

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06419

研究課題名（和文）双方向通信路と見なした全二重無線の符号化法の開発

研究課題名（英文）Development of Coding for Full-Duplex Radio as Shannon's Two-Way Communication Channels

研究代表者

松本 隆太郎（Matsumoto, Ryutaroh）

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10334517

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：全二重無線において問題となる受信電力に比べて、自局の送信電力が圧倒的に大きく干渉キャンセルが大変に困難なことへの一つの対応策として、送信電力を極限まで絞り込み送信シンボル1つあたりに含まれる光子が数十個レベルまで絞ったときのことについて考察を行った。このようなときに、電磁波の量子的な振る舞いの影響が支配的になってくる。そのような状況においての誤り制御方式についての検討を行い、従来の研究成果で不足している理論的基盤の整備や具体的な方式の提案を国際共同研究として執り行い、4件の査読付き学術論文をオープンアクセスとして公表することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この課題で得られた主な結果は、量子力学的な誤りが無視し得ないまたは支配的なときにおいてそのような誤りにどのように対応していくかということであった。最近量子情報処理、特に量子計算機が社会的に注目を集めて、アメリカでは十兆円規模の国家予算がそのような分野に投入され国際競争が高まっている。本成果は量子計算機の実現の一助となる可能性を秘めており、日本がそのような国際競争で優位な立場を取ることを可能性を高める。

研究成果の概要（英文）：A major problem in full-duplex wireless communications is that power of transmitted radio wave is too large compared to received radio wave, and interference cancellation is extremely difficult. To tackle this difficulty, I explored possibility of extremely reducing transmitting power so that only several dozens of photons are contained in a single transmitted symbol. Under such a situation, quantum mechanical effect becomes dominant, and I considered error correction methods under such a situation. I conducted international collaborative research with three Spanish researchers, built a theoretical foundation of such problems, and proposed explicit methods. We published four papers in referred academic journal in open access.

研究分野：情報理論

キーワード：情報理論 誤り訂正 無線通信

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

従来の無線通信においては、送信しながら受信することはできなかった。その理由は受信電波の電力の10の12乗程度（120 dB）程度の電力を自局から送信する電波が検波器に入るときに持つからであった。120 dBの干渉波をキャンセルすることは現代でも容易ではないが、2010年代半ばに、デジタル信号処理とアナログ信号処理を巧みに組み合わせることによって、受信波の電力に比べて圧倒的に大きい電力を持つ送信波の電力をなんとかキャンセルし、無線局から信号を送信しているときに、その無線局が受信している電波から信号を検波できるようになった。

少なくとも研究室レベルでは、全二重無線通信が可能であることが実証されたが、そのような全二重無線通信への理論的なアプローチが研究開始当初は不足していると考えた。とくに全二重無線通信への情報理論的なアプローチと誤り制御符号化からのアプローチが不足していると考えた。

2. 研究の目的

前述の項目1に述べたように、全二重無線通信に関する理論的な検討・考察が研究開始当初は不足していた。そこで、特に情報理論ならびに誤り制御符号理論の観点から、全二重無線特有の課題を探求し、それらの解決を目指すことを目的とした。そのような目的を目指すことで、理論面における新しい課題の発見や、全二重無線通信のさらなる実用化に向けた何らかの示唆を得られると考えた。

3. 研究の方法

通常の無線通信では、受信局の受信回路に届く受信波の電力は自局の送信波に由来する電力よりも100 dB以上高い。この電力の大きな違いが、全二重無線の実現を大変難しくしている。この送信電力と受信電力の大きな違いを大幅に減らす方法として、送信シンボル1つあたりに含まれる光子（電磁波のエネルギーの離散的な最小の単位）にまで減らすことが有効ではないかと考えた。全二重ではない無線では、上記の極小な送信波を使った通信は自由空間を用いた量子鍵配送の実証実験で、研究室レベルでは実現可能であることが確認されている。送信波の電力を極小まで絞り込むと、量子力学的な影響が支配的となる。また、一方送信シンボル1つあたりに用いる電力が大変小さくなるため、全二重ではなく普通（半二重）に検波した場合でも正しい検波を行うことが相当難しくなる。そこで、このような状況においてただしく検波するために量子力学的な影響を考慮した誤り制御の方法を研究していくこととした。

4. 研究成果

2017年にスペインに短期間滞在し、国際共同研究を実施し、その成果を「**Quasi-cyclic constructions of quantum codes**」という題名で学術雑誌**Finite Fields and Their Applications**にオープンアクセスで発表した。この成果は下記のようなものであった。巡回符号とは、符号語を巡回シフトしたものが再び符号語となる誤り訂正符号である。疑似巡回符号（quasi cyclic code）とは、符号語を m 等分し、等分割されたそれぞれのブロックで巡回したものが再び符号語となるような誤り訂正符号であった。疑似巡回符号は60年前から知られているが、それを量子的な誤りの制御に用いた例はほとんど無かった。疑似巡回符号の使用をスペインの共同研究者から提案され着手し、まず数少ない先行研究であった、中国のグループによって査読付き学術雑誌に掲載された論文が根本的に誤っていることを見つけた。更に疑似巡回符号を量子的な誤り訂正に用いることができるために、疑似巡回符号が

満たすべき十分条件を明らかにした。そしてその十分条件を満たすような疑似巡回符号を計算機によって風潰しに探索し、従来知られていた量子的な誤り訂正の方法よりも、優れた方式を特定した。この結果は雑誌に掲載されたあと、2年足らずで11件引用され、分野に一定の影響を与えている。

次に、送信電波の電力を極小に絞り込んでいるために不可避免的に現れてしまう量子力学的な効果を建設的な方向で利用できないか自由な発想で検討した。そして、送信局と受信局の間で量子エンタングルメントを共有することによって通信の効率（送信記号1つあたりに送ることができる情報の量）を高める可能性について検討を始めた。このようなときでも、量子的な誤りを制御することは必須である。共有エンタングルメントを活用しつつ量子的な誤り制御も行う方法について、前段落のスペインの共同研究者と2018年に検討を行った。その結果、共有エンタングルメントを用いた量子的な誤り訂正について、基礎的な理論付けが不足していることがわかり、理論的な整備を行った。また、整備された理論的な基盤にもとづいて、共有エンタングルメントを用いた量子的な誤りの制御方法に性能の限界について新たな知見を生み出した。これらの結果は「**Entanglement-assisted quantum error-correcting codes over arbitrary finite fields**」と題して査読付き学術雑誌**Quantum Information Processing**にオープンアクセス発表された。この論文は発表後1年足らずで既に8件引用され分野に一定のインパクトを与えているようである。

量子的な誤りには、ビット反転と位相反転の2種類があることが古くから知られている。量子的な誤り制御において、これら2種類の誤りの生起確率が大きくことなることがあり、これら2つを分けて誤り制御方式を設計したほうがよいことがあることは十数年前から知られていた。一方、共有エンタングルメントを量子的な誤り制御に利用できる場合に、これら2種類の誤りを分けて扱う方式は誰も考えておらず、明らかに検討すべき課題が未検討のまま残されていた。そこで、今までと同じスペインの共同研究者とこのような課題について検討し、下記の結果を得た。まず前述の「**Entanglement-assisted quantum error-correcting codes over arbitrary finite fields**」と同様なテクニックを使い、2種類の誤りに対応しつつ、共有エンタングルメントも活用する量子的な誤り制御方式の理論的な基盤を構築した。また、「**Entanglement-assisted quantum error-correcting codes over arbitrary finite fields**」と同様なテクニックで量子的な誤り制御方式の性能の限界について知見を与えた。また、具体的な方式の構成方法をBCH誤り訂正符号に基づいて提案し、前述の性能限界と比較することによって提案構成法の有効性を示した。これらの知見は「**Asymmetric Entanglement-Assisted Quantum Error-Correcting Codes and BCH Codes**」と題して査読付き学術雑誌「**IEEE Access**」誌にオープンアクセスで掲載された。

その後、前段落の性能限界の研究結果について、自分一人で2020年初頭に再度吟味を行った。その結果、考えうる方式の一部しか対象としていないことがわかった。このことは前述の結果の間違いを意味するわけではなく、対象とする範囲を広げることでより良い結果を得られることを意味していたため、そのような検討結果を「**Improved Gilbert-Varshamov Bound for Entanglement-Assisted Asymmetric Quantum Error Correction by Symplectic Orthogonality**」と題して査読付き学術雑誌「**IEEE Transactions on Quantum Engineering**」誌にオープンアクセスで掲載した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Galindo Carlos, Hernando Fernando, Matsumoto Ryutaroh	4. 巻 52
2. 論文標題 Quasi-cyclic constructions of quantum codes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Finite Fields and Their Applications	6. 最初と最後の頁 261 ~ 280
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ffa.2018.04.010	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 該当する
1. 著者名 Galindo Carlos, Hernando Fernando, Matsumoto Ryutaroh, Ruano Diego	4. 巻 18
2. 論文標題 Entanglement-assisted quantum error-correcting codes over arbitrary finite fields	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Quantum Information Processing	6. 最初と最後の頁 116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11128-019-2234-5	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 該当する
1. 著者名 Galindo Carlos, Hernando Fernando, Matsumoto Ryutaroh, Ruano Diego	4. 巻 8
2. 論文標題 Asymmetric Entanglement-Assisted Quantum Error-Correcting Codes and BCH Codes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 18571 ~ 18579
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2020.2967426	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 該当する
1. 著者名 Matsumoto Ryutaroh	4. 巻 1
2. 論文標題 Improved Gilbert-Varshamov Bound for Entanglement-Assisted Asymmetric Quantum Error Correction by Symplectic Orthogonality	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Quantum Engineering	6. 最初と最後の頁 4100604
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TQE.2020.2978454	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 -

〔学会発表〕 計0件

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----