

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：14401  
研究種目：基盤研究(C)（一般）  
研究期間：2021～2023  
課題番号：21K04915  
研究課題名（和文）量子インターネット基盤構築に向けた光子の時間-周波数量子チャネルの直接測定  
  
研究課題名（英文）Direct measurement of time-frequency quantum channels of photons for the construction of the quantum internet infrastructure  
  
研究代表者  
小川 和久（Ogawa, Kazuhisa）  
  
大阪大学・量子情報・量子生命研究センター・講師  
  
研究者番号：80772574  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：量子系のダイナミクスは、量子状態、量子過程、量子測定の3つの要素によって特徴づけられる。これらの要素を適切に測定することは、量子情報処理において極めて重要な課題である。近年、量子トモグラフィーを用いることなく、これら3つの要素の各複素行列要素を個別に求める直接測定法が提案され、実証されている。本研究では、これら3つの要素に対する直接測定法を系統的に導出する理論的枠組みを提案した。この枠組みに従い、さらに基底シフトユニタリー変換を利用することで、量子ビットプローブを用いた最も効率的な直接測定法を導出した。さらに、光パルス列を用いた量子状態の直接測定法の実現可能性を実験的に実証した。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、量子情報処理の効率を向上させるための新たな理論的枠組みを提案している。つまり、量子状態、量子過程、量子測定、量子測定の3つの要素を個別に直接測定する方法を体系的に導出し、これによって量子トモグラフィーの使用を回避できる。その結果、計算資源の節約と測定時間の短縮が可能になり、さらに、光パルス列を用いた実験により提案手法の実現可能性も示しており、学術的な進展だけでなく、光量子通信による量子情報処理の実用化に向けた一歩となると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The dynamics of a quantum system are characterized by three components: quantum state, quantum process, and quantum measurement. The proper measurement of these components is a crucial issue in quantum information processing. Recently, direct measurement methods have been proposed and demonstrated wherein each complex matrix element of these three components is obtained separately, without the need for quantum tomography of the entire matrix. In this study, we have proposed a theoretical framework to systematically derive direct measurement methods for these three components. Following this framework and further utilizing the basis-shift unitary transformation, we have derived the most efficient direct measurement method using qubit probes. Additionally, we have experimentally demonstrated the feasibility of the direct measurement method of quantum states using optical pulse trains.

研究分野：量子情報工学

キーワード：量子測定 量子トモグラフィ 直接測定 弱測定 光量子通信

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、量子計算・量子暗号・量子計測といった量子情報技術の研究・開発が世界的に進んでおり、将来的には、個別の小～中規模量子系を量子通信によりコヒーレンスを保ったまま接続し、量子もつれを共有することで、より高度で大規模な量子情報処理を目指す量子インターネット[1]が構想されている。個々の量子処理系(計算機)は様々な物理系による開発が進められているが、通信に用いられる物質は、伝送距離やコヒーレンス特性の観点から通信波長帯の光子にほぼ限られる。そして量子情報を担う自由度としては、パルスモードの時間自由度(またはそのフーリエ空間である周波数自由度)が有望である。これは主に、時間自由度が多次元系であるという大容量性、通信路中の雑音に対するロバスト性、集積導波路光学基盤との親和性のためである[2]。このような光子の時間-周波数自由度を用いた量子通信を確立するためには、送りたい状態が手元で準備できているか、送りたい状態が先方に届いているか(量子チャンネルで生じる変換を特定できるか)、さらにその結果として離れた2者間で量子もつれを共有できたかという、状態とプロセスを測定する手段が必須である。

量子状態やプロセスの測定には、他自由度では量子トモグラフィが一般的に用いられる。しかしこの手法を光子の時間-周波数自由度に適用するのは難しい; なぜならば、時間-周波数自由度において、時間または周波数基底への射影測定は容易であるが、量子トモグラフィが要求する波数の任意の重ね合わせ基底での測定は技術的要求が高いためである[3]。時間-周波数自由度における光の複素振幅の測定は、古典光であっても様々な工夫が必要であり[4]、さらに単一光子や量子もつれ光子対に対しては、近年になりいくつかの測定手法が提案・実験された[5]。しかしながら、これらの手法は純粋状態の測定に限定されており、状態準備の不完全性、2者間にまたがる量子もつれ状態の準備、量子チャンネル通過に伴うデコヒーレンスを検知するために必要な混合状態に対する測定ができないため、光子の量子通信の検証に求められる測定として不十分である。さらに光子の時間-周波数自由度における量子チャンネルのプロセスの測定に関しては、我々の知る限りトモグラフィ以外の方法は知られておらず、その測定の難しさから実現されていなかった。

一方、近年直接測定法と呼ばれる、量子トモグラフィ法とは異なる特徴を持つ新しい測定法が報告されている。直接測定とは、ある固定された基底で展開したときの各複素数の要素を個別に取得する手法であり、量子トモグラフィのように様々な基底での測定やデータの事後処理を必要としないという利点がある。直接測定は、そもそもは波動関数(純粋状態)の複素数値の操作論的意味付けという、量子基礎論的な動機に基づいて提案されたものであった[6]。そして「弱測定」[7]と呼ばれる特殊な測定法を用いるため効率が低く、またプロセス測定への応用は提案されていなかった。我々は先行研究[8]において、波動関数(純粋状態)だけでなく、混合状態や量子プロセスの直接測定が強測定(射影測定)で行えることを理論的に示した。この理論は物理系・自由度に依存しない一般的な枠組みであるため、これを光子の時間-周波数自由度に適用すれば、先行研究[5]の延長では実現が難しい混合状態や量子プロセスの測定が可能となる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、ローカルな時間測定および周波数測定だけで、光子の任意の時間-周波数状態の測定と量子チャンネルのプロセス測定が行えることを実験的に検証することである。この測定は時間-周波数領域におけるこれらの量子要素の直接測定によって実現する。そのために、まずは一般的な量子系に対する、これら3つの要素の直接測定法を系統的に導出する理論的枠組みを提案し、そこから時間-周波数領域における具体的な直接測定法を導出する。

### 3. 研究の方法

(i)直接測定の統一的理論枠組の構築: 量子系のダイナミクスは、量子状態、量子過程、量子測定 of 3つの要素によって特徴付けられる。これらの要素は、通常、固定されたある基底における複素行列で表され、これらの行列要素は一般的に量子トモグラフィによって測定される。一方、これまでにそれらの要素の直接測定による測定報告もなされてきたが、それらの実験では「弱測定」を用いて実装されており、測定効率は低いものであった。これらの先行研究において、直接測定は3つの量子成分それぞれについて独立に提案されてきた。しかし、量子時間発展が時間反転対称であることを考慮すると、これらの構成要素について、より統一的な観点から直接測定法を検討することは合理的であると考えられる。以前、我々は量子ビットプローブを用いた波動関数の直接測定の直観的な図式表現を提案し、直接測定が測定の強さに関係なくどのように働くかを明らかにした[8]。そこで本研究では、このフレームワークをさらに発展させ、量子状態、量子過程、量子測定のための効率的な直接測定系を説明する理論的枠組みを導出する。この枠組みは一般化 Hadamard テストと見なすことができ、所望の複素数のオブザーバブルを得る量子回路を設計するための指針を与える。

(ii) 光の時間-周波数状態に対する直接測定実験：(i)で構築した理論的枠組みを利用して、基底シフトユニタリ変換を用いた新しい直接測定法を導出し、これを離散時間自由度で符号化された光パルス列に実験的に適用することで、量子状態(密度演算子)に対するこの提案する直接測定法の実現可能性を検証する。

実験では3つのレーザーパルス列に符号化された3次元量子状態を調べた。量子もつれのない単一フォトンに対する検出確率は、古典的なコヒーレント光の強度測定結果に比例するため、この実験では古典的な領域の出力パワーを持つコヒーレント光を用いた(この実験手法は単一光子にも適用できる)。

図1に実験セットアップを示す。ファイバーレーザー光源によって波長1550nmの連続光を出力し、デュアルパラレルモジュレータ(DPM)によってレーザー光の時間分布を3つのパルスからなる所望のテスト波形に変調する。一般化 Hadamard テストは、200ps と 400ps の遅延を持つ非対称マハツェンダー干渉計(AMZI)を用いて実装される。この遅延により、提案した直接測定法における位相シフトユニタリ変換を実現する。さらに AMZI の2つのパス間の位相差を調整することで、X と Y の期待値が求められる。その後、AMZI が出力するパルス列を光検出器(PD)で検出し、その時間波形をオシロスコープで観測する。

観測された波形のうち、適切な箇所のパルスのピーク値を取得することによって、所望の複素行列の各行列成分を再構成できる。直接測定によって得られたこの行列の理想行列からの忠実度を計算し、提案手法の実現性を評価する。

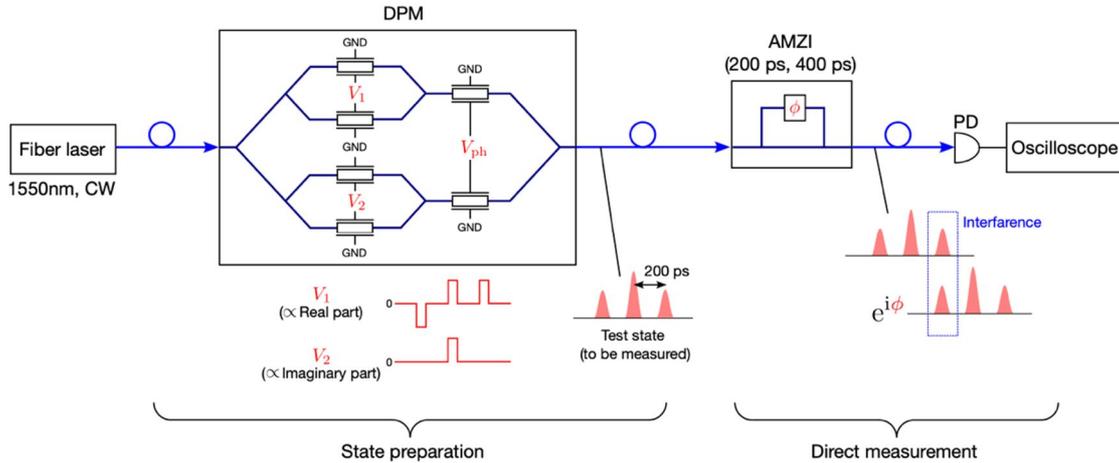


図 1: 直接測定実験のセットアップ。

#### 4. 研究成果

(i) まず我々は一般化 Hadamard テストを定義し、所望の複素数オブザーバブルの測定値がこの枠組みで実現できることを示した。次に、この一般化 Hadamard テストが我々の先行研究[8]で提案していたダイアグラム表現で表現できることを示し、回路中に置かれるゲートと測定値の関係を直観的に表すことができることを示した。このダイアグラム表現を用いて、量子状態、量子過程、量子測定の3つの要素の行列成分、特に一般に複素数である非対角成分を測定値として直接得るためにどのような回路を構成するべきかの指針を示すことができた(図2)。

同じ複素数を測定値として得るための回路構成には複数の実現方法がある。これまでに先行研究で提案された手法の多くは射影測定による損失を含むような、測定効率の良くない実現方法であった。我々はダイアグラム中に設置する量子ゲートをユニタリゲート(基底シフトユニタリ変換)にすることによって不要な損失を回避し、この一般化 Hadamard テストの枠組みにおいて最も効率の良い直接測定手法を導出した。

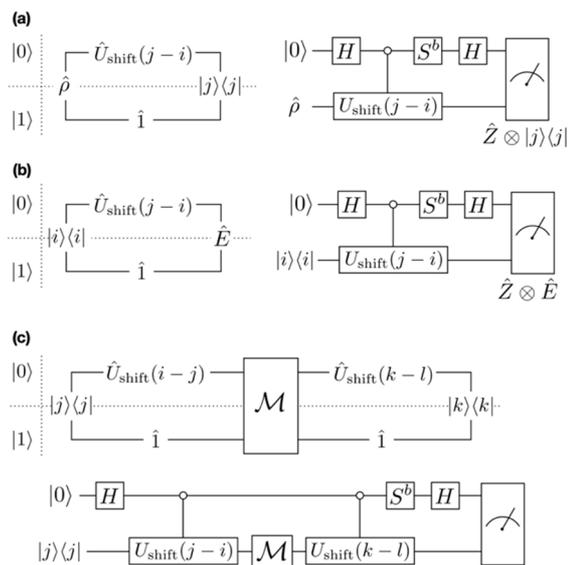


図 2: 直接測定法のダイアグラム表現と量子回路表現。(a) 状態の直接測定。(b) 測定の直接測定。(c) プロセスの直接測定。

(ii) 実験では例として5つのテスト初期状態パルスを準備し、それらの直接測定を行った。例えばテスト波形1に対する検出結果は図3のようになり、緑の点線で囲った部分のパルスのピーク値から、元の波形の密度行列の各行列要素を個別に取得することができる。この手法で再構成された行列は図4の通りであり、理想値と比べても近い値となった。5つの状態に対して忠実度を計算すると、いずれも98%以上の高い値となった。この結果から、提案した直接測定手法が正しく実現できることが示された。

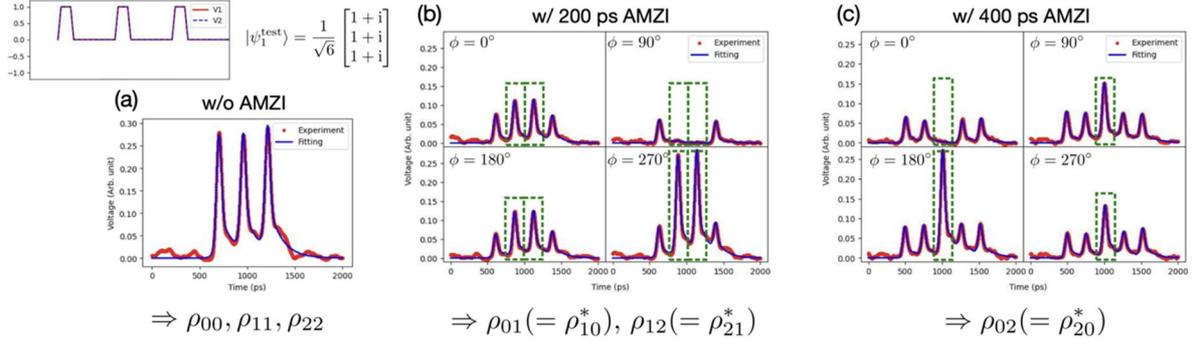


図3: テスト波形1とオシロスコープでのその検出結果。(a)AMZIを挿入しなかった場合。(b)200psの遅延を持つAMZIを挿入した場合。(c)400psの遅延を持つAMZIを挿入した場合。

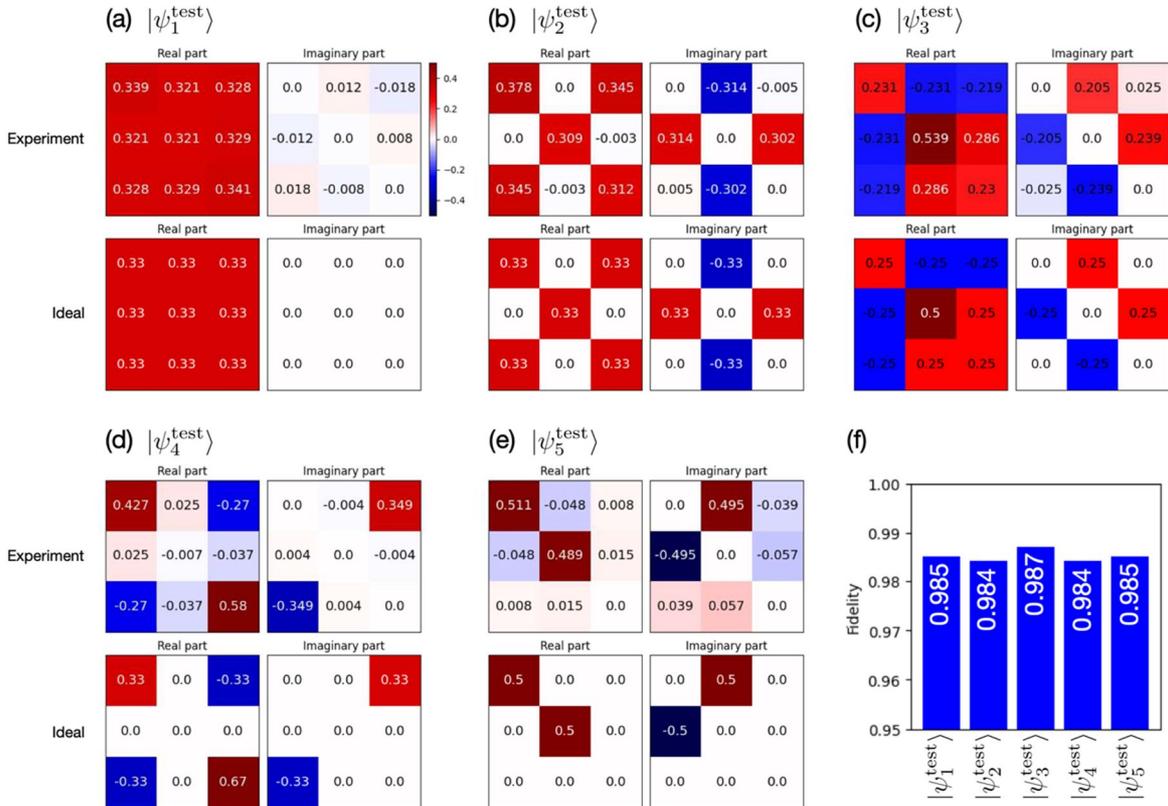


図4: (a)-(e)5つの状態に対する提案した直接測定での行列要素の測定結果(上段)と理想値(下段)。(f)5つの状態の測定結果の忠実度。

結論として、量子ダイナミクスの3つの要素である量子状態、量子過程、量子測定の直接測定法を統一するための理論的枠組みを導入し、この枠組みを活用することで、各量子要素に対する効率的な直接測定法を系統的に導出することができた。また、光パルス列を用いた量子状態の直接測定法の実験的実証を行い、初期状態の密度演算子の行列要素を個別に高い忠実度で推定できることを示した。本実験では、量子通信への応用を目的として光パルス列を用いたが、この直接測定法は様々な物理系への応用が可能である。将来的には、直接測定法は状態の計測だけでなく、多様な量子系におけるプロセスや計測の計測が行われることが期待される。

本研究成果はプレプリントサーバにて公開され[9]、現在ジャーナル投稿に向けて準備しているところである。

- [1]H.J.Kimble, Nature **453**, 1023 (2008); S.Pirandola and S.L.Braunstein, Nature **532**, 169 (2016); S.Wehner *et al.*, Science **362**, eaam9288 (2018).
- [2]J.Nunn *et al.*, Opt.Express **21**, 15959 (2013); B.Brecht *et al.*, Phys.Rev.X **5**, 041017 (2015).
- [3]時間-周波数自由度における分数フーリエ変換が必要: R.Salem *et al.*, Adv.Opt.Photonics **5**, 274 (2013).
- [4]I.A.Walmsley and C.Dorrer, Adv.Opt.Photonics **1**, 308 (2009).
- [5]W.Wasilewski *et al.*, Phys.Rev.Lett. **99**, 123601 (2007); C.Polycarpou *et al.*, Phys.Rev.Lett. **109**, 053602 (2012); Z.Qin *et al.*, Light Sci.Appl. **4**, e298 (2015); A.O.C.Davis *et al.*, Phys.Rev.Lett. **121**, 083602 (2018).
- [6]J.S.Lundeen *et al.*, Nature **474**, 188 (2011).
- [7]Y.Aharonov *et al.*, Phys.Rev.Lett. **60**, 1351 (1988).
- [8]K.Ogawa *et al.* New J.Phys. **21**, 043013 (2019).
- [9]K.Ogawa *et al.* arXiv:2403.18210.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kazuhisa Ogawa, Takumi Okazaki, Hirokazu Kobayashi, Toshihiro Nakanishi, and Akihisa Tomita	4. 巻 29
2. 論文標題 Direct measurement of ultrafast temporal wavefunctions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 19403-19416
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.423969	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
研究 分 担 者	富田 章久  (Tomita Akihisa)  (60501434)	北海道大学・情報科学研究院・教授    (10101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関