

令和 6 年 5 月 17 日現在

機関番号：32407

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04046

研究課題名（和文）全二重無線通信の空間ダイバーシティと固有ビームフォーミングによる伝送路容量の向上

研究課題名（英文）Improving channel capacity by using space diversity and eigen-beamforming techniques in full-duplex wireless communications

研究代表者

竹村 暢康（Takemura, Nobuyasu）

日本工業大学・基幹工学部・教授

研究者番号：90747023

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：移動通信システムの全二重無線通信における端末間干渉の抑圧および伝送路容量を向上する新たな手段として、ミリ波帯における指向性および偏波を切り換える空間ダイバーシティを適用した小型な端末アンテナ構成を実現した。MIMO固有ビームフォーミングと融合することで、端末間干渉の抑圧効果が得られることを確認し、基地局と端末間のシステム全体の伝送路容量の向上を実現するとともに、その効果を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、ミリ波帯における全二重無線通信技術を用いたSDD方式を適用した移動通信用の小型な端末アンテナ構成を実現し、システムにおける端末間干渉の抑圧と伝送路容量の向上の効果について明らかにしたことは学術的な意義が大きいものと考えられる。また、本技術によりミリ波帯において端末に適用する空間ダイバーシティ技術とMIMO固有ビームフォーミング技術の融合効果について検証できたことは、今後のIoTの普及において大きな効果をもたらすものと期待される。

研究成果の概要（英文）：A compact mobile terminal antenna configuration has been developed that employs space diversity to switch directionality and polarization in the millimeter wave band. This novel approach has the potential to suppress terminal-to-terminal interference and improve channel capacity in millimeter-wave full-duplex MIMO systems. It has been evaluated that the combination of MIMO eigen-beamforming can effectively suppress terminal-to-terminal interference and enhance the overall channel capacity of the system between a base station and terminals.

研究分野：通信工学

キーワード：全二重無線通信 空間ダイバーシティ 固有ビームフォーミング MIMO 移動通信 ミリ波 アンテナ  
伝送路容量

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

2030年までに達成する目標として掲げている国連の「持続可能な開発目標(SDGs: Sustainable Development Goals)」に対し、情報通信技術(ICT)など高度情報化社会への技術活用が検討されていた。特にスマートフォンなどを代表とする移動通信では、商用化が開始された5G(第5世代移動通信)の本格運用に向けて、さらなる大容量高速無線通信技術に対する期待が高まっていた。超高画質映像を伝送するためには、伝送するデータ量の増加に対応し、さらにIoTにおけるデバイス間通信にも対応する必要があった。通信障害を引き起こさず、システムを円滑に運用するためには、移動通信側での対応が社会的にも急務であった。

移動通信システムでは、使用する周波数帯域の高域化が進んでおり、さらにMIMO技術による伝送速度の高速化の研究が活発に行われていた。また、現行のTDD(Time Division Duplex)方式と比較して周波数利用効率を向上させるために、全二重無線通信技術を用いることで同一時間に送受信するSDD(Space Division Duplex)方式の研究が進められていた。

### 2. 研究の目的

移動通信システムではIoTへの対応に向けて、伝送路容量の向上を図る技術検討が重要であると考え、本研究では、図1に示すシステム構成でミリ波帯において全二重無線通信技術を用いたSDD方式を適用する場合を想定した。この運用により、各基地局のsmallセル内での端末間干渉を抑圧しつつ、基地局と端末間のシステム伝送路容量の向上を実現することを目的とした。具体的には、ミリ波帯での端末間MIMOチャネルに対する固有モード伝送において、上位の固有値に対してヌルビームフォーミングを行うMIMO固有ビームフォーミング(デジタル技術)と、端末において指向性や偏波を切り換える空間ダイバーシティ(アナログ技術)を融合することにより、全二重無線通信技術を用いたSDD方式適用時の端末間干渉を抑圧し、システム伝送路容量の向上を目指した。

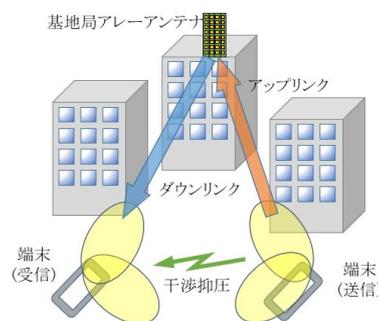


図1 端末間干渉抑圧と伝送路容量向上を実現する空間ダイバーシティとMIMO固有ビームフォーミングを適用したシステム構成

### 3. 研究の方法

本研究では、28GHz帯等のミリ波帯における全二重無線通信技術を用いたSDD方式を適用した移動通信用端末において、指向性や偏波を切り換える空間ダイバーシティを適用した小型な端末構成を実現し、MIMO固有ビームフォーミングと融合することで、端末間干渉の抑圧および伝送路容量向上に向けた技術提案と特性を評価し、その効果を明らかにした。空間ダイバーシティとMIMO固有ビームフォーミングを適用した融合技術における端末間干渉抑圧および伝送路容量向上に向けて検討した。

#### (1) 空間ダイバーシティを適用した端末アンテナ

端末内の限られたスペースに複数のアンテナを配置する空間ダイバーシティを適用した構成を実現するため、各アンテナの構成に関するパラメータを電磁界シミュレーションにより検討した。端末の実装に耐え得る小型な端末アンテナを検討し、空間ダイバーシティの構成を実現するために、誘電体基板上の上部と下部にアンテナを配置することで、異なる指向性や偏波を有する端末アンテナ構成を検討した。現行のスマートフォンの大きさを考慮し、実装可能な端末構成を検討した。

#### (2) 電波伝搬環境をモデル化したシミュレーションにおける端末間干渉評価

ミリ波帯(28GHz帯)において、端末間干渉を評価した。電波伝搬解析にはレイトレーシング法を用い、端末間の伝搬特性を明らかにし、送信端末と受信端末の各々のアンテナの指向性を考慮した屋外環境でのマルチパスによる影響を評価した。屋外電波伝搬モデルのシミュレーション結果から得られた伝搬特性をもとに端末間干渉を評価した。

#### (3) 電波伝搬環境をモデル化したシミュレーションにおける伝送路容量評価

レイトレーシング法を用いた電波伝搬解析ツールにより、基地局と端末間の伝搬特性を明らかにし、基地局アンテナと端末アンテナの各々の指向性を考慮した屋外環境におけるマルチパスによる影響を評価した。シミュレーションにより得られた伝搬特性の結果をもとに、基地局と携帯端末間の伝送路容量を評価した。また、基地局アンテナの指向性に関して、垂直面内におけるビーム幅およびチルト角を変化させた場合の伝送路容量を評価した。

#### (4) 空間ダイバーシティとMIMO固有ビームフォーミングを適用した端末による周波数帯域を考慮した効果検証

レイトレーシング法による電波伝搬解析ツールを用いて、端末間および基地局と端末間の周波数帯域を考慮した伝搬特性を明らかにし、屋外環境モデルでのマルチパスによる影響を評価した。ミリ波帯の周波数帯域を考慮して、端末間干渉および伝送路容量を評価した。

#### 4. 研究成果

ミリ波帯における全二重無線通信技術を用いた SDD 方式を適用した移動通信用端末において、指向性および偏波を切り換える空間ダイバーシティを適用した小型な端末アンテナ構成を実現した。MIMO 固有ビームフォーミングと融合することで、端末間干渉の抑圧効果が得られることを確認し、また、基地局と端末間のシステム全体の伝送路容量の向上を実現するとともに、その効果を明らかにした。

##### (1) 空間ダイバーシティを適用した端末アンテナ

端末はスマートフォンサイズとし、端末内の限られたスペースに複数のアンテナを配置するため、端末の上部と下部に各々4つのアンテナを配置して、合計8つのアンテナの中から4つのアンテナを選択することで、アンテナの指向性と水平および垂直の偏波を切り換える空間ダイバーシティを実現した。アンテナ素子はミリ波帯で動作する基板実装型の逆 F アンテナで構成され、電磁界シミュレーションによりアンテナ素子の形状や配置などを最適化し、所望のアンテナ特性を実現する端末を設計した。

図2に端末アンテナの構成を示す。(a)は試作アンテナの外観、(b)は計算モデルである。電磁界シミュレーションによる計算結果から端末アンテナのパラメータを調整し、所望の特性が得られるような端末アンテナを製作した。

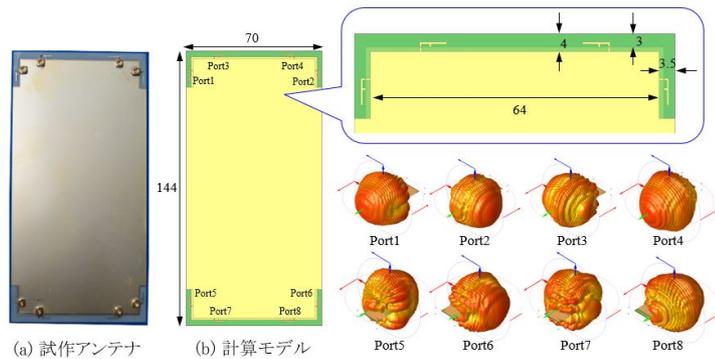


図2 端末アンテナ構成

図3 放射パターン

図3は各給電ポートにおける放射パターンを示しており、図4は端末アンテナの反射特性と通過特性の計算結果及び測定結果である。端末アンテナは28GHz帯で動作するように設計され、各給電ポートにより放射パターンの形状が異なることが確認できる。また、反射特性の測定結果は計算結果と比較して少し高域にシフトしている。これは寸法誤差やコネクタの影響などが考えられるが、アンテナのパラメータを変更することで調整可能である。空間ダイバーシティでは、端末に搭載されている8つのアンテナ素子から4つのアンテナ素子を選ぶことで、4素子MIMOアンテナとして使用する。従来構成は、Port1, Port2, Port5, Port6を常

に選択した場合とする。

##### (2) 電波伝搬環境をモデル化したシミュレーションにおける端末間干渉評価

空間ダイバーシティを適用した端末アンテナによる端末間干渉抑圧について評価するための屋外電波伝搬シミュレーションモデルを図5に示す。シミュレーションモデルは市街地を想定しており、材質をコンクリートとしたビルや道路から構成されている。送信端末(UT1)と受信端末(UT2)は、高さ1.2mの位置に道路上に配置され、UT2については3カ所の位置(#1~#3)で検討した。屋外電波伝搬シミュレーションにはレイトレーシング法を用いて計算した。計算条件は、UT1の送信出力を100mW、反射波の最大反射回数を5回、回折波は2回まで考慮し、レイ放射の角度分解能を1°とした。雑音電力は-90dBmとした。端末間干渉の評価方法は、まずUT1の各アンテナ素子からUT2の各アンテナ素子までの伝搬経路をレイトレーシング法により計算し、全てのパスから得られた受信電力から送受信端末間のチャンネル行列Hを求めた。このとき、UT1とUT2は水平方向に10°間隔で360°回転させ、各回転角度における端末間チャンネルから固有モード展開して求めた各固有値の累積分布を求めて評価した。端末アンテナに空間ダイバーシティを適用した場合、UT1のアンテナの組み合わせ70通りとUT2のアンテナの組み合わせ70通りの合計4900通りについて計算した。

図6に従来の固有ビームフォーミングのみを用いた4素子MIMOアンテナと、空間ダイバーシ

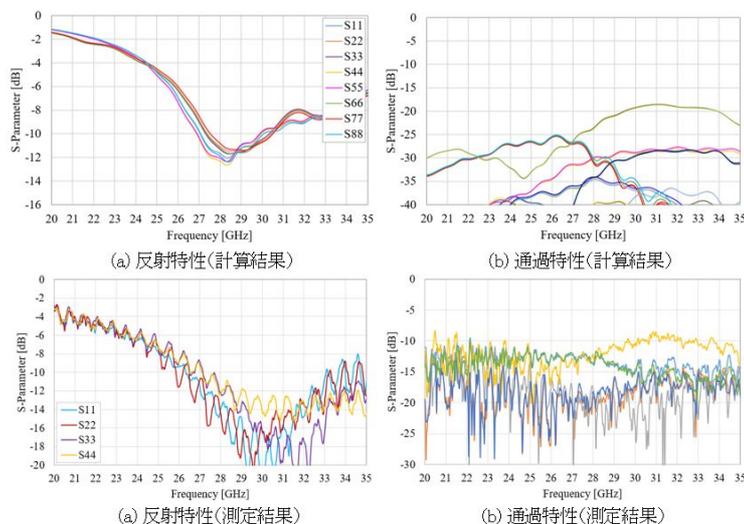


図4 端末アンテナ特性

ティおよび固有ビームフォーミングを適用した4素子MIMOアンテナの固有値累積分布の比較を示す。UT1とUT2を水平方向に10°間隔で360°回転させ、各回転角度における端末間チャンネルから固有モード展開して求めた第1~第4固有値の累積分布を示している。ここでは、UT2を配置した3カ所(#1~#3)の中から#2の結果について

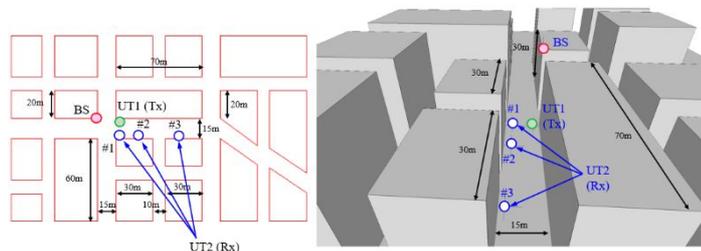


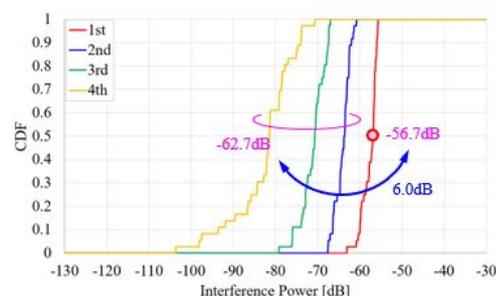
図5 電波伝搬シミュレーションモデル

示す。固有ビームフォーミングにより端末間チャンネルの第1固有値に対してヌル形成を行った場合、第2~第4固有値の総和が端末間干渉に相当する。UT2の配置(#2)の場合、従来構成では-62.7dB、提案構成では-65.2dBが端末間干渉となる。他のUT2の配置において、#1の場合、従来構成では-55.2dB、提案構成では-58.8dB、#3の場合、従来構成では-70.5dB、提案構成では-78.4dBとなった。計算結果より、端末アンテナに空間ダイバーシティを適用した場合、干渉抑圧効果が従来の4素子MIMOアンテナと比較して5~9dB改善することを確認した。

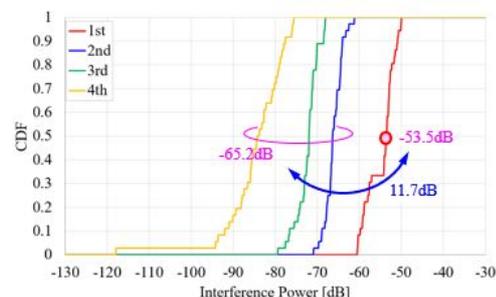
### (3) 電波伝搬環境をモデル化したシミュレーションにおける伝送路容量評価

端末間干渉を評価した際に計算した端末間チャンネルに加えて、基地局とUT1および基地局とUT2の伝搬チャンネルを計算し、それらのチャンネル特性を用いて基地局と送受端末間のシステム伝送路容量を評価した。シミュレーションモデルは図5と同様とし、レイトラッキング法を用いて計算した。基地局は高さ30mのビルの屋上に配置した。計算条件は、UT1の送信出力を100mW、基地局の送信出力を20W、反射波の最大反射回数を5回、回折波は2回まで考慮し、レイ放射の角度分解能を1°とした。雑音電力は-90dBmとした。また、基地局と送受信端末の位置関係は、基地局から0°水平面に対して、UT1が60°下側、UT2の配置(#1)が60°下側、UT2の配置(#2)が45°下側、UT2の配置(#3)が20°下側である。基地局アンテナは、垂直面内ビーム幅を90°、チルト角を0°とした場合と、垂直面内ビーム幅を10°、チルト角を45°とした場合について評価した結果を示す。

図7にシステム伝送路容量の比較を示す。ここでは、UT2を配置した3カ所(#1~#3)の中から#2の結果について示す。固有ビームフォーミングと空間ダイバーシティを適用した場合、固有ビームフォーミングのみを適用した場合、固有ビームフォーミングを適用していない場合、TDD方式の場合について比較している。計算結果より、垂直面内ビーム幅を90°、チルト角を0°とした場合、TDD方式では、システム伝送路容量の累積分布50%中央値が13.7 Bit/s/Hz、固有ビームフォーミングを適用しない場合は21.7 Bit/s/Hz、固有ビームフォーミングを適用した場合は23.6 Bit/s/Hz、固有ビームフォーミングと空間ダイバーシティを適用した場合は26.5 Bit/s/Hzとなり、従来の4素子MIMOアンテナと比較してシステム伝送路容量が向上することを確認した。また、垂直面内ビーム幅を10°、チルト角を45°とした場合、TDD方式では、システム伝送路容量の累積分布50%中央値が16.4 Bit/s/Hz、固有ビームフォーミングを適用しない場合は27.0 Bit/s/Hz、固有ビームフォーミングを適用した場合は28.4 Bit/s/Hz、固有ビームフォーミングと空間ダイバーシティを適用した場合は31.5 Bit/s/Hzとなり、従来の4素子MIMOアンテナと比較してシステム伝送路容量が向上することを確認した。

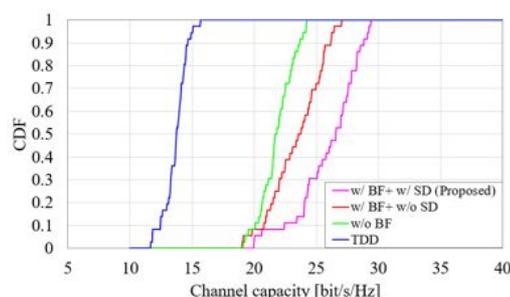


(a) 4素子MIMO(従来)

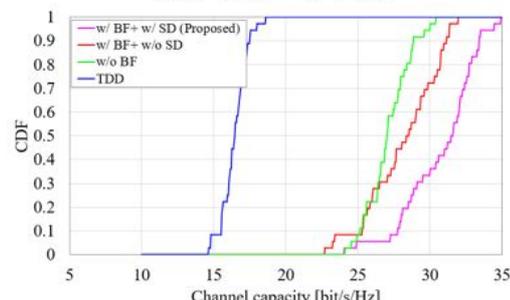


(b) 4素子MIMO(空間ダイバーシティ)

図6 固有値累積分布の比較(受信端末#2の場合)



(a) ビーム幅90°、チルト角0°



(b) ビーム幅10°、チルト角45°

図7 伝送路容量の比較(受信端末#2の場合)

(4) 空間ダイバーシティとMIMO固有ビームフォーミングを適用した端末による周波数帯域を考慮した効果検証

レイトレーシング法による電波伝搬解析ツールを用いて、端末間および基地局と端末間の28GHz帯における周波数帯域を考慮した伝搬特性を明らかにし、基地局アンテナの指向性と端末アンテナの指向性を考慮した屋外環境モデルでのマルチパスによる影響を評価した。シミュレーションモデルは図5と同様に構築し、レイトレーシング法を用いて計算した。基地局は高さ30mのビルの屋上に配置した。計算条件は、UT1の送信出力を100mW、基地局の送信出力を20W、反射波の最大反射回数を5回、回折波は2回まで考慮し、レイ放射の角度分解能を $1^\circ$ とした。雑音電力は-90dBmとした。図8に従来の固有ビームフォーミングのみによる4素子MIMOアンテナと空間ダイバーシティおよび固有ビームフォーミングを適用した4素子MIMOアンテナについて、端末間干渉抑圧量の周波数特性の比較を示す。ここでは、UT2を配置した3カ所(#1~#3)の中から#2の結果について示す。ここで示す端末間干渉抑圧量は、第1固有値の50%中央値と第2固有値から第4固有値までの50%中央値の総和との差として定義している。例えば、28.0GHzの場合、従来構成では-69.5dB、提案構成では-71.3dBが端末間干渉となり、端末間干渉抑圧効果は各々7.0dB、16.4dBとなった。また、28.8GHzの場合、従来構成では-63.3dB、提案構成では-71.9dBが端末間干渉となり、端末間干渉抑圧効果は各々7.5dB、16.6dBとなり、端末アンテナに空間ダイバーシティを適用した場合、干渉抑圧効果は従来の4素子MIMOアンテナと比較して改善することを確認した。

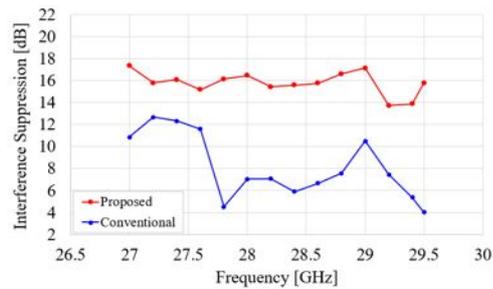


図8 端末間干渉抑圧量(受信端末#2の場合)

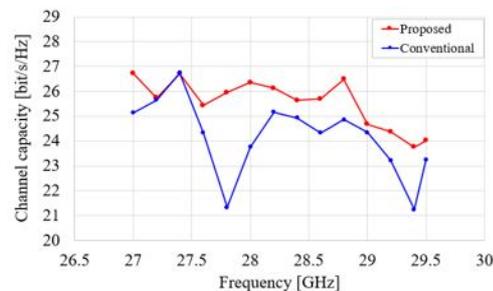


図9 伝送路容量(受信端末#2の場合)

図9に従来の固有ビームフォーミングのみによる4素子MIMOアンテナと空間ダイバーシティおよび固有ビームフォーミングを適用した4素子MIMOアンテナについて、システム伝送路容量の周波数特性の比較を示す。ここでは、UT2を配置した3カ所(#1~#3)の中から#2の結果について示す。例えば、28.0GHzの場合、従来構成では23.7 Bit/s/Hz、提案構成では26.3 Bit/s/Hz、28.8GHzの場合、従来構成では24.8 Bit/s/Hz、提案構成では26.4 Bit/s/Hzとなり、従来の4素子MIMOアンテナと比較してシステム伝送路容量が向上することを確認した。屋外電波伝搬モデルのシミュレーションにより得られた伝搬特性の結果から、端末間干渉および伝送路容量を評価し、空間ダイバーシティを適用していない従来の4素子MIMO端末と比較して、MIMO端末に空間ダイバーシティを適用することで、ミリ波帯の周波数帯域内において端末間干渉を抑圧し、さらにシステム伝送路容量の向上が可能であることを確認した。

本研究成果は、同一基地局スモールセル内における端末間干渉の抑圧とシステム伝送路容量を向上する方法に関するものである。これは、空間ダイバーシティ(アナログ技術)とMIMO固有ビームフォーミング(デジタル技術)の融合により実現するものであり、ミリ波帯における全二重無線通信技術を実現する上で重要な成果であると考えられる。移動通信システムだけでなく、他の全二重無線通信技術を用いるシステムの無線端末への応用が可能であり、今後のIoTの普及において大きな効果をもたらすものと期待される。

## 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 Takemura Nobuyasu	4. 巻 12
2. 論文標題 A study on terminal-to-terminal interference suppression using space diversity for millimeter-wave full-duplex MIMO system	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 288 ~ 293
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2023SPL0010	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6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 竹村暢康
2. 発表標題 全二重無線通信における空間ダイバーシティを用いたミリ波帯でのチャネル容量特性に関する検討
3. 学会等名 2022年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 Takemura Nobuyasu
2. 発表標題 A Study on Interference Suppression Performance using Space Diversity of Mobile Terminal for Millimeter-Wave Full-Duplex MIMO System
3. 学会等名 The 2022 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹村暢康
2. 発表標題 全二重無線通信における空間ダイバーシティを用いたミリ波帯での端末間干渉抑圧に関する検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 アンテナ・伝播研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 竹村暢康
2. 発表標題 全二重無線通信における空間ダイバーシティを用いたミリ波帯での端末間干渉抑圧に関する検討
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹村暢康
2. 発表標題 空間ダイバーシティを適用したミリ波帯全二重無線通信における周波数帯域特性に関する検討
3. 学会等名 2023年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takemura Nobuyasu
2. 発表標題 Investigating Channel Capacity Characteristics of Millimeter-Wave Full-Duplex MIMO System with Mobile Terminal Space Diversity
3. 学会等名 The 2023 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2023) (国際学会)
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
研究協力者	本間 尚樹  (Honma Naoki)		

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
---------	---------