

3.6.2 未来 ICT 研究所 量子 ICT 研究室

室長 佐々木雅英 ほか7名

量子情報通信技術の研究開発

【概要】

現在の情報通信技術は19世紀に確立された物理法則に基づいており、すでに光ファイバの電力密度限界や最新技術による暗号解読の危機が指摘されるなど、今後も次々と物理的限界を迎えることが予測される。このような限界を打破するため、究極の物理法則「量子力学」に基づいて、絶対安全な量子暗号通信や従来理論の容量限界を打破する量子情報通信の研究開発を産学官連携により戦略的に進めている。平成25年度は、量子鍵配送システムの動作特性変動の主要因解明と動作安定化に成功し、フィールド連続運転による安全鍵蓄積量を従来比10倍に改善した。また、「量子増幅転送」と呼ばれる新プロトコルを考案・実証し、量子暗号の長距離化及び量子ノードの回路構築の双方に有効な共通基盤技術を提示した。

【平成25年度の成果】

(1) 量子暗号技術：量子鍵配送システムの安定動作実証

産学官連携により波長多重型量子鍵配送システムに動作安定化のためのフィードバック機構を実装し、Tokyo QKD Network上の空中架線ファイバ(小金井～府中間折り返しの22km)でBennett-Brassard84プロトコルに基づく量子鍵配送の30日間のメンテナンスフリー連続運転に成功し、連続での鍵蓄積量を従来比10倍に改善した。蓄積鍵サイズは595.6Gbitsで公表されているデータとしては世界最高値(2014年3月時点)である。図1に示すように、量子ビット誤り確率は1.70%と世界最小レベルであり、光子伝送の制御性が高いことを示している。装置変動の安定化には、変調器のバイアス電圧の最適制御、復調干渉系の温度制御、伝送路特性変動を保証するための半導体検出器のゲート電圧制御が重要である。

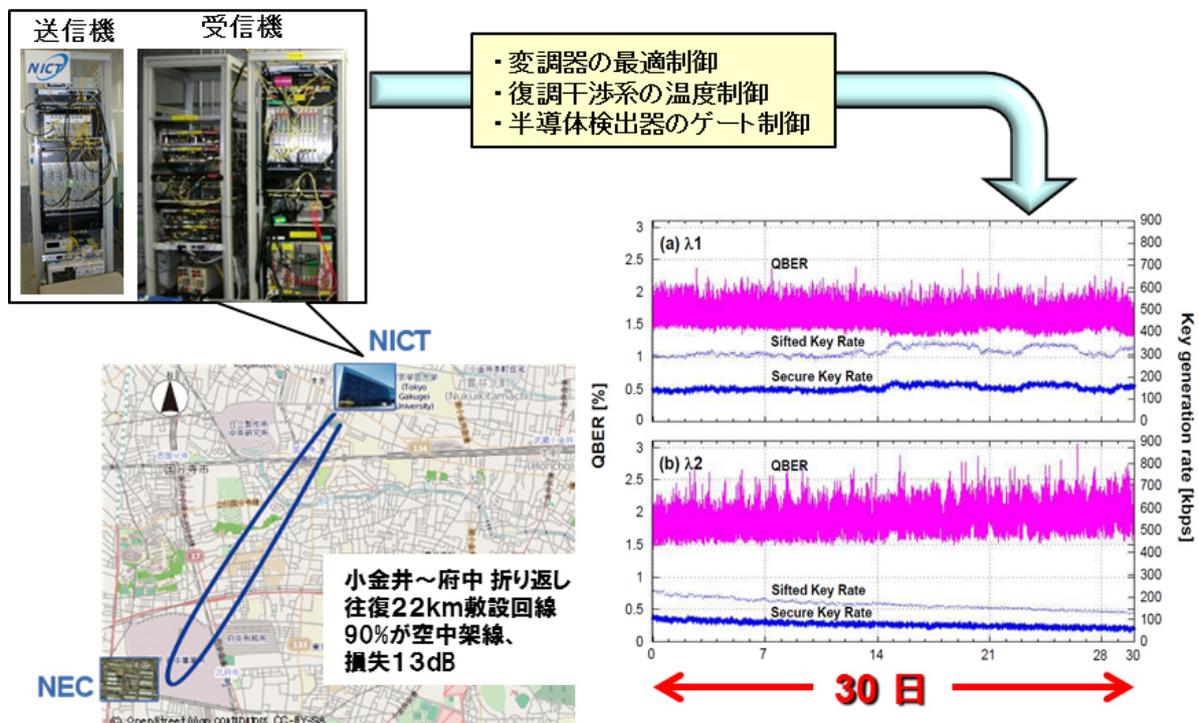


図1 波長多重型量子鍵配送システムの写真(左上)、小金井～府中間折り返しの22kmの敷設ファイバのイメージ図(左下)、2つの波長を同時に使った30日間にわたる量子鍵配送の特性変動(右下)

(2) 量子ノード技術：量子増幅転送プロトコルの考案と実証

光信号の量子力学的性質を保ったまま、遠く離れた地点に大きな信号として増幅して再生するもので、量子増幅転送と呼ばれるプロトコルを考案し実証することに成功した。この方式では、図2の左に示すように、

受信側にあらかじめ複数の波の成分が同時に存在する「量子重ね合わせ状態」という特殊な光を用意しておく、その一部を分岐して光回線を介して送信者へ送り共有しておく。送信者は、この共有した光を送りたい信号と合波し、2つのビームの光子を検出して、その結果に応じて受信側で量子重ね合わせ状態を適切にフィルタリングし、信号の再生増幅を行う。量子重ね合わせ状態を分岐すると、古典力学では考えられない特殊な相関(量子もつれ相関)がビーム間に形成され、1つのビームの状態が測定によって確定すると、それにもなって別のビームの状態も確定する。この性質を用いることで量子増幅転送が実現される。実証実験では、信号エネルギーの80%が失われる大きな損失を持つ光回線でも、無雑音のまま最大3倍まで増幅された信号を受信側に再生することを実証した。受信側で用意する量子重ね合わせ状態の振幅をさらに大きくすることができれば、原理的に距離や増倍利得をいくらかでも増やすことが可能となる。図2の右のグラフは、量子暗号の最も標準的なプロトコルである Bennett-Brassard 84 方式に量子増幅転送を適用した場合の長距離化の性能予測である。量子増幅転送によって距離が3倍以上に延長できることが分かる。量子増幅転送は、光を用いた量子コンピュータの回路内での信号増幅に利用することができる。特に、光量子コンピュータを受信機に組み込めば、光子あたり最大の情報量を取り出す量子デコーダを実現できるため、究極的な低電力・大容量の量子通信に向けた研究にも大きな進展をもたらすと期待される。成果は Nature Photonics 誌で発表し、報道発表も実施した。

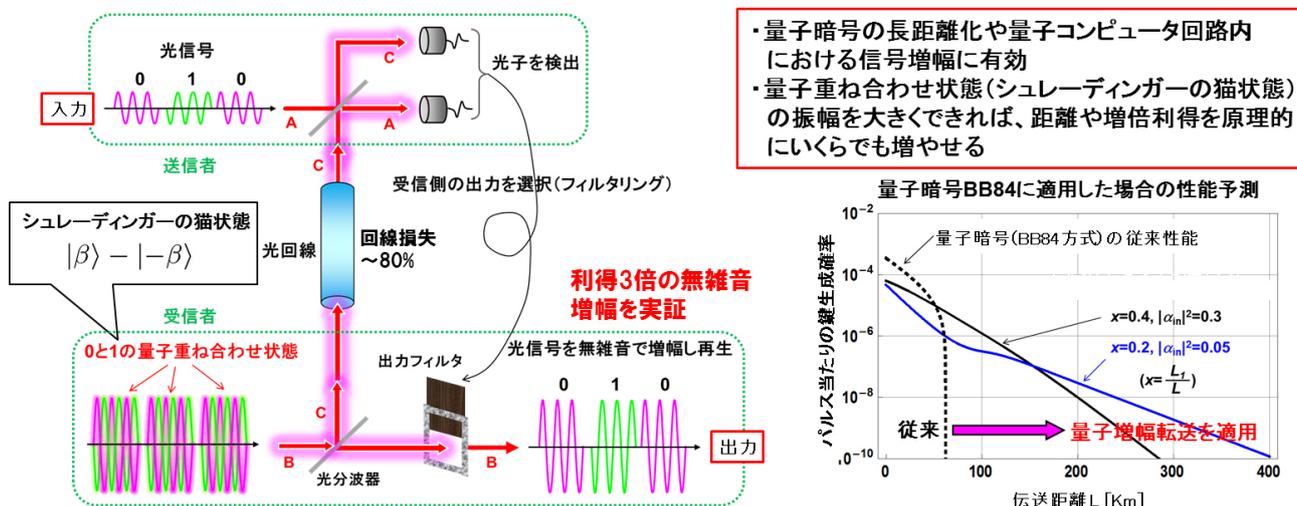


図2 量子増幅転送の構成と仕組み(左)、量子暗号 BB84 に適用した場合の長距離化の性能予測(右)

通信波長帯での光空間通信量子受信システムの設計を完了し、作製を開始した。さらに通信路特性に応じて伝送効率と安全性のバランスを自在に設定する符号化とその定量化手法を新たに開発した。

疑似位相整合 KTP 結晶 (PPKTP) を用いて通信波長帯の単一光子源と 2 光子光源の開発を進め、スペクトル純度を表わすシュミット数として理想値 $K=1$ に極めて近い純度 ($K=1.011$) を達成し、高輝度化についてもその指標である 4 光子同時計数率について、全ての波長域における過去の成果を上回る世界記録 (0.56counts/s) を達成した。周期分極反転ニオブ酸リチウム (PPLN) 導波路やシリコン (Si) リング型導波路回路について、通信波長帯におけるスクィーズド光や量子もつれ光源としての基本特性を評価し基礎データを蓄積した。特に、シリコン導波路光源では、長距離伝送に適した時間位置変調信号での量子もつれ相関を確認した。

光周波数標準技術として、量子論理分光法を簡易化したマクロ振動誘起法をインジウムイオン (In^+) で実証するための基盤技術の開発を完了した。特に、イオンの振動状態 (中心座標、振動周波数) の変化を高感度 (座標変化 1nm/s、周波数変化 0.2Hz/s) で検出する技術を完成させるとともに、インジウムイオンの共鳴遷移 (230nm) を安定に励起する周波数安定化コヒーレント光発生技術を完成させた。

光空間-ファイバ統合型の量子もつれ鍵配送装置における時間位置変調信号の時間間隔を従来の 2.5ns から 0.8ns として 3 倍以上の信号稠密化を実現し、現在主流のプロトコル BB84 よりも高いサイドチャネル攻撃耐性を持つ拡張 Ekert91 プロトコルを実装して、ファイバ長 27km 相当の損失 5.4dB 下でも古典限界を超える量子もつれ相関 (ベルの不等式の破れ) を確認した。