

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14979

研究課題名（和文）帯域内全二重における送受信機の非理想性を考慮した干渉除去フィルタの研究

研究課題名（英文）Study on self-interference cancellation filters considering transceiver imperfections for in-band full duplex

研究代表者

宮路 祐一（Miyaji, Yuichi）

豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・助教

研究者番号：50712923

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：帯域内全二重を実現するために、送受信機の非理想性を考慮したデジタル自己干渉除去フィルタを開発した。高精度な除去性能、低計算量、高速収束を実現するフィルタ、最も回路の非理想性を考慮したフィルタ、事前の非線形処理により回路の特性をより良く抽出するフィルタなどを開発した。併せて、数学的な妥当性を示す理論解析と、実用可能性を示すソフトウェア無線機を用いた実験を実施し、多面的に信頼性と有効性を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、帯域内全二重を実現するための回路の非理想性を考慮したデジタルフィルタ設計に関するものであるが、回路の非理想性は一般の無線機にも生じる問題であり、広く応用可能である。また、無線機を理解するための学術的側面と無線機を製作するための社会的側面の両方で重要な成果を含んでいる。今後、無線機の低廉化や高周波化によって、回路の非理想性を理解することはますます重要になり、本研究成果の意義が高まると期待される。

研究成果の概要（英文）：To realize in-band full-duplex, we have studied digital self-interference cancellation filters that take into account the non-ideality of transceivers. For instance, we have developed the filter that achieves high-precision cancellation performance, low computational complexity, and fast convergence, the filter that considers the most kinds of circuit non-idealities, and the filter that better extracts circuit characteristics through prior nonlinear processing. In addition, we have conducted a theoretical analysis to validate mathematically and experiments using software radios to demonstrate the practical feasibility. These results reveal the reliability and effectiveness of the developed filters from multiple perspectives.

研究分野：通信工学

キーワード：帯域内全二重 自己干渉除去 送受信機の非線形性 適応信号処理

1. 研究開始当初の背景

スマートフォンやタブレットをはじめとする無線機能を搭載した電子機器の急激な増加により、ヒトのインターネット化は非常に浸透している。また、身のまわりのモノが無線通信でつながり新しいサービスを産み出す、モノのインターネット化 (Internet of Things: IoT) が求められている。その一方で、機器の増加により電波資源の逼迫はますます深刻になり、モノの小型化により新しい通信技術の実装が困難になっている。IoT を実現するためには、低計算量で電波資源を有効利用する技術の確立が望まれている。

新しい電波資源の利用技術として、帯域内全二重がある。一般的な無線システムでは、同一周波数において送受信する際は時間を分ける、もしくは同時刻において送受信する際は周波数を分ける必要があった。どちらか一方を分ける必要があるのは、自身の放射する電波 (自己干渉) の強度が、受信したい電波の強度に対して、数十デシベルから百デシベルほど大きいことに起因している。

帯域内全二重に関する研究は、2010年、スタンフォード大学により実現可能性が示されたことに端を発し、盛んに行われるようになった。一般に、自己干渉除去はアンテナ、アナログ信号処理、デジタル信号処理の領域のそれぞれで行われる。本研究はこの中のデジタル信号処理に位置づけられる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、デジタル信号処理によって自己干渉を除去する際に、送受信機の非理想性 (図1のIQミキサの不均衡、電力増幅器の非線形性や局部発振器の位相雑音) に対処すること、また、高精度な干渉除去を低計算量かつ高速に実現することである。

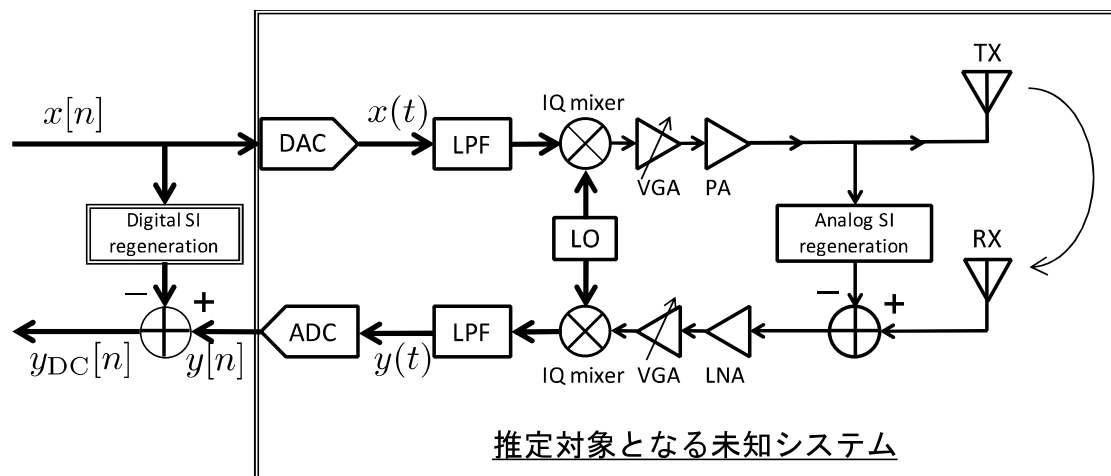


図1 デジタル自己干渉除去と推定対象

3. 研究の方法

本研究で開発したデジタル自己干渉除去フィルタを、(1)理論解析、(2)計算機シミュレーション、(3)ソフトウェア無線機により評価した。

(1) 理論解析

送受信機の両方で非理想性 (IQミキサの不均衡、電力増幅器の非線形性や局部発振器の位相雑音) がある場合について理論解析した。理論解析では、直交多項式を用いた一般フーリエ級数展開により非理想性を記述し、自己干渉除去性能や誤り率を解析した。

(2) 計算機シミュレーション

送受信機の両方で非理想性がある環境をベースバンドシミュレータに構築した。また、本研究で開発した自己干渉除去フィルタを実装した。自己干渉電力と雑音電力の比率を変えたときの自己干渉除去性能や誤り率を評価した。方法(1)と比較可能な結果に関しては、理論解析とシミュレーションの双方を比較し、妥当性と信頼性を担保した。

(3) ソフトウェア無線機

ソフトウェア無線機に(2)で開発した自己干渉除去フィルタを実装し、評価した。所望端末のない環境における自己干渉除去の性能を明らかにした。この際に、アナログ領域での自己干渉除去を可変減衰器によって再現し、計算機シミュレーションでの自己干渉電力と雑音電力の関係を調整した。

4. 研究成果

(1) 理論解析

デジタル自己干渉除去の性能を理論解析するために、直交多項式を用いた一般フーリエ級数展開を導入した。図1の入力信号を直交周波数分割多重 (OFDM) 信号とし、サブキャリア数が十分に大きいと仮定すると、信号は複素正規分布に従う。この分布を重み関数として内積を定義すると、ラゲール陪多項式を用いて、未知システム、デジタル自己干渉除去フィルタ、それらの差の成分である残留信号を表すことができること示した。この成果により、電力増幅器を有限次数の多項式だけでなく一般の関数で記述されるモデルを扱うことができるように拡張された。非常に大きな自己干渉を扱う帯域内全二重において、電力増幅器を一般化できたことは、応用上、非常にインパクトのある成果である。もちろん、計算機シミュレーションと理論解析は非常によく一致することも示している。

(2) 計算機シミュレーション

演算子処理にもとづくデジタル自己干渉除去

無線機における送受のIQミキサの不均衡、送受の増幅器の非線形性、無線伝搬路のひずみを考慮した自己干渉除去を五つの小問題へ分解し、それぞれを数学の演算子を用いて表現した。各小問題の解法やそれらをつなぎ合わせた大問題の解法は、五つの演算子とその逆演算子を用いて表現できることを明らかにした。従来に比べて、高精度、高速 (16倍) かつ低計算量 (10分の1) で自己干渉を除去できることを示した。

補助送信機とデジタル信号処理を援用したアナログ段デジタル自己干渉除去

アナログ段での自己干渉除去はアナログフィルタを用いるのが一般的である。しかし、線路長などの関係から、広帯域に自己干渉を除去することが困難である。本研究では、補助送信機とデジタル信号処理を援用することで、アナログフィルタを用いることなく、同振幅逆位相の信号を生成しアナログ段での自己干渉除去を達成した。IQミキサの不均衡、増幅器の非線形性に加え、位相雑音にも対処している。理論解析と併せて計算機シミュレーションをしており、適切に信号の遅延量を制御することで、送受信機に非理想性が生じたとしても、高い精度で自己干渉を除去できることを示した。補助送信機のコストが生じるが、デジタル段の処理を省略できるため、処理の高速化につながる。

非線形化処理を施したデジタル自己干渉除去

デジタル自己干渉除去を精度よく行うためには、フィルタに用いられるモデルと推定対象となる未知システムが近い必要がある。しかし、一般の電力増幅器を有限の次数でモデリングすることに困難が生じることがわかった。そこで、増幅器の非線形性に対処するためのプリディストーション、コンパANDING、クリッピングなどの非線形化処理を施したデジタル自己干渉除去に取り組んだ。これらの非線形化処理を考える上で、自己干渉除去フィルタの配置が重要であることがわかった。具体的には、プリディストーションの場合には、非線形化処理の前段、コンパANDINGとクリッピングの場合には、非線形化処理の後段に配置することで除去性能を高めることができる。また、プリディストーションの場合には、適切な非線形性を有するときに除去量が最大化する知見も得られた。これらに関する一般化には至っていないが、研究成果(1)の理論解析と組み合わせることで、更に知見を広げられると考えられる。

(3) ソフトウェア無線機

ソフトウェア無線機と高周波部品を組み合わせて、帯域内全二重端末 (図2) を構成した。帯域内全二重を実現する上で、送受で局部発振器を共有する必要があったため、上記の構成を採用した。これにより、(2)で開発したデジタル自己干渉除去フィルタの性能差をより適切に評価できるシステムが構築できた。

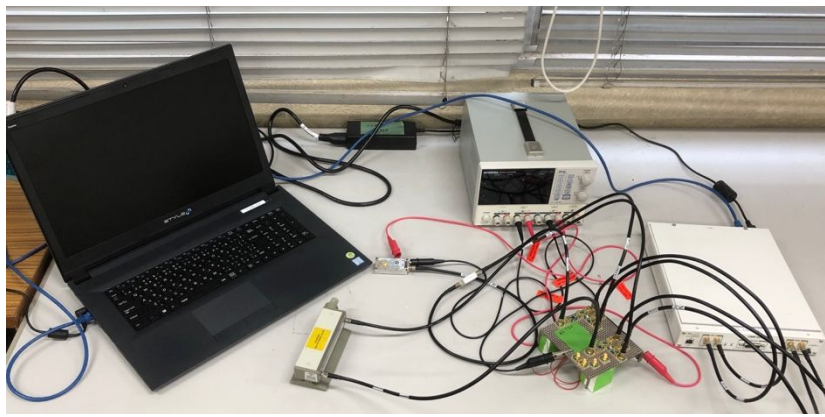


図2 帯域内全二重端末

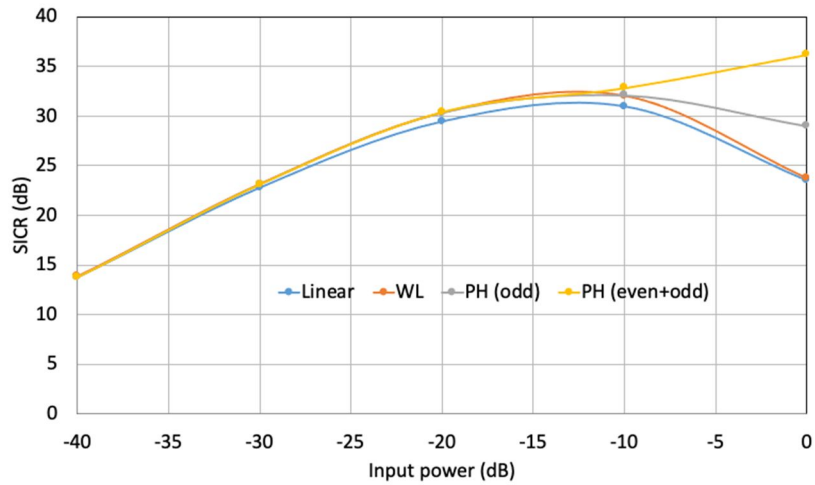


図 3 実験による自己干渉除去量の評価

性能評価において、アンテナとアナログ自己干渉除を可変減衰器で模擬し、デジタル段における自己干渉電力量を調整している。送受信信号を OFDM として、IQ ミクサの不均衡と電力増幅器の非線形性と伝搬路を推定するデジタル自己干渉除去フィルタを評価した。結果より、フィルタで考慮する基底によって、除去性能の差異を確認できる。これは、局部発振器を共有したことで明らかになった性能差である。また、最大で 37 デシベルの除去量を達成した。予期しなかった結果として、(2)の計算機シミュレーションでは考慮していない非理想性の存在も確認した。考慮していない非理想性についてはさらなる調査が必要となる。得られた結果、予期しなかった結果もふまえて、帯域内全二重における自己干渉除去を理解する上で重要な知見を得ることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Sato Eisaku, Komatsu Kazuki, Miyaji Yuichi, Uehara Hideyuki	4. 巻 10
2. 論文標題 Improvement in bit error rate of in-band full-duplex transceiver using clipping and clip-noise compensation techniques	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 918 ~ 923
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2021col0011	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 Komatsu Kazuki, Miyaji Yuichi, Uehara Hideyuki	4. 巻 20
2. 論文標題 Theoretical Analysis of In-Band Full-Duplex Radios With Parallel Hammerstein Self-Interference Cancellers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Wireless Communications	6. 最初と最後の頁 6772 ~ 6786
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/twc.2021.3076496	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 Komatsu Kazuki, Miyaji Yuichi, Uehara Hideyuki	4. 巻 19
2. 論文標題 Iterative Nonlinear Self-Interference Cancellation for In-Band Full-Duplex Wireless Communications Under Mixer Imbalance and Amplifier Nonlinearity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Wireless Communications	6. 最初と最後の頁 4424 ~ 4438
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TWC.2020.2983407	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 Fukui Takahisa, Komatsu Kazuki, Miyaji Yuichi, Uehara Hideyuki	4. 巻 19
2. 論文標題 Analog Self-Interference Cancellation Using Auxiliary Transmitter Considering IQ Imbalance and Amplifier Nonlinearity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Wireless Communications	6. 最初と最後の頁 7439 ~ 7452
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TWC.2020.3011467	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 Komatsu Kazuki, Miyaji Yuichi, Uehara Hideyuki	4. 巻 9
2. 論文標題 Weighted Least Squares With Orthonormal Polynomials and Numerical Integration for Estimation of Memoryless Nonlinearity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Wireless Communications Letters	6. 最初と最後の頁 2197 ~ 2201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LWC.2020.3017807	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20件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 金丸紘基、宮路祐一、上原秀幸
2. 発表標題 帯域内全二重における時間領域及び周波数領域キャンセラの実機実験による除去性能評価
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本魁世、宮路祐一、上原秀幸
2. 発表標題 帯域内全二重におけるFSK, PSKの実験による自己干渉除去性能の評価
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤栄作、小松和暉、宮路祐一、上原秀幸
2. 発表標題 帯域内全二重のためのデジタルプリディストータとネルダーミード法を用いた送信機の非線形化
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 2022年

1. 発表者名 岡野公太、小松和暉、宮路祐一、上原秀幸
2. 発表標題 帯域内全二重におけるコンバンディング法のパラメータ最適化
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 宮路祐一、上原秀幸
2. 発表標題 [ポスター講演]帯域内全二重の無線実験系構築への取り組み
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 田齊広太郎、小松和暉、宮路祐一、上原秀幸
2. 発表標題 RadComにおけるRF不完全性を考慮した距離と速さの検知
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤栄作、小松和暉、宮路祐一、上原秀幸
2. 発表標題 帯域内全二重無線のための非線形補償受信機を用いたビット誤り率の改善
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡野公太、小松和暉、宮路祐一、上原秀幸
2. 発表標題 コンバンディング法を用いた帯域内全二重におけるビット誤り率の理論解析
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福井崇久、小松和暉、宮路祐一、上原秀幸
2. 発表標題 補助送信機による自己干渉除去のためのWidely Linearフィルタ設計における適応アルゴリズムの評価
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 2019年

1. 発表者名 小松和暉、宮路祐一、上原秀幸
2. 発表標題 非線形自己干渉キャンセラのための二次元正規直交ラゲール多項式を用いた理論的性能解析
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 2019年

1. 発表者名 宮路祐一、上原秀幸
2. 発表標題 [依頼講演]帯域内全二重における送受信機の非理想性
3. 学会等名 電子情報通信学会無線通信システム研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Chua Teong Zhe, 小松和暉, 宮路祐一, 上原秀幸
2. 発表標題 帯域内全二重におけるRappモデルによる電力増幅器の非線形歪みと自己干渉除去の性能向上に関する検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福井崇久, 小松和暉, 宮路祐一, 上原秀幸
2. 発表標題 帯域内全二重における位相雑音を考慮した局部発振器の比較
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石井建至, 小松和暉, 宮路祐一, 上原秀幸
2. 発表標題 増幅器の利得変動に対処した自己干渉キャンセラの部分的再学習
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 2019年

1. 発表者名 Chua Teong Zhe, 小松和暉, 宮路祐一, 上原秀幸
2. 発表標題 Improving In-Band Full-Duplex Capacity by Transmitter Nonlinearization using Digital Predistortion
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 2020年

1. 発表者名 蛭川泰丞, 小松和暉, 宮路祐一, 上原秀幸
2. 発表標題 ベースバンド無線における帯域内全二重のためのヒルベルト変換を組み合わせた自己干渉除去
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石井建至, 小松和暉, 宮路祐一, 上原秀幸
2. 発表標題 無線チャネルの変動に対処した自己干渉キャンセラの再学習
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小松和暉, 宮路祐一, 上原秀幸
2. 発表標題 非線形自己干渉キャンセラを用いる帯域内全二重のための送信機AM-AM特性の最適化
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡野公太, 小松和暉, 宮路祐一, 上原秀幸
2. 発表標題 帯域内全二重におけるPAPR低減手法によるデジタル自己干渉除去の性能改善
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田齊広太郎, 小松和暉, 宮路祐一, 上原秀幸
2. 発表標題 Radar and CommunicationにおけるRF不完全性の影響の評価
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

ワイヤレス通信研究室 http://www.comm.ee.tut.ac.jp/wc/

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