

(海外特別研究員事業)

令和 2 年 4 月 30 日

海外特別研究員最終報告書

独立行政法人日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 30

受付番号 201860569

氏 名 泉 秀 枝

(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。

なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地（派遣先国名）用務地： デンマーク工科大学 （国名：デンマーク）

2. 研究課題名（和文）※研究課題名は申請時のものと変わらないように記載すること。

真空-単一光子重ね合わせ状態識別に対する最適測定系の開発

3. 派遣期間：平成 30 年 4 月 1 日 ～ 令和 2 年 3 月 19 日

4. 受入機関名及び部局名

デンマーク工科大学 物理学

5. 所期の目的の遂行状況及び成果...書式任意 書式任意（A4 判相当 3 ページ以上、英語で記入也可）

(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)

(注)「6.研究発表」以降については様式 10－別紙 1～4 に記入の上、併せて提出すること。

本研究課題は、真空・単一光子の重ね合わせ状態を識別するための最適測定系の実現を目指しており、その測定系は光の干渉、単一光子検出そして検出結果に基づいた高速フィードバック操作から成り立っている。その概略図を Fig.1 に示す。識別対象となる光学状態に対して局所光を干渉させ、光学状態の振幅及び位相を変化させる。これを変位操作と呼ぶ。そして単一光子検出によって光子が存在するかないかを判定し、光子が検出された場合は局所光の位相及び振幅を瞬時にフィードバック制御を行う。一方で光子が検出されなかった場合、局所光の振幅のみをフィードバック制御によって変化させる。このフィードバック操作を無限に早く実行することが可能であれば、真空・単一光子の重ね合わせ状態を誤りなく識別するための最適測定系となる。本研究では有限回数での誤り確率を実験により評価することを目的としている。また量子情報処理に必要である真空・単一光子の重ね合わせ状態のみならず、現在の光通信に使用されているレーザー光の識別においてもこのフィードバック操作を用いた測定系は最適もしくは準最適な測定系であることが知られている。そこで光子検出器に基づくフィードバック測定系を用いて、検出器の不完全性等が存在する実験状況下において従来の光の位相振幅を測定する技術によって与えられる識別限界 Standard Quantum Limit (SQL)を超えられるような識別性能を達成することが本研究課題の二つ目の目的である。



Fig.1 光子検出器を用いたフィードバック測定系の概略図。

派遣期間 1 年目では、本研究課題を遂行するための実験系を構築し、実現した測定系を量子検出器トモグラフィと呼ばれる手法を用いて評価した。本研究では実現可能な範囲の有限回数フィードバック操作で位相の異なる真空・単一光子の重ね合わせ状態識別における誤り確率がどれほど改善することができるかを評価した。その実験結果を Fig.1 に示す。赤点が実験結果により推定された誤り確率であり、赤線は実験状況下における理論値である。青の点線及び実線は実験による不完全性がない場合の理論値であり、それぞれ変位操作の位相のみをフィードバック制御する方法と位相・振幅をフィードバック制御する方法である。本研究結果からフィードバック操作を用いない単純な測定系に比べ($M=1$)、フィードバック操作を 4 回行うことで($M=5$)半分以上の誤り確率で重ね合わせ状態を識別できる測定系を開発することに成功した。2 年目には開発した測定系の性能をさらに詳しく調べるために、フィードバック遅延が誤り確率にどのような影響を与えるか実験により調査した。これらの成果は 2020 年 2 月に Physical Review Letters から出版された [S. Izumi, et al., Phys. Rev. Lett., 124, 070502(2020)]。

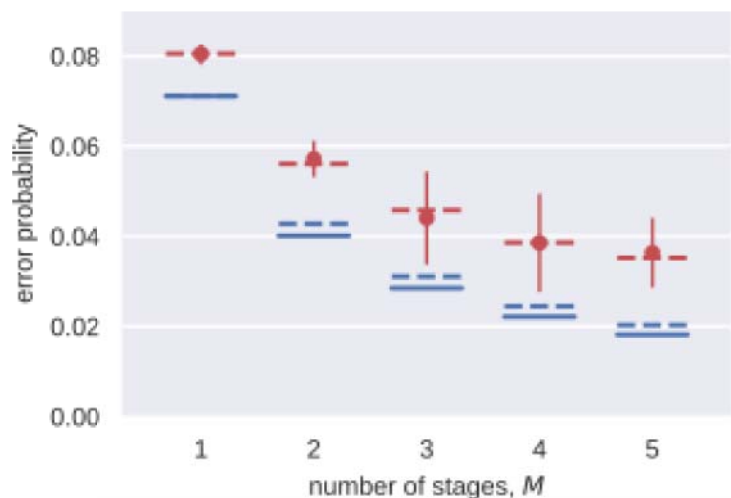


Fig.2 フィードバック測定系により得られる誤り確率。赤点は実験結果、赤及び青の実線はそれぞれ実験条件下での理論値と理想的な条件下での理論値。 M はフィードバック回数を表す。

さらに開発した測定系を用いて、現在の光通信に使用されているレーザー光の識別実験を行った。レーザー光は現代の技術で比較的容易に生成が可能であり、また高損失下でも純粋状態であるということから長距離光通信において重要な役割を担っている。その一方でレーザー光の強度が光子レベルまで弱められると、量子雑音の影響が顕著に表れる。量子光学でこれはコヒーレント状態と呼ばれ、量子雑音の影響により異なる複数のコヒーレント状態を誤りなく識別することは原理上不可能である。従来の光通信では光の位相振幅を測定することでコヒーレント状態を識別しているが、この測定系が与える識別誤り確率 SQL は量子力学によって与えられる究極の識別限界(Helstrom 限界)よりはるかに劣っている。そこでコヒーレント状態の識別ではしばしばこの Helstrom 限界に到達するための測定系が求められる。2 値コヒーレント信号に対しては、光子検出器に基づくフィードバック測定系を用いることでこの識別限界に到達でき

ことが知られている。一方 4 値コヒーレント状態は 2 値に比べ、信号数が増えることによる情報量の増加がある反面、2 値では最適測定であった光子検出器に基づくフィードバック測定系を用いても量子理論限界である Helstrom 限界に到達することはできない。それでも従来の技術である位相振幅の測定に比べて遥かに良い誤り確率で 4 値信号を識別することができるため、今後の光通信において重要な測定技術であることが知られている。このような背景を踏まえ、本研究では 4 値コヒーレント信号を識別対象とする。光子検出器に基づくフィードバック測定系は、高効率な光子検出器が必要であるため、通信波長帯である 1550nm において SQL を凌駕するような性能を実験により実現することは困難であった。そこで我々は通信波長帯に対し高検出効率をもつ超伝導ナノワイヤ単一光子検出器(SSPD)を使用することで、光子検出器の検出効率や、変位操作の干渉度などといった実験の不完全性が無視できない状況下において 4 値コヒーレント状態識別において SQL を超える誤り確率を達成した。

本研究で用いた実験系を Fig.3 に示す。光学レーザーには通信波長帯である 1550nm を使用し、 piezo素子(PZT)及び減衰器(VA)を用いて光信号の位相と強度が制御可能であり、任意の平均光子数の 4 値コヒーレント状態を用意することができる。測定系は変位操作、光検出器 SSPD 及び高速のフィードバック系からなり、変位操作を行うために必要となる局所光の位相は、光検出器 SSPD からの出力に応じ Field Programmable Gate Array(FPGA)によってフィードバック制御される。具体的には SSPD からの出力が“off”すなわち光子が検出されなければ、位相変調器

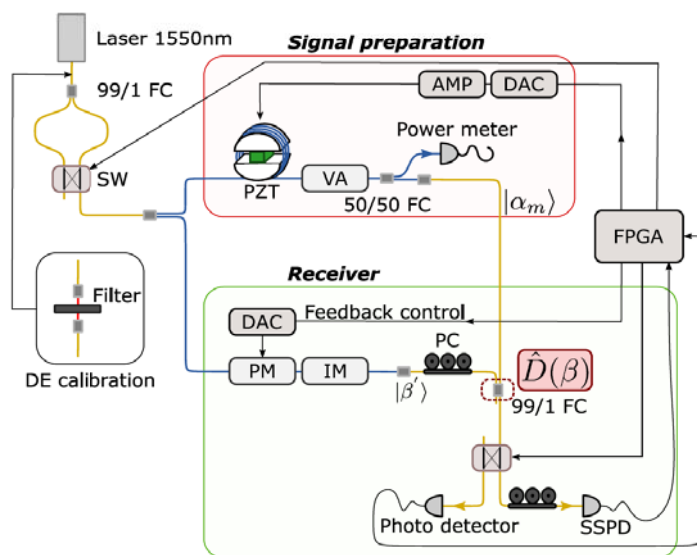


Fig.3 実験系の概略図。

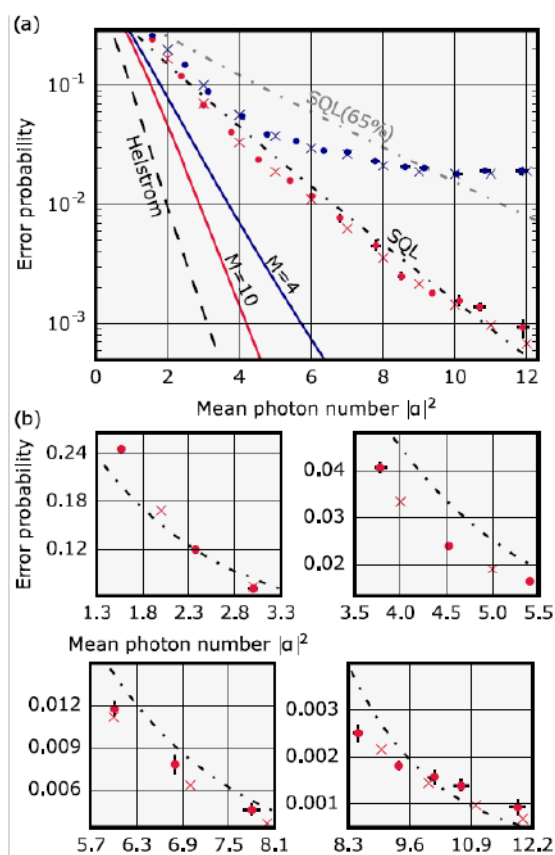


Fig.4 平均誤り確率。

(a) 対数表示。

(b) 線形表示。

PM に印加される電圧は変化せず、光子が検出された場合は測定結果履歴からベイズ推定に基づき印加電圧を変化させる。実験状況下で SQL を超えるためには検出器の効率を含めた全体の検出効率が非常に重要となる。本研究では可能な限り損失を抑えるために、99/1 ファイバーカップラから SSPD までのファイバーをすべて融着することで透過率 90%を達成した。また SSPD の検出効率は 73%であることから全体の検出効率はおおよそ 65%に到達することが可能である。さらに変位操作における信号光と局所光の干渉度は 99.6%であり、この状況下であれば SQL よりも良い誤り確率を達成することが可能である。実験手順として、QPSK 信号のうち 1 つを用意し、測定系によって識別を行う。用意した信号と測定出力によって決定された結果が等しくない場合誤りとなる。この過程を 4 値に対し複数回繰り返し行い、評価した平均誤り確率を結果を Fig.4 に示す。縦軸は平均誤り確率、横軸はコヒーレント状態の平均光子数である。Fig.4 (a)及び(b)は対数及び線形プロットである。また実験結果は赤及び青の丸点によって示されており、それぞれフィードバック操作を 10 回及び 4 回行った場合である。黒の点線で示された SQL は現在の光通信で用いられている光位相振幅を測定するヘテロダイン測定によって達成可能な誤り確率であり、Helstrom は量子力学によって理論的に許

される最小の誤り確率である。赤($M=10$)及び青($M=4$)の実線はフィードバック測定系においてフィードバック操作を 10 回そして 4 回行った際に得られる誤り確率の理論値である。本研究では主に検出効率と変位操作における干渉度の影響により理論値に比べて実験値が大きく劣化してしまう。それでもフィードバック操作を 10 回行うことによって、従来の技術で達成可能な SQL を下回る誤り確率を達成することに成功した。これは通信波長帯レーザー及び測定系を用いて実験状況下で SQL を超えた初の成果である。

本研究で実現可能なフィードバック帯域は 1MHz と遅く、信号状態の時間幅 $200\mu\text{s}$ に比べその速度制限は無視することができない。特にフィードバック操作を 10 回と多数回行う場合その影響はより顕著になる。そこでフィードバック遅延を考慮した理論モデルを提案し、誤り確率が遅延によりどのような影響を受けるか理論・実験の両方の観点から調査した。その結果とりわけ 4 値信号コヒーレント状態の平均光子数が比較的高い場合には、少ない場合に比べフィードバック遅延の影響が大きく誤り確率を大幅に劣化させることがわかった。さらなるフィードバック帯域の改善には新たに高速なデジタルーアナログ変換器を用いることで可能となるが、最終的な制限は SSPD のデッドタイム(50ns)によって与えられる。近年では通信波長帯に対してさらなる高性能な単一光子検出器が利用可能であるため、実際の通信での測定系として用いるためにはそのような高性能光子検出器が求められる。この成果は 2020 年 4 月に Physical Review Applied に受理された[S. Izumi, et al., Phys. Rev. Applied (2020).]。