

伝搬路環境を考慮した量子通信システムとその誤り率特性

情報科学部 小山 真司

指導教員：白田 毅

1 はじめに

情報社会において、通信の高速化は重要な課題である。現在は光波を情報媒体とする高速な光通信システムが利用されているが、この方式の通信も理論的な限界を迎えようとしている。その要因は量子雑音によるものであり、これは熱雑音などの古典的な雑音とは本質的に異なるため、従来の情報理論、通信理論だけではこれを抑制できない。したがって、更なる高速化のためには、光の量子力学的性質を記述し、これを制御できる理論体系、すなわち量子情報理論に基づいた量子通信の研究が必須である。

本研究は、将来的に量子通信を実現、実用することを目指すものである。先行研究 [1] により、光ファイバ通信や自由空間伝送における理想的な量子通信の性能が明らかになった。実現へ向けた次の研究段階として、送受信機の移動や、伝搬路環境を考慮した量子通信の性能を調査する必要がある。この点について、古典通信における研究成果は移動体通信技術などに実用化されている。ところが、量子通信におけるこういった成果は現状極めて少ない。そこで本研究では、送受信機の移動や、伝搬路環境の変化が量子通信の性能に与える影響を明らかにすることを目的としている。本稿では、受信信号に位相変動が発生する量子通信システムモデルを仮定し、その誤り率特性を明らかにする。

2 問題設定

量子通信システムモデルの設定について説明する。送信信号には複素振幅 α の BPSK コヒーレント状態信号 $|\alpha\rangle, |-\alpha\rangle$ を用いる。古典論では光波を時間関数 $S(t)$ などで表し、その振幅、周波数、位相に情報を載せて通信を行うのに対し、量子論では光の量子状態を量子状態ベクトル $|\psi\rangle$ などで表し、これに情報を載せて通信を行う。本モデルでは、これらの送信信号が伝搬する過程で位相変動の影響を受ける環境を想定している。ただし、位相変動の量 θ の値は未知であり、その確率分布のみが既知であると仮定する。この仮定は量子論特有のものであり、本モデルでの量子通信においては、位相変動の量 θ の値は、たとえ同じ環境で行われた通信であっても一定には定まらず、その性質が確率的にのみ記述できるという場合を考えている。そしてこの様子を、受信信号 ρ_0, ρ_1 として次のように記述する。

$$\rho_0 = \int P(\theta) |\alpha e^{i\theta}\rangle \langle \alpha e^{i\theta}| d\theta, \quad (1)$$

$$\rho_1 = \int P(\theta) |-\alpha e^{i\theta}\rangle \langle -\alpha e^{i\theta}| d\theta. \quad (2)$$

これは混合状態と呼ばれる量子状態であり、 θ についての積分によって状態の確率的な重ね合わせを表している。ただし、 $P(\theta)$ は θ の確率密度関数であり、平均 $\mu = 0$ 、分散 σ^2 のガウス分布に従うものとする。

3 誤り率特性

上述のモデルにおける量子最適測定とホモダイン測定による誤り率を求める。量子最適測定は量子通信において誤り率を最小にする測定であり、ホモダイン測定は同期検波によって直交振

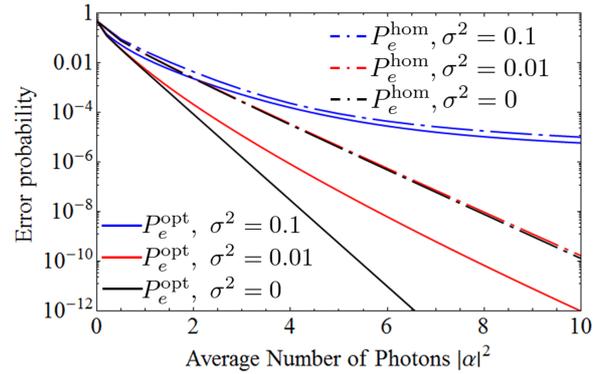


図1 各測定による誤り率特性

幅を近似的に測定する。各測定による誤り率は次で計算できる。

$$P_e^{\text{opt}} = \frac{1}{2} \left(1 - \sum_{\lambda > 0} \lambda \right), \quad (3)$$

$$P_e^{\text{hom}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_{-\infty}^0 \int_{-\infty}^{\infty} P(\theta) \exp[-2(x - \text{Re}[\alpha e^{i\theta}])^2] d\theta dx. \quad (4)$$

ただし、 λ は $\rho_0 - \rho_1$ の固有値とする。

図1に誤り率特性を示す。横軸を平均光子数 $|\alpha|^2$ とし、縦軸を誤り率としている。実線は量子最適測定による誤り率 P_e^{opt} 、鎖線はホモダイン測定による誤り率 P_e^{hom} を表している。また、青線は θ の確率分布が分散 $\sigma^2 = 0.1$ の、赤線は分散 $\sigma^2 = 0.01$ のガウス分布である場合を表している。なお、黒線は位相変動が発生しない場合を表しており、誤り率の比較のために示した。

図1において、実線、鎖線共に青線は一定値に収束するような動きを見せている。よって、分散 σ^2 が大きい場合には、平均光子数 $|\alpha|^2$ を大きくし、送信信号のエネルギーを増加させるという対処では軽減困難な誤りが存在することが分かる。つまり、送信信号エネルギーの増加による誤り率減少よりも、位相変動による誤り率増加の影響が大きく現れている。

4 まとめ

本研究は、送受信機の移動や、伝搬路環境の変化が量子通信の性能に与える影響を明らかにすることを目的としている。本稿では、目的達成へ向けた試みとして、位相変動が発生する環境下の量子通信システムモデルの誤り率特性を示した。今後は、伝搬路の時間的、空間的変動を記述したモデルについて考察し、その影響を明らかにする。

参考文献

- [1] V. Giovannetti, *et al.*, Phys. Rev. **90**, 027902, (2004).
- [2] C. W. Helstrom, *Quantum detection and estimation theory*, Academic Press, New York, (1976).
- [3] 小山 真司, 大橋 一葉, 石川 喜啓, 白田 毅, 平成 25 年度東海支部連合大会 講演論文集, F3-4, (2013).
- [4] 小山 真司, 大橋 一葉, 石川 喜啓, 白田 毅, 第 36 回情報理論とその応用シンポジウム (SITA2013) 予稿集, 6.4.2, (2013).