

光通信理論・量子通信理論に関する研究

広田 修
玉川大学 助教授

あらまし

本研究においてエネルギー損失による量子制御効果の劣化を解決するため受信量子状態制御方式が提案され、それによって光通信の通信路容量を無限大にしうる事が示された。

1. まえがき

電磁波は約 10^{13} Hz以上の周波数においては量子力学的現象が顕著になり、光の領域ではそれが支配的となる。1974年筆者はYuenと同時期に光の場における真空ゆらぎ(量子雑音)の制御(スキズイング)を応用した新しい通信の原理を提唱し、現在までその実現化に関する研究に従事して来た。しかし、量子雑音を制御し既存の限界を超えた光通信系を実現する際に、通信路でのエネルギー損失は量子状態制御による量子雑音のスキズイングを破壊するという重大な事実が明らかにされた。本研究はこの問題を最重要課題として取り組み、いくつかの問題解決のための方式を明らかにし、それに伴う理論を構築した。また最近その完全な解決法を理論的に示した。

以下にその要点を御報告する。

2. エネルギー損失による特性劣化の改善

現在の光通信の限界を打ち破るための量子制御光通信はコヒーレント光通信の究極に対応する量子コヒーレント通信と強度直接検波通信方式の究極に対応する光子通信に大別できる。この2つの方式におけるエネルギー損失による劣化特性は異なるため双方別々に考察した。

2-1 量子コヒーレント通信系

(A) スキズド状態パラメータ制御法

スキズド状態の光ではスキズドパラメータの制御によって平均エネルギー一定条件下で従来のコヒーレント状態より $(\langle n \rangle + 1)$ 倍の信号対雑音比を得ることができる。この最小量子雑音の光を信号光として伝搬させた場合、通信路のエネルギー損失に伴う真空モードとの結合によって最終的にコヒーレント状態より劣化してしまう。

我々は送信スキズド状態モードと真空モードの結合系を一つの系とみなしスキズド

パラメータを最適化することによって常にスクイズド状態光の方が優れた特性をもちうることを示した。残念ながらこれによる改善量はそれ程大きくはない。しかし、ビームスプリッターや光分波器における真空モードとの結合においてスクイズド状態の優位性を保つために極めて有用な方法となる。すなわち、スクイズド状態光を信号とする光回路系や後述する受信側でスクイズド状態を生成する方式において重要な役割を果たす。

(B) 受信量子状態制御法

長距離光通信に量子状態制御技術を応用するため我々は送信量子状態をコヒーレント状態として、通信路出力においてスクイザーによってスクイズド状態に変換する方法を提案した。ここで、ユニタリー変換であるスクイザーはコヒーレント状態をスクイズド状態に変換し、かつ入力信号対雑音比を保存するが、改善できない。そこでスクイザー出力に位相変換器を置きコヒーレント成分の位相を $\pi/2$ シフトする方式を考案し、その作用に対応する位相シフト作用素の存在を数学的に証明した。上記の系統図は図1のようになる。この方式により、コヒーレント光通信の信号対雑音比は

$$\text{SNR} = 4G^2\eta\langle n \rangle$$

となる。ただし、 G はスクイザーの利得、 η は通信路透過率、 $\langle n \rangle$ は送信パルス当りの光子数である。従来のそれは

$$\text{SNR} = 4\eta\langle n \rangle$$

であり、これに比して我々の系は G を大きくする事により極めて高い信号対雑音比を得る。もし、 G を無限大とすれば光通信の容量は無窮大となり、既存の量子限界を破ることになる。

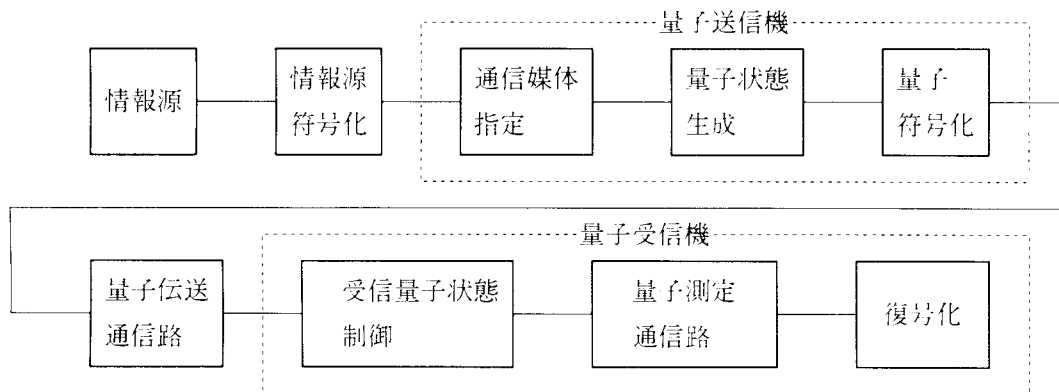


図1-a 量子通信のブロック表現

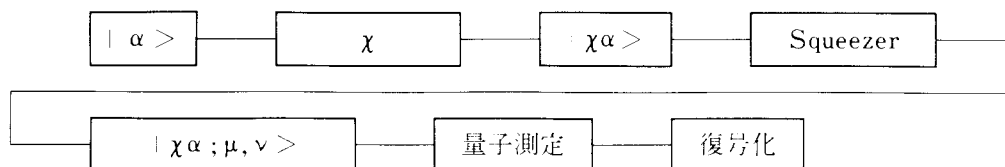


図1-b 受信量子状態制御方式のブロック表現

2-2 光子通信系

量子状態制御のもう一つの有用な技術は光子数確定状態を信号とする光子通信系である。この系もまたエネルギー損失によってその利点は劣化する。この劣化特性は入出力条件付確立で表わされ、理想的な減衰過程は2項分布となる。この光子通信系はコヒーレント系と異なり受信側での量子状態制御の適用はあまり利点はない。そこで我々は誤り訂正符号の応用によってエネルギー損失の効果を軽減する方式を提案した。その結果、誤り訂正能力を4ビット程度とすれば損失の効果を10db程度改善しうる事が示された。

光子通信系は長距離通信よりむしろ光子コンピュータ等の低エネルギー、高信頼度情報処理技術としての応用が期待される。

このような応用に際して、情報処理過程の光回路によるエネルギー損失は数db程度と予想されるので我々の開発している光子通信用誤り訂正符号は本質的な役割を果たすと考えられる。また我々の光子通信用誤り訂正符号の研究は情報理論研究者の関心を集めるところとなり、1つの研究分野を形成する勢いを見せている。

この研究は情報理論研究者の関心を集

3. 研究成果の公表

本研究助成に基づく成果は

- (a) 電子情報通信学会英文誌
- (b) J. of Optical Communication
- (c) Optics Communications
- (d) Optical and Quantum Electronics

の各ジャーナルに公表された。表1に論文リストを示す。

4. 研究助成と光通信理論研究会

本研究助成は本テーマに関して初めて受けた助成であり、その意味でもその決定の知らせに対する喜びは一人であった。

ちょうど同時期に電子情報通信学会に申請していた光通信理論研究会の設立が認可され本研究助成を基財として慶大、東工大、理大、山梨大の協力を得て本研究の本格的なグループ研究を開始した。本研究会を通して現在若い数人の優れた研究者が育っている。

有用な通信理論はほとんど欧米製という現状において若い研究者を中心に我々独自の光通信理論の構築を目差している。もし我々の研究が大成するとすれば、偏に本研究助成によるものである。ここに高柳先生及び当財団に心より御礼申し上げます。

表1 公表論文リスト

1. O. Hirota, K. Yamazaki, M. Nakagawa, and M. Ohya, Properties of error correcting code using photon pulse, The Trans. IEICE of Japan, E-69, pp917-919, 1986.
2. O. Hirota, K. Yamazaki, Y. Endo, M. Nakagawa, and M. Ohya, Properties of cutoff rate of photon channels, The Trans. of IEICE of Japan, E-70, pp7-9, 1987.
3. T. Uyematsu, O. Hirota, and K. Sakaniwa, On classes of novel quantum state for attenuation process, Trans. IEICE, E-70, 4, pp386-388, 1987.
4. K. Yamazaki, O. Hirota, M. Nakagawa, T. Uyematsu, and M. Ohya, Effect of error correcting code in photon communications with energy loss, The Trans. of IEICE of Japan, E-70, pp835-840, 1987.
5. K. Yamazaki, O. Hirota, and M. Nakagawa, Comparison between photon communication and quantum coherent communication systems, Trans. IEICE, E-70, 9, pp835-840, 1987.
6. O. Hirota, O. Kagami, and M. Takahara, Application of received quantum state control for coherent optical communications, Trans. IEICE, E-70, 9, pp801-803, 1987.
7. O. Hirota, Y. Yoshida, M. Nakagawa, and M. Takahara, Properties of coherent optical communication with received quantum state control and its capacity, Trans. IEICE, E-71, 4, pp372-375, 1988.
8. 大矢, 吉見, 広田, 量子制御通信過程における誤り確率の厳密な導出
電子情報通信学会論文誌 vol-J71-B, 4, pp543-539, 1988.
9. M. Takahara, H. Naitoh, O. Hirota, and H. Koyano, New evaluation method for modal noise in multimode optical fiber systems, J. of Optical communications, 9, 1, pp5-12, 1988.
10. O. Hirota, Properties of quantum communication with received quantum state control, Opt. Commun. 67, 3, pp204-208, 1988.

11. K. Yamazaki, O. Hirota, and M. Nakagawa, Optimum condition of squeezed state signal for optical communication with energy loss, Trans. IEICE, E-71, 8, pp775-785, 1988.
12. T. Uyematsu, K. Yamazaki, O. Hirota, M. Nakagawa, and K. Sakaniwa, Effect of asymmetric error correcting codes in photon communication systems, The Trans. of IEICE of Japan, to be published in 1988.
13. T. Hiromi, O. Hirota, and M. Nakagawa, Application of back-action evading amplifier to optical network communications, Optical & Quantum Electron. To be published in 1988.