

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656044

研究課題名(和文) 光通信用ファイバコンポーネントを利用した周波数自由度による量子通信アーキテクチャ

研究課題名(英文) Development of quantum communication system in photon-frequency basis using fiber optic components

研究代表者

深津 晋 (FUKATSU, SUSUMU)

東京大学・総合文化研究科・教授

研究者番号：60199164

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：現在、安全な通信の実現を目指した量子通信に関する研究が盛んに行われているが、その実現には専用ハードウェアの開発が必須と考えられている。本研究では、現行の光通信用ファイバコンポーネントを流用するだけで量子通信が可能なることの検証を目指した。とくに従来の視点には欠如していた周波数自由度の量子通信への積極的利用を試み、周波数の縦割りにもとづく現行の光多重通信方式に異なる周波数間の電場干渉を導入することで時間ドメイン上の一光子干渉に依拠した新しい量子通信方式の原理の提案と検証を試みた。

研究成果の概要(英文)：A recent surge in demand for secure communication has spurred interest in developing a viable quantum communication protocol. Here it is demonstrated that the unprecedented frequency degree of freedom of light is rather suited for this purpose, as opposed to the many that call for specialty hardware to implement with. In fact, ubiquitous fiber optic components conveniently can provide its platform simply by introducing interference of the electric fields associated with the otherwise non-overlapping subbands of frequency(wavelength)-division multiplexing. An alternative quantum key distribution scheme is proposed and implemented by taking advantage of single photon interference in the time domain.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用光学・量子光工学

キーワード：量子通信 波長多重 ファイバコンポーネント 周波数重ね合わせ状態 量子鍵配送 差動周波数シフト 量子ゲート 量子アルゴリズム

1. 研究開始当初の背景

量子力学によれば光には「光子数」「偏光」「運動量」と「周波数」の自由度が備わっている。量子通信においては前者3つの利用価値が確認されているが、実験的な制約のせいで後者がほぼ手つかずの状態では放置されてきた。一方、古典通信ではもっぱら後者が利用されている。実際、周波数(ないしは波長)多重通信方式(WDM)では国際規格のITUグリッドにしたがう周波数帯域の割り当てによって1540nm周辺の光周波数を縦割りを利用して。それでもWDMを含めた光通信において量子通信に必須の「(周波数)重ね合わせ状態」が利用されることはなかった。逆に言えば、量子通信と従来の光通信(古典通信)は、背中合わせではぼ平行線の発展を遂げつつも技術融合や互惠関係に転じる接点を見いだせない状態にあったのである。

本研究では、実用水準に達したファイバ光通信の利点を最大限に生かしつつ、高秘匿性の近未来通信を担う量子通信の技術を最小の労力、最短の時間で実用化の軌道にのせるべく、両者の戦略的な融合と技術革新を図ることに腐心した。

量子通信ではたいがい単一光子源など特殊な光源を前提とするが、これこそが実現を阻む要因であった。しかし、この前提条件の特殊性でさえ伝送ロスで失われてしまうことを考えれば、ありきたりのレーザー光源こそが現実解であり、その他のハードウェア群も既存の部品を転用できることが望ましい。

このように本研究は、「斬新な構想」を堅固な基盤の技術体系に立脚して具現化することにより量子通信の実現への明確な道筋を早期につけようとするものである。

識別不可能な光の重畳は量子力学的な「重ね合わせ状態」を構成するが、現行のWDM技術はこれとは無縁である。そうであれば周波数の縦割りによって独自の進化を遂げた技術体系を継承するかたちでその潜在能力を有効に引き出すとともに、量子通信プラットフォームを形成することが、低コスト性と高い実現可能性を担保するとの着想を得た。

周波数重ね合わせ状態の実現は相対論的見地から量子物理学の基本概念にパラダイムシフトを迫るものである。一方、工学的には、古典的コヒーレント光で量子通信プロトコルを構築することは「量子」の看板に再考を促す一方、光コンポーネントモジュールがファイバで直列配置する生来の省スペース設計は、スケーラビリティの達成に匹敵する価値をもつ。また、ゼロ分岐特性がユニタリ性を確保する観点からは高密度量子ビット(qunit)発生への発展が期待できる。

本研究で中心的役割を果たす周波数弁別素子「コムフィルタ」には完成の域に達していたファイバブラッグ・グレーティング(FBG)の技術が転用可能な状況にあった。また、通常のコヒーレント光源の利用が世界規模で再考されるタイミングと提案が偶然

にも重なった。周波数自由度によるコヒーレント計算など応用の道筋も明確になりつつある状況の中、原理検証への準備が整った。

2. 研究の目的

究極的に安全な情報の送受信を可能にする通信プロトコルの実現を目指して現在も量子通信の研究が盛んに行われている。

ガラスファイバを媒体とする光通信は、高速かつ大量のデータ通信に欠かせない基幹技術体系である一方、現行の波長多重光通信方式(WDM)は、古典的な光の強度変調に過ぎず、そのままでは量子通信には不向きである。

本研究では、従来の光通信用ファイバコンポーネントを流用するだけで「安価」かつ「平易」に量子通信に資するプラットフォームを構築可能な、新しい通信アーキテクチャの提案と検証を目指した。

量子通信では傍受耐性の優れたプロトコルの開発が急務である。そこで従来、量子通信では注目されてこなかった光の周波数重ね合わせ状態の積極的登用を試みた。周波数ドメインは無限の広がりを持ちながら(qunit生成)物理スペースを過度に消費せず、ファイバ最大のメリットであるインラインのカスケード接続が利用できるからである。

本研究では、全光ファイバ系ハードウェア構成の新量子通信アーキテクチャ構築の旗印の下、現行光ファイバ通信部品、レーザーを流用したインライン型量子通信プラットフォームの検討と周波数重ね合わせ状態の発生ならびに量子通信プロトコル伝送の原理の検証実験を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

現存ファイバ光学部品を活用した量子通信ハードウェア新構想の検証を目標に、基本モジュール構築とコヒーレント光による周波数重ね合わせ状態の検証ならびに光状態操作を試みた。次いで短距離伝送路における周波数エンコード量子鍵配送プロトコルの原理の検証実験を目指した。その一方でファイバ光学回路のモジュール特性、カスケードスキームを拡張して量子ゲートの構築を試みた。これらを総合して省スペース設計で量子通信・計算のプラットフォームを安価かつ平易に構築する可能性を検討した。

具体的な検討項目は以下のとおりである。

- 1.ファイバコムフィルタの設計・製作
 - ・FBG スプライシングによるファイバコムフィルタ試作とモジュール化
 - ・長周期FBGの妥当性
- 2.量子重ね合わせ状態の生成
 - ・光源選択
 - ・EO変調器とMach-Zehnder干渉計による2周波数重ね合わせ状態発生
 - ・単一光子ビート検出と精密制御
 - ・多周波重ね合わせ状態
- 3.量子鍵配送プロトコル実装実験

- ・周波数エンコード光による BB84 方式実装
- ・DPS-QKD 鍵配送方式の提案と実装
- 4.周波数量子ゲート構築の試み
 - ・回転ゲート設計と動作検証
 - ・制御 NOT (量子位相ゲート) 構築
- 5.研究の総括
 - ・全光ファイバ系量子通信アーキテクチャ
 - ・「安価」「平易」な量子通信技術基盤形成
 - ・量子ゲートモジュール化ほか拡張性
 - ・多重周波数重ね合わせ状態の応用

4. 研究成果

初年度では基本モジュール構築と周波数基底におけるコヒーレント光の状態操作を試みた。3つの 100GHz, $R > 90\%$ の FBG(中心波長 1576.4, 1578.3, 1583.2 nm)をスプライスしたファイバコムフィルタからは、図1のような光の透過・反射特性が得られた。スプライスによる損失はFBGあたり 0.3dB 未満であり CNOT モジュールに必要な4組の FBG スプライスにも十分耐えることがわかった。これより長周期 FBG の登用は経済的合理性の観点でも特段の利点はないことが判明した。

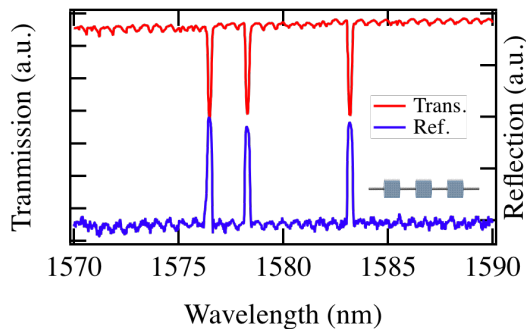


図1 FBG ファイバコムフィルタの透過反射特性。

以上の結果は周波数量子ゲート構築に直結する。実際、FBG とサーキュレータとを組み合わせることで add-drop (AD)フィルタ(図2)ができるが、この AD フィルタを複数組み合わせると図2のような単純構成のビットスワップ型 CNOT サブゲートが構築できる。CNOT 化には2ビット迂回ループを合分波フィルタ経由で賦与すればよい。ここに周波数 CNOT ゲートは2ポート構成が特徴である

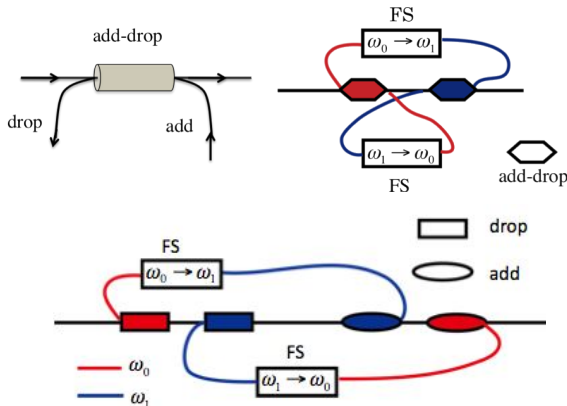


図2 ADフィルタ(左)とCNOTサブゲート構成2種の提案(右)(FS: 周波数シフタ)。

(図3)。これは通常、独立構成の標的ビットが制御ビットを内包する独自の設計思想に起因する。このような carry-on キュビット(図4)は高い潜在的応用可能性を秘めている。

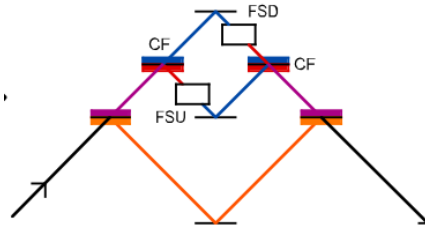


図3 周波数 CNOT ゲート (迂回ループ付き)。

Inputs	Outputs
$ \omega_0\rangle = 00\rangle$	$ \omega_1\rangle = 01\rangle$
$ \omega_1\rangle = 01\rangle$	$ \omega_0\rangle = 00\rangle$
$ \omega_2\rangle = 10\rangle$	$ \omega_2\rangle = 10\rangle$
$ \omega_3\rangle = 11\rangle$	$ \omega_3\rangle = 11\rangle$

図4 carry-on qubit 型周波数 CNOT の真理値表。

一方、量子位相ゲートの構成はかえって複雑になった。回転ゲートの一種であるアダマルゲートの基本構成を図5に示す。

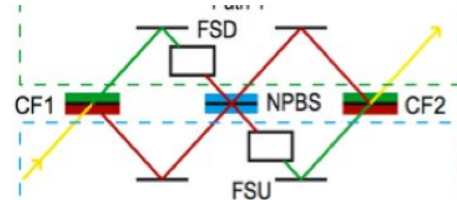


図5 周波数アダマルゲートの概念図。(CF: コムフィルタ, FS: 周波数シフタ)。

以上のように周波数量子ゲートの基本デザインは固まったが、唯一、100GHz におよぶ周波数シフタの実現が課題として残された。計画当初は AO 変調器を考慮したが、Fabry-Perot 共振器型の LN 導波路とファイバループを介した周波数逡倍の適用を現時点で模索中である。

他方、量子重ね合わせ状態の生成は、当初計画を前倒しした量子鍵配送の原理の検証、プロトコル実装とあわせて実施した。周波数基底の特徴を活かすべく時間ドメイン上での状態ベクトル和を積極的に利用した。その関係上、一光子計測を余儀なくされたが、近赤外の単一光子検出系が確保できない現状に鑑みて、既存の光子検出系が利用できる可視光(633nm)を用いて鍵配送と周波数重ね合わせにかかる実験を行った。

光源には減光コヒーレント光 (HeNe レーザ出力) を用い、20MHz の EO 変調器と1ビット遅延非対称型 Mach-Zehnder 干渉計を用いて2周波数重ね合わせ状態発生を試みた。干渉計の一方のアームには 80MHz の AO

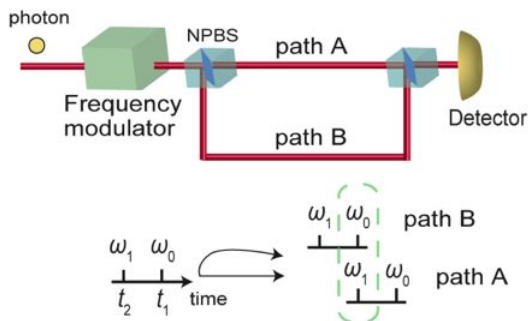


図6 時間ドメイン周波数重ね合わせ状態発生.

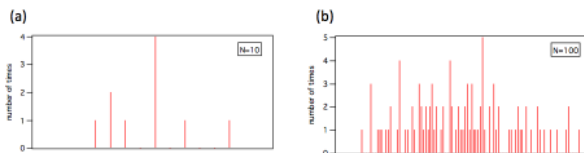


図7 一光子ビート(cos型)の時間発展(N=10, 100).

変調器を搭載し、20MHz ドライバと同期させてこれを駆動した。図6は時間ドメインの周波数重ね合わせ発生実験系の概念図である。0.1 毎秒未満に減光した連続コヒーレント光をパルス成形し、周波数シフトを介して1ビット遅延干渉計を通過させる。2連パルス間に重ね合わせ状態が形成されるが、パルス間に周波数シフトがある場合のみ周波数重ね合わせが発生する。連続光ならば有限時間ウィンドウ内のビートを観測すればよいが、ここでは一般には観測が困難な一光子ビートフリッジ(図7)の観測が必要になる。

一方、3つ以上の周波数重ね合わせ状態は、合波分波フィルタと周波数変調器あるいは周波数コムさえ準備できれば、容易に発生・制御可能なことがわかる。

図6のパルス間の周波数差を利用した新しい量子鍵配送(差動周波数シフト方式)の概略を図8に示す。図6の一光子ビート観測系とのちがいは、後段の非対称型の Franson 型干渉計を通過させることによって出力端において自動的に周波数弁別を行う点にある。図9のように検出タイミングを予め決定しておけばフリッジ特定位置で読み出しが可能となり、2台の検出器で周波数弁別ができる。

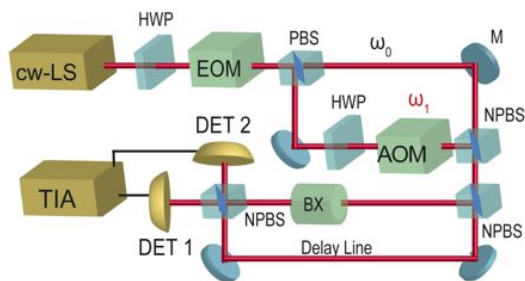


図8 差動周波数シフト鍵配送(DFSQKD)実験系。(HWP: 1/2 波長板, PBS:偏光ビーム分割器, M:ミラー, NPBS:ビーム分割器, DET:検出器, LS:光源, BX:ビーム拡大器, AOM:音響光学変調器(80MHz 周波数シフト), EOM:電気光学変調器, TIA:時間差解析装置)。

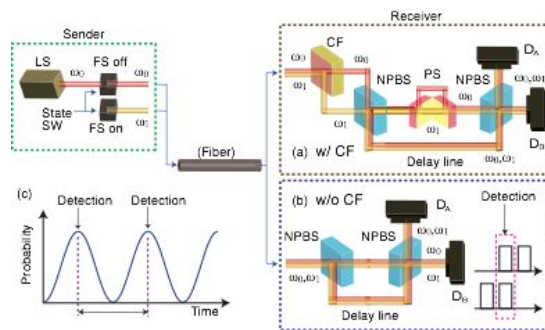


図9 DFSQKD 受信2方式と周波数弁別の概念図。(a) コムフィルタと (b)非コムフィルタ方式。(c)検出器上のビートピークでの検出。

ところが実験では20MHzの共鳴型EO変調器を用いたため理想的な矩形パルスからのずれが発生し、補正の必要が生じた。図10と図11にそれぞれ2検出器上の光路識別した場合とビート信号の理論予測と実験結果を示す。サンプリング定理から得られた位置で比較的高い周波数弁別能が得られている。

現状、周波数弁別能こそ十分ではないものの、DFSQKD 実装のための基本的要請をクリアしていることが示されたと考えられる。研究終了後、発展形として10GHz以上の帯域の周波数変調器を用いた急峻な立ち上がりパ

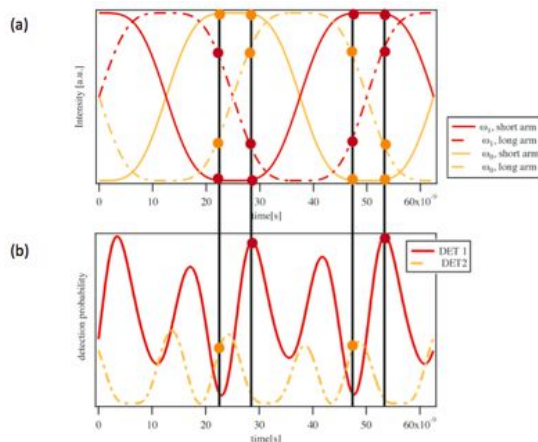


図10 2検出器上の光路識別と干渉縞の理論値。は周波数弁別に必要な観測タイミング。(検出器1(赤(暗))検出器2(橙(明))。

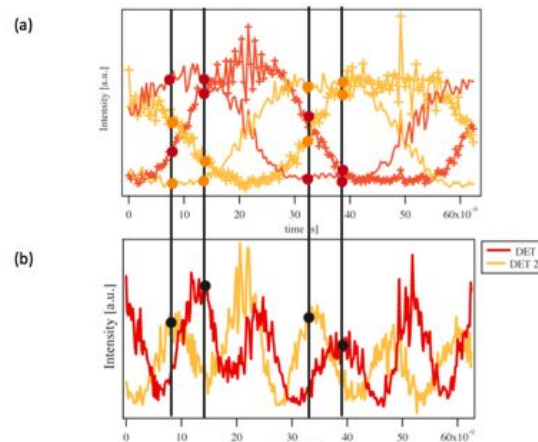


図11 2検出器上の光路識別と干渉縞の実験値。は周波数弁別に必要な観測タイミング。(検出器1(赤(暗))検出器2(橙(明))。

ルスの条件下での周波数弁別の特性評価を計画している。これによれば、もとより検討対象であった鍵配送の鍵生成レートと成功率の向上を同時にはかることができる。

研究の総括として以下の項目を確認した。周波数基底のオール光ファイバ系量子通信アーキテクチャが唯一、周波数シフトを除けば、現行のファイバーコンポーネントを用いてほぼ実装可能であることを確認できた。

一方、本研究で提案する周波数の利用は、ファイバ光学系のみならず空間伝送や同じく縦割りの公共放送系の周波数帯にも適用可能であり、高い拡張性を秘めていると言える。その証左として当初計画では浮上しなかった副産物の周波数基底上での量子アルゴリズムの仮想搭載があげられる。グローバーの大量検索問題に対して初回試行のみで忠実度 90%以上の結果が得られており、量子計算への適用可能性を示す重要な結果である。

尚、以上の成果のうち DFSQKD 実装に関しては投稿論文がこの報告書作成の時点で査読中の段階にあり、一光子ビートの観測については時間ドメイン上の一光子干渉の量子論とあわせて投稿準備が整っている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

1) 菅野絵里奈, 浅場智也, 深津 晋, “差動周波数シフト量子鍵配送の実験的検証”, 日本物理学会2013年秋季大会 2013年9月26日 26aBB-1 徳島大学常三島キャンパス(徳島県徳島市).

2) Erina Kanno, Tomoya Asaba and S.Fukatsu, “Differential-Frequency-Shift Quantum Key Distribution”, The 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC-12) A7-Pwe-7 2013年7月17日 幕張メッセ(千葉県千葉市).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：

発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

URL: <http://maildbs.c.u-tokyo.ac.jp/~fukatsu/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

深津 晋 (FUKATSU SUSUMU)
東京大学・大学院総合文化研究科・教授
研究者番号：60199164

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし