

令和 6 年 5 月 8 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04479

研究課題名（和文）全二重伝送における干渉抑圧法の高度化と非直交多元接続への応用

研究課題名（英文）Advanced interference suppression for full-duplex transmission and its application to non-orthogonal multiple access

研究代表者

宮嶋 照行（Miyajima, Teruyuki）

茨城大学・理工学研究科（工学野）・教授

研究者番号：00261743

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、移動通信システムの周波数利用効率向上のために有効な全二重伝送に着目し、その干渉抑圧技術と非直交多元接続（NOMA）への応用を調査した。まず、全二重動作する通信局において自己干渉と符号間干渉を同時に抑圧するための手法を提案し、その有効性を確認した。これらはトレーニング信号を必要としないため全二重伝送の周波数利用効率をさらに向上させる。次に、NOMAにおける中継局のビームフォーミング設計法と基地局におけるアンテナ選択法を提案し、その有効性を確認した。これらは簡易な処理で実現できるため全二重伝送装置の簡易化が図れる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

移動無線通信では限られた周波数帯域の有効利用が求められる。全二重伝送と非直交多元接続通信は同一周波数で同時に送受信を行うことで周波数利用効率を向上させる技術である。しかし、これらを実現するためには自己干渉、符号間干渉、ユーザ間干渉を効果的に抑圧する必要がある。本研究では、種々の場合についてこれらの干渉を抑圧する手法を開発した。得られた研究成果は、次世代無線通信の周波数利用効率向上に一定の知見を与えるものである。特にパイロット信号を不要とするブラインド手法は、想定外の環境変動に自律的に適応しながら干渉を効率的に抑圧できるもので全二重伝送の実現に貢献できるものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, we focused on full-duplex transmission, which is effective for improving the spectral efficiency of mobile communication systems, and investigated its interference suppression techniques and their application to non-orthogonal multiple access (NOMA). First, we proposed methods for simultaneously suppressing self-interference and inter-symbol interference in full-duplex stations and confirmed its effectiveness. These methods do not require training signals and further improve the spectral efficiency of full-duplex transmission. Next, we proposed a beamforming design method for relay stations and an antenna selection method for a base station in NOMA, and confirmed the effectiveness of these methods. These methods can be realized with a simple process, thus simplifying the full-duplex transmission system.

研究分野：情報通信工学

キーワード：無線通信 移動通信 全二重伝送 非直交多元接続通信 干渉抑圧 ニューラルネットワーク ブラインド信号処理 ビームフォーミング

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。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

第5世代(5G)移動通信システムがすでに商用化されているが、今後さらに多様で高度なユーザ要求に応えるために、5Gの発展技術の研究開発が必要である。特に、超高速大容量の無線システムを実現するために、周波数利用効率(単位周波数当りの伝送速度)向上技術の開発は推進すべき重要な課題である。本研究では、移動通信システムの周波数利用効率向上のために有効な技術である全二重伝送と非直交多元接続に着目する。

全二重伝送(同一帯域全二重伝送)は、同一周波数帯で送信と受信を同時に行うため、従来の半二重伝送と比べて周波数利用効率を2倍にできる技術である。ただしそのためには、通信局自身が送信した信号を受信することによる自己干渉を効率的に抑圧することが必要である。これまでの検討により、理想的な条件下では自己干渉を抑圧できることが判っている。しかし、現実の通信環境ではハードウェア不整合等のために理想的な条件は満たされず、干渉により性能が大幅に劣化してしまう。

一方、非直交多元接続(Non-Orthogonal Multiple Access: NOMA)は、従来の直交多元接続に比べて2倍から数倍の周波数利用効率を得られる。ただしそのためには、ユーザ間の干渉をキャンセルする必要がある。NOMAへ全二重伝送を応用すれば、相乗効果により周波数利用効率を更に向上できると考えられる。しかし、種々の干渉が存在するため、それらを効率的に抑圧・制御することは困難である。

本研究では、これらの問題に対し、本研究代表者がこれまで取り組んできた通信信号処理手法を発展させることで解決することを試みる。具体的には、全二重伝送の現実的な通信環境における性能劣化を防ぎ効率的に干渉を抑圧する線形及び非線形手法、NOMA中継伝送とNOMAマルチユーザ通信において種々の干渉を同時に効率的に抑圧する手法の2点を検討する。現実的設定における検討を行うことで、簡易で周波数利用効率の高い全二重伝送技術の確立を目指す。

### 2. 研究の目的

本研究は、研究代表者が検討してきた全二重伝送について「自己干渉抑圧の高度化」と「NOMAへの応用に適した干渉抑圧法の開発」を目的とする。具体的に、研究期間内に以下の項目を明らかにする。

- (1) 全二重フィルタ転送型中継伝送について、線形時間領域フィルタによる自己干渉と符号間干渉のブラインド抑圧法の考案し、特に送受信機不整合が存在する場合の性能を評価する。
- (2) 全二重動作する通信端末において、ニューラルネットを用いて自己干渉と符号間干渉をブラインド抑圧する手法を考案し、特に送受信機不整合が存在する場合の効果の評価する。
- (3) 全二重動作する中継機によるリレーアシストNOMAについて、簡易なビーム形成法により自己干渉とユーザ間干渉を低減する手法を考案し、性能を評価する。
- (4) NOMAマルチユーザシステムについて、全二重基地局における自己干渉とユーザ間干渉の影響を低減するアンテナ選択法を考案し、その性能を数値評価により明らかにする。

### 3. 研究の方法

- (1) 周波数選択性通信路におけるサイクリックプリフィックス(Cyclic Prefix: CP)なし直交周波数分割多重(Orthogonal Frequency Division Multiplexing: OFDM)伝送について、全二重動作するフィルタ転送型中継局において線形フィルタ処理により符号間干渉と自己干渉を同時に抑圧する方式を検討する。送受信機不整合等の現実環境を反映した通信系の数式モデル化を行い、理論解析の後、申請設備を用いる計算機シミュレーションにより性能を評価し、提案法の有効性を明らかにする。
- (2) CPなしOFDMによる全二重通信端末において、ニューラルネットにより自己干渉と符号間干渉を抑圧する手法を検討する。特に、IQインバランスや非線形アンプ等の送受信機不整合がある場合に干渉が抑圧できることを示す。その干渉抑圧能力を計算機シミュレーションにより定量的に評価する。
- (3) 全二重動作する中継機を含むNOMAにおいて、中継機のビーム形成により自己干渉とユーザ間干渉を抑圧する手法を検討する。特に、簡易な処理により従来手法と同程度の性能が得られることを計算機シミュレーションにより確認する。
- (4) 全二重動作する基地局を用いたNOMAに基づくマルチユーザ通信において、自己干渉とユーザ間干渉とチャネル間干渉の影響を低減するアンテナ選択法を検討する。送受信アンテナをそれぞれ複数選択し、それらによりビーム形成を行うことで干渉を抑圧しつつ、同時にユーザペアリングを行うことでさらに干渉を抑圧する手法の効果を計算機シミュレーションにより確認する。

### 4. 研究成果

- (1) 全二重フィルタ転送型中継伝送における線形時間領域フィルタによるブラインド干渉抑圧：全二重中継伝送では、全二重伝送に起因する自己干渉に加えて、周波数選択性通信路の遅延波

の存在に起因する符号間干渉が問題となる。中継局に設置した線形フィルタにより符号間干渉と自己干渉を抑圧するためのフィルタ設計法を提案した。提案法は、適応最小分散法を用いることでトレーニング信号やCPを用いることがないため、周波数利用効率の劣化を防ぐことができる利点がある。一方、OFDMではIQインバランスや非線形増幅器による送受信機不整合が性能劣化を引き起こすことが問題となるが、提案法はこれらの不整合が存在しても干渉を抑圧できる。図1に線形時間領域フィルタ調整前後のフィルタ出力を示す。調整前(左図)は干渉の影響で乱れているが、調整後(右図)では干渉が抑圧されて信号点が分離されていることが分かる。図2に伝送速度特性を示す。フィルタなしの場合(w/o filter)に比べて、フィルタを用いることで干渉が抑圧されて伝送速度が向上している。提案法(with imperfection)は不整合が存在しない場合(w/o imperfection)と同等の性能が得られており、さらに半二重(HD)の約2倍の伝送速度が得られており、不整合が存在する場合でも全二重伝送の効果が得られていることが分かる。

#### (2) 全二重端末におけるニューラルネットを用いるブラインド干渉抑圧：

周波数選択性通信路において発生する符号間干渉の影響を低減するためにOFDMではCPを用いるが周波数利用効率の劣化を犠牲にする。CPを用いないOFDMでは符号間干渉を抑圧する等化が必要である。送受信機においてIQインバランスや非線形増幅器による不整合の補償も必要である。これらは非線形ひずみであるから、非線形処理を行うニューラルネットの利用が有効と考えられる。まずニューラルネットを用いる等化器を提案した。提案法はトレーニング信号を必要としないブラインド手法である。図3にその誤り率性能を示す。提案法(with IQI and nonlinear distortion)は不整合がない場合(w/o imperfections)に比べて僅かに劣化するものの誤り率を十分に低減できている。提案法は通信路推定を必要とするが、ブラインド手法により通信路推定した場合(with blind CE)の結果も示す。高SNRにおいて良好な性能が得られている。

全二重端末では、符号間干渉と自己干渉の同時抑圧が求められる。トレーニング信号を用いないニューラルネット等化器を自己干渉が存在する場合にも適用できるように拡張した。図4に誤り率特性を示す。提案法はトレーニング信号を用いる場合(training signal)と同等の性能が得られており、線形の最大比合成法(MRC)より優れており非線形性の有効性を示している。

#### (3) 全二重リレーアシストNOMAにおける干渉抑圧ビーム形成：

NOMA下りリンクにおいて中継器(リレー)を利用することで、通信エリアを拡張し遠方ユーザとの通信をサポートできる。また中継器が全二重動作することで、通信効率を犠牲にすることなくNOMAと中継伝送のメリットが得られる。そのためには自己干渉とユーザ間干渉を抑圧する技術が必須である。複数の送受信アンテナを用いるビーム形成技術が有用であるが、従来手法はビーム形成の設計に多くの処理を必要とした。そこで簡易なビーム形成設計法を提案した。図5に提案手法の合計伝送速度特性を示す。従来の性能が良い方法(SDR)と同等の性能が得られている。SDRに比べて提案法は1/1000程度の計算時間の低減が可能である。また簡易な従来手法(TZF)やランダムに決定した場合に比べて、ユーザ間干渉が高い領域でも性能が劣化しないことが分かる。

NOMAではユーザ間干渉が問題となるが、高速伝送時の周波数選択性通信路では符号間干渉も問題となる。これを解決するためにシングルキャリアや伝送に周波数領域等化器を用いる場合を考え、この時にユーザ間干渉を低減する非同期NOMAを提案した。意図的な時間遅延を送信信号に与えるという簡易な処理で干渉を低減するものである。図6に2ユーザの場合の伝送速度領域を示す。従来の直交多元接続(OMA)やNOMAに比べて提案する非同期NOMA(ANOMA)は広い領域が得られることが分かる。

#### (4) 全二重基地局によるNOMAマルチユーザ通信におけるアンテナ選択：

全二重動作する基地局によるNOMAに基づくマルチユーザ通信システムでは、自己干渉に加えて、ユーザ間干渉、チャンネル間干渉が問題となる。基地局が複数のアンテナを有していればビーム形成による干渉抑圧が期待できるが、アンテナ数が増えると無線(RF)回路が大規模化する問題がある。これを解決するためにアンテナ選択が有用である。合計伝送速度に基づいてアンテナを1本だけ選択する方法をまず検討し、次に複数のアンテナを選択し、それらによりビーム形成を行う手法を提案した。上りリンクの伝送速度拘束の元で下りリンク合計伝送速度を最大にするようにビーム形成を行う。さらに距離に基づいてユーザペアリングを行う。図7に合計伝送速度特性を示す。ビーム形成に加えてペアリングを行うことで優れた性能が得られている。

全二重動作する複数の通信端末と電力送信機と情報受信機からなる無線電力通信ネットワークを検討する。電力送信機から無線により端末に電力を送信し、端末は収集した電力を用いて通信を行う。電力送信機から情報受信機への干渉を抑圧しながら複数ユーザ端末の情報伝送効率を向上させるための送受信機設計法を提案した。合計伝送速度を最大にするように、ビーム形成、電力割り当て、サブキャリア割り当てを行う。図8に電力送信機のアンテナ数を変化させた時の合計伝送速度を示す。ビーム形成を用いない場合(w/o BF)に比べて、ビーム形成を用いることで性能が向上する。提案法は従来のビーム形成法(Interference nulling BF, EH maximization BF)に比べて高い伝送速度が得られることが分かる。

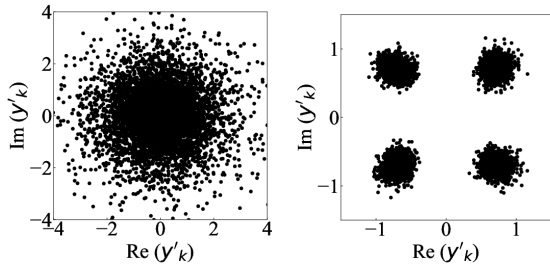


図 1. 線形フィルタ干渉抑圧効果.

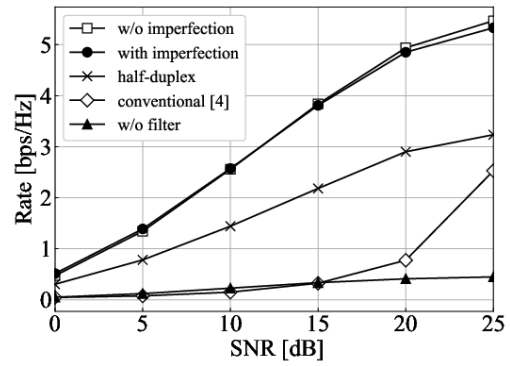


図 2. 線形フィルタ干渉抑圧の性能.

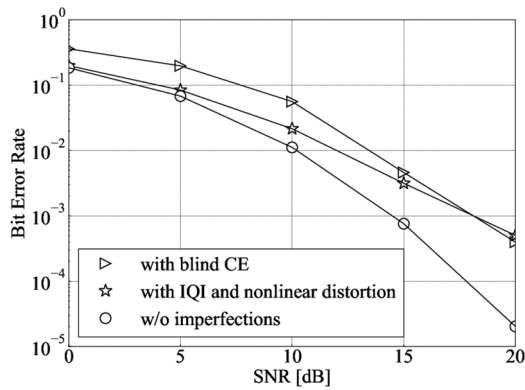


図 3. ニューラルネット等化器の性能.

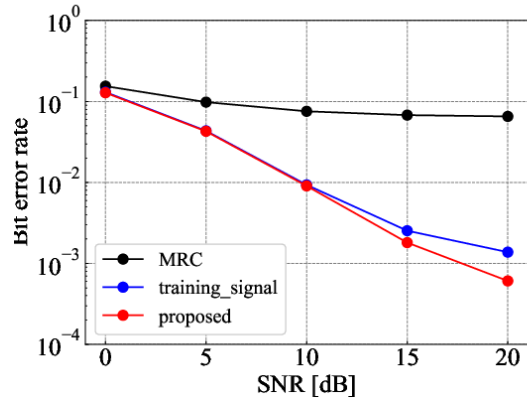


図 4. ニューラルネット干渉抑圧性能.

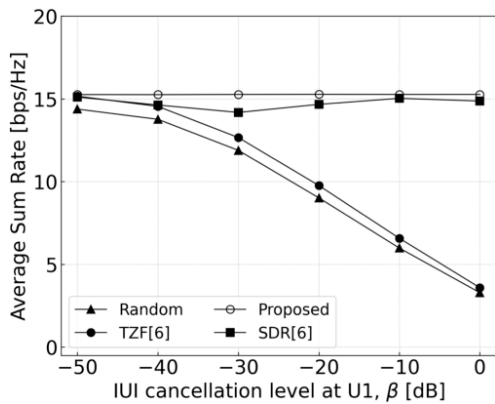


図 5. NOMA 中継伝送の性能.

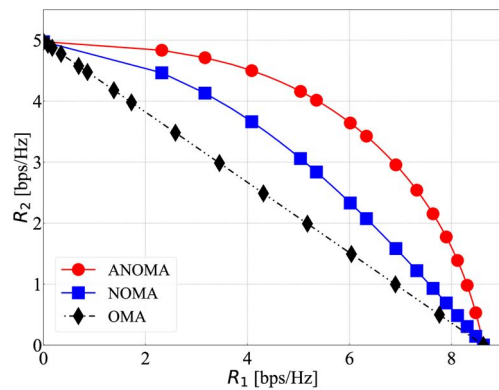


図 6. 非同期 NOMA の性能.

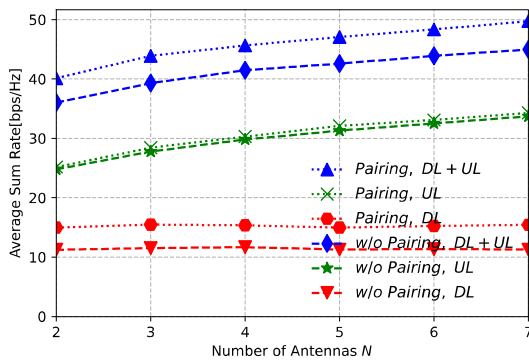


図 7. マルチユーザ NOMA のアンテナ選択性能.

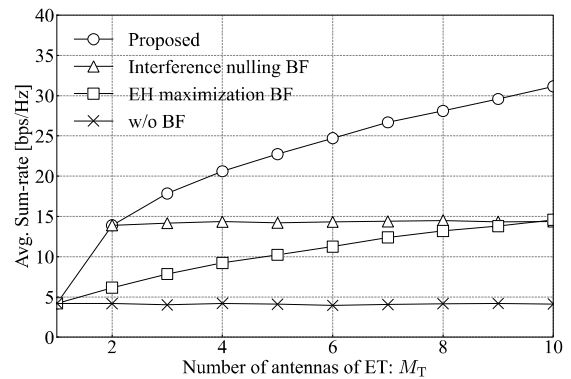


図 8. 全二重無線電力通信ネットワーク性能.

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 1件）

1. 著者名 Isaka Kai, Miyajima Teruyuki, Sugitani Yoshiki	4. 巻 X10
2. 論文標題 Neural network-based time-domain equalization without training signal in OFDM systems without CP	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 未定
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2021ETL0016	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 竹腰 雄斗, 宮嶋 照行, 杉谷 栄規	4. 巻 J104-A
2. 論文標題 適応最小分散法を用いる全二重フィルタ転送型リレーにおける干渉抑圧	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電子電子情報通信学会論文誌A 基礎・境界	6. 最初と最後の頁 241 ~ 243
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14923/transfunj.2021JAL2001	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 Kurayama Tomonari, Miyajima Teruyuki, Sugitani Yoshiki	4. 巻 E105.B
2. 論文標題 Asynchronous NOMA Downlink Based on Single-Carrier Frequency-Domain Equalization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 1173 ~ 1180
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transcom.2021MEP0003	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 Liao Hanlin, Miyajima Teruyuki	4. 巻 12
2. 論文標題 Low-complexity beamforming design for full-duplex relay-assisted cooperative NOMA	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 386 ~ 391
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2023TCL0005	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 Hirashima Keigo, Miyajima Teruyuki	4. 巻 E107.B
2. 論文標題 Sum Rate Maximization for Multiuser Full-Duplex Wireless Powered Communication Networks	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications	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 -

〔学会発表〕 計25件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 LIAO Hanlin, MIYAJIMA Teruyuki
2. 発表標題 Improved Beamforming Design for Full-Duplex Relay-Assisted Cooperative NOMA
3. 学会等名 Proc. 2022 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 楊松, 宮嶋照行
2. 発表標題 ミリ波マルチユーザMIMO-OFDMのための周波数フラットプリコーディングの一検討
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 2022年

1. 発表者名 栗田快志, 宮嶋照行
2. 発表標題 非直交多元接続に基づく全二重基地局におけるアンテナ選択の効果
3. 学会等名 電気学会東京支部茨城支所研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 所和弥, 宮嶋照行
2. 発表標題 トレーニング信号が不要な全二重伝送用ニューラルネット等化器の提案
3. 学会等名 電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 KURAYAMA Tomonari, MIYAJIMA Teruyuki, SUGITANI Yoshiki
2. 発表標題 Single-Carrier NOMA Downlink with Symbol Offset in Frequency-Selective Channels
3. 学会等名 IEEE Global Conference on Consumer Electronics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 天野匡平, 宮嶋照行, 杉谷栄規
2. 発表標題 シングルキャリア伝送に基づく全二重マルチユーザシステムのためのフィルタ設計について
3. 学会等名 電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 倉山智成, 宮嶋照行, 杉谷栄規
2. 発表標題 SC-FDEに基づく下りリンクNOMAのユーザ間干渉低減の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 倉山智成, 宮嶋照行, 杉谷栄規
2. 発表標題 時空間送信フィルタを用いた下りリンクNOMAにおけるシンボルオフセットの効果
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 2021年

1. 発表者名 倉山智成, 宮嶋照行, 杉谷栄規
2. 発表標題 下りリンク非同期NOMAにおける符号間干渉低減の検討
3. 学会等名 革新的無線通信技術に関する横断型研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 廖漢麟, 宮嶋照行, 杉谷栄規
2. 発表標題 全二重りレーアシストNOMAにおける電力割当ての検討
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 Isaka Kai, Miyajima Teruyuki, Sugitani Yoshiki
2. 発表標題 Time-Domain Equalizer Using Neural Network Without Known Training Signals for OFDM Systems Without CP
3. 学会等名 International Conference on Emerging Technologies for Communications (国際学会)
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 Tomonari Kurayama, Miyajima Teruyuki, Sugitani Yoshiki
2. 発表標題 Improved Transmitter Design for Downlink NOMA in Frequency-Selective Channels
3. 学会等名 International Conference on Emerging Technologies for Communications (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Isaka Kai, Miyajima Teruyuki, Sugitani Yoshiki
2. 発表標題 Time-Domain Equalization Using Neural Network with Arbitrary Decision Delay
3. 学会等名 Global Conference on Consumer Electronics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomonari Kurayama, Miyajima Teruyuki, Sugitani Yoshiki
2. 発表標題 Transmitter Design for Downlink Non-Orthogonal Multiple Access System in Frequency-Selective Channels
3. 学会等名 International Technical Conference on Circuits/ Systems, Computers and Communications (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹腰雄斗, 宮嶋照行, 杉谷栄規
2. 発表標題 全二重フィルタ転送型リレーにおける同時干渉抑圧法の検討
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 2020年

1. 発表者名 井坂開, 宮嶋照行, 杉谷栄規
2. 発表標題 トレーニング信号が不要なニューラルネット等化器の性能改善
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 倉山智成, 宮嶋照行, 杉谷栄規
2. 発表標題 下りリンクNOMAにおける時間領域干渉抑圧法の性能評価
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 井坂開, 宮嶋照行, 杉谷栄規
2. 発表標題 CPなしOFDMにおける既知トレーニング信号が不要なニューラルネット等化器
3. 学会等名 電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井坂開, 宮嶋照行, 杉谷栄規
2. 発表標題 CPなしOFDMにおける送受信機不整合がニューラルネット等化器に及ぼす影響
3. 学会等名 電気学会東京支部茨城支所研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 倉山智成, 宮嶋照行, 杉谷栄規
2. 発表標題 シングルキャリアNOMAにおけるユーザ間公平性を考慮した干渉抑圧フィルタ設計
3. 学会等名 電気学会東京支部茨城支所研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石塚崇寛, 宮嶋照行
2. 発表標題 全二重OFDM伝送におけるニューラルネットワークを用いた非線形干渉抑圧
3. 学会等名 電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 倉山智成, 宮嶋照行
2. 発表標題 シングルキャリアNOMA/TDMAの一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Liao Hanlin, 宮嶋照行
2. 発表標題 ダウンリンク協調NOMAのビームフォーミング設計に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石塚崇寛, 宮嶋照行, 杉谷栄規
2. 発表標題 全二重伝送におけるニューラルネットを用いた非線形干渉抑圧
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 竹腰雄斗, 宮嶋照行, 杉谷栄規
2. 発表標題 全二重フィルタ転送型リレーにおける同時干渉抑圧へのハードウェア不完全性の影響,
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021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