

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：13904

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20437

研究課題名（和文）Beyond 5Gへ向けた無線通信システムの非線形理論の拡張

研究課題名（英文）Extension of Nonlinear Theory for Beyond 5G Wireless Communication Systems

研究代表者

小松 和暉（Komatsu, Kazuki）

豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・助教

研究者番号：90912402

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題の目的は非線形な無線通信システムの理論解析手法を高度に発展させることで、帯域内干渉の干渉キャンセラなどの非線形性が重要になるシステムの解析に応用し、従来までは考えられていない非線形性について理論的観点から研究を進めることである。実際に、帯域内全二重やBeyond 5Gシステムにて期待される新しい無線技術にて応用が期待できる新しい非線形理論や技術を開発することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で拡張された理論は、従来までの理論と比較して、大幅に制約が緩和されている。そのため、本理論は無線通信のさまざまな領域で今後活用されると期待できる。また、無線通信のみならず、ニューラルネットワークなどのように複雑に線形変換と非線形変換が組み合わされるシステムについても理論解析ができるため、無線通信以外の分野での発展・利用も予想される成果である。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study is to develop a highly advanced theoretical analysis method for nonlinear wireless communication systems and apply it to the analysis of systems where nonlinearity is important, such as interference cancellation for in-band interference, and to study nonlinearity from a theoretical perspective that has not been considered before. In fact, we were able to develop new nonlinear theories and techniques that are expected to be applied to new wireless technologies such as in-band full-duplex and Beyond 5G systems.

研究分野：無線工学

キーワード：無線通信 非線形 電力増幅器 帯域内全二重 理論解析

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

周波数資源の枯渇は世界的な問題であり、周波数利用効率の高い無線通信システムの開発が世界的に要請されている。5G や Beyond 5G のシステムでは、非直交多元接続 (Non-Orthogonal Multiple Access: NOMA) や帯域内全二重、Faster-than-Nyquist といった干渉キャンセラを利用することで従来システムよりも高い周波数効率を発揮する技術が注目されている。これらのシステムは無線機非線形歪みを受けた干渉に対して脆弱である一方で、理論的な視点からこれらのシステムに対する非線形性の影響は今までまだ詳細に調査されていない。もし、これらのシステムをシミュレーションの想定環境と同じレベルで理論解析できれば、研究者は理論的な視点から技術の最適化ができ、さらに得られた理論的知見から、より高度な技術の開発が可能である。

2. 研究の目的

本研究では現代や次世代の無線通信システムをシミュレーションと同じレベルで理論解析するために必要な非線形性に関する理論の開発を行い、干渉キャンセラを利用するシステムの代表として帯域内全二重の理論解析をすることを目的とする。解析対象の拡張として、任意の関数で表される非線形性について解析できるように理論を拡張する。これによって、図 1 に示すように従来までは増幅器のような AM-AM/PM 非線形性のみしか扱えなかった理論を、PM-AM/PM 非線形性が扱えるように拡張する。PM-AM/PM 非線形性が生じる高周波素子の代表例として IQ ミキサがあり、この理論の拡張によって IQ ミキサで生じる IQ インバランスの理論解析が可能となる。帯域内全二重は IQ インバランスの影響を大きく受けることが報告されているため、本研究によって理論解析できるようになれば、帯域内全二重の普及や新しい研究の発展に大きく役立つと期待できる。

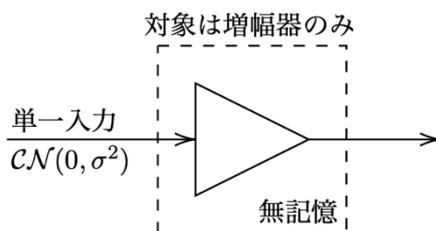


図 1 従来の理論で解析可能な対象

3. 研究の方法

一般的な無線通信システムの理論解析の研究が非線形性を無視した理想化された想定環境で理論式を導出して検証するだけに留まっていることに対して、本研究では導出された理論が非線形性を考慮したシミュレーション結果や実機実験の結果と一致し、理論により得られた知見を現実上の非線形なシステムに応用できることを重視する。このような現実上のシステムへの応用を見据えた理論の構築は他にあまり例を見ない研究課題であり、本研究課題の独自性である。そのため、理論の導出後にはシミュレーションや実機実験との検証を行う。

4. 研究成果

本研究によって拡張された理論によって新たに解析できるようになったシステムを図 2 に示す。まず、拡張された理論では、あらゆる無記憶非線形システムについて解析できるようになった。つまり、増幅器以外の IQ ミキサで生じる IQ インバランスについても解析可能である。さらに、入力側や出力側に複数の記憶のある線形システムが存在しても、そのシステム全体を解析できることがわかっている。このようなシステムは無線通信以外の、たとえばニューラルネットワークなどの分野においても頻出するような非線形システムであるため、本研究によって拡張された理論はニューラルネットワークの解析などへの応用も期待できるといえる。

このような理論を無線通信に応用することで本研究では以下の学会発表や論文投稿を行った。

【雑誌論文】

1. Komatsu Kazuki, Miyaji Yuichi, Uehara Hideyuki, Matsumura Takeshi, "Theoretical Investigation and Optimization of Power Amplifier Nonlinearity for In-Band Full-Duplex Radios," IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023.

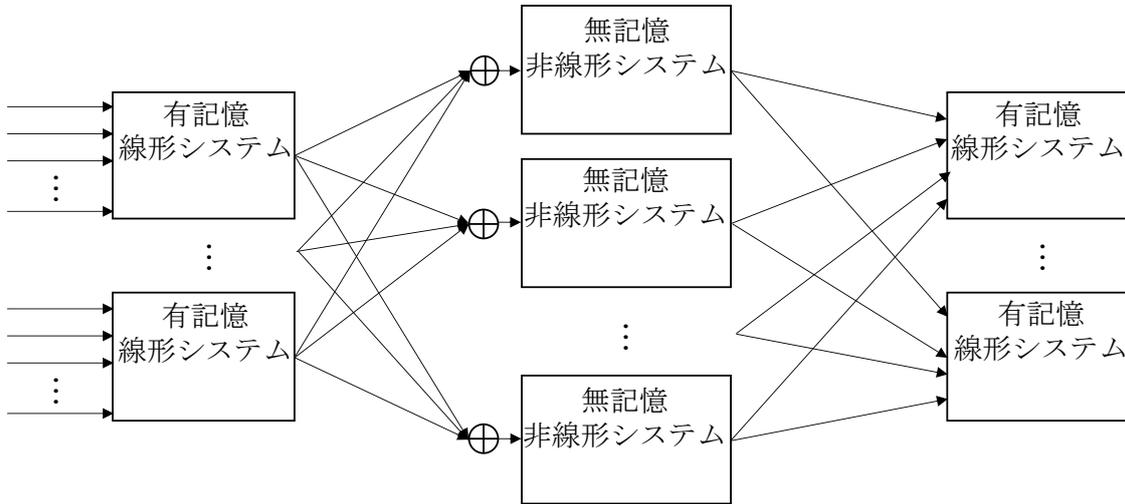


図 2 拡張された理論により解析可能な対象

【国際会議論文】

2. Kazuki Komatsu, Takeshi Matsumura, “Estimation of Memoryless Nonlinearity of Multiple Amplifiers with Low Complexity and High Stability Based on Orthonormal Systems and Quadrature,” in Proc. 2021 24th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 2021.

【国内学会発表】

3. 小松和暉, 宮路祐一, 上原秀幸, “多雑音による非線形性の緩和に関する基礎的理論研究”, 電子情報通信学会技術報告, RCS2023-60, 2023.
4. 小松和暉, 松村武, “多項式デジタルプリディストータを用いる帯域内全二重の理論解析”, 電子情報通信学会技術報告, RCS2021-144, 2021.

1.の論文では, 非線形自己干渉キャンセラを用いる帯域内全二重において, 最適となる増幅器特性を理論解析を通して導出することに成功した. 図 3 に導出された最適な増幅器特性の一例を示す. このように, 通信における非線形システムの理論解析を応用することで, 理論的に最適となる非線形特性を導出することができる.

4.の国内学会発表では, 帯域内全二重において多項式のデジタルプリディストータ (DPD) を用いたときの通信性能を理論解析した結果を報告した. 一般的に, DPD を用いることで電力増幅器が線形化されるため通信性能が改善されるが, 非線形自己干渉キャンセラを用いる帯域内全二重では DPD を用いることで通信性能が悪化する可能性を理論解析結果から指摘した. この成果は, 帯域内全二重を実際に運用する際に DPD をどのように組み込めば高性能な帯域内全二重が達成できるのかについてのヒントになると期待できる.

2.の国際会議発表では, 本研究での理論解析において利用する直交多項式を応用することで, 多数の無記憶非線形性を一度に高精度に推定する技術について発表をした. また, この推定手法は少ない観測サンプル数と小さな計算量で従来手法と同等以上の推定精度が達成できることを示した.

3.の国内学会発表では, 図 4 に示す 1 ビットの量子化器を用いる直交周波数分割多重 (OFDM) 信号の受信機を, 本研究で拡張した理論を用いて理論解析する方法について報告をした.

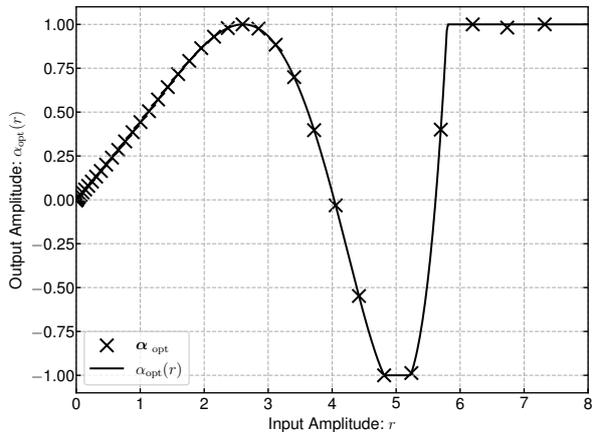


図 3 非線形キャンセラを用いる帯域内全二重にとって最適な増幅器特性 (雑誌論文 1)

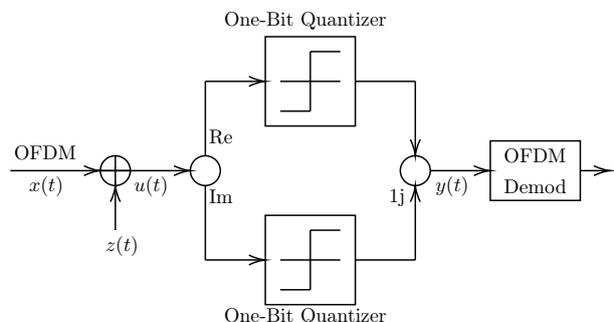


図 4 1 ビット量子化器を用いる OFDM 受信機 (国内学会発表 3)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Komatsu Kazuki, Miyaji Yuichi, Uehara Hideyuki, Matsumura Takeshi	4. 巻 22
2. 論文標題 Theoretical Investigation and Optimization of Power Amplifier Nonlinearity for In-Band Full-Duplex Radios	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Wireless Communications	6. 最初と最後の頁 3384 ~ 3396
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TWC.2022.3217765	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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Kazuki Komatsu, Takeshi Matsumura
2. 発表標題 Estimation of Memoryless Nonlinearity of Multiple Amplifiers with Low Complexity and High Stability Based on Orthonormal Systems and Quadrature
3. 学会等名 2021 24th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小松和暉、松村武
2. 発表標題 多項式デジタルプリディストータを用いる帯域内全二重の理論解析
3. 学会等名 電子情報通信学会無線通信システム研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小松和暉、宮路祐一、上原秀幸
2. 発表標題 多雑音による非線形性の緩和に関する基礎的理論研究
3. 学会等名 電子情報通信学会無線通信システム研究会
4. 発表年 2023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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------