

# 学位論文内容要旨

申請者	ふりがな 氏名  おうてんちょう 王天澄
学位申請論文 題目	量子通信及び量子計測システムにおける 雑音解析及び最適受信機に関する研究
別紙のとおり	

- 備考
- 1 指導教員と相談のうえ作成すること。
  - 2 2,000字～3,000字で作成すること。
  - 3 用紙の規格は、日本工業規格A4縦型とすること。

## 博士論文 要旨

### 量子通信及び量子計測システムにおける

### 雑音解析及び最適受信機に関する研究

情報科学研究科博士後期課程

2019841002 王 天澄

半導体分野におけるムーアの法則、通信分野におけるシャノン限界をはじめ、近年、技術の進歩に伴い古典力学に基づいた物理的限界を迎えている。その限界を打破するために、ミクロの世界で支配的な物理原理となる量子力学を利用した次世代情報技術、つまり量子情報技術が重要視されている。例として、ムーアの法則を突破しスーパーコンピュータの能力を凌駕する量子コンピュータ、シャノン限界を突破する超高速通信の量子通信、従来技術を凌駕する感度や精度を実現する量子計測などが挙げられる。本論文では、古典的な検出限界を上回ることができる量子受信機の視点から出発し、相手からの信号を受信する方式と、自分が送信した信号を自分で受信する方式という大きく分けて二種類の受信方式を扱う。この二種類の受信方式はそれぞれ量子情報科学のサブ分野である、量子通信と量子計測に対応している。以下に、二つの研究に分けて説明する。

量子通信に関する研究：

量子通信システムの性能評価を行うためには、量子最適測定とそれによる最小誤り率の導出が不可欠である。その性能評価については、線形損失や熱雑音環境下など基本的なガウス雑音を対象とする研究では広く議論されてきたが、非ガウス雑音、特に位相の不規則変動による効果に関する研究も必要である。本研究は、超長距離無線量子通信などの実現に向けて、乱気流による波面歪みやレーザー線幅などによって引き起こされる、量子通信路に不可避な位相雑音が生じることを想定し、現実の実験に結びつけるために理論的解析・計算及び受信機設計を行い、パラメーターが変化する際の詳細な特性を明らかにすることを目的とする。ただし、位相変動 $\theta$ が平均0で分散（位相雑音量に対応） $\sigma^2$ の正規分布 $N(0, \sigma^2)$ に従う位相雑音モデルを取り扱う。量子通信の究極の性能を達成する量子最適受信機は実際、高度に信号にチューニングされるものであり、 $\sigma^2$ の正確な見積りが前提となる。限界性能を与える量子最適受信機の特徴が基準となるため、本研究では、まず、 $\sigma^2$ が正確に見積もれる場合から出発する。具体的には、MPSK ( $M$ -ary phase-shift keying) コヒーレント状態信号が送信され、正規分布 $N(0, \sigma^2)$ に従う位相雑音を受けた受信混合状態信号に対する量子最適測定を導出し、量子最適受信機による誤り率特性を明らかにする。次に、量子受信機が $\sigma^2$ の変化に追従できない場合を考える。具体的には、量子受信機として実際と異なる $\sigma^2$ に対する量子最適受信機を考え、その誤り率特性を明らかにする。この量子受信機は量子最適受信

機よりも性能が悪いが、更に古典最適受信機よりも性能が低下する場合があることを示す。最後に、 $\sigma^2$ の見積もりが正確にはできないものであるという事実を認めた上で、どこまでの最適化が可能かを考察する。具体的には、 $\sigma^2$ の見積もりがピンポイントではできないもののある範囲 $R$ の中に入っているという想定の下、ミニマックス規準に基づき $R$ に対して最適化を行う。このミニマックス規準に基づく設計は、位相雑音量の変化に対しロバストな量子受信機的设计規準であるとみなすことができる。

量子計測に関する研究：

量子イルミネーションは量子レーダーとも呼ばれており、量子計測の様々なプロトコルの中で基本形となると考えられる。ここでまず量子イルミネーションについて説明する。量子媒体として光（電磁波）を考えると、エンタングルド状態とは、2つの光の空間モードに量子相関のある状態といえる。2つのモードは、それぞれシグナル光とアンシラ光と呼ばれる。シグナル光をターゲットに照射し、反射光とアンシラ光に対して、量子一括測定と呼ばれる両者の量子相関を検出する測定を行うことで、非常に高精度なターゲット検出が可能となる。車載レーダーを初めとし量子レーダーの実用化・民生用化に向けて動的目標の検出などのより現実的な場面を考えると、先行研究で扱った、無数の光パルスを当てた場合に対応する Chernoff 限界だけでなく、一発の光パルスを当てた場合の量子受信機による誤り率、という瞬時的な性能評価も望まれる。本研究は、擬似ベル状態を用いた量子イルミネーションについて、現実の実験に結びつけるために理論的な解析・計算を行い、パラメーターが変化する際の詳細な特性を明らかにすることを目的とする。具体的には、ベル状態、2モードのガウス状態、擬似ベル状態の時間空間発展を記述する Schrödinger 表示を利用し、それらを用いた量子イルミネーションについて誤り率規準に基づき性能の評価・比較を行い、誤り率特性を考察する。また、エンタングルド状態ではなく、コヒーレント状態を用いた従来のレーザレーダーとの比較も行う。本研究では、減衰を受けた擬似ベル状態を用いた量子イルミネーションの解析のために、3元コヒーレント状態信号の3次元ベクトル表現を利用し、まず、新たな解析的アプローチで誤り率の解析解を導出する。その結果を用い、無減衰の場合に関してはレーザレーダーに対して明確な優位性を持つことを解析的に示す。減衰ありの場合には、解析解を用いた数値特性を様々な減衰率や平均光子数について調べることにより、擬似ベル状態を用いた量子イルミネーションがレーザレーダーだけでなく、2モードのガウス状態を用いた量子イルミネーションよりも優位であることを示す。