

- **量子効果に基づく情報圧縮操作を世界で初めて原理実証**
～日本の量子情報通信技術、第二世代へ向けて大きな一歩。本日開催の「量子情報通信研究推進会議」に報告～
 - 平成15年11月20日
-

通信総合研究所(CRL、理事長:飯田尚志)では、英国ハートフォートシャ大学及びストラスクライド大学と共同で「量子情報源符号化」という操作を世界で初めて実証しました。

量子情報通信で使われる情報の符号化は、データを圧縮して表現するための量子情報源符号化と、圧縮されたビット列をできるだけ小さい誤りで伝送するための量子通信路符号化の2つに大別されます。

CRLでは、量子通信路符号化については、既に原理実証に成功しており、今回の成果で量子情報技術の根幹をなす2つの符号化操作の実証に成功したものです。データ圧縮と誤り訂正を行う符号化は、あらゆる情報処理の基本操作であり、量子的データ圧縮に関する今回の成果は、光子レベルの信号を扱う量子通信や量子暗号の実現への第一歩となるものです。

【背景】

量子効果を利用した通信技術は、従来の伝送容量の限界を超える新しい通信方式や、盗聴を完全に見破る量子暗号技術を可能にするなど、その実現に大きな期待が寄せられています。

現在、世界中で量子情報技術に関する数々の研究が進められているものの、実際に実用化してゆく上で不可欠となる量子符号化技術に関しては、依然、理論的研究に止まっているのが現状です。特に、量子的媒体上でのデータ圧縮と誤り訂正を行う符号化技術がなければ、量子情報技術は絵に描いた餅になってしまいます。

CRLでは、このような量子的媒体上での符号化技術の研究に取り組んできました。

【本研究成果の概要】

今回の成果は、従来方式では圧縮不可能だった信号でも、量子効果を使ってさらに圧縮する操作、いわゆる量子情報源符号化を世界で初めて実験的に実証したものです。

この成果は、量子情報通信の実現に向けて、大きな一歩になるものと期待されます。

なお、本研究は、総務省「量子情報通信研究開発プロジェクト」及び科学技術振興機構CREST中村プロジェクトの一環として実施されたものです。

また、本研究成果は、11月21日発行号のPhysical Review Letters誌に掲載されます。

【今後の展開】

今回の成果とこれまでのCRLの成果により、これまで理論的な研究対象でしかなかった量子符号化の実現化への最初の方向性を示すものであり、いよいよ量子情報技術が実現に向けたスタート地点に立ったことを示すものです。

<連絡先>

基礎先端部門量子情報技術グループ

佐々木雅英、武岡正裕

Tel:042-327-6524、7471

Fax:042-327-6629

【背景】

デジタルデータは、0と1の膨大なパルス列です。音声や画像を0と1という記号で表現すること(符号化すること)で、効率的なデータの圧縮や雑音下での信頼性の確保が可能になります。

符号化といわれる操作は、大きく分けると、データを圧縮して表現するための情報源符号化と、そのビット列をできるだけ小さい誤りで伝送するための通信路符号化の2つに大別されます。今後、チップの小型化や光回線の大容量化が進むと、0と1を運ぶ媒体が光子や電子のレベルに到達し、量子力学^{注1}が支配する世界で符号化を行う領域に入っていきます。CRLでは、そのような領域における通信の2つの基本操作、量子情報源符号化と量子通信路符号化の研究に取り組んできました。

信号の圧縮とは、信号に含まれる冗長性を取り除く操作で、信号の特徴を利用し、データのサイズを減らすことです。従来の情報圧縮には限界がありますが、量子情報理論^{注2}と呼ばれる最新の理論によれば、信号の「量子状態間の重なり」という量子の世界独特の冗長性まで取り除く事によって、従来の理論の限界以上に更なる圧縮が可能になることを予言しています。

【本研究成果の概要】

一般に、情報の圧縮効率と復元精度は、扱うデータのサイズが大きいほど高くなります。しかし、現在の技術で扱える量子力学的データのサイズはまだ数ビットにしかなりません。そのような場合、一定の圧縮率のもとで如何に高い復元精度を実現できるかが重要になってきます。我々の実験では、量子もつれ^{注3}と呼ばれる効果を適切に制御する事で、従来の圧縮方式では不可能な高い復元精度が達成されていることが確認されました。

【本実験の概要】

我々の実証実験では、3ビットの信号を2ビットの信号に圧縮し、再び3ビットの信号へ復元するモデルを使います。実際には一つの光子の直交する偏光面と4本の伝送経路を使って、3ビットの信号を用意します。4本の伝送経路のうち2本を捨てることによって、2ビットの信号へと圧縮することができます。圧縮された信号を再び元の3ビットの信号へと復元しその復元精度を測定したところ、量子もつれを使わない従来の圧縮方式よりも高い復元精度が達成されていることが確認されました。

量子的重なりを有する3ビット信号は、図1(b)のように単一光子を半波長板と偏光ビームスプリッタを介して4本の光路へ導波することで用意します。半波長板の角度をいろいろ変えれば、信号の量子的重なりを調整することができます。図1で左側の緑の点線上に量子的重なりを持つ3ビット信号が用意されます。2ビット信号への圧縮は、4本の光路を2本の光路へ圧縮することで行います(図1(a))。実際には、4本の光路のうち2本の光路を2つの半波長板と1個の偏光ビームスプリッタを介して交差させた後、2本の光路のみを残すことで実現します。3ビット信号への復元は、圧縮に使った回路とほぼ鏡像対称の回路によって行われ、図1で右側の緑の点線上に3ビット信号が復元されます。これより右側の回路は、復元された信号の状態が圧縮前の状態にどれだけ近いかという復元精度を測定するための回路です。一方、量子もつれを使わない従来の圧縮は、3ビットの信号に何も手を加えずにただ1ビットを捨てるという操作に対応します(図2)。今回の実験では、この量子もつれを使わない圧縮操作を超える復元精度を実現することに成功しました。

【実験結果】

図3は、量子的重なり度合いの異なる信号における圧縮・復元精度の測定結果をプロットしています。復元の過程では、単純に圧縮の逆変換を行う方法(プロトコル1)と、圧縮過程の結果に依存して逆変換の過程で光子を新たに加える方法(プロトコル2)の2種類の実験を行いました。いずれの方法においても、理論的に予想される限界の95%程度の精度での実験に成功し、図3から信号の量子的重なり度合いが大きな場合に、量子もつれを使わない圧縮操作に比べて高い復元精度が達成されていることがわかります。

<用語説明>

注1. 量子力学:

原子スケールの超微細な世界を支配している物理法則。量子とは、「量を測る最小単位」という意味で使われる。例えば、電気は電子というそれ以上分割できない電荷の粒の流れであり、光は電子の遷移に伴って放出される光子という粒の流れである。このような世界の基本原理として、状態を擾乱無しには測定できないという「不確定性原理」と、複数の可能性が同時に存在可能であるという「重ね合わせの原理」の2つがある。

注2. 量子情報理論:

シャノンによって築かれた情報理論は、情報の流れをその背後にある物理モデルから切り離して0, 1のような抽象的記号の確率的遷移として記述している。これによって、情報操作を記述する極めて汎用的な数理体系となっている。この理論体系を量子力学の法則まで取り入れて拡張したものが量子情報理論と呼ばれ、現在も日々発展しつつある理論である。

注3. 量子もつれ:

2つ以上の量子力学的自由度にわたって形成された量子力学的相関。例えば、2つの自由度にわたる量子もつれでは、一方の自由度の量子状態を測定したとき、その結果がもう一方の量子状態についての情報を与える。このような相関効果は、隠れた変数理論を用いても説明できない量子力学特有の性質である。

<本研究成果の発表>

掲載誌：Physical Review Letters 91, 217902 (2003) (平成15年11月21日発行号)

論文タイトル: Experimental Demonstration of Quantum Source Coding

著者(所属): 三森康義, J. A. Vaccaro, S. M. Barnett, E. Andersson, 長谷川敦司, 武岡正裕, 佐々木雅英 (基礎先端部門量子情報技術グループ)

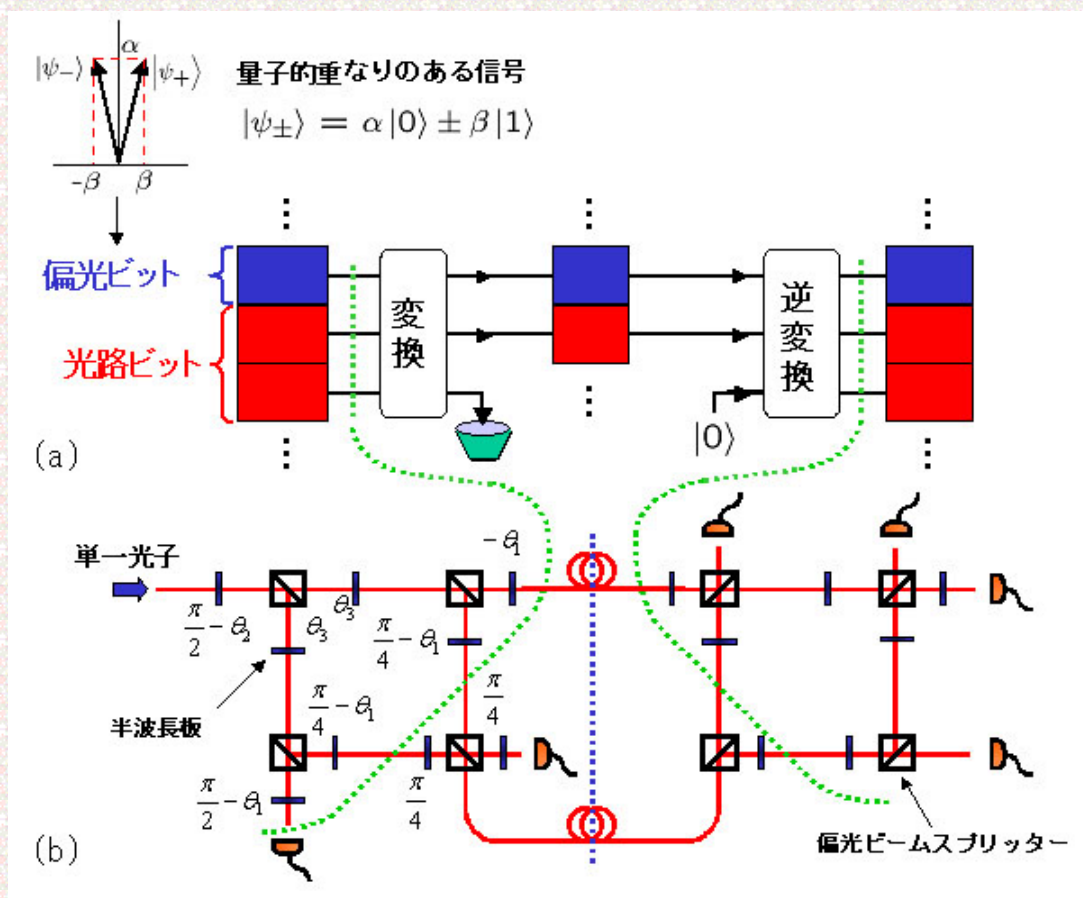


図1 (a)3ビット量子信号圧縮・復元の概念図。
(b)単一光子信号の圧縮・復元精度テスト実験回路。

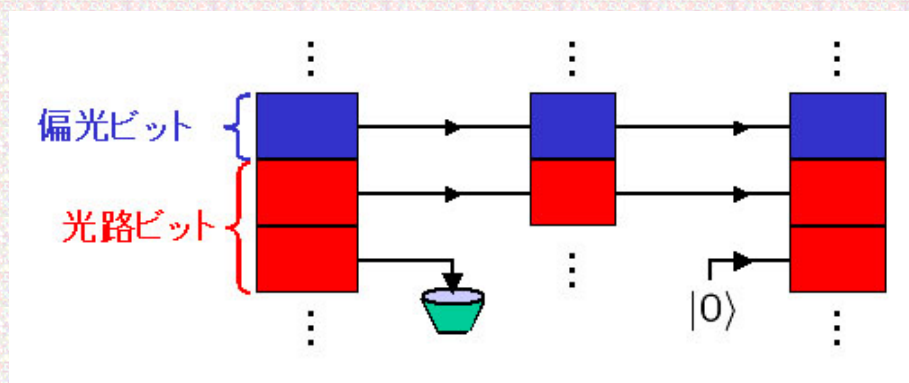


図2 量子もつれを使わない圧縮・復元操作(trivial compression)

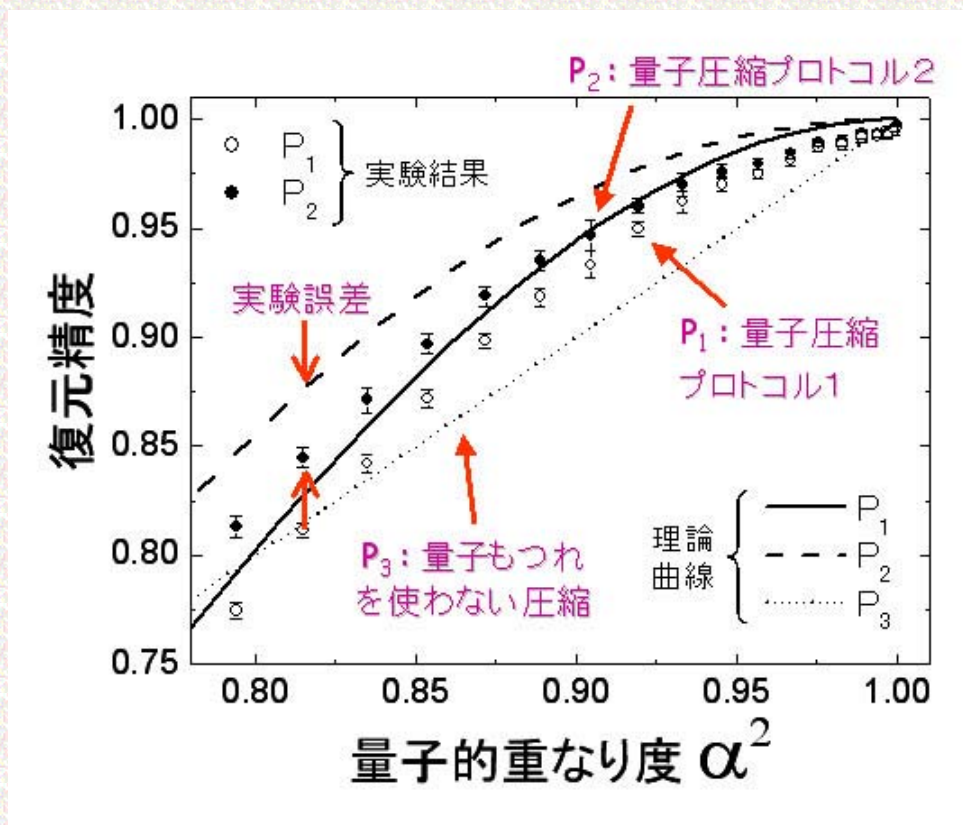


図3 3ビット量子信号圧縮における復元精度測定の実験結果