

令和 2 年 7 月 13 日現在

機関番号：23901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H04367

研究課題名(和文)量子フェージング通信路モデルを基礎とした無線量子通信に関する研究

研究課題名(英文)Wireless quantum communication based on quantum fading channel model

研究代表者

臼田 毅 (Usuda, Tsuyoshi)

愛知県立大学・情報科学部・教授

研究者番号：80273308

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,900,000円

研究成果の概要(和文)：前プロジェクト「量子フェージング通信路とその伝送限界及び符号化・復号化、変調方式に関する研究」の成果を基礎とし、現実の無線量子通信への応用を見据えた研究を行った。具体的には、マルチモードへの拡張を行い、さらに、複数雑音が混在した場合も扱った。前者は特に、量子特有の情報リソースである“エンタングルメント”を考慮するために不可欠であり、実際にエンタングルメントを応用した量子プロトコルに適用し、性能解析を行った。これらに加え、これまでに開発してきた研究ツールを進歩させた。特に、対称信号向けだった通信路行列公式の研究を非対称信号に拡張するための2つのアプローチ：対称化と部分対称性の利用を進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、将来の多様な無線量子通信の形式を考え、エンタングルメントという量子特有の相関を利用した量子プロトコルにおいて、フェージングがどのように影響するかを丁寧に考察している。また、必要な理論解析の道具を磨き、本研究グループ独自の通信路行列公式を拡張するなど、地道に研究を進めていることに特徴がある。本研究の延長として、量子無線LANや移動体量子通信、量子宇宙通信などの応用研究が期待される。さらに、近年、注目されているエンタングルメントを利用した量子計測も、無線量子通信の応用と捉えることができるため、通信のみならず計測などの他分野への波及が考えられる。

研究成果の概要(英文)：Developing the previous project: “quantum fading channel and its information carrying limit, coding-decoding, and modulation,” we have considered an application to wireless quantum communications. First, we applied the theory of a quantum fading channel to multi-mode quantum systems and considered the multiple noise case. Considering multi-mode quantum systems is essential to treat “entanglement.” We also applied the model to some application protocols of entanglement and clarify various properties. Moreover, we extended the formula of a channel matrix to asymmetric signals.

研究分野：工学

キーワード：情報通信工学 量子情報理論 量子通信 フェージング 通信路容量

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 本分野の研究動向

量子通信は未来の通信と言われることもあるが、その萌芽は「量子雑音」に初めて言及した 1950 年の Gabor の論文「Communication Theory and Physics」(Phil. Mag., ser.7, vol.41, pp.1161-1187, 1950) に見られる。量子通信理論の公式化の原点である Helstrom の歴史的な論文「Detection Theory and Quantum Mechanics」(Inform. Control, vo.10, pp.254-291, 1967) が発表された 1967 年を実質的な量子通信創始の年と考える研究者も多いが、それから半世紀が経つ。その間、量子通信分野では、10 年～20 年のスパンで大きな飛躍がもたらされてきた。1970 年代は Helstrom, Holevo, Yuen らによる量子通信理論の公式化と通信路容量予想、1990 年代には Holevo, Schumacher, Westmoreland による量子通信路符号化定理の証明があり、2000 年代には、量子減衰通信路という現実に近い通信路の通信路容量が MIT のグループによって初めて導出された。これは、1960 年代からの 40 年来の未解決問題が解決したことを意味し、量子通信研究は大きな山を越えた。このため、いよいよ量子通信の実用化に向けた研究を本格化させる時期に来ていると考えられる。

減衰以外の現実的な量子通信路として、古くから加法的ガウス型量子雑音が扱われてきている(例えば、NASA による研究)が、無線通信等で非常に重要であるフェージング通信路については、量子通信の萌芽期に研究されたものの、1990 年代後半の量子ブームを含めて 30 年以上忘れられ、いわば理論の空白の状態にあった。これは、量子通信の萌芽期直後の光ファイバ通信の実用化・発展により、2000 年代初頭までの 30 年、量子通信路として光ファイバが想定されることが多かったことが一因と思われる。

### (2) 研究代表者らの状況と本研究課題の提案

研究代表者らは、量子情報理論の予言する量子通信の伝送限界が、具体的にどのように達成しうるかという研究テーマについて、長年研究を続け(例えば、平成 18 年度から 20 年度、平成 21 年度から 23 年度の科研費プロジェクト)、デジタル変調を適用した場合の量子通信路容量や量子符号化・復号化、多重化、さらには広帯域化に関する成果を得ていた。これらは、基本的な量子通信路モデルについて扱ったものといえるが、上記の状況から、平成 23 年度までのプロジェクト終了後に、次のステップとして、応用的量子通信路モデルに取り組むこととし、平成 24 年度から 27 年度の科研費プロジェクト「量子フェージング通信路とその伝送限界及び符号化・復号化、変調方式に関する研究」を提案した。同プロジェクトは本研究課題の前身といえる。

前プロジェクトにおいては、通信路の基本モデルを示すとともに、伝送限界や符号化・復号化、変調方式に関する考察を進めた。この間、関連研究として、位相変動がある場合の量子受信機の研究(例えば、イタリアのグループによる Homodyne detection as a near-optimum receiver for phase-shift-keyed binary communication in the presence of phase diffusion, S. Olivares, et al., Phys. Rev. vol.A87, 05303(R), 2013) などがあったが、フェージングの一面のみを捉えたものであった。国内でも NICT のプロジェクトなどをはじめ、量子通信に関する熱心な取り組みがあったが、量子暗号への応用が主であり、また、量子情報理論の研究では、多重アクセス通信路の研究などの関連研究はあるものの、抽象的(数学的な視点では一般的)な考察が主であった。このように、無線量子通信を想定した量子フェージング通信路の研究を体系的に進める動きはまだまだ少なく、研究代表者らのグループが、そのアドバンテージを生かし、さらに研究を進めるべきと考え、本研究課題を提案した。

提案時点においては、量子フェージング通信路の研究を現実の無線量子通信への応用を考えるならば、二つの点で、研究をさらに進めるべきことに着目した。第一に、当時のモデルは、単一モードに対応した基本モデルであったため、マルチモードに対応する一般モデルへと拡張し、多モードスクイズド状態あるいは擬似ベル状態などの非古典的な入力の有効性を検証する必要があること。第二に、無線量子通信システムにおいて、減衰や加法的雑音、フェージングは、それぞれ単独で起こるといよりは、これらの雑音が複合的に重畳することがより現実的と考えられ、その数学モデルを与え、伝送限界を明らかにし、限界に近づく変調、符号化・復号化などを明らかにしていくことが必要ということである。

## 2. 研究の目的

本研究は、量子通信ネットワークの実現を究極の目標とし、超高速、超高信頼、超高安全な通信として期待される量子通信が、小規模ネットワークからグローバルネットワーク、コスモネットワークまで、現実世界のあらゆる場面で実用化されることを夢見ている。本研究では、量子通信はもちろん量子計測への応用のためにも重要な無線量子通信に着目し、前プロジェクトの量子フェージング通信路理論を基礎とし、さらに現実的な環境を想定して、マルチモードモデルに拡張するとともに、減衰や加法的雑音などの複数の雑音要因が複合的に重畳した状況を扱い、伝送限界及び限界に近づく通信方式、符号化・復号化を明らかにすることを目的とする。

### 3. 研究の方法

研究の進め方について、研究の目的で述べた考えを整理しシンプルな単語で研究項目を表現すると、(1)マルチモード化、(2)モデル、(3)限界と設計、(4)道具となる。以下、具体的に述べる。

#### (1)マルチモード化

マルチモードのモデルを考察する。量子通信におけるマルチモードで、もっとも注意すべきことは、エンタングルメントである。エンタングルメントは、古典には無い量子特有の相関である。光系においては、ガウス状態が基本であるため、まず、2モードガウス状態を扱う。また、近年注目されている擬似ベル状態も取り扱う。両エンタングルド状態に対し、エンタングルメントを利用した量子プロトコルが、フェージング等にどのように影響されるか、定量的に明らかにする。

#### (2)モデル

複数の雑音要因が複合的に重畳した状況の取り扱いを考察する。雑音の種類としてはガウス雑音をもっとも基本的であるため、複数の雑音としてガウス雑音と非ガウス雑音が混在する場合を扱う。具体的には、熱雑音などのガウス雑音と代表的な非ガウス雑音である位相雑音が混在するときの誤り率等の特性を明らかにする。

#### (3)限界と設計

通信の性能限界を示す基本である通信路容量について、量子フェージング通信路に対する離散化通信路容量の特性を明らかにする。また、古典最適検出と量子最適検出を用いる場合とを比較する。さらに、誤り率についても、量子最適検出限界を明らかにする。具体的には、2元及び多元の量子信号に対し、誤り率を最小とする量子最適検出を導出する。また、その誤り率特性を古典最適検出による誤り率と比較する。これらの特性は、単に誤り率のみでは無く、雑音の見積もりの不完全性なども考慮することに加え、その不完全性を前提とした設計論も展開する。

#### (4)道具

長年行ってきた研究を発展させ、量子一括復号の公式を一般化するという道具を磨き、その道具を使う。これまでの我々の主要な成果として、通信路行列公式の導出があるが、これは、量子信号の対称性を利用し、通信路行列の解析解を与えるものである。しかしながら、非対称信号を取り扱うことができなかった。通信路容量などの限界特性により速く近づくのは非対称信号であることから、困難でも非対称信号を取り扱う必要がある。このため、対称化と部分対称性の利用というアイデアからアプローチする。その他、従来提案してきた誤り率近似式理論も進める。

### 4. 研究成果

以下、項目ごとに研究成果を示す。なお、導出した公式や証明、通信路容量や相互情報量、誤り率の特性など、グラフ等を含む詳細な結果については、発表論文等に示している。

#### (1) マルチモード化

##### 2モードガウス状態

エンタングルメントの効果を見るため、エンタングルメントを利用した量子プロトコルに注目するが、特に、無線量子通信にも繋がる量子イルミネーションを取り扱うこととした。このプロトコルに対し、まず、量子フェージングを確率的減衰通信路モデルにより導入し、受信量子状態を記述した。また、フェージングの大きさや受信機における開口面積などを変えたとき、誤り率などの基本特性がどのように変化するかを明らかにした。詳細は、以下の論文等に示している：石川恵大、喜多健志朗、王天澄、西野祐太、臼田毅、ビームワンダリングがある場合の量子イルミネーションの誤り率特性、第40回情報理論とその応用シンポジウム、pp.403-407, 2017年

##### 擬似ベル状態

擬似ベル状態は、ベル状態、2モードガウス状態に続く第三のエンタングルド状態と呼ばれる。エンタングルド状態としては後発であるため、2000年以降に研究が活発化したものである。実は、本研究課題開始後の2017年に、擬似ベル状態に関する新たな論文(O. Hirota, "Error free quantum reading by quasi Bell state of entangled coherent states," Quantum Measurements and Quantum Metrology 4, pp.70-73, 2017年)が掲載され、本研究課題では、実施期間中に、擬似ベル状態に関する比重を多くすることとした。その論文では、擬似ベル状態を用いると、量子リーディングにおける誤りを0にできるということが示されている。このため、本研究でも、量子リーディングを扱い、減衰や擬似ベル状態の不完全性、さらには量子リーディングにおける位相シフトの不完全性があつた場合の誤り率特性について、明らかにした。

詳細は、次の論文および投稿中の論文等に示している：

K. Ishikawa, T. Wang, and T. S. Usuda, Effect of incomplete phase shift on quantum reading using a quasi-Bell state in non-symmetric loss model, Extended Abstracts of AQIS2018, 76, 2018 年

K. Ishikawa, T. Wang, and T. S. Usuda, Effect of non-symmetric loss on quantum reading using a quasi-Bell state, Proceedings of ISITA2018, pp.467-471, 2018 年

## (2) モデル

### 複合的雑音要因

ガウス雑音と非ガウス雑音である位相雑音が混在するときの誤り率等の特性を明らかにするとともに、両雑音がそれぞれ単独で存在するときの数式を用いた誤り率近似式を提案し、その近似精度を定量的に示した。この結果は、ガウス雑音と非ガウス雑音が混在しても、両者がほぼ独立に影響する範囲を明確に示すものと言える。詳細は、次の論文等に示している：

T. Wang, K. Nakahira, and T. S. Usuda, Error performance of optimum quantum measurement in the presence of non-Gaussian noise and Gaussian noise, Extended Abstracts of AQIS2018, 108, 2018 年

### 確率的減衰通信路とビームワンダリング

無線量子通信の一種と言える、量子暗号の空間伝送による実用化研究において、通信路の不完全要因としてビームワンダリングを考えた発表が、2016 年の量子通信国際会議であった。このため、ビームワンダリングと本研究で扱ってきたモデルの関係を考察した。その結果、本研究で扱ってきたモデルにおいて、確率分布を変えるとビームワンダリングを扱うことができることが確認された。関連する内容は、次の論文等に示している：

K. Kita, S. Koyama, M. Tanaka, and T. S. Usuda, Attenuated quantum channel with probabilistic transmissivity, Extended Abstracts of AQIS2016, pp.63-64, 2016 年

## (3) 限界と設計

### 通信路容量

離散化通信路容量の特性を明らかにした。通信路は(2)の確率的減衰通信路を扱った。まず、古典最適検出と量子最適検出を用いる場合とを比較すると、両者には明確なギャップがあり、量子最適検出の優位性が確認できた。しかし、信号の最適先験確率分布の特性が、定量的には古典と量子で異なるものの、予想と反し、定性的には同様の結果となった。これに関し、その後の考察により、量子情報のコミュニティでは量子特有という常識のあった離散の効果と類似の結果が、古典軟判定復号によっても得られるということがわかった。分野における常識を鵜呑みにすることが危険であることを示唆するものと言える。関連する内容は、次の論文等に示している：

T. Wang, K. Kita, and T. S. Usuda, Channel capacity of quantum channel with beam wandering, Proceedings of AQIS2017, pp.215-217, 2017 年

### 誤り率

2 元及び多元の量子信号に対し、誤り率を最小とする量子最適検出を導出した。また、その誤り率特性を古典最適検出による誤り率と比較し、雑音の影響を受けた後も、両者には明確なギャップがあることを明らかにした。さらに、雑音量の見積もりが正確で無く、最適からずれてしまった場合の量子検出のロバスト性を調べた。そこでは、ロバスト性を示すファクタである  $S$  について、信号数を増やすことで、どのように変わるか、定量的に明らかにした。詳細は、次の論文等に示している：

T. Wang, K. Nakahira, and T. S. Usuda, Error performance and robustness of optimum quantum detection for MPSK signals in the presence of phase noise, Proceedings of ISITA2018, pp.344-348, 2018 年

### ロバストな量子受信機の設計

雑音量の見積もりを厳密に行い、量子受信機を用意することは困難と考え、ある程度の見積もり誤差はあるものとし、その条件下で最適な量子受信機を設計する手法を示した。より具体的には、ミニマックスの考え方を用いて設計する手法となる。また、利用可能な量子測定のクラスを制限する場合と無制限の場合について、ロバスト性を示すファクタ  $S$  がどのように変化するかを明らかにした。詳細は、次の論文等に示している：

T. Wang, K. Nakahira, and T. S. Usuda, Design criteria for a robust quantum receiver in the presence of phase noise, Proceedings of AQIS2019, Poster Day 1, pp.142-145,

2019 年

#### (4) 道具

##### 符号化による非対称信号の対称化

量子通信において、究極的な特性を得るには符号化は不可欠であるが、元の信号が非対称でも符号化後に対称にできることを示した。まず、3ASK 信号に対する例を通じ示した後、任意の非対称純粋状態信号に適用可能な手法を示した。さらに、混合状態に適用可能な手法へと一般化し、確率的減衰で表されるフェージングや熱雑音を受けたコヒーレント信号に対し、本手法が適用可能であることを示した。詳細は、次の論文等に示している：

田中美波, 大橋あすか, 高比良宗一, 臼田毅, 符号化を用いた 3 元 ASK コヒーレント状態信号の対称化, 電子情報通信学会論文誌 (B), vol. J101-B, no.11, pp.978-987, 2018 年

S. Takahira and T. S. Usuda, Applying a symmetrization method by coding to non-symmetric mixed-state signals, Proceedings of ISITA2018, pp.472-475, 2018 年

##### 非対称信号に対する通信路行列計算の簡単化

非対称信号と言っても部分的な対称性は持つため、その性質を利用し、大きな問題を小さな問題に分割する公式を明らかにした。取り扱った信号は、1 次元信号である ASK 信号に加え、2 次元信号である AMPM 信号及び QAM 信号である。詳細は、次の論文等に示している：

R. Miyazaki, M. Yoshida, T. Wang, and T. S. Usuda, Simplification of the calculation of the channel matrix for AMPM coherent-state signals, ISITA2020, accepted.

##### 誤り率近似式理論

通信路の伝送限界特性を調べるために重要な、トレース距離を用いた誤り率近似式理論の研究を進めた。まず、近似式と最小誤り率のギャップの起源を探るため、最小誤り率の厳密解が得られている PSK の数式を詳しく分析し、我々の提案してきた近似式と厳密解のギャップが、古典的及び量子的な 2 つの起源に分けられることを明らかにした。さらに、物理分野で研究されていた量子性の定量評価指標との関連を考察した。詳細は、次の論文等に示している：

N. Matsumoto, A. Kadoya, S. Takahira, Y. Nishino, and T. S. Usuda, Origin of the gap between the minimum error probability and its simple approximation, Proceedings of AQIS2017, pp.264-266, 2017 年

#### (5) その他の成果

以下、プロジェクト提案後の世界の動向に基づいて進めた研究、あるいは、プロジェクトの周辺の課題について進めた研究成果を示す。

##### 対称量子状態と 次 の相互レニー情報量との関係

対称量子状態は、量子通信のみならず、量子力学の解釈という原理的な研究をしている研究者も注目している。最先端の理学との交流が未来の工学を生むとの信念に基づき、その接点となる対称量子状態について、情報の視点からのアプローチを行った。具体的には、相互情報量を一般化した 次 の相互レニー情報量が、対称量子状態を明確に特徴付けるものであることを相互情報量に対する Scrooge 情報源との対比により示唆した。詳細は、次の論文等に示している：

K. Sato, S. Takahira, K. Nakahira, and T. S. Usuda, Maximizing  $\alpha$ -order Mutual Renyi Information for group covariant SIC Ensemble, Extended Abstracts of AQIS2018, 2018 年

##### 行列関数に対する量子計算アルゴリズム

量子計算は、符号化の量子利得を得るための量子一括復号が量子計算で実現されるなど、本研究課題の量子通信と直接的な関わりがある。このため、現在活性化している量子計算と量子通信の研究を同時に行うことで、相乗効果を生むことを期待した。行列関数に関する新たな量子アルゴリズムを提案したほか、これを検証するためのシミュレーションツールの利用により、量子一括復号の設計にも繋がるノウハウを得ることができた。詳細は、次の論文等に示している：

S. Takahira, A. Ohashi, T. Sogabe, and T. S. Usuda, Quantum algorithm for matrix functions by Cauchy's integral formula, Quantum Information and Computation, vol.20, no.1&2, pp.14-36, 2020 年

以上、主な研究成果を研究項目ごとにまとめて記してきた。本研究は、これまでの研究代表者らの一貫した取り組みを継続・発展させ、研究スタンスを曲げずに、将来の量子通信実用化へのステップとして、必要な工学的考察を行ったものである。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計35件（うち査読付論文 35件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 S. Takahira, A. Ohashi, T. Sogabe, and T. S. Usuda	4. 巻 20
2. 論文標題 Quantum algorithm for matrix functions by Cauchy's integral formula	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Quantum Information and Computation	6. 最初と最後の頁 14 ~ 36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.26421/QIC20.1-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 K. Ishikawa, T. Wang, and T. S. Usuda	4. 巻 -
2. 論文標題 Comparison of quantum reading in non-symmetric loss using maximum and non-maximum quasi-Bell states	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of AQIS2019	6. 最初と最後の頁 111 ~ 113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Y. Takahashi, K. Ishikawa, S. Usami, and T. S. Usuda	4. 巻 -
2. 論文標題 Performance Evaluation of ghost imaging with orthogonal/non-orthogonal quantum states	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of AQIS2019	6. 最初と最後の頁 117 ~ 120
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 T. Wang, K. Nakahira, and T. S. Usuda	4. 巻 -
2. 論文標題 Design criteria for a robust quantum receiver in the presence of phase noise	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of AQIS2019	6. 最初と最後の頁 142 ~ 145
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 田中美波, 大橋あすか, 高比良宗一, 臼田毅	4. 巻 J101-B
2. 論文標題 符号化を用いた3元ASKコヒーレント状態信号の対称化	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌 (B)	6. 最初と最後の頁 978 ~ 987
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transcomj.2017JBP3065	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Takahira, T. Sogabe, and T. S. Usuda	4. 巻 7
2. 論文標題 Bidiagonalization of (k, k+1)-tridiagonal matrices	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Special Matrices	6. 最初と最後の頁 20 ~ 26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1515/spma-2019-0002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 K. Sato, S. Takahira, K. Nakahira, and T. S. Usuda	4. 巻 -
2. 論文標題 Maximizing $\alpha$ -order Mutual Renyi Information for group covariant SIC Ensemble	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Extended Abstracts of AQIS2018	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Ishikawa, T. Wang, and T. S. Usuda	4. 巻 -
2. 論文標題 Effect of incomplete phase shift on quantum reading using a quasi-Bell state in non-symmetric loss model	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Extended Abstracts of AQIS2018	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Wang, K. Nakahira, and T. S. Usuda	4. 巻 -
2. 論文標題 Error performance of optimum quantum measurement in the presence of non-Gaussian noise and Gaussian noise	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Extended Abstracts of AQIS2018	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 N. Matsumoto, S. Takahira, and T. S. Usuda	4. 巻 -
2. 論文標題 Relation between quantumness and the approximation accuracy of the minimum error probability	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Extended Abstracts of AQIS2018	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Wang, K. Nakahira, and T. S. Usuda	4. 巻 -
2. 論文標題 Error performance and robustness of optimum quantum detection for MPSK signals in the presence of phase noise	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of ISITA2018	6. 最初と最後の頁 344 ~ 348
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Ishikawa, T. Wang, and T. S. Usuda	4. 巻 -
2. 論文標題 Effect of non-symmetric loss on quantum reading using a quasi-Bell state	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of ISITA2018	6. 最初と最後の頁 467 ~ 471
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Takahira and T. S. Usuda	4. 巻 -
2. 論文標題 Applying a symmetrization method by coding to non-symmetric mixed-state signals	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of ISITA2018	6. 最初と最後の頁 472 ~ 475
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Nakahira, T. S. Usuda, K. Kato	4. 巻 63
2. 論文標題 Finding Optimal Solutions for Generalized Quantum State Discrimination Problems	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Information Theory	6. 最初と最後の頁 7845 ~ 7856
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIT.2016.2644666	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Wang, K. Kita, T. S. Usuda	4. 巻 -
2. 論文標題 Channel capacity of quantum channel with beam wandering	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of AQIS2017	6. 最初と最後の頁 215 ~ 217
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 N. Matsumoto, A. Kadoya, S. Takahira, Y. Nishino, T. S. Usuda	4. 巻 -
2. 論文標題 Origin of the gap between the minimum error probability and its simple approximation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of AQIS2017	6. 最初と最後の頁 264 ~ 266
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. S. Usuda, S. Asano	4. 巻 -
2. 論文標題 Simple approximation of minimum error probability for pure-state signals	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Abstracts of Papers of QCMC2016	6. 最初と最後の頁 114 ~ 114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Kita, S. Koyama, M. Tanaka, T. S. Usuda	4. 巻 -
2. 論文標題 Attenuated quantum channel with probabilistic transmissivity	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Extended Abstracts of AQIS2016	6. 最初と最後の頁 63 ~ 64
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計64件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 中川綾太, 王天澄, 白田毅
2. 発表標題 2つの量子フェージング通信路の関係について
3. 学会等名 第42回情報理論とその応用シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮崎龍輔, 吉田真菜, 白田毅
2. 発表標題 AMPMコヒーレント状態信号に対する通信路行列計算の簡単化
3. 学会等名 第42回情報理論とその応用シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山内淳, 石川恵大, 高橋祐斗, 王天澄, 白田毅
2. 発表標題 擬似ベル状態による減衰環境における量子イルミネーション
3. 学会等名 第42回情報理論とその応用シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋祐斗, 石川恵大, 宇佐見庄五, 白田毅
2. 発表標題 非直交量子状態を用いたゴーストイメージングのVisibilityによる性能評価
3. 学会等名 第42回情報理論とその応用シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山内淳, 石川恵大, 高橋祐斗, 王天澄, 白田毅
2. 発表標題 減衰環境における量子イルミネーションの利用エンタングルド状態依存性
3. 学会等名 令和元年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 王天澄, 中平健治, 白田毅
2. 発表標題 複数の雑音が重畳した場合の量子通信システムの特性
3. 学会等名 第16回情報学ワークショップ (WiNF2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋祐斗, 石川恵大, 白田毅
2. 発表標題 非直交量子状態を用いたゴーストイメージングの考察
3. 学会等名 第41回情報理論とその応用シンポジウム(SITA2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Sato, S. Takahira, T. S. Usuda
2. 発表標題 SIC ensemble is "Scrooge" with second-order mutual Renyi information criterion
3. 学会等名 14th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石川恵大, 西野祐太, 高比良宗一, 王天澄, 白田毅
2. 発表標題 擬似ベル状態を用いた量子リーディングに対する片側減衰の影響
3. 学会等名 平成29年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 王天澄, 喜多健志朗, 白田毅
2. 発表標題 ビームワンダリングが発生した場合の非対称信号を用いた量子通信路容量
3. 学会等名 第15回情報学ワークショップ (WiNF2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石川恵大, 喜多健志朗, 王天澄, 西野祐太, 白田毅
2. 発表標題 ビームワンダリングがある場合の量子イルミネーションの誤り率特性
3. 学会等名 第40回情報理論とその応用シンポジウム(SITA2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中澤彩希, 田中美波, 高比良宗一, 白田毅
2. 発表標題 任意の非対称純粋状態信号に対する符号化による対称化手法とその例
3. 学会等名 第40回情報理論とその応用シンポジウム(SITA2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 喜多健志朗, 白田毅
2. 発表標題 多元量子信号に対するビームワンダリングの影響
3. 学会等名 第40回情報理論とその応用シンポジウム(SITA2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 王天澄, 喜多健志朗, 白田毅
2. 発表標題 ビームワンダリングがある場合の古典及び量子最適受信機の誤り率の比較
3. 学会等名 平成28年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 王天澄, 喜多健志朗, 白田毅
2. 発表標題 ビームワンダリングが発生する量子通信路の通信路容量
3. 学会等名 第14回情報学ワークショップ
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 喜多健志朗, 白田毅
2. 発表標題 多元量子信号に対するビームワンダリングの影響と誤り率の限界
3. 学会等名 第14回情報学ワークショップ
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 松本直也, 西境浩平, 角谷昭仁, 白田毅
2. 発表標題 量子最適受信機の誤り率近似式の理論的精度保証に関する考察
3. 学会等名 第39回情報理論とその応用シンポジウム
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 田中美波, 大橋あすか, 白田毅
2. 発表標題 符号化を用いたASKコヒーレント状態信号の対称化
3. 学会等名 第39回情報理論とその応用シンポジウム
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	中平 健治 (Nakahira Kenji)  (90804005)	玉川大学・量子情報科学研究所・教授  (32639)	
研究協力者	高比良 宗一 (Takahira Souichi)	愛知県立大学・情報科学研究科・博士後期課程  (23901)	
研究協力者	王 天澄 (Wang Tiancheng)	愛知県立大学・情報科学研究科・博士後期課程  (23901)	
連携研究者	内匠 逸 (Takumi Ichi)  (30188130)	名古屋工業大学・工学研究科・教授  (13903)	
連携研究者	宇佐見 庄五 (Usami Shogo)  (30387758)	名城大学・理工学部・准教授  (33919)	
連携研究者	城本 啓介 (Shiromoto Keisuke)  (00343666)	熊本大学・先端科学研究部・教授  (17401)	
連携研究者	曾我部 知広 (Sogabe Tomohiro)  (30420368)	名古屋大学・工学研究科・准教授  (13901)	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携 研究者	神谷 幸宏  (Kamiya Yukihiro)  (10361742)	愛知県立大学・情報科学部・准教授     (23901)	