

- **量子受信機の原理を世界で初めて検証**  
～ 従来の光通信性能限界を超える低誤り率受信機の原理を実証 ～

- 平成20年11月11日

独立行政法人情報通信研究機構(以下「NICT」という。理事長:宮原 秀夫)は、エアランゲン大学(ドイツ)及びデンマーク工科大学(デンマーク)と共同で、現在の光通信技術の性能限界を超える低誤り率での信号検出が可能な量子受信機の原理を世界で初めて実証しました。量子受信機は、現在の光通信理論に基づく受信機では不可能な深宇宙通信、超大容量通信を可能にする量子通信に必須となる基本技術であり、今回の成果は、その実現に向けた大きな一歩となりました。本成果は、米国物理学誌『Physical Review Letters』11月21日号(予定)に掲載されます。

## 【背景】

インターネットの急速な普及など、光ネットワークの通信量は日々爆発的に増加し続けています。多重化信号のトータルの光電力がファイバーの限界に達してしまうと、さらなる大容量化のためには、各信号を超微弱光にする必要が生じます。また惑星間レベルの超長距離の通信では、信号は宇宙で拡散し、やはり超微弱光しか受信できません。これら極限的な通信状況では、光子\*1数個程度の極端に微弱な信号から最大限の情報を取り出す受信機の開発が重要課題となります。現在の光通信技術で最高の受信感度を実現できるのは、コヒーレント通信\*2という方式です。しかし、光子レベルの超微弱光では、光の量子雑音\*3の影響が顕著になり、コヒーレント通信の受信機でさえ低誤り率の信号検出は不可能になります。一方、量子物理学の理論では、この限界は原理的には超えられることが予言されていました。その実現の有力な候補が量子受信機\*4です。しかし既存の量子受信機の提案は技術的難易度が極めて高く、研究開発はあまり進んでいませんでした。

## 【今回の成果】

NICTでは独自の理論研究を進め、現在の光技術でも十分に実現可能な新しい量子受信機の方式を提案しました。今回の共同研究は、その原理が正しいことを実験により検証したものです。従来のコヒーレント通信の受信方式では、光の波の性質である干渉を使って、信号の位相と振幅を測定しています。しかし量子雑音の影響をできる限り除去するには、光の波動性だけでなく量子性、すなわち光子としての性質も最大限に活用する必要があります。量子受信機では、光を適切に干渉させた後に、光子検出器で光子を直接検出することでそれを実現しています。我々の提案では、干渉に用いる外部参照レーザーのパラメーターを量子力学的に最適化することで、既存の提案に比べ装置を劇的に簡略化することに成功しました。

実験では、平均光子数が1光子以下の極めて弱い2値位相変調(BPSK)信号\*5に対して、光子検出器の量子効率を補正した条件で、コヒーレント通信の理論限界を超える低誤り率での信号検出を世界で初めて実証しました。量子雑音に埋もれた光の量子状態の識別は基礎物理学としても重要な研究課題であり、本成果は物理学の権威ある専門誌Physical Review Letters誌に受理されました。

## 【今後の展望】

本成果によりNICTが開発した方式の有用性が実証され、量子受信機の実現に大きく近づきました。今回作成した受信機は内部に市販の光子検出器を組み込んだプロトタイプですが、今後はここに最先端の光子検出技術を導入し、世界に先駆けた量子受信機の実現を目指します。量子受信機は新しい微弱光検出技術であり、深宇宙通信や超低消費電力通信以外にも、超高感度計測技術や低エネルギー粒子検出、周波数標準技術など様々な分野への応用が期待されています。

< 本件に関する 問い合わせ先 >  
新世代ネットワーク研究センター量子ICTグループ  
武岡 正裕  
Tel : 042-327-7471  
Fax : 042-327-6629

< 広報 問い合わせ先 >  
総合企画部 広報室  
報道担当  
Tel : 042-327-6923  
Fax : 042-327-7587

---

## <用語 解説>

### \*1 光子

量子力学によれば、光は波の性質と粒子の性質を併せ持っています。光の粒子は光子と呼ばれ、これ以上分割することのできない光のエネルギーの最小単位です。例えば光通信で通常用いられる1.5ミクロンの波長では、1光子のエネルギーは約1000京分の1(1京は1の後に0が16個ついた単位)ジュールという極めて小さな値になります。

### \*2 コヒーレント通信

現在実用化している光通信は、光の強度を変化させて情報を載せる強度変調方式が主流ですが、光の波の性質を生かし、位相の変化にも情報を載せる方式がコヒーレント通信方式です。コヒーレント通信は次世代の高速・大容量の光通信方式として、NICTをはじめ世界中の研究機関で実用化に向けた研究が加速しています。コヒーレント通信では、ホモダイン検波、ヘテロダイン検波と呼ばれる方式の受信機により、光の波に載せられた情報を検出します。

### \*3 量子雑音

量子力学の不確定性原理に基づく量子揺らぎに由来する雑音。どんなに完全なレーザー光でも量子雑音が含まれています。光子レベルの微弱光では量子雑音の影響が強く、信号の識別性を著しく劣化させる主要因となります(補足資料参照)。

### \*4 量子受信機

コヒーレント通信の限界をさらに超える方式として期待されているのが量子通信です。その最大の違いは受信方式にあり、光の粒子性と波動性という量子力学的な性質を最大限に制御して情報を取り出します。量子受信機の具体的な構成方法に関する研究はまだ始まったばかりであり、理論研究・実装技術ともに今後のブレークスルーによる大幅な性能向上が期待されています。

### \*5 2値位相変調信号

最も基本的な位相変調法で、位相が互いに逆相の(180° ずれた)信号に0と1の情報を載せる変調方式です。

---



<光の量子雑音>

レーザーは雑音のほとんど無い理想的な光波を発生できますが、理想的なレーザー光でも、図1のように量子力学的な揺らぎに由来する、いわゆる量子雑音が含まれています。強いレーザー光ではその影響はほとんど無視できますが、光子レベルの微弱光では相対的に量子雑音の影響が強く、信号の識別性を著しく劣化させる要因となります。

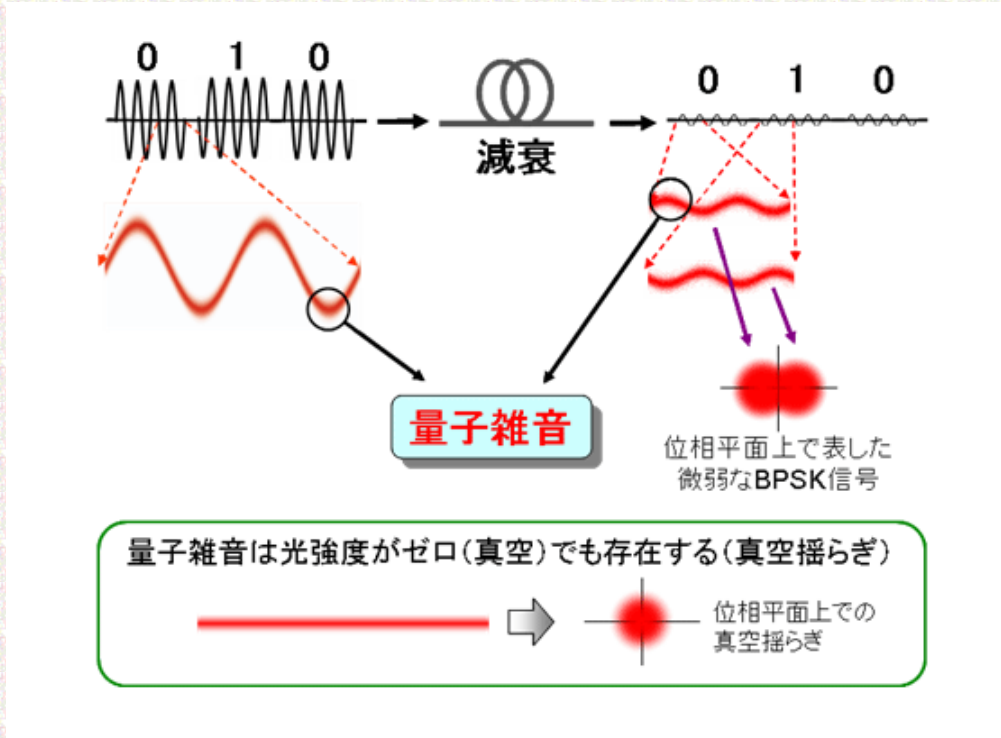


図1 光の量子雑音

<ホモダイン受信機と量子受信機>

コヒーレント通信では、2値位相変調信号はホモダイン受信機で受信されます。ホモダイン受信機は、信号光を強い参照レーザーと干渉させてから受信することで、光波の振幅を測定します。

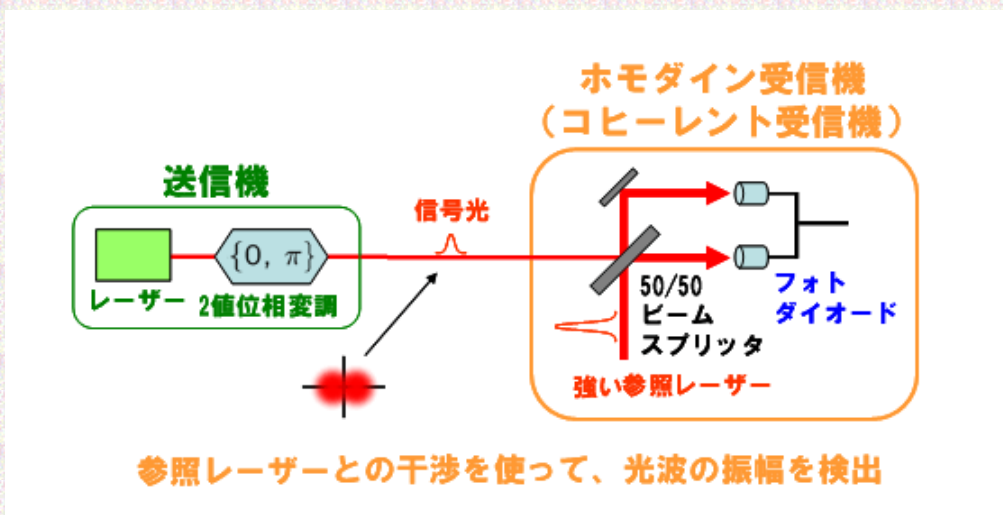


図2 ホモダイン受信機概念図

一方、量子受信機は、光信号の持つ量子力学的な性質、すなわち粒子性と波動性を共に生かすことで実現できます。まず、受信機に入ってくる微弱な信号光を、反射率が1%程度の特殊なビームスプリッターで参照用レーザー光と干渉させて、その波の性質を制御します。そして、干渉後のビームの光の粒子性、すなわち、光子の有無を光子検出器で測定することで、量子雑音に埋もれた情報を極限まで引き出すことができるようになります。

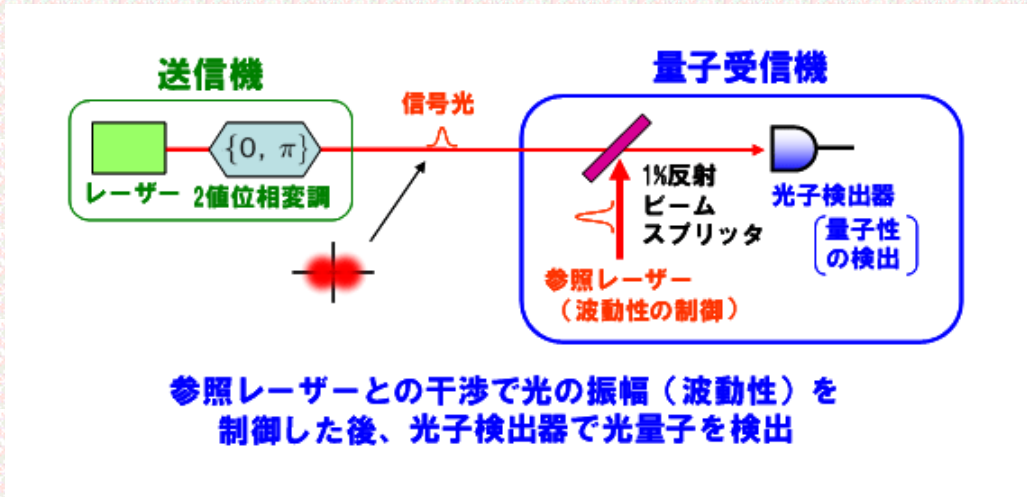


図3 今回実証された量子受信機のプロット

2つの受信機の原理の違いは、位相平面上に表された2値位相変調信号を使って図4のように説明されます。

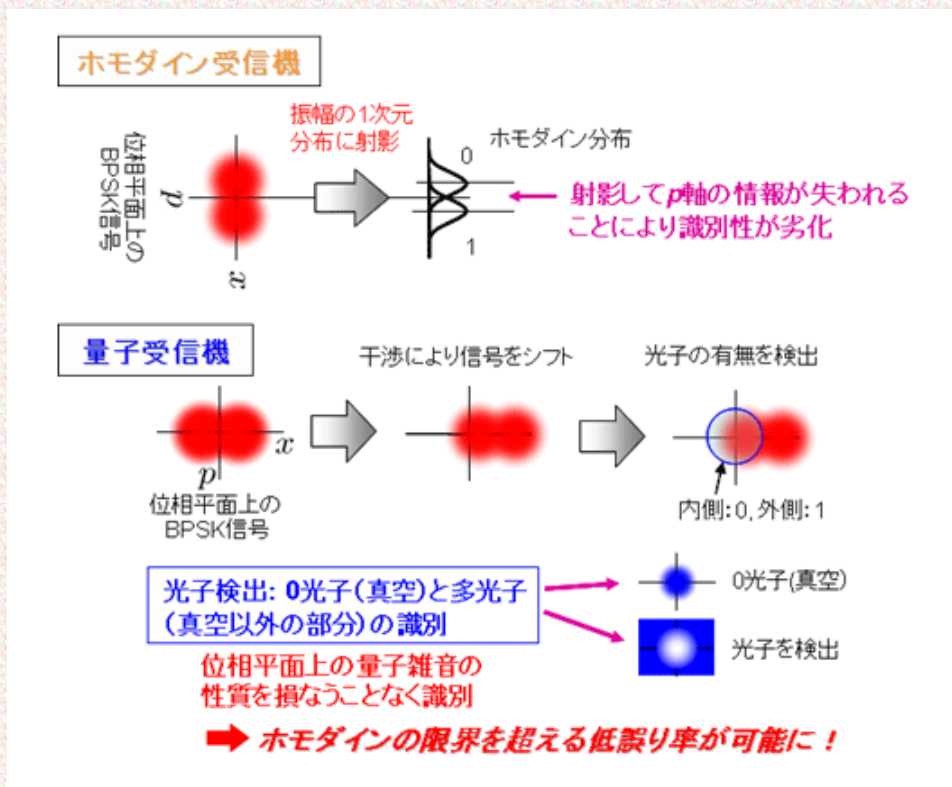


図4 ホモダイン受信機と量子受信機の原理

<今回の実験結果>

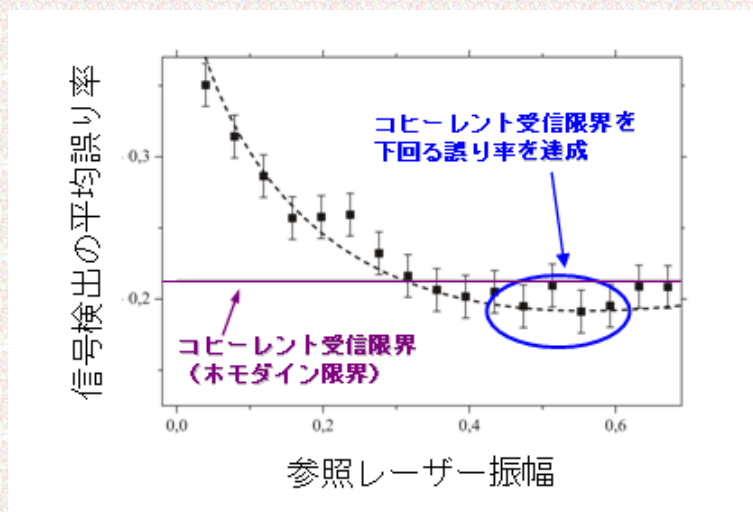


図5 量子受信機で達成された信号検出の誤り率

今回の実験結果として、2値位相変調信号に対する参照レーザーの振幅パラメータを量子力学の理論に基づいて適切に制御することにより、検出器量子効率を補正した条件の下で、ホモダイン受信機によるコヒーレント受信限界を超える低誤り率を世界で初めて達成しました。