高次元 Time-bin 量子もつれ状態の長距離配送実験

Long-distance distribution of high-dimensional time-bin entanglement

NTT 物性研 °生田 拓也,武居 弘樹

NTT BRL, °Takuya Ikuta, Hiroki Takesue

E-mail: ikuta.takuya@lab.ntt.co.jp

【背景】

近年、量子情報処理で扱えるヒルベルト空間の拡張方法の一手法として、高次元量子状態の研究が活発になされている。我々はこれまで、 光子のファイバ伝送に適した Time-bin 量子状態の高次元化に取り組んできた[1]。前回、我々は次元dの Time-bin 量子状態に対し測定のセット アップ数がdでスケールする量子状態トモグラフィ(QST)を提案し、d = 4の場合の実証実験を 報告した[2,3]。今回、同測定法を用い、世界で 初めての高次元量子状態の長距離ファイバ伝送 に成功したので報告する。

【QST 装置の構成】

Fig. 1 に*d* = 4の時のカスケード遅延マッハツ エンダ干渉計(CMZI)による QST 装置の構成を 示す。入力状態のタイムスロットの時間間隔 T に対し、2T の遅延時間を持つ 2-bit 遅延干渉計 と T の遅延時間を持つ 1-bit 遅延干渉計がカス ケード接続されている。また、これらの干渉計 は各干渉計内の光路間で生じる相対位相差 $\theta_2, \theta_1 \varepsilon$ 、各々独立に0もしくは $\pi/2$ に設定でき る。この CMZI に4次元 Time-bin 量子状態を入 力する。ここで入力状態は $\hat{\rho} = \sum c_{i,j} |i\rangle\langle j|$ (i,j \in [0,3]) で与えられるエルミート演算子で表さ れ、|i⟩は単一光子が4つのパルスのうちi番目の パルスに存在する状態を表す。

CMZI内部での時間遅延により、出力では7つ の異なる時刻において光子を検出する可能性が 生じる(Fig. 1)。測定を繰り返すことで時刻ごと の光子の検出頻度のヒストグラムが得られるが、 これは入力状態、検出時刻、及び CMZI 内部で 生じる相対位相差に依存した2光子干渉パター ンを示す。この時、図中①の検出時刻では干渉 により入力状態の確率振幅の相対位相の情報が 得られる一方で、②や③のように完全に、ある いは部分的にしか干渉が生じない時刻が存在す るため確率振幅の絶対値の情報も得ることが出 来る。これらの情報を組み合わせることで、入 力量子状態の密度演算子ĵを再構成する。

【実験系】

波長 1551.1 nm の連続発振レーザー光を強度 変調し、パルス幅 100 ps、パルス間隔 1 ns、繰 り返し周波数 125 MHz の 4 連パルスを生成す る。この 4 連パルスを PPLN 導波路に入力し、 二次高調波生成によって 780 nm のポンプパル ス列を生成する。ポンプパルス列を別の PPLN 導波路に入力することで、自然放出パラメトリ ック下方変換により次式で示す 4 次元最大もつ れ状態を生成する。

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{3} |k\rangle_{s} |k\rangle_{i}, \qquad (1)$$

ただし、添字s、iはそれぞれシグナル(1555 nm)、 アイドラ光子(1547 nm)を示す。生成された光子 を波長分離フィルタで分離したのち、各々50 km の分散シフトファイバに入力する。ファイバ伝 搬後、各光子に偏波補償を行ったうえで先述の CMZI に入力し、超伝導細線単一光子検出器に よる測定を行い、その同時計数を記録する。

【実験結果】

Fig. 2 に QST によって再構成された密度演算 子育の実部を示す。4 次元最大もつれ状態特有の 櫛形の非対角項成分が確認できる。また、純粋 状態|Ψ)に対するフィデリティとして 93.5%を 得た。これにより、長距離ファイバ伝送後も高 品質な高次元もつれ状態を保持していることが 確認できた。

【参考文献】

[1] T. Ikuta, H. Takesue, Phys. Rev. A 93 022307 (2016).

- [2] 生田拓也, 武居弘樹, 第 77 回秋応物 13p-B2-9 (2016).
- [3] T. Ikuta, H. Takesue, to appear in New J. Phys.



Fig. 1 Concept of QST by CMZI

Fig. 2 Real parts of $\hat{\rho}$