

様 式 C - 1 9、F - 1 9 - 1、Z - 1 9 (共通)

科学研究費助成事業

研究成果報告書



令和 6 年 5 月 13 日現在

機関番号：33903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04492

研究課題名(和文)多様体の幾何を利用した符号化の研究

研究課題名(英文)Study on coding methods using manifold geometry

研究代表者

小西 たつ美 (Konishi, Tatsumi)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：00340159

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000 円

研究成果の概要(和文)：複数の送受信アンテナを用いるMIMO (multiple-input multiple-output) 通信方式では非コヒーレントにおける符号空間がグラスマン多様体とみなせるが、本研究ではグラスマン多様体がシューベルト胞体に分割される性質がトレリス符号化変調のコセット分割に類似していると考えて、シューベルト胞体に情報の一部を載せる多重解像度MIMO符号を提案している。そしてシューベルト胞体に載せて送信する低解像度の情報は、正規化ドップラー周波数が0.1のように非常に高いドップラー周波数になっても、低いドップラー周波数とほぼ同様のり率を示すことを、シミュレーションと理論式によって明らかにしている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

腸高速で走行や飛行を行う移動体間の無線通信では、非常に高いドップラー想定されるが、そのような環境下においても誤り率が変動しない通信方式は、我々が知る限りほとんど提案されていない。本研究課題で提案しているグラスマン多様体のシューベルト胞体行列を用いた多重解像度MIMO通信方式では、ドップラー周波数の変動に対して誤り率がほとんど変動せず、また非常に高いドップラー周波数に対しても送受信が可能なMIMO符号化方式となっているため、社会的なインパクトは非常に高いと考えている。またグラスマン多様体のシューベルト胞体分割を通信方式に適用することも、過去には検討されてないため、学術的意義も高いと考える。

研究成果の概要(英文)：MIMO (multiple-input multiple-output) communication methods that utilize multiple transmitting and receiving antennas have become one of the important fundamental technologies in modern wireless communications. In MIMO, the code space in non-coherent communication can be regarded as a Grassmann manifold.

As a result of preliminary studies, we believe that the property that the Grassmann manifold is divided into Schubert cells without overlap is similar to the coset partitioning of trellis coded modulation, and proposed a multi-resolution MIMO encoding method.

In the proposed method, medium-resolution information is transmitted using non-coherent differential QPSK, and low-resolution information is transmitted using a Schubert cell matrix. Simulations and theoretical formulas have revealed that even when the normalized Doppler frequency reaches a very high Doppler frequency of 0.1, low-resolution information exhibits almost the same error rate as a low Doppler frequency.

研究分野：通信工学

キーワード：MIMO グラスマン多様体 シューベルト胞体 ドップラー周波数 移動体通信

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

複数の送受信アンテナを利用する MIMO (multiple-input multiple-output) 通信方式は、現代の無線通信システムにおいて重要な基盤技術の一つとなっている。MIMO 通信では、送受信の双方で通信路情報を必要としない非コヒーレント通信における符号空間が、グラスマン多様体とみなせるため、これまでグラスマン多様体ベースのプリコード・コードブックやビームフォーミングベクトル、時空間符号化などが提案されてきた。しかし、グラスマン多様体をベースとした誤り訂正符号のような信頼性を向上させる技術の研究は、我々の知る限り行われていない。そこで本研究課題では、グラスマン多様体を持つ幾何学的な性質を利用した、MIMO 通信の信頼性を向上させる符号化技術の検討を行うこととした。

2. 研究の目的

グラスマン多様体は有限次元複素線形空間内の部分空間であり、部分空間を点と考えると、それらの点を集めてできている空間とみなせる。グラスマン多様体を用いた MIMO 通信の信頼性を向上させるためには、それら点の軌道や分割、距離構造についての考察が重要になる。予備的な検討の結果、グラスマン多様体がシューベルト胞体に重複なく分割されるという性質が、従来技術であるトレリス符号化変調のコセット分割に類似しているという考えに至り、分割したシューベルト胞体自身にも情報の一部を載せて送信する MIMO 符号化技術の検討を、本研究課題の目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、グラスマン多様体ベースの非コヒーレント MIMO 符号が潜在的に有する性質「符号行列 S に通信路行列 H を乗算した受信行列が S の列で張られた部分空間になり、その部分空間は通信路行列に関わらず不変である」という性質を利用している。そして K 本のアンテナから T 時刻 (T タイムスロット) で送信する MIMO 符号行列を T 行 K 列の行列で表し、受信側の復号には GLRT (Generalized Likelihood Receiver Test) を使用する。これにより連続する二つの符号行列において通信路行列が同一であるという条件が不要になるため、従来技術である一つ前符号行列との差分に情報を載せる差動ユニタリ時空間符号や差動時空間ブロック符号と比べ、グラスマン多様体ベースの MIMO 符号では、通信路行列の時間変動に対してロバストな通信方式となり、高いドップラー周波数への対応が比較的柔軟に可能となる。これらの事実に基づき、グラスマン多様体のシューベルト胞体を利用した新たな MIMO 符号化方式の提案と、高いドップラー周波数環境となる高速移動体通信での誤り性能について検討した成果を報告する。

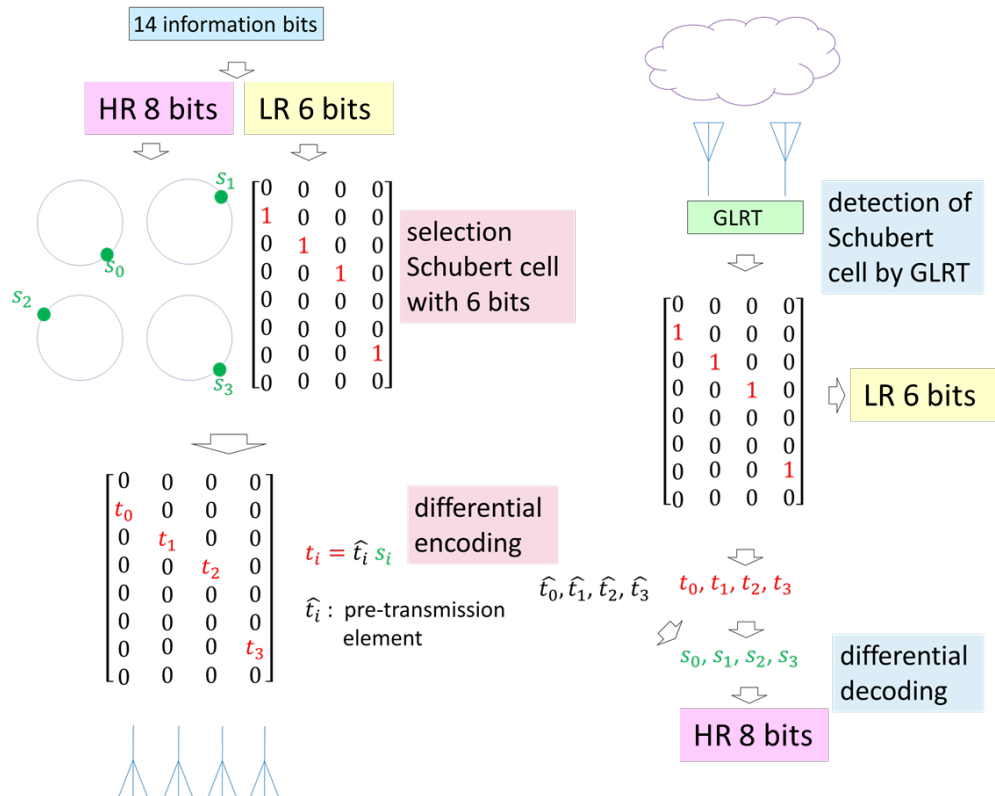


図 1. 本研究で提案する多重解像度 MIMO 符号化方式の一例

4. 研究成果

(1) シューベルト胞体分割を用いた多重解像度 MIMO 符号化

グラスマン多様体は、対角成分が 1 の下三角行列の部分群であるシューベルト胞体（セル）によって、互いに重複せず分割される。例えばグラスマン多様体 $G(4,2)$ は、以下のシューベルト胞体に分割される。ここで、* には任意の複素数が入るが、本研究ではこれを 0 とする。

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ * & * \\ * & * \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ * & 0 \\ 0 & 1 \\ * & * \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ * & * \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ * & 0 \\ * & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ * & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

本研究で提案する多重解像度（マルチレゾリューション）MIMO 符号化では、中解像度（Middle Resolution: MR）の情報を非コヒーレント差動 QPSK で送信し、低解像度（Low Resolution: LR）の情報をシューベルト胞体行列に載せて送信する。これは送受信の双方で通信路情報を必要としない方式であり、通信路の状況が比較的良好な場合には、MR も LR も受信可能とし、通信路の状況が悪化した場合でも、少なくとも LR の情報ビットだけは受信できるようにする。図 1 に多重解像度 MIMO 符号化方式の一例を示す。この例では、8 ビットの MR の情報ビットと、6 ビットの LR の情報ビット（計 14 ビット）を一つの MIMO 符号行列で送信する。8 ビットの MR 情報ビットは QPSK の 4 シンボル s_i にマッピングし、6 ビットの LR 情報ビットは一つのシューベルト胞体行列を選択するために使用する。 s_i と一つ前の送信行列の QPSK シンボルから、差動符号化で現在の送信行列の QPSK シンボルを求め、得られた差動 QPSK のシンボル t_i を、シューベルト胞体行列の 1 の部分に割り振り、4 本のアンテナから 8 時刻かけて送信する。

受信側では式(1)の GLRT 復号により送信されたシューベルト胞体行列 $\tilde{S}$ を最ゆう推定する。

$$\tilde{S} = \arg \max_{S \in \Psi} \text{Trace}(Y^H S S^H Y) \quad (1)$$

ここで、 Y は受信行列、 Y^H はその共役転置行列を表し、 Ψ は送信される可能性のあるシューベルト胞体行列の集合を表している。GLRT によって送信されたシューベルト胞体行列を推定した後で、6 ビットの LR 情報ビットを復号する。その後シューベルト胞体行列の各 1 の場所にあるシンボルを取り出し、一つ前の行列のシンボルとの位相差を用いて差動復号の処理を行い、最初に QPSK にマッピングした 4 個のシンボルを推定して 8 ビットの MR 情報ビットを復号する。なお詳細な説明は省くが、この例では 8 行 4 列のシューベルト胞体行列の総数 70 個の中から、行列の類似度の高い行列から省くことで、6 ビットに相当する 64 個のシューベルト胞体行列を選択し使用している。

(2) シューベルト胞体行列に載せた LR 情報ビットの誤り率の検討

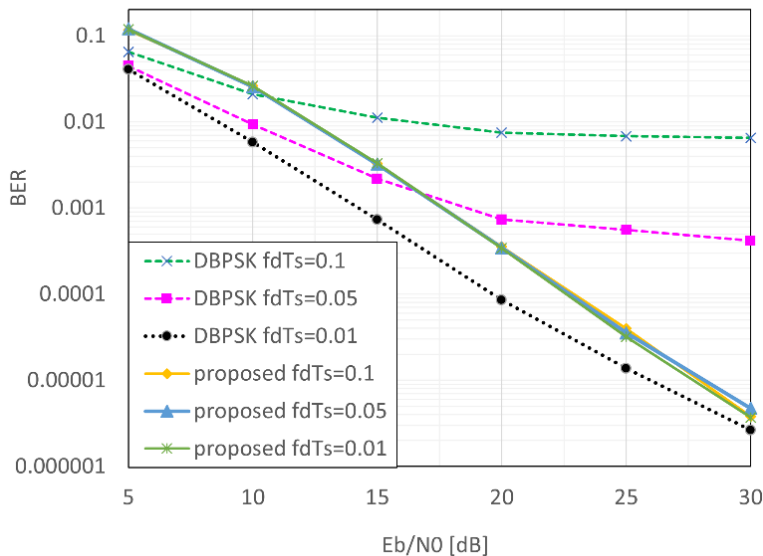


図 2. DBPSK と提案方式の LR 情報ビットのビット誤り率の比較

次に、図 1 で示した提案符号のシューベルト胞体行列に載せて送信する LR 情報ビットの誤り率を、正規化ドップラー周波数をパラメータとして、シングル送信アンテナによる差動 BPSK (DBPSK) とシミュレーションで比較した結果を図 2 に示す。ここで、正規化ドップラー周波数 $f_d T_s$ は、最大ドップラー周波数 f_d とシンボル周期 T_s の積で、移動体の速度が速くなり、ドップラー周波数が高くなると大きくなる値である。

図 2 の結果から、DBPSK は正規化ドップラー周波数 $f_d T_s$ が 0.05 と 0.1 のように非常に大きな値になるとエラーフロアが生じてしまうが、提案方式の方は $f_d T_s$ が大きくなっても、BER がほとんど変動していない。このように非常に高いドップラー周波数の場合でも、BER が変動せずに通信が可能な方式は、我々の知る限りこれまで提案されていないため、インパクトのある成果が得られたと考えている。

(3) シューベルト胞体行列を用いた MIMO 符号化の誤り率の理論式の導出

シミュレーションで上記のように良い結果が得られたので、これを裏付けるために、誤り率の理論式の導出を行った。送受信アンテナ 2 本の場合の通信路行列 H 、送信行列 S_t 、GLRT で用いるシューベルト胞体 S をそれぞれ以下の行列とし

$$\begin{bmatrix} h_{00} & h_{01} \\ h_{10} & h_{11} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} t_0 & 0 \\ 0 & t_1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

雑音行列 W の成分を w_{tn} とすると (ただし n は受信アンテナ数が N に対し $0 \leq n < N$ となる値)

$$\begin{aligned} Y^H S S^H Y &= \begin{bmatrix} (t_0 h_{00} + w_{00})^\dagger & (t_1 h_{10} + w_{10})^\dagger & (w_{20})^\dagger & (w_{30})^\dagger \\ (t_0 h_{01} + w_{01})^\dagger & (t_1 h_{11} + w_{11})^\dagger & (w_{21})^\dagger & (w_{31})^\dagger \end{bmatrix} S S^H \begin{bmatrix} t_0 h_{00} + w_{00} & t_0 h_{01} + w_{01} \\ t_1 h_{10} + w_{10} & t_1 h_{11} + w_{11} \\ w_{20} & w_{21} \\ w_{30} & w_{31} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} |t_0 h_{00} + w_{00}|^2 + |t_0 h_{01} + w_{01}|^2 & \cdots \\ \cdots & |t_1 h_{10} + w_{10}|^2 + |t_1 h_{11} + w_{11}|^2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

となり、送信行列 S_t とシューベルト胞体 S が同じ場合の GLRT トレース値は式 (2) となる。

$$\text{Trace} (Y^H S S^H Y) = |t_0 h_{00} + w_{00}|^2 + |t_0 h_{01} + w_{01}|^2 + |t_1 h_{10} + w_{10}|^2 + |t_1 h_{11} + w_{11}|^2 \quad (2)$$

また、1 列だけ異なる $S \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ で GLRT を行った際のトレース値は式 (3) となることから

$$\text{Trace} (Y^H S S^H Y) = |t_0 h_{00} + w_{00}|^2 + |w_{20}|^2 + |t_0 h_{10} + w_{10}|^2 + |w_{21}|^2 \quad (3)$$

つまり S_t と S に同じ列があればトレース値が雑音成分のみにはならず、同じ列がない S の場合は、 $\text{Trace} (Y^H S S^H Y) = |w_{10}|^2 + |w_{11}|^2 + |w_{20}|^2 + |w_{21}|^2$ となっている。送信行列側の送信時刻を t 、 S 側の異なる時刻を t' とすると、 k 列目が誤るのは、 $|t_t h_{tn} + w_{tn}|^2 < |w_{t'n}|^2$ の場合であるため、このようになる確率が判明すれば、そこから誤り率の導出が可能になる。

この $|h_{tn} + w_{tn}|^2 < |w_{t'n}|^2$ となる確率は、BPSK のレイリーフェージングにおける誤り率が、 $|h_{tn} + w_{tn}|^2 < |-h_{tn} + w_{t'n}|^2$ で表されることから、図 3 のオレンジ色の部分のように、送信電力を半分にした場合の BPSK の誤り率と同じであるとみなせる。レイリーフェージングにおける BPSK の誤り率の簡易な理論式は、SNR の値を ρ としたとき $P_r \leq 0.5(1.0 + \rho)^{-N}$ で与えられるので、送信電力を半分にすると $P_r \leq 0.5(1.0 + 0.5\rho)^{-N}$ となる。ただしこの誤り率は、一つの列の違いにのみ着目したものであるため、全ての行列ペア間での k 列異なるペアの割合を a_k とすると、符号全体の平均誤り率は、 $P_{ave} = \sum_{k=0}^{K-1} a_k P_r^k$ と表せる。この式は一系列のみ異なる行列に誤る確率が支配的であるため、さらにそれを考慮すると、最終的に、

$$P_{ave} = \sum_{k=0}^{K-1} a_k P_r^k \cong a_0 P_r = 0.5K(T - K)(1.0 + 0.5\rho)^{-N} \quad (4)$$

となり、提案している多重解像度 MIMO 方式のシューベルト胞体に載せた情報部分についての、誤り率の簡易な理論式が得られた。

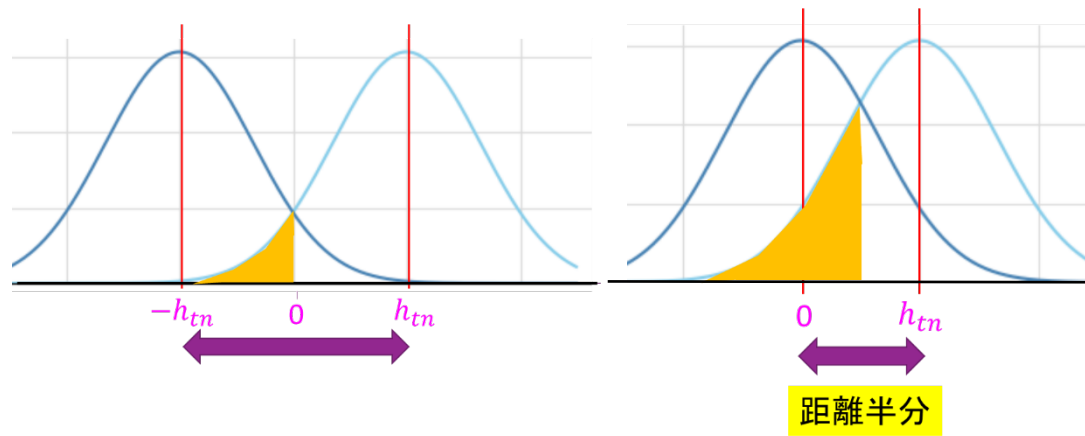


図 3. 左の BPSK の誤り率と右の提案方式の誤り率（オレンジ部分）の比較

得られた誤り率の簡易な理論式(4)と、シミュレーションでの誤り率の比較を行った結果を図 4 に示す。この図では、送信行列のサイズは、5 行 2 列、6 行 3 列、7 行 3 列、8 行 4 列の 4 種類を設定し、受信アンテナ数 2 本と 3 本それぞれに対して誤り率を比較している。得られた結果から、誤り率の簡易な理論式が、ほぼシミュレーション結果と一致していることがわかる。

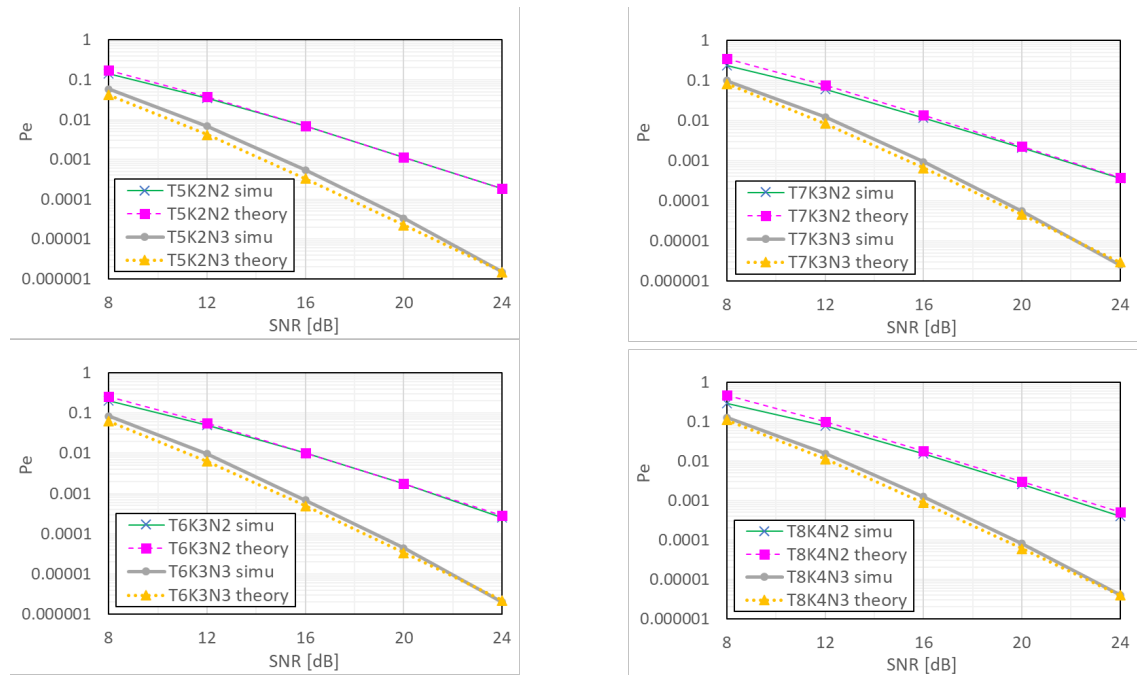


図 4. $f_d T_s = 0.1$ に対する多重解像度 MIMO 方式の LR 情報部分の誤り率の評価
(simu はシミュレーション結果、theory は理論式(4)の計算結果)

<引用文献>

- ① R. H. Gohary and H. Yanikomeroglu, "Noncoherent MIMO signaling for block-fading channels: approaches and challenges," IEEE Veh. Technol. Mag., Vol. 14, pp. 80–88, 2019.
- ② 池田 岳 「数え上げ幾何学講義 シューベルト・カリキュラス入門」 東京大学出版, 2018.
- ③ T. Konishi, et.al, "Novel MIMO method for high mobility environments using Schubert cell decomposition," IEICE ComEX, Vol. 11, pp. 679–683, 2022.
- ④ M. K. Simon and M. Alouini, "Digital Communication over Fading Channels," 2nd ed., Wiley IEEE Press, 2004.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Konishi Tatsumi, Nakano Hiroyuki, Yano Yoshikazu, Aoki Michihiro	4. 巻 11
2. 論文標題 Novel MIMO method for high mobility environments using Schubert cell decomposition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 679 ~ 684
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2022xb10106	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 KONISHI Tatsumi, NAKANO Hiroyuki, YANO Yoshikazu, AOKI Michihiro	4. 巻 E105.A
2. 論文標題 Spatial Vectors Effective for Nakagami- α Fading MIMO Channels	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 428 ~ 432
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transfun.2021TAL0001	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11件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 宮路直孝、小西たつ美
2. 発表標題 シューベルト胞体分割を用いた空間シフトキーイングの性能
3. 学会等名 令和5年度電気・電子・情報関係東海支部連合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Naotaka Miyaji, Tatsumi Konishi
2. 発表標題 A Study on Average Error Probability of Noncoherent MIMO Scheme Using Cell Decomposition
3. 学会等名 The 46th Symposium on Information Theory and its Applications
4. 発表年 2023年

1 . 発表者名 Tatsumi Konishi, Naotaka Miyaji
2 . 発表標題 Error Performance Analysis of MIMO Communications Using Manifold Properties
3 . 学会等名 IEICE Technical Report RCS2023-104
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 Tatsumi Konishi
2 . 発表標題 A Study on Bit Error Rate of MIMO Scheme Effective for High-Speed Mobile Communications
3 . 学会等名 IEICE Technical Report RCS2022-124
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Tatsumi Konishi, Naotaka Miyaji
2 . 発表標題 Performance Analysis of MIMO Communication Using Decomposition of Grassmann Manifold
3 . 学会等名 The 45th Symposium on Information Theory and its Applications
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Tatsumi Konishi, Naotaka Miyaji
2 . 発表標題 Sparse Spatial Modulation Scheme Effective for Ultrafast Mobile Communications
3 . 学会等名 International Symposium on Information Theory and Its Applications (ISITA) 2022 Poster Review (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1. 発表者名 小西 たつ美
2. 発表標題 多様体の性質を用いた非コヒーレントMIMO符号の一検討
3. 学会等名 信学技報, vol. 121, no. 153, RCS2021-113, pp. 75-78, 2021年8月
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tatsumi Konishi
2. 発表標題 A study on noncoherent multi-resolution MIMO communications
3. 学会等名 信学技報, vol. 121, no. 391, RCS2021-258, pp. 43-47, 2022年3月.
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tatsumi Konishi
2. 発表標題 Non-Coherent MIMO Communication Methods Using Schubert Cell Decomposition
3. 学会等名 情報理論とその応用シンポジウム SITA2021 5.2.2 2021年12月
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tatsumi Konishi, Hiroyuki Nakano, Yoshikazu Yano, Michihiro Aoki
2. 発表標題 Performance analysis of spatial signal vectors over Nakagami fading channels
3. 学会等名 IEICE Tech. Rep., vol. 120, no. 204, RCS2020-94, pp. 13-17, Oct. 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tatsumi Konishi, Hiroyuki Nakano, Yoshikazu Yano, Michihiro Aoki
2. 発表標題 Robust transmission method against millimeter wave channels
3. 学会等名 IEICE Society Conference 2020, September 15-18, 2020
4. 発表年 2020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
---------	---------