

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19740253

研究課題名（和文）量子符号化通信のための量子受信機の物理的設計に関する研究

研究課題名（英文）Physical implementation of the quantum receivers for practical quantum channel coding

研究代表者

武岡 正裕（TAKEOKA MASAHIRO） 独立行政法人 情報通信研究機構・新世代ネットワーク
研究センター 量子 ICT グループ・主任研究員

研究者番号：70415850

研究成果の概要：

宇宙通信などの超長距離光通信の通信性能限界は、従来の光通信理論ではショット雑音で制限されるとみなされてきた。しかし量子情報理論によれば、光の量子性を考慮した受信機によりこの限界を著しく凌駕できることが予想されている。本研究では、光子検出器等の現実のデバイスで実現可能な量子受信機を提案し、その最初の原理実証及び他の量子光学実験への応用を実現した。

交付額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2007年度 | 1,300,000 | 0 | 1,300,000 |
| 2008年度 | 700,000 | 210,000 | 910,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 2,000,000 | 210,000 | 2,210,000 |

研究分野：数理系科学

科研費の分科・細目：物理学・原子・分子・量子エレクトロニクス・プラズマ

キーワード：量子情報

1. 研究開始当初の背景

宇宙空間における超長距離光通信など、受信端での光信号が極端に微弱になる通信路における通信性能の限界は、従来の光通信理論ではショット雑音で制限されるものとみなされてきた。しかしながら近年の量子情報理論の進展により確立された量子信号検出理論や量子通信路符号化定理によれば、光信号の測定過程を最適化し、また信号間に量子一括測定を施すことにより、原理的には従来のショット雑音限界を著しく凌駕する通信性能が達成可能であることが明らかになっている。

しかしながら、これらの量子測定は数学的に最適化されたものであり、それを実際の物理過程でどのように、そしてどの程度実現できるのかは必ずしも明らかにされてはいなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、微弱なコヒーレント光信号からショット雑音限界を超えて最大限の情報を取り出すような量子受信機、量子一括測定を実現するための実際の物理過程を明らかにすることである。特に、現在の光通信や基礎光学実験においてよく確立している

測定や光学素子の多くは、量子光学においてはガウス型量子操作と呼ばれる量子状態操作のクラスに属している。このガウス型量子操作による信号の識別性能限界を求め、さらにショット雑音限界を超える量子受信機実現のための、非ガウス型量子操作も含めた具体的な物理過程を理論的に明らかにする。

3. 研究の方法

(1) ガウス型量子測定による 2 値コヒーレント信号の識別誤り率限界

ガウス型量子操作は、ガウス状態を別のガウス状態へと変換する量子操作として定義される。量子光学では、線形光学過程や 2 次の非線形光学過程、ホモダイン測定などがガウス型量子操作に相当する。ここではガウス型量子測定を、ガウス型量子操作及び古典的な操作で達成できる測定と定義した。これらは量子光学の実験で高い精度で実現している技術である。

このようなガウス型量子測定の信号識別性能限界を明らかにするため、まずは最も簡単な例である、2 値位相変調(BPSK)コヒーレント状態の識別に関する最小平均誤り率について考えた。ガウス型量子測定は、図 1(b)のようにガウス型量子操作のステップとそこでの部分的な測定結果(古典信号)のフィードフォワードでモデル化できる。これらの理論の道具立てを用いて、ガウス型量子測定の最小誤り率及び最適な測定の具体的な表式を求める。

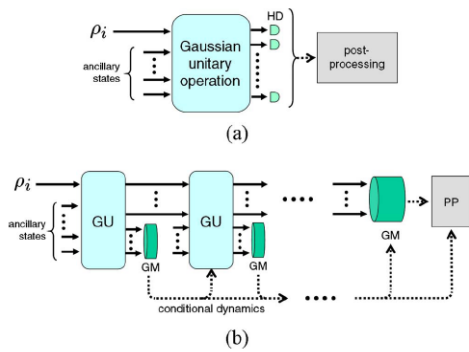


図1 (a) 古典的操作を含まないガウス型量子測定。
(b) ガウス型量子操作及び古典的操作からなるガウス型量子測定。詳細は論文成果③を参照。

(2) 光子検出器を用いた準最適非ガウス型量子受信機の提案

上記の BPSK コヒーレント信号の識別誤り率について、ガウス型量子測定限界を超える能力を持ち、かつ現在の技術で実現可能な準最適量子受信機の構成法を提案する。非ガウス型の量子操作には光子検出器を用いることを考える。提案した量子受信機の理論解析及び原理実証実験を行い、その有用性を示す。

(3) 非ガウス型補助状態(コヒーレント状態重ね合わせ)の生成

近年、光のコヒーレント状態を基底としその重ね合わせ状態を量子ビットとする量子計算のスキームが、光子レベルの非線形光学過程を必要としない手法として注目されている。本研究の最終的な目的である量子一括測定とは、コヒーレント信号に対するある種の量子計算に他ならない。従って上記のスキームの量子一括測定への応用は非常に有望なアプローチであると考えられる。この量子計算のスキームでは補助状態として、2 つのコヒーレント状態の重ね合わせ(coherent state superposition: CSS)が必要である。CSS 状態は、スクイズド状態と光子検出器を用いた確率的な操作で近似的に生成できることが知られているが、ここに(2)の量子受信機のアイディアを適用し、より自由度の高い CSS 状態を生成する手法を提案する。

4. 研究成果

(1) ガウス型量子測定による 2 値コヒーレント信号の識別誤り率限界

ここで定義したガウス型量子測定は、任意の古典的操作を含むため、その全体の測定過程は非ガウス型の状態変換になりうる。このため、これまでのガウス型量子操作に関して示されている定理を直接用いることはできない。そこで、ガウス型量子測定の最小誤り率は以下の方法で求められた。まず、古典的なフィードフォワードを含まない制限されたクラスの測定に関する最小誤り率及び最適な測定を求める。これはホモダイン測定で実現できることが簡単に示される。次に、古典的操作を一段だけ含んだ場合にこれを拡張すると、それではホモダイン測定を超えることはできないことがわかる。この結果は容易に多段の古典操作に拡張され、従って BPSK 信号の識別においては、古典的なフィードフォワードを含んだガウス型量子測定だけでは、単純なホモダイン測定、すなわちショット雑音限界を下回る誤り率を達成することは原理的に不可能であることが示された。これは、BPSK 信号の識別においてショット雑音限界を超えるためには、非ガウス型の量子操作が本質的に必要であることを厳密に証明した結果であり、今後量子符号化、量子通信の研究を進める上で重要な成果である。

(2) 光子検出器を用いた準最適非ガウス型量子受信機の提案と原理実証

現在の技術で、微弱光に対して最も効率的に実現できる非ガウス型量子操作は、光子検出器である。光子検出器を用いた BPSK 信号に対する量子最適受信機の構成法は 1970 年

代に先駆的な研究において既に検討されていたが、その後ほとんど進展がなかった。我々は過去の提案を発展させ、図2のような準最適な量子受信機を提案した。

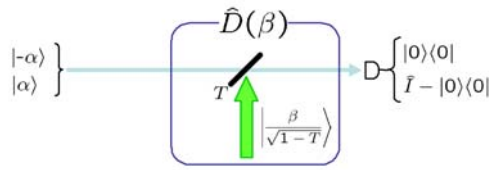


図2 光子検出器を用いた準最適な量子受信機。高透過率($T \sim 1$)のビームスプリッターで変位操作 $\hat{D}(\beta)$ を実現。光子検出器は光子の有無を識別する。

量子限界を達成するためには、2値のコヒーレント状態の適切な重ね合わせ状態への射影測定が必要である。図2では、信号と微弱な参照光を、透過率99%のビームスプリッターでコヒーレントに干渉（線形変位操作）させたあと、信号光側のポートの光について光子検出器により光子の有無を検出している。このとき検出された光子は、信号のものであるか参照光のものであるかは原理的に区別がつかず、この識別性の喪失によって、実効的に異なる光子数状態の重ね合わせ状態への射影が可能となる。また参照光の振幅と位相を適切に制御することにより重ね合わせを最適化することが出来る。図3に、ショット雑音限界（ホモダイン限界）、提案する量子受信機の誤り率、及び量子限界を比較する。

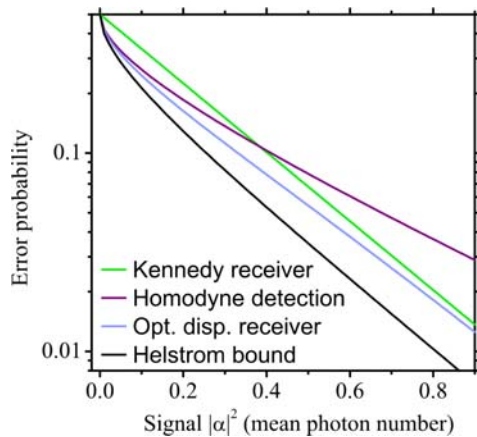


図3 各種受信機の誤り率限界。Opt. disp. Receiver: 我々の提案する量子受信機。Kennedy receiver: ケネディにより提案(1973)された受信機。Helstrom bound: 量子限界。

我々の提案する受信機は極めて簡単な構成であり、精度の高い光学系と、現在開発の進んでいる超伝導を用いた高量子効率光子数識別器(量子効率 $>90\%$)などを用いれば、現在の技術で十分にショット雑音限界を超

えることを、数値計算により明らかにした。

また、その実現に向けた第一歩として、市販のアバランシェフォトダイオード(量子効率 $\sim 60\%$)を用いた原理実証実験を行った。図4は、量子効率を補正した実験結果であり、信号の平均光子数が $0.15 \sim 0.25$ の微弱な領域において、ホモダイン限界を超えるデータが示された。これは、超伝導光子数識別器等を用いた真にホモダイン限界を超える受信機の実現につながる重要な成果である。また理論的にも、今後は多値振幅位相変調信号に対する量子受信機への拡張や、極限計測技術への応用など、様々な発展が期待される。

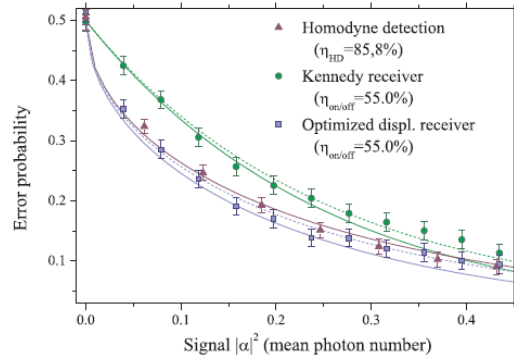


図4 原理実証実験結果から、各受信機の誤り率の比較。 η : 各受信機の実験での量子効率。

(3) 非ガウス型補助状態(コヒーレント状態重ね合わせ)の生成

前述(2)で提案した量子受信機の原理を、近似的なCSS状態生成のスキームに応用し、コヒーレント状態間の重ね合わせの位相、重み付けを任意に制御できる新しい手法を提案した。近似的なCSS状態は、真空スクイズド状態の一部分をビームスプリッターで反射させてその光子数を検出することで確率的に生成できる。このとき光子が1つ以上検出されその数が奇数であれば負(位相差 180°)の重ね合わせ、偶数であれば正(位相差 0°)の重ね合わせが生成される。我々は、光子検出器で光子数状態への射影測定を行う代わりに(2)の量子受信機を用いると、正の重ね合わせ状態と負の重ね合わせ状態がさらに重ね合わさった状態が生成され、その重ね合わせを参照光の位相振幅を制御することで任意に制御できることを確認した。図5はその数値計算例である。

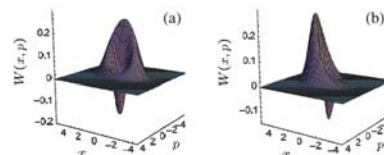


図5 生成されるコヒーレント状態重ね合わせのウィグナー関数の数値例。(a) 重ね合わせの位相が 90° の場合。(b) 重ね合わせの重み付けが3:1の場合。詳細は論文成果⑦を参照。

本提案は現在の実験技術で十分に実現可能であり、コヒーレント状態の任意の重ね合わせの生成が可能になれば、コヒーレント状態を用いた量子計算を始め様々な量子情報プロトコルに応用されることが期待される。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

- ① H. Takahashi, K. Wakui, S. Suzuki, M. Takeoka, K. Hayasaka, A. Furusawa, and M. Sasaki, "Generation of large-amplitude coherent-state superposition via ancilla-assisted photon subtraction", *Physical Review Letters*, 101, 233605-1—4 (2008) 査読有
- ② C. Wittmann, M. Takeoka, K. N. Cassemiro, M. Sasaki, G. Leuchs, U. L. Andersen, "Demonstration of near-optimal discrimination of optical coherent states", *Physical Review Letters*, 101, 210501-1—4 (2008) 査読有
- ③ M. Takeoka and M. Sasaki, "Discrimination of the binary coherent signal: Gaussian-operation limit and simple non-Gaussian near-optimal receivers", *Physical Review A*, 78, 022320-1—7 (2008) 査読有
- ④ M. Sasaki, M. Takeoka, and H. Takahashi, "Temporally multiplexed superposition states of continuous variables", *Physical Review A*, 77, 063840-1—11 (2008) 査読有
- ⑤ M. Takeoka, H. Takahashi, and M. Sasaki, "Large-amplitude coherent-state superposition generated by a time-separated two-photon subtraction from a continuous-wave squeezed vacuum", *Physical Review A*, 77, 062315-1—9 (2008) 査読有
- ⑥ 武岡正裕, "連続量変数の光量子計算と量子情報通信", *光学*, 37, 692—697 (2008) 査読有
- ⑦ M. Takeoka, M. Sasaki, and N. Lütkenhaus, "Implementing projective measurements with linear optics", *Proc. of the 8th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC2006)*, 1, 413—416 (2007) 査読有
- ⑧ M. Takeoka and M. Sasaki, "Conditional generation of an arbitrary superposition of coherent states", *Physical Review A*, 75, 064302-1—4 (2007) 査読有
- ⑨ M. Takeoka, "Projective measurements via linear optics and photon detectors", *Optics*

and Spectroscopy, 103, 98—106 (2007) 査読有

[学会発表] (計 14 件)

- ① M. Takeoka et al., "Experimental implementation of near-optimal quantum measurements of optical coherent state", DEX-SMI Workshop on Quantum Statistical Inference, NII, Tokyo, Japan, March 2-4, 2009.
- ② M. Takeoka et al., "Quantum receivers and quantum coding toward the quantum-limited performance in long-haul optical communications", International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS2009), Miraikan, Tokyo, Japan, February 4-6, 2009.
- ③ M. Takeoka et al., "Discrimination of optical coherent states via near-optimal quantum receivers", SPIE Photonics West, San Jose, CA, USA, January 24-29, 2009 (**Invited**).
- ④ M. Takeoka, "Generation of optical Schrödinger cat-like states and classical-quantum channel coding", Workshop on topological cluster state computing in optics 2008, NII, Tokyo, Japan, December 11-12, 2008.
- ⑤ M. Takeoka et al., "Practical near-optimal quantum receivers for the BPSK coherent signals", 2008 International symposium on physics of quantum technology, Nara, Japan, November 25-28, 2008.
- ⑥ M. Takeoka, "Implementation of quantum receivers for communication and sensing", 2008 xQIT conference, Difficult problems in quantum information theory, MIT, Cambridge, MA, USA, November 19-20, 2008 (**Invited**).
- ⑦ M. Takeoka et al., "Near-optimal quantum receivers for the coherent state discrimination", The 9th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC2008), Calgary, Canada, August 19-24, 2008.
- ⑧ 武岡正裕, "量子情報通信: 研究の原状と展望", 文科省科研費補助金 特定領域研究「新世代光通信へのイノベーション」第2回量子情報ミニ研究会, 有馬, 2008年7月7-8日 (**招待講演**).
- ⑨ 北川晃 他, "連続量ベル相関測定による量子もつれの推定", 第18回量子情報技術研究会, 東京大学, 2008年5月22-23日。
- ⑩ C. Wittmann et al., "Near-optimal quantum state discrimination of optical coherent states", Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS2008), San Jose,

USA, May 4-9, 2008.

- ⑪ 辻野賢治 他, “コヒーレント信号識別における準量子最適受信機の原理実証”, 日本物理学会第 63 回年次大会, 近畿大学, 2008 年 3 月 22-26 日。
- ⑫ 武岡正裕 他, “コヒーレント信号識別のガウス測定限界と準最適量子測定について”, 日本物理学会第 62 回年次大会, 北海道大学, 2007 年 9 月 21-24 日。
- ⑬ M. Takeoka et al., “Near-optimal quantum receivers for the BPSK coherent signals”, SPIE Optics East, Boston, USA, September 10-12, 2007.
- ⑭ M. Takeoka, “Discrimination of binary optical quantum states”, Identifying quantum states and operations: theory and applications, Budmerice, Slovakia, June 20-24, 2007, **(Invited)**.

[産業財産権]

○取得状況 (計 2 件)

名称: 量子干渉計測システム
発明者: 武岡正裕、佐々木雅英、番雅司
権利者: (独)情報通信研究機構
種類: 特許
番号: 第 4235704 号
取得年月日: 2008 年 12 月 26 日
国内外の別: 国内

名称: Quantum source coding apparatus and quantum information communication system
発明者: M. Sasaki, Y. Mitsumori, A. Hasegawa, M. Takeoka, J. A. Vaccaro, S. M. Barnett, E. Andersson
権利者: (独)情報通信研究機構
種類: USA Patent
番号: No. 7403713
取得年月日: 2008 年 7 月 22 日
国内外の別: 国外

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武岡 正裕 (TAKEOKA MASAHIRO)

独立行政法人 情報通信研究機構・新世代ネットワーク研究センター 量子 ICT グループ・主任研究員

研究者番号: 70415850