

標準量子限界を打ち破る量子受信器

和久井健太郎*・辻野 賢治*,**・泉 秀 蒔*・武岡 正裕*・佐々木雅英*,†

Quantum Receiver Beyond the Standard Quantum Limit

Kentaro WAKUI*, Kenji TSUJINO*,**, Shuro IZUMI*, Masahiro TAKEOKA* and Masahide SASAKI*

How precisely we can discriminate weak optical coherent signals is ultimately limited by the quantum fluctuation of the signals themselves, when the signals are detected by shot-noise-limited homodyne receivers with unit detection efficiencies. This limit is so-called “shot noise limit” or “standard quantum limit” (SQL) in coherent communication. However, it has been predicted that one could overcome the SQL using quantum-mechanically optimized receivers. Such receivers are called “quantum receivers”, and has been intensively studied both theoretically and experimentally, for binary or M-ary coherent signals. Here we briefly introduce the concept and recent progress in development of the quantum receivers. The concept and the technology shown here will pave a way not only to enhance signal-to-noise ratio beyond the shot noise limit in heavily attenuated channels, but to realize efficient quantum information protocols based on coherent states.

Key words: quantum communication, quantum receiver, binary phase-shift keying, standard quantum limit

光通信では、光パルスの強度や振幅を変調することで“0”と“1”のビット列を作り出し、そこに伝えたい情報を符号化して伝送している。数ある通信方式の中でも、コヒーレント光通信において情報伝送の搬送波となるレーザー光に振幅位相変調 (quadrature amplitude modulation: QAM) を施し、受信側にはホモダイン測定を用いた場合、最も高い信号雑音比 (SN 比) を実現できることが知られている¹⁾。しかし、例えば次のような場合には QAM の信号間距離が極度に近くなり、光自身も量子雑音の影響を無視できなくなる。すなわち、長距離光空間通信など中継増幅器が挿入できない状況において信号がショット雑音以下まで減衰したり、あるいは (信号強度が十分に大きい場合でも) 一定のパワー制限の下で QAM の超多値化を進める、といったケースである*1。この信号識別の限界は一般に標準量子限界 (standard quantum limit: SQL) とよばれ、従来この限界を凌駕するビット誤り率を実現する

ことは不可能であると考えられてきた。しかし、光の量子力学的性質を積極的に用いることで SQL を超える受信性能を実現できることが実証され、注目を集めている。このような信号受信方式は「量子受信器」とよばれ、実証実験が積極的に進められている。本稿では、この量子受信器の成り立ちや概念に触れながら、最近の研究動向について紹介したい。

1. 量子信号の識別

量子信号に対する検出理論は、1967年にヘルストロム (C. W. Helstrom) によって定式化された²⁾。ここではまず、Helstrom が最初に取り上げた2つの量子状態の識別について考える。現在の光通信で使われるオン-オフ強度変調 (on-off keying: OOK) 方式では、レーザー光をあるビット区間 T 秒ごとにオン-オフさせ“1”と“0”の信号を生成する (図1)。理想的な単一モードの光では、1と0

*情報通信研究機構 (〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1) †E-mail: psasaki@nict.go.jp

**現所属: 東京女子医科大学 (〒162-8666 東京都新宿区河田町 8-1)

*1 例えば光ファイバーを例にとると、同時に投入できるパワーにも限界があるため、そういったパワー制限の下で QAM の超多値化を進めると信号間距離が減少してゆくことになる。

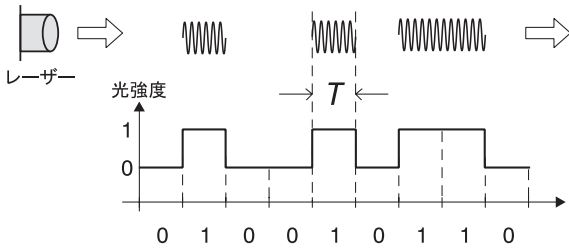


図1 オン-オフ強度変調方式. 光強度のオン-オフ時間波形パターン(下)と, レーザー出力光のオン-オフパターン(上).

に対応する量子状態はそれぞれコヒーレント状態

$$|\alpha\rangle \equiv e^{-|\alpha|^2/2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\alpha^n}{\sqrt{n!}} |n\rangle \quad (1)$$

と真空状態 $|0\rangle$ である. このようなオン-オフ信号は, 通常は光子計数により識別し, ビット時間 T の間に光子が検出されれば 1, さもなくば 0 と判定する. オフ信号 $|0\rangle$ の場合, 理想的な光子検出器では光子が検出されないが, オン信号の場合には平均光子数が有限でも光子が全く検出されない確率が存在する. その確率は

$$\langle \alpha | 0 \rangle \langle 0 | \alpha \rangle = e^{-|\alpha|^2} \quad (2)$$

で与えられる. これはコヒーレント状態が直交しない量子状態であることに起因している³⁾. オン, オフの信号状態がともに等確率で送信されるとすると, ビット誤り率は

$$P_e = \frac{1}{2} e^{-|\alpha|^2} \quad (3)$$

となる. もちろん, 古典的なオン-オフ信号であれば $|\alpha|^2 \gg 1$ となるよう光増幅器などを用いて信号間距離を極力離しているため P_e もゼロと見なせるが, 信号が減衰したり, 多値化により信号間距離が縮まって量子雑音が顕著になる領域では, ビット誤り率が無視できないほど大きくなってしまう.

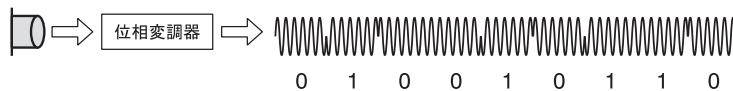


図2 二値位相変調方式の波形パターン.

2. コヒーレント光通信における限界

2.1 BPSK 信号に対する標準量子限界

次世代光通信として, オン-オフ強度変調方式の代わりに, 光波の位相まで変調するコヒーレント光通信方式が研究されている. その最も基本となる方式は, レーザー光の位相を 180° ずらした二値の位相変調信号 $\{|\alpha\rangle, |-\alpha\rangle\}$ (α は実数) で $\{0, 1\}$ を表現する, いわゆる二値位相変調 (binary phase shift keying: BPSK) 方式である (図2). 光を電磁波として考えた場合, 最も効率のよい信号検出方法は, ホモダイン測定とよばれる被測定信号の振幅と位相に感度をもつ測定手法である. 図3にその概要を示す. ここでは, まず信号光を強い参照光 (「局発光」) と干渉させ, 強度の強い2つのビームに変換する. これらを2つのバランス型フォトダイオードで電流に変換し, 差分をとる. 2つの電流の差分をとることによって古典的な雑音成分が相殺され, 光自身のゆらぎのみで決まる, いわゆるショット雑音限界での信号検出が可能となる.

ホモダイン測定の厳密な量子力学的定式化は, ユーエン (H. P. Yuen) らによってなされた⁴⁾. ここで, 信号光と局発光を表す場の消滅演算子をそれぞれ $\hat{a}(t)$, $\hat{a}_L(t)$ とすると, $[\hat{a}(t), \hat{a}^\dagger(t')] = \delta(t-t')$ が成り立つ. これらを 50:50 のバランス型ビームスプリッターで干渉させた後の2つの出力光の場の演算子はそれぞれ

$$\hat{b}(t) = \frac{\hat{a}(t) + \hat{a}_L(t)}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

$$\hat{c}(t) = \frac{-\hat{a}(t) + \hat{a}_L(t)}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

で与えられる. フォトダイオードではこの光の場が二乗検波され, 電流 $\hat{b}^\dagger(t)\hat{b}(t)$, $\hat{c}^\dagger(t)\hat{c}(t)$ にそれぞれ変換される (図3を参照). 局発光が十分強く, 量子ゆらぎを無視できる ($\hat{a}_L(t) = \alpha_L e^{-i(\omega t - \phi)}$) とすると, この差分電流は最終的に

$$\hat{I}(t) = 2\alpha_L \hat{X}_\phi \quad (6)$$

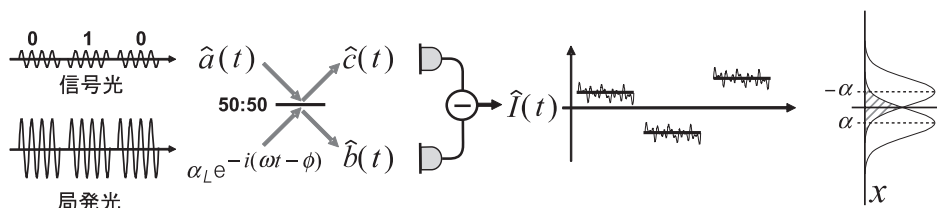


図3 ホモダイン測定方式の概要と出力確率分布, および BPSK 信号の判定.

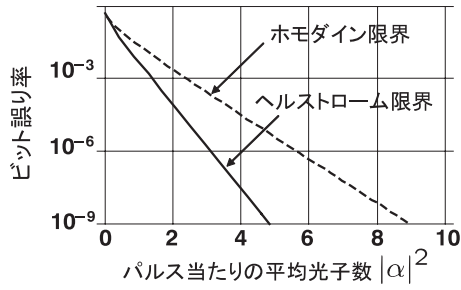


図4 BPSK 信号に対するビット誤り率の平均光子数依存性.

と記述できる⁵⁾. \hat{X}_ϕ は直交位相振幅演算子であり, $\hat{X}_\phi|x_\phi\rangle = x_\phi|x_\phi\rangle$ である. すなわちホモダイン測定での観測結果 x_ϕ は, 直交位相振幅 $|x_\phi\rangle$ の固有値となる.

BPSK 信号に対して 100% の効率でホモダイン測定を行うと, 出力の確率分布は次のようなガウス分布となる.

$$|\langle x|\pm\alpha\rangle|^2 = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \exp[-2(x\mp\alpha)^2] \quad (7)$$

この分布は一般に図3のように重なりをもつため, 重なり部分の面積が最小になるように x の閾値を設定して信号判定を行う. ビット信号が等確率で生成される場合, BPSK 信号でのビット誤り率は

$$P_e^H = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^0 dx |\langle x|\alpha\rangle|^2 + \frac{1}{2} \int_0^{\infty} dx |\langle x|-\alpha\rangle|^2 \\ = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{2}\alpha) \quad (8)$$

で与えられる. このビット誤り率が BPSK 信号におけるホモダイン測定での識別限界, すなわち SQL となる. この限界はホモダイン測定におけるショット雑音レベルに相当するため, ショット雑音限界ともよばれる. この P_e^H を信号の平均光子数 $|\alpha|^2$ に対してプロットすると, 図4の点線 (ホモダイン限界) のようになる. パルスあたりの平均光子数が 10 光子を下回ると, 現在のエラーフリーの基準値とされる, 10^{-9} を切る事が不可能となる.

2.2 ヘルストローム限界

これに対して, ヘルストロームは量子力学が課す量子状態の識別限界を導いた²⁾. この場合の最小ビット誤り率は

$$P_e = \frac{1}{2} \langle -\alpha | \hat{\Pi}_0 | -\alpha \rangle + \frac{1}{2} \langle \alpha | \hat{\Pi}_1 | \alpha \rangle \quad (9)$$

を最小化する解 $\{\hat{\Pi}_0, \hat{\Pi}_1\}$ として求められる. ここで, $\hat{\Pi}_0, \hat{\Pi}_1$ は信号検出の測定過程を表す, 正值作用素測度 (positive operator-valued measure: POVM) である. 詳しい導出は省略するが, 最小ビット誤り率 P_e^{\min} は

$$P_e^{\min} = \frac{1}{2} (1 - \sqrt{1 - \kappa^2}) \quad (10)$$

で与えられる. ここで $\kappa = \langle \alpha | -\alpha \rangle$ である. 平均光子数

$|\alpha|^2$ に対してビット誤り率をプロットすると図4の実線のようになる. この最終的なビット誤り率の限界をヘルストローム限界とよび, いかなる信号受信方式もこのビット誤り率を下回することはできない. また, SQL を超えた信号識別を可能とする受信方式のことを, 「量子受信器」とよぶ.

3. 量子受信器

ここまでで, 位相と振幅情報をもつ BPSK 信号の識別では, 理想的なホモダイン測定を用いてもビット誤り率がゼロとはならず, SQL が存在することを示した. これに対して, 本稿で解説する量子受信器の目的とは, いかに SQL を乗り越え, ヘルストローム限界に近づく受信器を設計・実現できるかという点にある.

3.1 変位操作と光子検出を用いた量子受信器

BPSK 信号 $\{|\alpha\rangle, |-\alpha\rangle\}$ に対する量子最適受信器の実現化に向けた最初の一步は, ケネディ (R. S. Kennedy) によって示された⁶⁾. ケネディの提案では, 信号 $\{|\alpha\rangle, |-\alpha\rangle\}$ を直接ホモダイン検波する代わりに, $\hat{D}(-\alpha) = \exp(-\alpha\hat{a}^\dagger + \alpha^*\hat{a})$ のようなユニタリー変換によって $\{|0\rangle, |-2\alpha\rangle\}$ という状態にいったん変換される. この状態に対してオン-オフ検出 $\{\hat{\Pi}_{\text{on}}, \hat{\Pi}_{\text{off}}\}$ を用いて信号の判定を行うことで, 以下の謝り率が得られる.

$$P_e = \frac{1}{2} \langle -2\alpha | \hat{\Pi}_{\text{off}} | -2\alpha \rangle \\ = \frac{1}{2} e^{-2|\alpha|^2} \quad (11)$$

オン-オフ検出の POVM は

$$\hat{\Pi}_{\text{on}} = \sum_{n=1}^{\infty} |n\rangle\langle n| \quad (12)$$

$$\hat{\Pi}_{\text{off}} = |0\rangle\langle 0| \quad (13)$$

である. この方式では, 信号強度が大きい領域ではほぼヘルストローム限界と同程度のビット誤り率を達成できる. ユニタリー変換 $\hat{D}(-\alpha)$ は変位演算子とよばれる. この変位演算を実現するには, 信号光とコヒーレントな局発光を用意し, 反射率がきわめて小さいビームスプリッターで局発光を信号光に合波させる. この方式の巧みな点は, 振幅が等しい 2 つの信号 $\{|\alpha\rangle, |-\alpha\rangle\}$ を, 変位操作によって $\{|0\rangle, |-2\alpha\rangle\}$ という振幅の異なる状態に変換し, オン-オフ検出を可能にしたことである.

その後, ドリナー (S. J. Dolinar) はケネディの方式を発展させ, ヘルストローム限界に到達する物理的方法を発見した⁷⁾. 概要を図5に示す. ここではケネディの方式において信号を一気に $\{|0\rangle, |-2\alpha\rangle\}$ まで変換する代わりに,

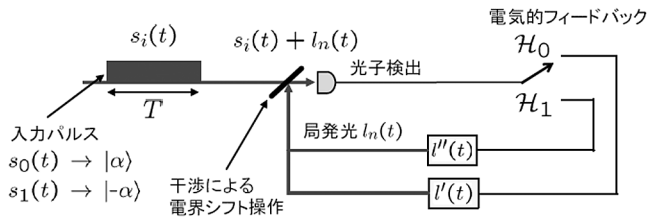


図5 ドリナーによる時間分割型の量子受信器。

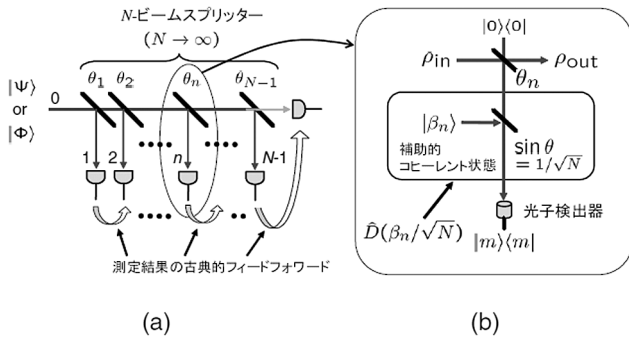


図6 ビームスプリッター分割型の量子受信器。

時刻 t_1, t_2, \dots において光子を一つ一つ検出し、光子が検出されるたびにフィードバックによって局発光の位相を調整しながら段階的に変換を行う、というものである。このドリナー型の検出手法では、オン-オフ検出器の分解能は十分に早く、パルスの干渉用ビームスプリッターにパルスの後ろ部分が入射される前に光子検出とフィードバック操作が完了するものとする。受信した信号が $|\alpha\rangle$ であったか $|\alpha\rangle$ であったかは、パルスを最後まで測り終えた後に、トータルの検出光子数の偶奇によって最終的に判定する。

近年になって、ドリナー型の時間分割型受信方式は無数のビームスプリッターを使ったモデルで置き換え可能であることが武岡らによって示され、加えて任意の二値信号に拡張された⁸⁾。ここでは、線形光学素子とオン-オフ検出器とフィードバック操作を用いることで、任意の二値直交信号に対して完全な識別が可能であることが証明された(概要は図6)。特筆すべき点は、このアプローチを用いることであらゆる二値の射影測定が構成が可能となる点である⁹⁾。またこの証明を用いることで、受信方法の具体的な設計および最適化が可能となった。その結果、ビームスプリッターの段数や光子検出器の効率が有限であったり、また必ずしもフィードバックを用いなくとも、SQLを凌駕する受信器を構築できることが明らかとなった。

なお受信技術にホモダイン測定を用いた場合でも、ホモダイン測定器の前で三次以上の非線形過程を用いればヘルストローム限界に到達することができる^{10,11)}。

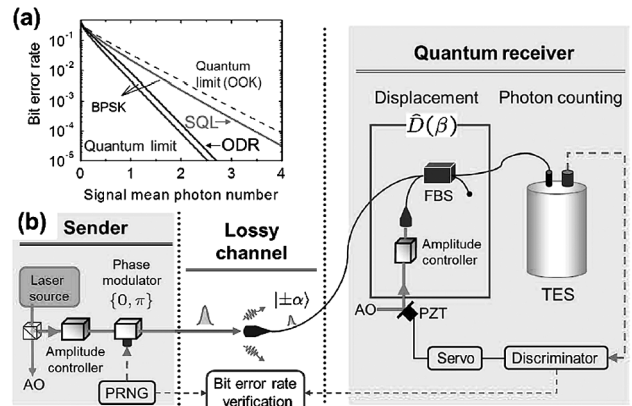


図7 ショット雑音限界を超える量子受信器：実験図¹²⁾。

3.2 BPSK 信号の SQL を超える最適化受信器の実現

さて、本節では情報通信研究機構 (NICT) における辻野らの実験を具体的に紹介したい¹²⁾。この実験では、上述した武岡らの理論研究¹³⁾をもとにして、NICTで設計した最適化受信器 (optical displacement receiver: ODR) を用いている。ODRは基本的にケネディの方式を踏襲しているが、ケネディ方式において問題となっていた、微弱光識別能力の低下を改善したものとなっている。また、ドリナー型受信器のように信号を多数回フィードバックする必要がない点も、通信用途として大きなメリットがある。

ODRの性能を図7 (a) に示す。図内の ODRはこの実験で実現した最適化受信器の識別限界を示している。一方、左端の Quantum limit は BPSK 信号に対するヘルストローム限界を、また SQL は BPSK 信号に対する標準量子限界をそれぞれ示している。ここから、ODRの性能が SQL を超えて、ヘルストローム限界に近いビット誤り率を実現していることがわかる。また、参考までに、OOK 信号に対するヘルストローム限界も示す (Quantum limit (OOK))。

次に、図7 (b) は実験装置図を示している。レーザー光には波長 850 nm の連続 (CW) 光が使用されている。情報の送り手 (Sender) は、まず強度変調器を用いて CW 光をパルス化し、次に位相変調器によって 180° 異なる $0, \pi$ の位相変調を行って、BPSK 信号を生成する。変調の位相は、擬似乱数発生器 (pseudo-random-number generator: PRNG) によってランダムに選択される。生成された BPSK 信号は光ファイバーに結合され、ファイバービームスプリッター (FBS) を用いて変位操作が施される。FBS の分岐比はおおよそ 99:1 であり、BPSK 信号の 99% と局発光の 1% が結合され、検出器へ導波される。この操作が近似的な変位操作を実現している。変位操作を受けた信号は、超伝導転移端センサー (transition edge sensor: TES) にて検出される。TES は超伝導体を用いた光子検出器であ

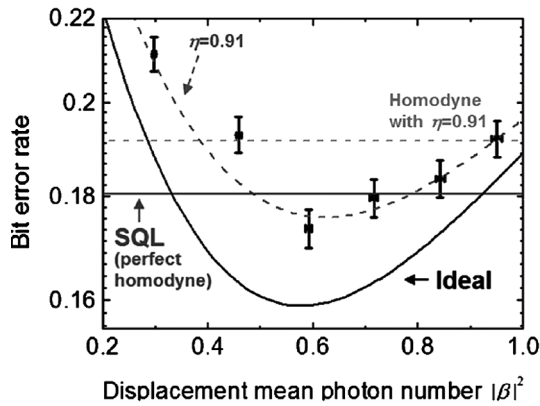


図8 ショット雑音限界を超える量子受信器：実験結果¹²⁾。

り、近赤外や通信波長帯においてきわめて高い量子効率を誇っている^{14, 15)}。本実験においても受信器全体での検出効率は90%を超えており、さまざまな不完全性を含んだ実験状況においてSQLを超えるためには、このような高効率の検出器が必要不可欠であった。TES自体は光子数を識別できる性能をもつが、ここでは光子の到来のみを検知するオン-オフ検出器として用いられている。余談だが、TESはほかにも量子効率の高さが重要となる実験で積極的に活用されている¹⁶⁾。

図8に結果を示す。これはBPSK信号の振幅を $|\alpha|^2 = 0.21 \pm 0.01$ で一定とした場合のビット誤り率である。SQLは量子効率が100%の理想的なホモダイン限界に相当する。この結果から、変位操作の平均光子数が $|\beta|^2 = 0.6$ となるポイントにおいて、ビット誤り率が有意にSQLを超えていることがわかる。この実験以前にも、NICTを含むいくつかのグループにおいて原理実証実験が行われていたが¹⁷⁻¹⁹⁾、理想的なホモダイン限界を超えた量子受信器は本実験によって初めて達成された。

BPSK信号を量子力学的に取り扱った場合、理想的なホモダイン測定を用いた場合でも、光自身のもつ量子ゆらぎ(ショット雑音)のため、信号識別にSQLが存在する。しかしながら、変位操作と光子検出・フィードバック操作を導入した量子受信器を用いることで、SQLを凌駕してヘルストローム限界へと迫るビット誤り率を実現することができる。本稿では、実際にSQLを超える性能を実現したODRの実験について紹介した。

また本稿では紹介できなかったが、より最近になって、三値ないし四値PSK信号に対する具体的設計や²⁰⁾、オン-オフ検出器の代わりに光子数識別器を利用した場合の量子受信器が提案されている^{21, 22)}。また、四値PSK信号に対する量子受信器の実験や^{23, 24)}、さらには、四値PSK信号、

パルス位置変調(pulse-position modulation: PPM)信号に対して、実時間のフィードバック/フィードフォワード操作を実装した例も報告されており^{25, 26)}、量子受信器の研究は理論・実験の両面においてさらなるひろがりを見せている。

文 献

- 1) K.-P. Ho: *Phase-Modulated Optical Communication Systems* (Springer, New York, 2005).
- 2) C. W. Helstrom: *Quantum Detection and Estimation Theory* (Academic Press, New York, 1976).
- 3) 松岡正浩：量子光学(東京大学出版会, 1996).
- 4) H. P. Yuen and V. W. S. Chan: "Noise in homodyne and heterodyne detection," *Opt. Lett.*, **8** (1983) 177-179.
- 5) 佐々木雅英, 松岡正浩(監修)：量子情報通信(オプトロニクス社, 2006).
- 6) R. S. Kennedy: "A near-optimum receiver for the binary coherent state quantum channel," *Research Laboratory of Electronics, MIT, Quarterly Progress Report, No. 108* (1973) 219-225.
- 7) S. J. Dolinar: "An optimum receiver for the binary coherent state quantum channel," *Research Laboratory of Electronics, MIT, Quarterly Progress Report, No. 111* (1973) 115-120.
- 8) M. Takeoka, M. Sasaki, P. van Loock and N. Lütkenhaus: "Implementation of projective measurements with linear optics and continuous photon counting," *Phys. Rev. A*, **71** (2005) 022318.
- 9) M. Takeoka, M. Sasaki and N. Lütkenhaus: "Binary projective measurement via linear optics and photon counting," *Phys. Rev. Lett.*, **97** (2006) 040502.
- 10) M. Sasaki, T. S. Usuda and O. Hirota: "Physical aspect of the improvement of quantum-noise characteristics caused by unitary transformation with a nonlinear optical medium," *Phys. Rev. A*, **51** (1995) 1702-1705.
- 11) M. Sasaki and O. Hirota: "Optimum decision scheme with a unitary control process for binary quantum-state signals," *Phys. Rev. A*, **54** (1996) 2728-2736.
- 12) K. Tsujino, D. Fukuda, G. Fujii, S. Inoue, M. Fujiwara, M. Takeoka and M. Sasaki: "Quantum receiver beyond the standard quantum limit of coherent optical communication," *Phys. Rev. Lett.*, **106** (2011) 250503.
- 13) M. Takeoka and M. Sasaki: "Discrimination of the binary coherent signal: Gaussian-operation limit and simple non-Gaussian near-optimal receivers," *Phys. Rev. A*, **78** (2008) 022320.
- 14) A. E. Lita, A. J. Miller and S.-W. Nam: "Counting near-infrared single-photons with 95% efficiency," *Opt. Express*, **16** (2008) 3032-3040.
- 15) D. Fukuda, G. Fujii, T. Numata, K. Amemiya, A. Yoshizawa, H. Tsuchida, H. Fujino, H. Ishii, T. Itatani, S. Inoue and T. Zama: "Titanium-based transition-edge photon number resolving detector with 98% detection efficiency with index-matched small-gap fiber coupling," *Opt. Express*, **19** (2011) 870-875.
- 16) M. Giustina, A. Mech, S. Ramelow, B. Wittmann, J. Kofler, J. Beyer, A. Lita, B. Calkins, T. Gerrits, S.-W. Nam, R. Ursin and A. Zeilinger: "Bell violation using entangled photons without the fair-sampling assumption," *Nature*, **497** (2013) 227-230.
- 17) R. L. Cook, P. J. Martin and J. M. Geremia: "Optical coherent state discrimination using a closed-loop quantum measurement," *Nature*, **446** (2007) 774-777.
- 18) Ch. Wittmann, M. Takeoka, K. N. Cassemiro, M. Sasaki, G. Leuchs and U. L. Andersen: "Demonstration of near-optimal discrimination of optical coherent states," *Phys. Rev. Lett.*, **101**

(2008) 210501.

- 19) K. Tsujino, D. Fukuda, G. Fujii, S. Inoue, M. Fujiwara, M. Takeoka and M. Sasaki: "Sub-shot-noise-limit discrimination of on-off keyed coherent signals via a quantum receiver with a superconducting transition edge sensor," *Opt. Express*, **18** (2010) 8107–8114.
- 20) S. Izumi, M. Takeoka, M. Fujiwara, N. D. Pozza, A. Assalini, K. Ema and M. Sasaki: "Displacement receiver for phase-shift-keyed coherent states," *Phys. Rev. A*, **86** (2012) 042328.
- 21) C. Wittmann, U. L. Andersen, M. Takeoka, D. Sych, and G. Leuchs: "Demonstration of coherent-state discrimination using a displacement-controlled photon-number-resolving detector," *Phys. Rev. Lett.*, **104** (2010) 100505.
- 22) S. Izumi, M. Takeoka, K. Ema and M. Sasaki: "Quantum receivers with squeezing and photon-number-resolving detectors for M-ary coherent state discrimination," *Phys. Rev. A*, **87** (2013) 042328.
- 23) F. Becerra, J. Fan, G. Baumgartner, S. Polyakov, J. Goldhar, J. Kosloski and A. Migdall: "M-ary-state phase-shift-keying discrimination below the homodyne limit," *Phys. Rev. A*, **84** (2011) 062324.
- 24) C. R. Müller, M. A. Usuga, C. Wittmann, M. Takeoka, Ch. Marquardt, U. L. Andersen, and G. Leuchs: "Quadrature phase shift keying coherent state discrimination via a hybrid receiver," *New J. Phys.*, **14** (2012) 083009.
- 25) J. Chen, J. L. Habif, Z. Dutton, R. Lazarus, and S. Guha, "Optical codeword demodulation with error rates below the standard quantum limit using a conditional nulling receiver," *Nat. Photon.*, **6** (2012) 374–379.
- 26) F. Becerra, J. Fan, G. Baumgartner, J. Goldhar, J. Kosloski and A. Migdall: "Experimental demonstration of a receiver beating the standard quantum limit for multiple nonorthogonal state discrimination," *Nat. Photon.*, **7** (2013) 147–152.

(2013年7月12日受理)