

令和元年6月3日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K18073

研究課題名(和文)次世代航空通信向けマルチユーザMIMO技術の開発及び航空機縮尺モデルを用いた評価

研究課題名(英文)Development of multiuser MIMO signal processing system for a future aeronautical communication system

研究代表者

森岡 和行(Morioka, Kazuyuki)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・電子航法研究所・研究員

研究者番号：80711316

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)：本研究では、長距離伝送で高信頼性が要求される航空無線通信システムに対して、MIMOの信頼性向上を目的としたSpace Time Block Code (STBC)と長距離伝送に適したContinuous Phase Modulation (CPM)を組み合わせたSTBC-CPM (Space Time Block Coded-Continuous Phase Modulation)方式の提案を行った。さらにSTBCの符号化方式として非直交符号を適用することによって周波数利用効率を改善できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

航空通信分野において、WiMAX規格に基づく次世代航空無線通信システムAeroMACS(Aeronautical Mobile Airport Communications System)の検討が行われており、将来的にMIMO技術の導入が期待されている。本研究成果は、MIMO技術の航空無線通信システムへの適用について検討したものであり、将来の航空無線システムの信頼性向上に役立てることができる。また、航空無線通信のみならず、IoT通信や衛星通信等への適用も期待できる。

研究成果の概要(英文)：Continuous phase modulation (CPM) has constant envelope and good spectral properties. Therefore, it is suitable for aeronautical communication systems that require high reliability in long distance communication.

On the other hand, recent broadband mobile communication systems use space time block codes (STBCs) to obtain channel gain using multiple antennas. STBC-CPM is a combination of STBC and CPM, having the advantages of both techniques. We proposed STBC-CPM system which has spectral efficiency and power efficiency at the same time. The spectral efficiency of STBC-CPM was compared, then we found that non-orthogonal STBC can be used to improve the spectral efficiency of STBC-CPM system.

研究分野：無線通信システム

キーワード：MIMO STBC CPM

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

マルチユーザ MIMO (Multiple Inputs and Multiple Outputs) システムは、複数の端末と基地局の間で同時に無線伝送を行うことにより、システム全体の周波数利用効率を向上させる技術であり、近年盛んに研究が行われている。商用システムでは LTE-Advanced, WiMAX2 等において本技術の導入が行われている。航空通信分野においても、WiMAX 規格に基づく次世代航空無線通信システム AeroMACS (Aeronautical Mobile Airport Communications System) の検討が行われており、将来的にマルチユーザ MIMO 技術の導入も期待される。このような背景に基づき本研究では、MIMO の航空無線通信システムへの適用について検討した。

### 2. 研究の目的

航空無線通信は一般的にセルラー通信よりも長距離伝送が必要となる。また、航空機の安全運航に関わる通信を行うため、高い信頼性が要求される。次世代航空無線通信システムである AeroMACS にも MIMO の動作モードとして複数アンテナを利用した信頼性向上技術である STBC (Space Time Block Code) が用いられている。航空機は携帯端末に比べてアンテナを配置するスペースが大きく、電源についても携帯端末程シビアではない。そのため航空機への MIMO の適用は有効と考えられる。そこで、本研究では、MIMO、特に通信の信頼性を向上させる STBC に着目し、航空無線通信システムに適した MIMO 信号処理方式を提案することで、より信頼性の高い次世代航空無線通信システムの基盤技術の開発をめざした。

### 3. 研究の方法

研究代表者はこれまでに長距離伝送に適した連続位相変調方式 (CPM: Continuous Phase Modulation) の研究に携わっており、CPM を用いて MIMO の伝送特性を改善できないか検討を行った。研究期間の1年目から3年目にかけて、シミュレーションによる検討、及び理論検討を実施した。最終年度には、ソフトウェア無線 (SDR: Software Define Radio) を用いた評価環境の構築を実施した。

### 4. 研究成果

本研究を通して、長距離伝送で高信頼性が要求される航空無線通信システムに対して、MIMO の信頼性向上を目的とした Space Time Block Code (STBC) と長距離伝送に適した Continuous Phase Modulation (CPM) を組み合わせた STBC-CPM (Space Time Block Coded-Continuous Phase Modulation) 方式の提案を行った。さらに STBC の符号化方式として非直交符号を適用することによって周波数利用効率を改善できることを示した。

#### (1) 4 送信アンテナの場合

STBC-CPM 方式の元となる STBC に準直交符号を適用し、シミュレーションにより周波数利用効率の比較を行った。図 1 に元となる直交符号と準直交符号の例を示す。また、図 2 に周波数利用効率の比較結果を示す。図 2 より、準直交符号を用いることにより、周波数利用効率が 0.5 bit/s/Hz 向上したことが確認できる。

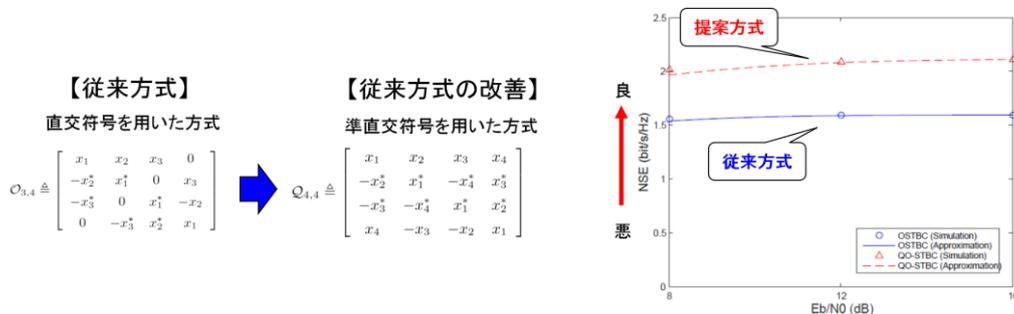


図 1. 4 送信アンテナの場合の準直交符号の適用例

図 2. 周波数利用効率評価

#### (2) 8 送信アンテナの場合

STBC-CPM 方式の 8 送信アンテナの場合についてシミュレーションを実施し、MIMO 符号化として用いる符号の直交性を犠牲にすることで送信レートを向上し、結果として周波数利用効率 (NSE: Normalized Spectral Efficiency) が改善されることを確認した。図 3 に提案した非直交符号を示す。また図 4 に様々な符号を用いた場合の周波数利用効率の比較結果を示す。図 4 中の「OSTBC」は MIMO 符号化として用いる符号が直交符号の場合を示しており、その他比較とし

て準直交符号である「Toeplitz Code」を用いた場合、その発展形である「GOTC-0 (Group Orthogonal Toeplitz Code)」を用いた場合を示している。なお、図中「GOTC-0」の後の数値は、符号作成の際のグループ化率を示している。また、「Q-GOTC」は提案する非直交符号を用いた場合の結果を示している。図より、提案方式を用いることにより、直交符号を用いた場合に比べて周波数利用効率が大幅に改善している様子が分かる。さらに、提案方式は、同程度の周波数利用効率を実現できる「Toeplitz Code」や「GOTC-0(2,2)」と比較してブロック長が短いという特徴があり、復号遅延を小さくできるという利点がある。

$$\mathcal{G}_{4,4} = \begin{bmatrix} X_{(1)} & X_{(2)} & X_{(3)} & X_{(4)} \\ -X_{(2)}^* & X_{(1)}^* & -X_{(4)}^* & X_{(3)}^* \\ -X_{(3)}^* & -X_{(4)}^* & X_{(1)}^* & X_{(2)}^* \\ X_{(4)} & -X_{(3)} & -X_{(2)} & X_{(1)} \end{bmatrix}$$

$$X_{(1)} = \begin{bmatrix} x_1 & 0 \\ x_2 & x_1 \\ x_3 & x_2 \\ x_4 & x_3 \\ x_5 & x_4 \\ 0 & x_5 \end{bmatrix}, X_{(2)} = \begin{bmatrix} x_6 & 0 \\ x_7 & x_6 \\ x_8 & x_7 \\ x_9 & x_8 \\ x_{10} & x_9 \\ 0 & x_{10} \end{bmatrix}, \tilde{X}_{(1)} = \begin{bmatrix} x_5 & 0 \\ x_4 & x_5 \\ x_3 & x_4 \\ x_2 & x_3 \\ x_1 & x_2 \\ 0 & x_1 \end{bmatrix}, \tilde{X}_{(2)} = \begin{bmatrix} x_{10} & 0 \\ x_9 & x_{10} \\ x_8 & x_9 \\ x_7 & x_8 \\ x_6 & x_7 \\ 0 & x_6 \end{bmatrix}$$

$$X_{(3)} = \begin{bmatrix} x_{11} & 0 \\ x_{12} & x_{11} \\ x_{13} & x_{12} \\ x_{14} & x_{13} \\ x_{15} & x_{14} \\ 0 & x_{15} \end{bmatrix}, X_{(4)} = \begin{bmatrix} x_{16} & 0 \\ x_{17} & x_{16} \\ x_{18} & x_{17} \\ x_{19} & x_{18} \\ x_{20} & x_{19} \\ 0 & x_{20} \end{bmatrix}, \tilde{X}_{(3)} = \begin{bmatrix} x_{15} & 0 \\ x_{14} & x_{15} \\ x_{13} & x_{14} \\ x_{12} & x_{13} \\ x_{11} & x_{12} \\ 0 & x_{11} \end{bmatrix}, \tilde{X}_{(4)} = \begin{bmatrix} x_{20} & 0 \\ x_{19} & x_{20} \\ x_{18} & x_{19} \\ x_{17} & x_{18} \\ x_{16} & x_{17} \\ 0 & x_{16} \end{bmatrix}$$

図 3. 8 送信アンテナの場合の非直交符号

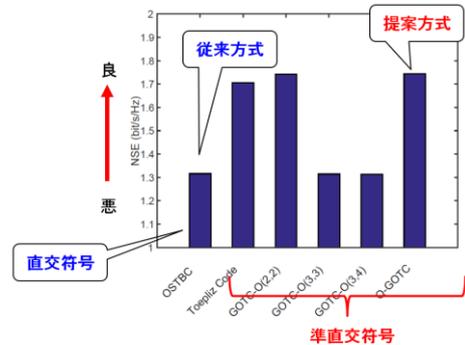


図 4. 様々な符号を用いた周波数利用効率評価

### (3) SDR を用いた評価環境の構築

最終年度には、提案方式の有効性を実証するための評価環境の構築を行った。評価環境は、Xilinx 社製の Zynq-7000 All Programmable SoC を搭載した評価ボード (Zedboard) と Analog Devices 社製の広帯域トランシーバ AD9361 を組み合わせて簡易な SDR (Software Defined Radio) 環境として構築した。図 5 に評価システムの概要を示す。また、システムを用いて基本性能評価を行った。図 6 に評価結果を示す。図 6 よりシステムの最大スループットである 8Mbps が実現できていることが確認でき、本 SDR 評価システムを用いて様々な周波数、パラメータにて評価可能であることが確認できた。最後に、電波無響室にて実際に電波を放射しての送受信評価を実施した (図 7)。

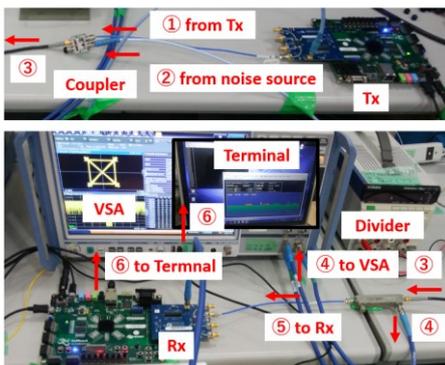


図 5. 開発した SDR 評価環境

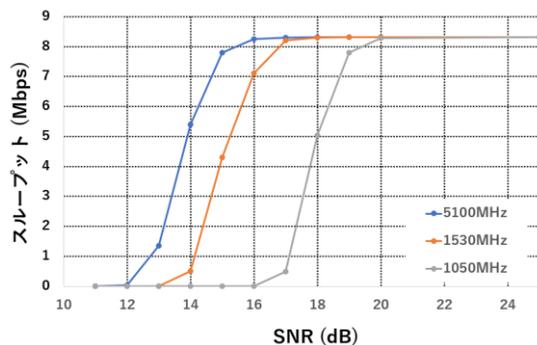


図 6. 基本性能評価結果

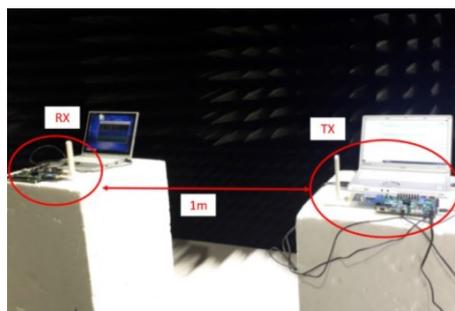


図 7. 電波無響室での評価実験の様子

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 1 件）

- [1] Kazuyuki MORIOKA, Satoshi YAMAZAKI, David ASANO, “Improving Spectral Efficiency of Non-Orthogonal Space Time Block Coded-Continuous Phase Modulation”, IEICE Transactions on Communications, E101.B, 2024~2032, 2018. (査読あり)  
DOI: 10.1587/transcom.2018EBP3018

〔学会発表〕（計 10 件）

- [1] Kazuyuki MORIOKA, Naoki KANADA, Shunichi FUTATSUMORI, Akiko KOHMURA, Naruto YONEMOTO, Yasuto SUMIYA, “Throughput and Frame Error Rate Evaluation in different frequencies for Integrated-Aeronautical Mobile Communication Terminal”, 14th International Conference on Space, Aeronautical and Navigational Electronics 2018, 2018.  
[2] 森岡 和行, 金田 直樹, ニッ森 俊一, 河村 暁子, 米本 成人, 住谷 泰人, “SDR の航空無線への応用に関する基礎検討～統合型航空無線通信端末のスループット評価～”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会 2018, 2018.  
[3] 森岡 和行, 金田 直樹, ニッ森 俊一, 河村 暁子, 米本 成人, 住谷 泰人, “複数の周波数・通信方式に対応した統合型航空無線通信端末の実装と基本評価”, 日本航空宇宙学会飛行機シンポジウム 2018, 2018.  
[4] 森岡 和行, 金田 直樹, ニッ森 俊一, 河村 暁子, 米本 成人, 住谷 泰人, “プログラマブル SoC と広帯域トランシーバを用いた再構成可能な統合型航空通信端末に関する一検討”, 電子情報通信学会総合大会, 2018.  
[5] Kazuyuki MORIOKA, Satoshi YAMAZAKI, David ASANO, “Study on Spectral Efficiency for STBC-CPM with Two and Four Transmit Antennas”, IEEE International Symposium on Signal and Information Technology (ISSPIT 2017), 2017.  
[6] 山崎 悟史, 森岡 和行, “マルチアンテナシステムの基礎と動向”, 電気学会電子・情報・システム部門大会, 2017.  
[7] Kazuyuki MORIOKA, Satoshi YAMAZAKI, David ASANO, “BER Approximation of BBOST-CPM with Quasi-OSTBC”, The International Symposium on Information Theory and Its Applications 2016, 2016.  
[8] 森岡 和行, 金田 直樹, ニッ森 俊一, 河村 暁子, 米本 成人, 住谷 泰人, アサノ デービッド, “連続位相変調方式を用いた時空間ブロック符号に関する一検討～変調パラメータと占有帯域幅に関する考察～”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会 2015, 2015.  
[9] 森岡 和行, 金田 直樹, ニッ森 俊一, 河村 暁子, 米本 成人, 住谷 泰人, アサノ デービッド, “BBOST-CPM 方式のパラメータ最適化に関する基礎検討”, 電子情報通信学会 RCS 研究会, 2015.  
[10] Kazuyuki MORIOKA, Naoki KANADA, Shunichi FUTATSUMORI, Akiko KOHMURA, Naruto YONEMOTO, Yasuto SUMIYA, David Asano, “Occupied Bandwidth Comparison of BBOST-CPM with Two Transmit Antennas”, The International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2015), 2015.

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

なし

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：アサノ デービッド

ローマ字氏名：David Asano

研究協力者氏名：山崎悟史

ローマ字氏名：Satoshi Yamazaki

※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、研究者個人に帰属されます。