

究極の光通信技術を目指して

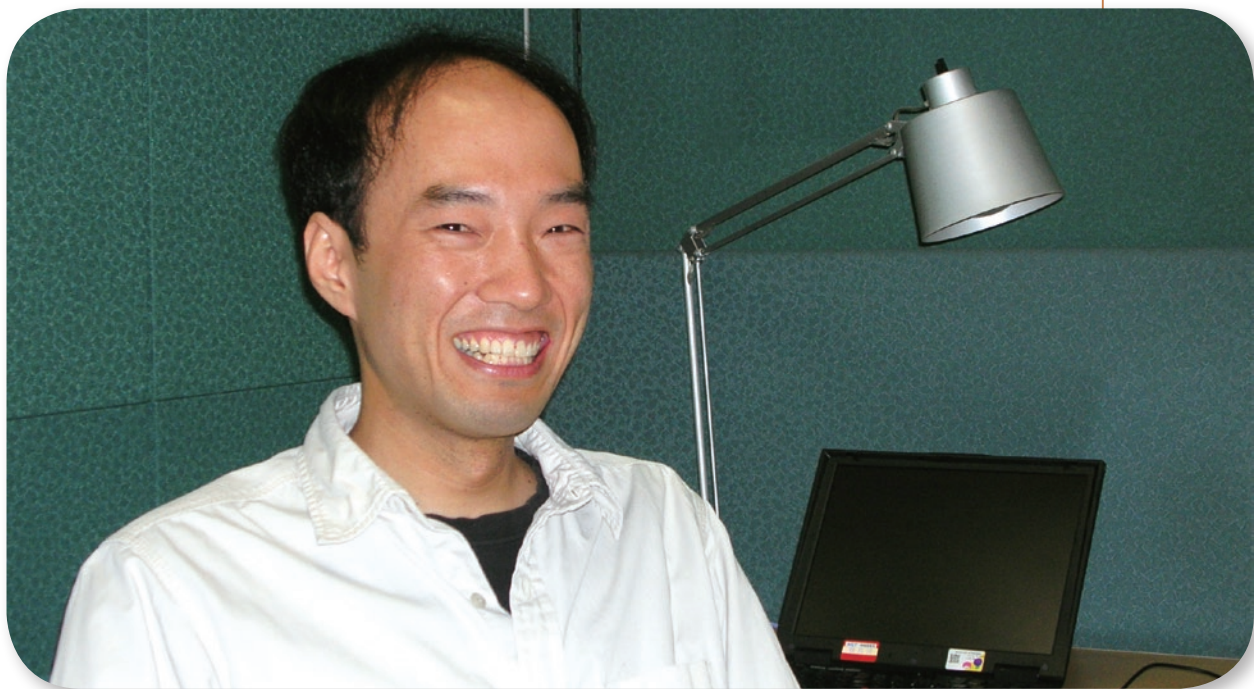
—現代光通信の限界を超える量子受信機—

武岡 正裕 (たけおか まさひろ)

未来 ICT 研究所
量子 ICT 研究室 主任研究員

大学院修了後、2001年に入所。以来、量子情報理論、量子光学などの研究に従事。日本物理学会若手奨励賞、文部科学大臣表彰若手科学者賞受賞。2011～2012年に総務省へ出向。趣味はチェロの演奏など。音楽で学んだ感覚を研究に活かしたいと思っています。

「光通信の性能を物理的に許される極限まで高めることを目指し、最新の物理学である量子力学の理論を駆使した『量子情報通信』の研究に取り組んでいます。」



● はじめに

光通信の性能は、0, 1の信号を識別する際のビット誤り率と、その後の誤り訂正によって決まります。ビット誤り率は光源や受信機で生ずる雑音を除去することで小さくできますが、それでも原理的に消せない雑音、「量子雑音」が存在します(図1)。

量子雑音は、物理の基本原則である「量子力学」に基づき光が持っている基本的な性質です。その影響は、通信路の伝送損失が大きく、また信号密度が高くなればなるほど相対的に顕著に現れてきます。従来の光通信理論では量子雑音は制御不可能とされ、現在実用化されている光通信の最新方式でも、「ショット雑音」と呼ばれ除去できないものとされています。

一方、1960年代にレーザーが発明され、光通信への応用が検討され始めたころ、一部の研究者の間では、光通信と量子力学を融合するための先駆的な理論研究が進められ、量子雑音を適切に制御することで、ショット雑音を超えてビット誤り率を極限まで低減できる可能性が指摘されていました。しかし当時は技術的な問題もあり、こうした研究は今日に至るまで理論研究のレベルにとどまっていました。NICTでは、近年の光検出技術や量子物理学の急速な発展を利用してその実現に向けた研究にいち早く取り組み、世界で初めて光通信のショット雑音限界を破ることに成功しました。

● 光信号の識別と量子雑音

現在最新の光通信方式である「コヒーレント光通信」では、レーザー光の波の大きさ(振幅)やタイミング(位相)を変えて情報を載せ、受信側ではそれらの値を直接測り情報を取り出しています。

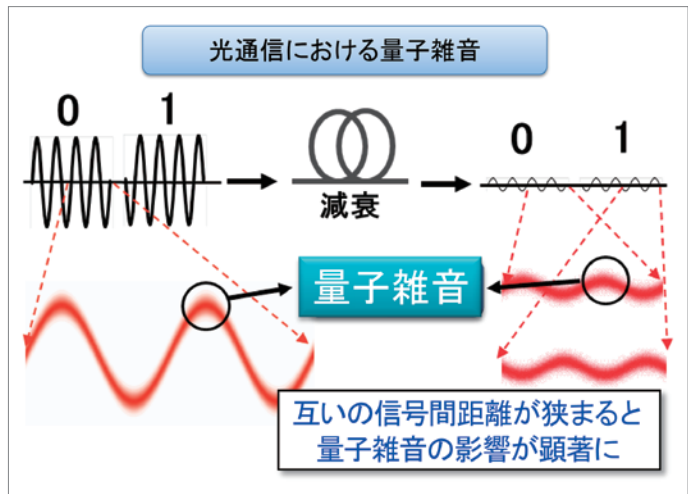


図1 光通信における量子雑音

量子雑音をただの雑音とみなす現在の光通信理論では、これは最適な受信方法です。このときの受信誤り率の限界が「ショット雑音限界」または「標準量子限界」と呼ばれるもので、特に光信号が微弱な領域では通信性能を大きく制限します。

この限界を超えるには、量子雑音をマイクロレベルで制御して検出する必要があります。原子などマイクロの世界の物理を記述する量子力学によれば、物質の状態は「波動関数」で表現されます。波動関数が何かという説明はさておき、特徴的なのは、その状態を測定するとき、測定の方法(どのようなパラメータを測定するか)によって状態の性質の見え方が大きく異なってくるという点です。また、一度測定を行うとその影響により波動関数の状態は変化してしまいます。このため物質(波動関数)の全像を一度の測定で見ることができず、影絵のように見ている方向(選んだ測定方法)からの断片的な情報だけしか測れないのです。図2左に、光通信の場合の例を示します。光信号の波動関数を干渉計で測定すれば波としての位相の性質が現れ、一方、エネルギーを測れば強度(光子の数)の性質が現れます。そして、それぞれ状態の性質は異なって見えますが、いずれの場合も量子雑音の影響が強く現れ、信号識別にはショット雑音の限界が課されてしまいます。

● 量子受信機の実現

ではショット雑音限界を超えるためにはどうすればよいのか？それには量子雑音の影響が最も排除されて見える最適方向から、波動関数の測定を行えばよいのです。このように量子力学的に最適化された測定を行う装置が「量子受信機」です(図2中及び右)。この最適化された測定は、理論的には数式できれいに書き下せますが、強度や位相の単純な測定ではないため、物理的にどう実現するかは非常に難しい問題です。NICTでは、そのような測定を光の干渉(波の制御)と光子検出(粒の測定)を組み合わせることで近似的に実現できる新しい受信法を提案しました(図3参照)。さらに独立行政法人産業技術総合研究所の最新の光子数識別器(超伝導転移端センサ)を導入した量子受信機を構築し、平均光子0.2個という極めて微弱な信号の送受信において、世界で初めてコヒーレント光通信のショット雑音限界の壁を打ち破ることに成功しました。1960年代の理論的な予想から半世紀後に、ようやくその正しさが実験的に証明されたこととなります。

● 今後の展望

本成果の意義は、まずは基礎科学の進展に寄与する点です。一方、今の通信事業者は光子レベルの微弱な信号で通信をしているわけではなく、そんな研究が必要なのか疑問に思われるかもしれません。しかし、例えば衛星通信では、通信距離が極端に長く中継増幅も出来ないため、受信側に到達する信号は極端に減衰します。実際、最近の人工衛星-地上間のフィールド試験では、受信器に到達する信号の光子数は100個以下にまで減衰されています。今後、衛星光通信の適用範囲が拡大し、例えば月-地球を結ぶ通信などを行う場合、さらに光子数の少ない信号を受信・識別する必要が生じるでしょう。また地上においても、一部の基幹ネットワークでは通信の大容量化に伴い光ファイバーが溶け出す限界近くまで光信号が詰め込まれており、ビットあたりの光電力(光子数)を極限まで下げることは重要な課題になっています。今回実現した量子受信機に、さらに量子的な誤り訂正の概念を取り入れると、限られたエネルギーの信号で物理的に許される究極の通信容量を達成できることが理論的に知られています。このような装置「量子復号器」の実現には、より本質的

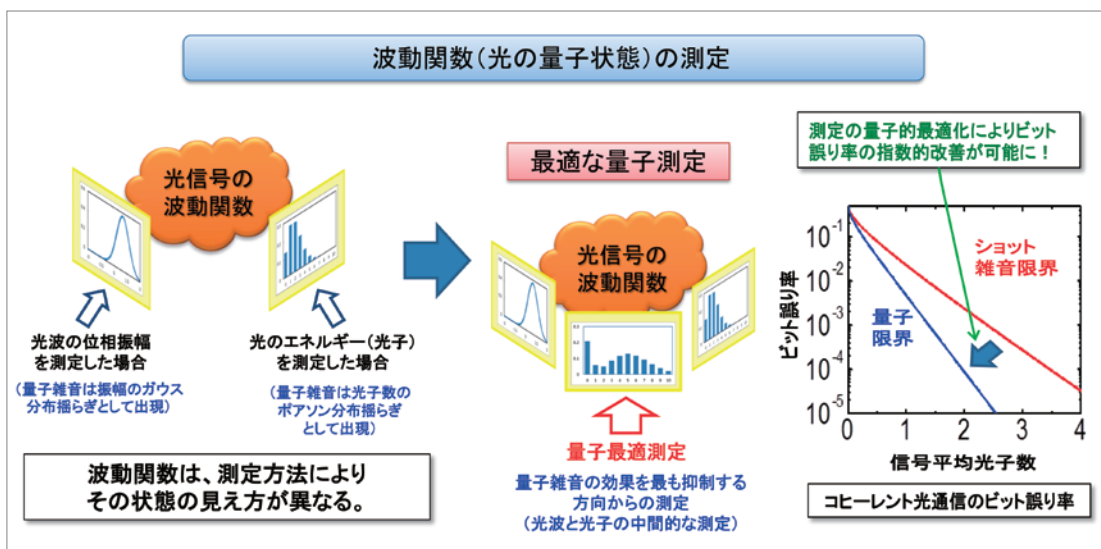


図2 波動関数(光の量子状態)の測定

に光の波動関数を制御しなければならず、それには実験物理やデバイス技術の大きなブレイクスルーが必要です。今後ますます増大する通信の大容量

化・省エネルギー化の要求に 20 年後 30 年後も応えていくため、このような革新的な技術の実現に向けた研究をこれからも続けてまいります(図 4)。

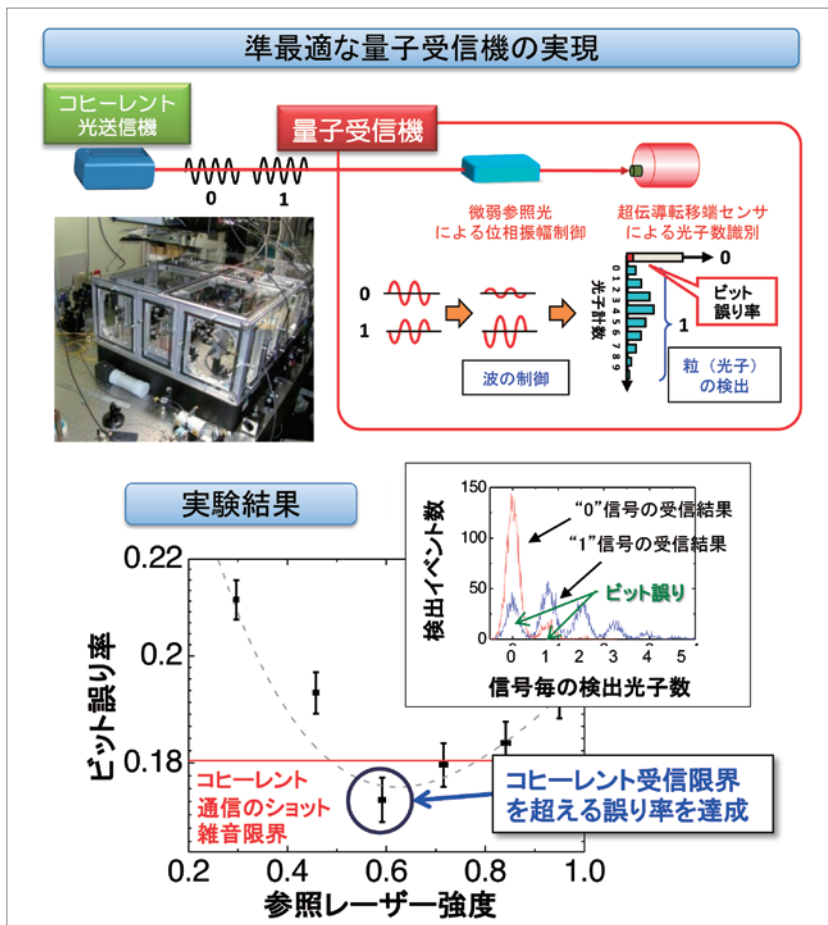


図3 準最適な量子受信機の実現

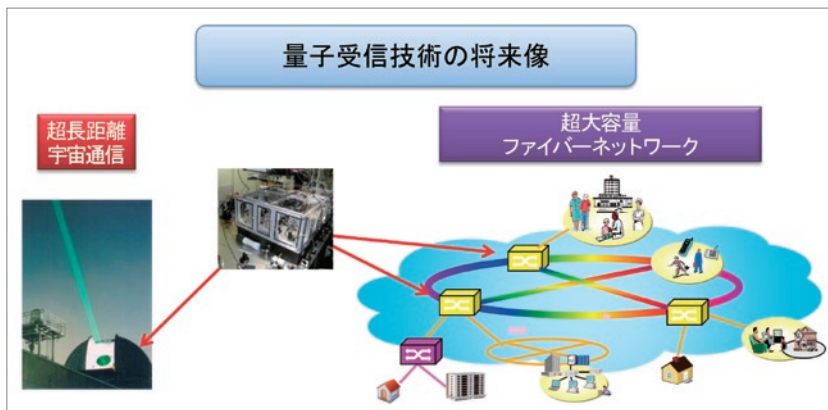


図4 量子受信技術の将来像