} = e^{i\pi f(j)}$.

*10 <https://arxiv.org/abs/2311.02367>

*11 https://aqua.sfc.wide.ad.jp/publications/thesis_sara_arvix.pdf

• **Amplitude-Redistribution (AR) Blocks** Unlike the Amplitude-Permutation Circuits, these circuits redistribute the amplitudes across various quantum states, thereby harnessing the full potential of quantum superposition and entanglement. An example of an AR block is the Quantum Fourier Transform (QFT). An AR block contains gates that alter interference patterns and create or destroy superposition. AR blocks can be represented as

$$\sum_j \alpha_j |j\rangle \rightarrow \sum_j \alpha'_j |j\rangle. \quad (4)$$

Where $\alpha'_j = \sum_k U_{j,k} \alpha_k$. Here, U is a unitary matrix applied to the qubits.

Once that category has been determined, each slice can be debugged independently. AP blocks can be debugged classically, both because such blocks are known to be efficiently simulatable in quantum systems and because they can be debugged one amplitude at a time.

For Phase-Modulation blocks, two common errors will be (a) applying the correct phase shift to the wrong qubit, and (b) applying the wrong phase shift to the right qubit (including omitting a needed gate). (For simplicity, we omit controlled phase gates here.) Test vectors need to be prepared to help us distinguish these two cases. For example, the unitary for a three-qubit phase slice is shown in Figure 20.

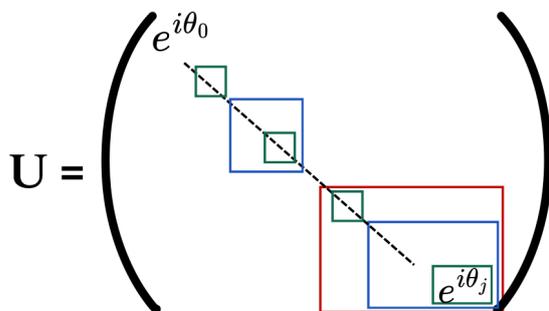


Figure20: The unitary for a three-qubit phase slice. The colored boxes delineate terms affected by errors in the high-order (red), middle (blue), and low-order (green) qubits.

These likewise can be tested and debugged relatively efficiently.

This leaves only AR (amplitude redistribution) blocks as the difficult case. Such blocks can be tested in part using hand-built test cases with simple structure to test much more complex, general blocks.

第4章 Publications

• Journal Papers (2024)

- N Benchasattabuse, M Hajdušek, R Van Meter, “Engineering Challenges in All-photonic Quantum Repeaters”, IEEE Network, 39(1), Jan. 2025. doi: 10.1109/MNET.2024.3411802
- SA Metwalli, R Van Meter, “Testing and Debugging Quantum Circuits” IEEE Transactions on Quantum Engineering, 5, 2500415, Mar. 2024. doi: 10.1109/TQE.2024.3374879

• Invited Paper (2024)

- Shota Nagayama, Toshihiko Sasaki, Akihito Soeda. “Backcasting Perspectives on Services of Future Quantum Internet.” 2024 IEEE International Conference on Quantum Software (QSW), Shenzhen, China, 2024, pp. 12–18, doi: 10.1109/QSW62656.2024.00015.

• Invited Talks (2024)

- Shota Nagayama. “Quantum Network Systems and Testbed efforts in Japan.” To appear in The 4th Workshop on Quantum Repeaters and Networks. Sep. 2024.
- Shota Nagayama. “Backcasting Perspectives on Services of Future Quantum Internet.” IEEE Symposium on Quantum Software: Towards Quantum Utility in the NISQ Era (QSWUtil). Jul. 2024.
- Rodney Van Meter, “Networks for Modular Quantum Systems,” Siam Quantum Science and Technology,

Krabi, Thailand, Dec. 2024, keynote.

- Rodney Van Meter, “Quantum Networking Gets Real,” Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, Dec. 2024.
- Rodney Van Meter, “Quantum Networking Gets Real,” Mahidol University, Bangkok, Thailand, Dec. 2024.
- Rodney Van Meter, “Networks for Modular Quantum Systems,” Southeastern Quantum Conference 2024, Knoxville, TN, USA, Oct. 2024.
- Rodney Van Meter, “Quantum Networking Gets Real,” Universite Savoie Mont Blanc, Sept. 2024.
- Rodney Van Meter, “Data Center Quantum Networks: From Experiment to System,” American Physical Society March Meeting, Minneapolis, MN, USA, Mar. 2024.
- Rodney Van Meter, “Quantum Networking Gets Real,” Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA, USA, Feb. 2024.

• International Conferences with Proceedings (2024)

- Yoshihiro Mori, Toshihiko Sasaki, Rikizo Ikuta, Kentaro Teramoto, Hiroyuki Ohno, Michal Hajdusek, Rodney Van Meter, & Shota Nagayama. “Scalable Timing Coordination of Bell State Analyzers in Quantum Networks,” 2024 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE), Montreal, Canada, 2024, pp. 1890–1896, doi: 10.1109/QCE60285.2024.00218.
- Kento Samuel Soon, Naphan Benchasattabuse, Michal Hajdusek, Kentaro Teramoto, Shota Nagayama, & Rodney Van Meter. “Performance of Quantum Networks Using Heterogeneous Link Architectures,” 2024 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE), Montreal, Canada, 2024, pp. 1914–1923, doi: 10.1109/QCE60285.2024.00221.
- Marii Koyama, Claire Yun, Amin Taherkhani, Naphan Benchasattabuse, Bernard Ousmane Sane, Michal Hajdusek, Shota Nagayama, & Rodney Van Meter. “Optimal Switching Networks for Paired-Egress Bell State Analyzer Pools,” 2024 IEEE International

Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE), Montreal, Canada, 2024, pp. 1897–1907, doi: 10.1109/QCE60285.2024.00219.

- Kento Samuel Soon, Michal Hajdusek, Shota Nagayama, Naphan Benchasattabuse, Kentaro Teramoto, Ryosuke Satoh, & Rodney Van Meter. “An implementation and analysis of a practical quantum link architecture utilizing entangled photon sources.” IEEE International Conference on Quantum Communications, Networking, and Computing (QCNC) 2024, Kanazawa, Japan, Jul. 2024, pp. 25–32, DOI: 10.1109/QCNC62729.2024.00014.

• Panel Discussions (2024)

- (invitee) “Quantum Network Testbed Work in Japan.” The 4th Workshop for Quantum Repeater Networks. Sep. 2024.
- (invitee) “Quantum Network Testbed Panel Discussion.” To appear in IEEE QCE 2024. Sep. 2024.

• Birds-of-a-Feather (BoF) Organization (2024)

- Sho Morishita, Yusuke Nagato, Konomi Higo, Kentaro Teramoto and Shota Nagayama. “Quantum Quest: Dialogue and Exploration of Quantum Governance Through a Card Game.” IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE) 2024. Sep. 2024. BoF Abstract.
- Shota Nagayama, Rodney Van Meter, Wenji Wu and Inder Monga. “What Makes Quantum Networks? A Quantum Network Protocols ‘Perspective: From Physical Layer to Application Layer.” IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE) 2024. Sep. 2024. BoF Abstract.

• Submitted / Pre-prints / In Progress (2024)

- Daisuke Sakuma, Amin Taherkhani, Tomoki Tsuno, Toshihiko Sasaki, Hikaru Shimizu, Kentaro Teramoto, Andrew Todd, Yosuke Ueno, Michal Hajdušek, Rikizo Ikuta, Rodney Van Meter, & Shota Nagayama. “An Optical Interconnect for Modular Quantum

Computers.” arXiv preprint arXiv:2412.09299, 2024.

- Fumiyoshi Kobayashi, & Shota Nagayama. “Erasure-tolerance protocol for the surface codes on Rydberg atomic quantum computers.” arXiv preprint arXiv:2404.12656, 2024.

• Talks in Symposiums (2024)

- Shota Nagayama. “スケーラブルで強靱な統合的量子通信システム.” ムーンショット目標6 公開シンポジウム2024. 2024/03/25.

• Contributions to Books (2024)

- 永山翔太. “量子インターネット.” 書籍「インターネット白書2024」, 株式会社インプレス. Feb. 2024.

• Workshops, Conferences Without Proceedings & Posters (2024)

- Amin Taherkhani, Kentaro Teramoto, Andrew Todd, Rodney Van Meter, & Shota Nagayama. “A Scalable Framework for Automation of Quantum Network Experiments,” 2024 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE), Montreal, Canada, 2024, pp. 624–625, doi: 10.1109/QCE60285.2024.10436.
- Michal Hajdušek, Rod Van Meter, Monet Tokuyama, Akihito Soeda, & Shota Nagayama. “Timing regime in Quantum networks.” IETF119 QIRG. Mar. 2024.
- Rodney Van Meter, Ryosuke Satoh, Makoto Nakai, & Shota Nagayama. IETF119 QIRG. Mar. 2024. (Brief report/session)

• Domestic Activities in Japan (Academic) (2024)

- 永山翔太. “量子通信のビジョン.” 電子情報通信学会コミュニケーションシステム(CS)研究会, Jan. 2024.