

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06068

研究課題名(和文) Bent型ZCZ符号を用いた高効率・高信頼CDMA方式に関する研究

研究課題名(英文) Study on highly efficient and reliable CDMA systems using Bent ZCZ codes

研究代表者

松藤 信哉 (MATSUFUJI, Shinya)

山口大学・大学院創成科学研究科・教授

研究者番号：00173873

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：複数移動端末が動的に無線ネットワークを柔軟に構築可能な干渉の無い符号分割多元接続方式(ZCZ-CDMA)の高信頼、高効率化について探索した。これには、零相関領域以外の相関関数も全体的に低く抑えられる新しいBent型ZCZ符号の設計、受信信号とZCZ符号の全ての系列との相関を出力できるマッチドフィルタバンク(MFB)のコンパクトな設計、MFBを用いた高速同期捕捉回路の提案、そして、複素アダマール変換を適用した高速伝送のためのブロック符号化方式の構築などが含まれる。

研究成果の概要(英文)：We have searched for reliable and high efficiency of code division multiple access system without interference (ZCZ - CDMA), which multiple mobile terminals can dynamically construct wireless network flexibly. This includes the design of new bent ZCZ codes whose correlation functions are totally low except the zero correlation zone, the design of a compact matched filter bank (MFB) that can output the correlation between the received signal and all sequences of the ZCZ code, the proposal of a high-speed synchronous acquisition circuit using MFB, and the construction of a block coding method for high-speed transmission applying complex Hadamard transform.

研究分野：情報通信工学

キーワード：近距離無線通信 CDMA ZCZ系列 高信頼 高効率 超遅延

1. 研究開始当初の背景

IoT ビジネスへの市場への期待とともに、近距離無線通信分野の通信方式のさらなる開発・規格化が行われてきている。しかし、以前、活発に議論されていた高度道路交通情報システム分野やロボット産業分野での複数移動端末が動的にアクセスできる無線ネットワークシステムの構築や実用化は、頓挫している。それは、既存の通信方式の適用では限界がある。その実現のためには、どのような通信路においても、複雑な通信制御を行うことなく、複数移動端末間で、低コストかつ柔軟に無線ネットワークを構築できる通信方式が要求される。すなわち、複数端末が瞬時にアクセスでき、各々がリアルタイムに情報伝送できる通信方式である。

研究代表者等は、今までに、上記のような応用を想定しながら、それに十分に対応可能である CDMA 方式 (ZCZ-CDMA) について探索してきた。これは、拡散符号として零相関領域 (Zero Correlation Zone) を有する系列セットである ZCZ 符号 (研究代表者等が命名) を用い、通信エリア内で送信される同期制御信号によりタイミングを合わせて複数端末が同時に情報を送受信するような準同期方式である。これにより、非希望波の他局間干渉が無く、希望信号の遅延波による符号間干渉を除去、あるいはその遅延波を有効活用して通信性能を高めることができる。すなわち、複数端末が各々、同時に伝送していたとしても、1対1通信のように振る舞う。

今までに、上記の実用化を想定した上で、研究代表者等は、系列数が数学的上界に到達する ZCZ 符号の設計に関する研究や回路素子を最小限に抑え低価格かつ高機能を有する ZCZ-CDMA の設計について研究を行ってきた。しかし、伝送速度が速くなるに伴いマルチパスフェージング通信路上 (超遅延) での予期せぬ干渉や同期ずれによる影響により通信性能は劣化してしまう。

2. 研究の目的

本研究では、想定外の通信路環境においても、高効率かつ高信頼性を有す ZCZ-CDMA の構築する以下の項目について探索する。

(1) Bent 型 ZCZ 符号の設計

ZCZ 符号の周期自己・相互相関関数は、情報シンボルを ZCZ 符号の中の一つの系列により拡散された送信信号が理想の通信路上で受信された場合における希望波と非希望波に対する ZCZ 系列との相関 (マッチドフィルター) 出力特性に相当する。同期ずれや超遅延波による影響を最小に抑えるためには、ZCZ 符号も全体的に自己・相互相関関数が全体的に低いことが要求される。一般には、零相関領域 (Zcz) を有することから特異な相関関数を有するために大きな相関値が時々現れる。それを解決するために、各系列のアダマール変換の全てが絶対値が 1 となる Bent

型 ZCZ 符号を提案し、その構成法やその乱数的性質について探索する。

(2) 高信頼 ZCZ-CDMA 方式の構築

情報シンボル列 (ブロック) を同じ系列で拡散して、それらをインターリーブして送信するブロック符号化 ZCZ-CDMA 方式のさらなる高効率化、高安定化について探索する。これは、超遅延に対して、端末数を保持したまま、零相互相関領域を拡大させて他局間干渉を除去することが可能である。しかし、自己相関特性に相当する希望波とのマッチドフィルター出力は、Zcz チップ毎に、各情報に相当するピーク値が現れてしまい、自局の符号間干渉が現れる。それをチャンネル推定による復調方式により除去する必要があるが、ブロック長を大きくするに伴い、雑音の影響も加わり、誤り率が増加してしまう。その問題解決のために、情報ブロックを直交 (ユニタリ) 変換を用いて情報拡散し、送信する方式を提案する。

(3) コンパクトな送受信回路の設計

無線ネットワークを柔軟に構築できるコンパクトなブロック符号化 ZCZ-CDMA の送受信回路の設計について探索する。基本的には、室内での通信においては、ZCZ 符号の中の一つの系列を同期制御信号用に利用し、その全ての系列と受信信号との相関出力を同時に得ることができるマッチドフィルターバンク (MFB) を基盤とする。これには、Bent 型 ZCZ 符号の MFB の設計やこれを適用した高速アクセス・同期制御を可能とする同期捕捉回路の設計、複数端末が同時伝送可能な通信回路の設計、さらには、関連研究として、光無線通信方式や ZCZ 符号の MFB の考察や無線伝送のための高信頼、高速伝送のための伝送方式等の諸技術も含まれる。

3. 研究の方法

研究代表者 (松藤) が中心となり、研究分担者 (松元, 井田) と博士学生 1 名が主に、上記の研究項目について、ほぼ同時平行しながら研究を遂行してきた。理論の検証や計算機シミュレーションによる性能評価には、主に MATLAB を用いる。また、ハードウェアの性能や検証のためには、システム開発ソフトウェア LabVIEW と MATLAB を併用し、さらに、ソフトウェア無線機 USRP を使用した。月に 1 度ほど、研究の促進や研究のまとめのための研究打合せ合同ゼミを開催した。その中で、さらなる検討、発展、そして、関連する諸技術についても探索した。

4. 研究成果

研究の目的で述べた項目にあわせて、研究成果を以下の通り報告する。

(1) Bent 型 ZCZ 符号の設計

①素数 p において、周期 $N=p^{n+s}$, 系列数 $M=p^{n-1}$,

零相関領域 $Z_{cz}=p^{s+n-1}$ となる p 相あるいはそれ以上の多相の ZCZ 符号 $A(N, M, Z_{cz})$ の構成法を明確化し、有限体 $GF(p)$ 上で表現可能な論理関数（発生関数）を公式化した。また、ZCZ 符号が bent となる論理関数の条件を導いた。ここで、 $p=2$ として n が奇数の場合には 2 相 Bent 型 ZCZ 符号は存在せず、4 相とすれば存在すること等も示している。

② ZCZ 符号の相関関数について比較、考察した。非 Bent 型では、自己および相互相関関数は、系列によってバラツキがあり、大きな相関値が現れる。一方、Bent 型は、周期および非周期および周期自己相関関数はどれもほぼあり、全体的に低く抑えられている。また、周期および非周期相互相関関数においても同様に全体的にどれとの系列間においても同じように低くおさえられることが確認できる。さらに、異なる ZCZ 符号間での相互相関においても、非 Bent 型は、バラツキが大きい、Bent 型は全体的に低く、平均化されることが確認できる。図 1 は、非 Bent 型と Bent 型 ZCZ 符号 $A(32, 16, 1)$ の場合の非周期自己相関関数の絶対値の平均の例を示す。このように、Bent 型 ZCZ 符号は、擬似乱数的性質を有しており、ZCZ-CDMA の拡散符号に適している。特に、 $s=0$ の場合は、数学的上界 $M \leq N/(1+Z_{cz})$ に到達し、 $p=3$ の場合の 3 相 ZCZ 符号 $A(3^n, 3^{n-1}, 2)$ は超遅延への耐性の観点からも有効であることを指摘した。

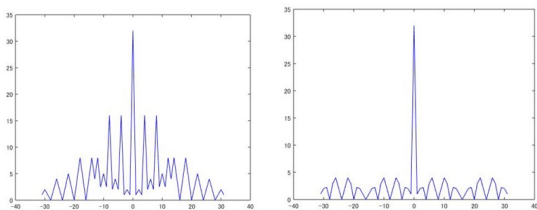


図 1. 非 Bent 型と Bent 型の自己相関特性

(2) 高信頼 ZCZ-CDMA の構築

① Bent 型 ZCZ 符号と非 Bent 型 ZCZ 符号における超遅延や同期ずれに対する耐性について考察した。たとえば、ZCZ 符号 $A(32, 16, 1)$ を使用し、4 パス等電力レイリーフェージング環境におけるビットエネルギー対雑音電力密度比に対する誤り特性を図 2 に示す。ブロックサイズ $K=8$ に対して遅延波が 4 チップを超えた場合 ($L=12$) では、Bent 型のほうが

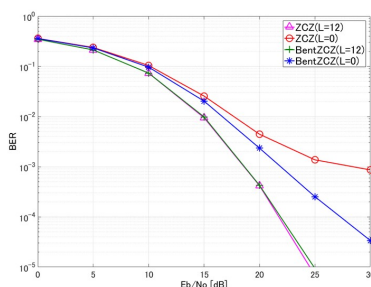


図 2. Bent 型と非 Bent 型の誤り特性の比較

誤り特性の劣化が小さい（干渉への耐性が高い）ことが分かる。ここで、 $L=0$ は何も遅延波が無い場合であり、 $L \leq K=8$ まではほぼ同じ特性である。これからも分かるように、Bent 型 ZCZ 符号は想定外の超遅延に対しても耐性が高く、誤り率が改善されることが示された。これは、同期が外れたとしても、一般に議論されている非同期 CDMA 方式と同じ振る舞いであることを意味する。

② 高速伝送に対応するためのブロック符号化 ZCZ-CDMA のさらなる高信頼化のために、情報ブロックをブロック符号化の前段に 2 値アダマール行列（変換）により拡散し、受信側の逆ブロック符号化の後段にその逆変換を施す方式を提案した。これは、大きな干渉や雑音に対しても全体に逆拡散することにより、チャンネル推定による復調に対する耐性を高める方式である。回路規模を減少させるように、ブロックサイズは $K=2^k$ として、高速アダマール変換可能な次数 K の 2 値アダマール行列を用いる。例として、図 3 に示すように、ZCZ 符号 $A(32, 16, 1)$ に対して、 $K=8, 16, 32$ と増加させても、ほとんど誤り特性は劣化しないことが確認できる。これらにより、本提案の有効性は示された。

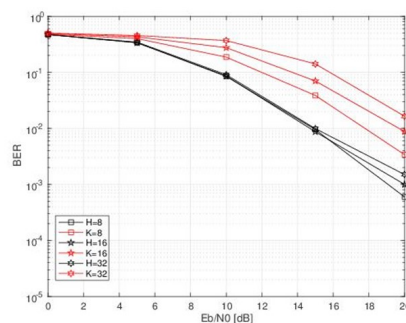


図 3. アダマール変換の適用との比較

③ 上記の研究の拡張として、マルチキャリア ZCZ-CDMA の基盤となる直交周波数分割多重 (OFDM) のピーク信号対雑音電力比 (PSNR) に対する通信性能向上について探索した。これは、逆高速フーリエ変換 (IFFT) した情報シンボルに大きな値が出現し、瞬時送信電力は大きく変動してしまう。これにより、アナログ電力増幅器の効率は低下し、移動端末の電力消費は増大する。今までに、次数 $N=2^n$ の高速フーリエ変換 (FFT) の前段に位相が一致しないように次数の異なる（高速処理できない）複数のフーリエ変換 (DFT) を適用することにより、PSNR 問題を解決し、かつ、誤り率を改善できることが示されている。本考察では、高速アダマール変換可能な p 相アダマール変換を適用した場合等、詳細に調べ、有効性を示した。たとえば、 $N=128$ では 125 次 5 相アダマール行列は、PSNR も誤り特性もほぼ最適に近くなる。さらに、OFDM のパイロット信号の構成法を提案し、それらの雑音への耐性を高められることも示している。

(3) コンパクトな ZCZ-CDMA の設計

通信エリア内の同期制御端末から同期制御信号が一定間隔毎に送信されていると仮定する. 送信端末は, そのタイミングに合わせて, 拡散された複数情報シンボルからなる情報フレームを同期制御信号と重ならないように送信する. 受信端末は, 遅延波や雑音の影響を受けた各端末からの送信信号が各々加算された信号をそのタイミングに合わせて受信し相関復調する. ここで, 零相関領域上で周期性が保証されているのであれば, 超遅延でも無干渉となる. 以下, 実現性に向けた回路規模の最小化を探索する.

① Bent 型を含む ZCZ 符号 $A(p^n, p^{n-1}, p-1)$ の MFB は, 回路素子を最小に抑えてコンパクトに回路設計できることを示した. これは, p^{n-1} 次複素アダマール行列を p 段用いて表すことが可能であり, また, p^{n-1} 次複素アダマール行列は, p^{n-1} 個だけ非零の要素からなる $n-1$ 個の p^{n-1} 次行列に因子分解できる. これにより, 回路素子数を $O(p^{2n-1})$ から $O(np^n)$ へ回路素子数を低減できることを示している. また, 実際にそれをシステムソフトウェア LabVIEW より試作している. 図4は, ZCZ 符号 $A(32, 16, 1)$ の MFB の例である. また, 同様にして, 光無線において使用可能な ZCZ 符号の MFB の設計を行い, 回路を試作している.

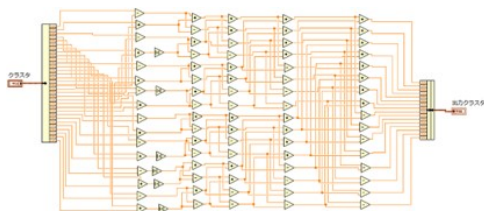


図 4. ZCZ 符号 $A(32, 16, 1)$ の試作

② ZCZ 符号の 1 つの系列を同期制御信号に適用することにより, 1 フレーム間で瞬時に同期制御信号の同期点を検出可能な同期捕捉回路を提案した. これは, 回路素子を最少化できる MFB と同期制御区間内では他の送信信号は現れないことを利用して, 同期制御信号に適用する系列と受信系列との相関の絶対値を分子に, それ以外の系列との相関の絶対値の総和を分母にした評価式を計算し, 同期点を検出する. 図5の左図は, 基本的な同期検出法である同期制御用系列と受信系列との相関出力を示す. 受信系列は各端末の送信信号が多重化されているので, 図の左側の同期制御区間以外も大きなピーク値が現れてしまう. そのため, 同期点を探すためには, ピーク値とサイドローブ値の両方を観測する必要があり, 少なくとも 2 回以上のフレームを観測する必要がある. しかし, 右図に示すように, 提案法では, 同期点のみ大きなピーク値が現れるので, 1 フレームだけで同期点を検出できる. いくつかの通信路環境下において, 同期検出誤り率を低く抑えられることを示している. また, LabVIEW により

同期補足回路を試作し, USRP により動作確認している.

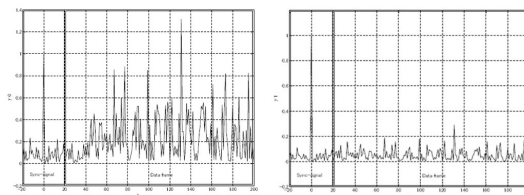


図 5. 従来法と提案法の相関出力

③室内では, ZCZ 符号の中の一つの系列を同期制御信号用に利用する上記の同期捕捉回路を適用し, 各端末からの受信信号との相関出力を同時に得ることができるマッチドフィルタバンク (MFB) を基盤とする図6に示すコンパクトな送受信回路設計について, 通信プロトコルを想定した上で議論した. これには, 複数端末が同時伝送可能な通信回路の設計, レイク受信のための回路削減なども含まれる. 送受信回路は, 同期制御信号発生器としても兼用可能であり, 全ての相関を同時に並列処理する機能を備えれば, アクセスポイントとしても利用できる. すなわち, インフラストラクチャーモードとアドホックモードを同時に利用した無線ネットワークを構築できることを意味する.

さらに, 本設計にも関係する OFDM における MIMO 技術に関して探索しているが, これらも ZCZ-CDMA にうまく適用できるものと考えている. さらに, 光無線伝送方式のようなマルチパスが現れない通信路環境においても, ZCZ 符号は, 受信回路の遅延による干渉に対して耐性が高いことも示している. このようなことから, ZCZ-CDMA は, ニーズに柔軟に対応可能な無線ネットワークシステムを実現できるものと期待できる.

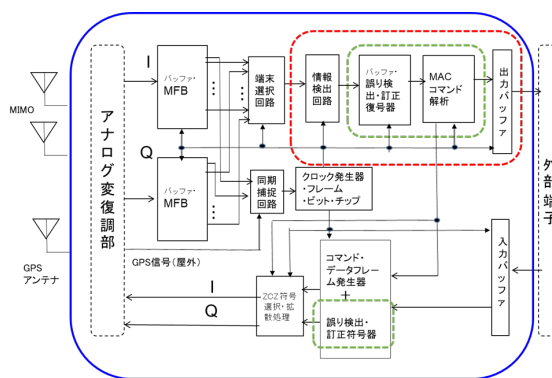


図 6. MFB に基づく送受信回路の設計

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

- ① Takahiro Matsumoto, Hideyuki Torii, Yuta Ida, Shinya Matsufuji, Modified Mutually ZCZ Set of Optical Orthogonal Sequences, IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E101-A, No. 12, 査読有, 2018 (採録済).

- ② Yuta Ida, Takahiro Matsumoto, Shinya Matsufuji, Packet Splitting and Adaptive Modulation Based on CSI of Time Domain for Decode-and-Forward Cooperative OFDM Systems in Different Channel Model, International Journal of Communication Systems, Vol. 31, Issue 2, pp. 1-17, 査読有, 2018.
- ③ Takahiro Matsumoto, Hideyuki Torii, Yuta Ida, Shinya Matsufuji, BER Performance of SS System Using a Huffman Sequence Against CW Jamming, IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E101-A, No. 1, pp. 167-175, 査読有, Jan. 2018.
- ④ Sho Kuroda, Shinya Matsufuji, Yuta Ida, Takahiro Matsumoto, High-Speed Synchronization Acquisition Methods of Quasi-Synchronous CDMA, Journal of Signal Processing, Vol. 21, No. 6, pp. 273-279, 査読有, Nov. 2017.
- ⑤ Yasuaki Ohira, Takahiro Matsumoto, Hideyuki Torii, Yuta Ida, Shinya Matsufuji, Code Generator for an Optical ZCZ Sequence with Zero-Correlation Zone 2z, Journal of Signal Processing, Vol. 21, No. 6, pp. 265-272, 査読有, Nov. 2017.
- ⑥ Yuta Ida, Chang-Jun Ahn, Takahiro Matsumoto, Shinya Matsufuji, Four Time Windows Averaging Channel Estimation With Real and Imaginary TFI Pilot Signals for OFDM, IEICE Communications Express, Vol. 6, No. 10, pp. 590-595, 査読有, 2017.
- ⑦ Takafumi Hayashi, Yoshida Watanabe, Toshiaki Miyazaki, Anh Pham, Takao Maeda, Shinya Matsufuji, A Novel Class of Quadriphase Zero-Correlation Zone Sequence Sets, IEICE Trans. Fundamentals of Electronics, E100-A, pp. 953-960, 査読有, April 2017.
- ⑧ Yuta Ida, Chang-Jun Ann, Takahiro Matsumoto, Shinya Matsufuji, Achievement Accurate CSI for AF Relay MIMO/OFDM Based on Complex HTRCI Pilot Signal with Enhanced MMSE Equalization, IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E98-A, No. 11, pp. 2254-2262, 査読有, Nov. 2015.
- ⑨ Yuta Ida, Masanori Yofune, Chang-Jun Ahn, Takahiro Matsumoto, Shinya Matsufuji, Estimation Based on Weighted Channel Variance for HTRCI-MIMO/OFDM with QRM-MLD and Channel Ranking under Fast Fading Channel, Trans. on Emerging Telecommunications Technologies, Vol. 26, Issue 7, pp. 1050-1059, 査読有, July 2015.

[学会発表] (計 56 件)

- ① Yasuaki Ohira, Takahiro Matsumoto, Hideyuki Torii, Yuta Ida, Shinya Matsufuji, A Compact Matched Filter Bank for an Optical ZCZ Sequence Set with Zero-

Correlation Zone 2z, IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E101-A, No. 1, pp. 195-198, Jan. 2018.

- ② Takahiro Matsumoto, Hideyuki Torii, Yuta Ida, Shinya Matsufuji, Theoretical Analysis of BER Performance of OCDMA System Using Compact Matched Filter Bank for an Optical ZCZ Sequence Set, Proc. of WPMC2017, pp. 314-318, Dec. 2017.
- ③ Shinya Matsufuji, Sho Kuroda, Yuta Ida, Takahiro Matsumoto, "A Study on Matched Filter Banks of P-Phase ZCZ Codes, Proc. of WPMC2017, pp. 201-204, Dec. 2017.
- ④ Naoya Murokawa, Yuta Ida, Takahiro Matsumoto, Shinya Matsufuji, Iterative Equalization Based on Estimated Variance and Threshold for Massive MIMO with Spatial Modulation, Proc. of NOLTA2017, B2L-E-2, pp. 538-541, Dec. 2017.
- ⑤ Yuta Ida, Takahiro Matsumoto, Shinya Matsufuji, Compensation of Deteriorated CSI Allocation Based on Decision Direct and Turbo Equalization for MUDiv/OFDMA, Proc. of NOLTA2017, A3L-A-5, pp. 209-212, Dec. 2017.
- ⑥ Zeming Dong, Sho Kuroda, Shinya Matsufuji, Yuta Ida, Takahiro Matsumoto, On BC-ZCZ-CDMA Using an Hadamard Matrix, 第 19 回 IEEE HISS, 301 通信工学, B2-8, pp. 209-212, Dec. 2017.
- ⑦ 稲垣達也, 黒田翔, 井田悠太, 松元隆博, 松藤信哉, マッチドフィルタバンクを用いた ZCZ-CDMA 通信モジュールの試作, 第 19 回 IEEE HISS, 301 通信工学, B2-7, pp. 206-208, Dec. 2017. (優秀研究賞)
- ⑧ Zeming Dong, Sho Kuroda, Shinya Matsufuji, Yuta Ida, Takahiro Matsumoto, A Study on Block Coding ZCZ-CDMA Using the Hadamard Transform, 第 40 回情報理論とその応用シンポジウム論文集, pp. 478-481, Nov. 2017.
- ⑨ Takahiro Matsumoto, Masanori Kurashita, Yasuaki Ohira, Hideyuki Torii, Yuta Ida, Shinya Matsufuji, Influence of ISI on Synchronous OCDMA System Using an Optical ZCZ Sequence Set on a Diffuse Channel, Proc. of IWSDA' 17, pp. 159-163, Sept. 2017.
- ⑩ Zeming Dong, Shinya Matsufuji, Yuta Ida, Takahiro Matsumoto, A Study on PAPR Reduction in OFDM Using Complex Hadamard Matrices, Proc. of IWSDA' 17, pp. 154-158, Sept. 2017.
- ⑪ Yuta Ida, Takahiro Matsumoto, Shinya Matsufuji, Three Hop AF Relay Transmissions for OFDM Applying Real and Imaginary TFI Pilot Signals, Proc. of IWSDA' 17, pp. 145-148, Sept. 2017.
- ⑫ Takahiro Matsumoto, Hideyuki Torii, Yuta Ida, Shinya Matsufuji, A Generation Method of a Modified Mutually ZCZ Set of Optical Orthogonal Sequences, Proc. of

SISA2017, pp.299-304, Sept. 2017.

⑬ Yasuaki Ohira, Takahiro Matsumoto, Hideyuki Torii, Yuta Ida, Shinya Matsufuji, Construction of Code Generator for Optical ZCZ Sequence Used as Synchronization Symbol, Proc. of SISA2017, pp. 283-288, Sept. 2017.

⑭ Tomoaki Hirosawa, Yasuaki Ohira, Takahiro Matsumoto, Hideyuki Torii, Yuta Ida, Shinya Matsufuji, Study on BER Performance of Optical Wireless Code-Shift Keying System Using Compact Matched Filter Bank for Optical ZCZ Sequence Set, Proc. of SISA2017, pp. 244-248, Sept. 2017.

⑮ Sho Adachi, Yasuaki Ohira, Takahiro Matsumoto, Hideyuki Torii, Yuta Ida, Shinya Matsufuji, Experimental Evaluation of Optical ZCZ-CDMA System on the Move, Proc. of SISA2017, pp. 229-233, Sept. 2017.

⑯ 松藤信哉, 井田悠太, 松元隆博, 直交性を活用した符号分割多元接続方式について, 電子情報通信学会技術研究報告, 2016年度アシュアランスシステム研究会, AS2016, pp. 1-8, March 2017 (招待講演).

⑰ Toma SAEKI, Shinya Matsufuji, Yuta Ida, Takahiro Matsumoto, On Block Coding CDMA Using Bent ZCZ Codes, Proc. of NCSP' 17, pp. 625-628, March 2017.

⑱ Yuta Ida, Takahiro Matsumoto, Shinya Matsufuji, Interleaved MUDiv Block Allocation and Optimum Power Control for SC-FDMA, Proc. of NCSP' 17, pp. 517-520, March 2017.

⑲ Akihiro Kamenno, Shinya Matsufuji, Yuta Ida, Takahiro Matsumoto, Takafumi Hayashi, Correlation Properties of Bent ZCZ Codes, Proc. of NCSP' 17, pp. 513-516, March 2017.

⑳ Yasuaki Ohira, Takahiro Matsumoto, Hideyuki Torii, Yuta Ida, Shinya Matsufuji, Construction of a Code Generator for an Optical ZCZ Sequence with Zero Correlation Zone 2z, Proc. of NCSP' 17, pp. 361-364, March 2017.

㉑ Takahiro Matsumoto, Hideyuki Torii, Yuta Ida, Shinya Matsufuji, A Generation Method of a Mutually ZCZ Set of Optical Orthogonal Sequences Consisting of Binary and Ternary Sequence Pairs, Proc. of NCSP' 17, pp. 357-360, March 2017.

㉒ Yuta Ida, Takahiro Matsumoto, Shinya Matsufuji, Packet Splitting and Adaptive Modulation Based on Time Domain CSI for Cooperative OFDM Systems," Proc. of the NOLTA2016, A2L-G4, pp. 99-102, 2016.

㉓ 中村亮太, 松元隆博, 鳥井秀幸, 井田悠太, 松藤信哉, 光 ZCZ 系列セットを用いた光無線 MIMO 通信方式に関する検討, 第 18 回 IEEE

HISS, 301 通信工学, A2-31, pp. 98-101, Nov. 2016 (優秀研究賞)

㉔ Yasuaki Ohira, Takahiro Matsumoto, Hideyuki Torii, Yuta Ida, Shinya Matsufuji, Study on Construction of a Matched Filter Bank for an Optical ZCZ Sequence Set with Zero-Correlation Zone 2z, Proc. of NCSP' 16, pp. 363-366, March 2016.

㉕ Yuta Ida, Kota Imafuku, Takahiro Matsumoto, Shinya Matsufuji, Performance Evaluation for AF Relay TFI-OFDM Systems, Proc. of ISPACS2015, pp. 548-551, 2015.

㉖ 佐伯透真, 松藤信哉, 松元隆博, 井田悠太, Bent 型 ZCZ 符号を適用したブロック符号化 CDMA の性能評価, 平 27 電気・情報関連学会中国支部連合大会, 9-4, Oct. 2015.

㉗ 松田悠希, 松藤信哉, 松元隆博, 井田悠太, アダマール変換を用いた伝送方式について, 平 27 電気・情報関連学会中国支部連合大会, 9-3, Oct. 2015.

㉘ 蔵下征則, 松元隆博, 鳥井秀幸, 井田悠太, 松藤信哉, 拡散反射型同期光 ZCZ-CDMA 方式の誤り率特性の理論的検討, 平 27 電気・情報関連学会中国支部連合大会, 9-2, Oct. 2015. (優秀論文発表賞 B)

㉙ Sho Kuroda, Shinya Matsufuji, Yuta Ida, Takahiro Matsumoto, On a Block Coding ZCZ-CDMA Scheme with High-Speed Processing, Proc. of IWSDA' 15, pp. 220-224, Sept. 2015.

㉚ Shinya Matsufuji, Takafumi Hayashi, Sho Kuroda, Yuta Ida, Takahiro Matsumoto, On Bent ZCZ Codes, Proc. of IWSDA' 15, pp. 216-219, Sept. 2015.

㉛ 松藤信哉, 林隆史, 黒田翔, 井田悠太, 松元隆博, Bent 型 ZCZ 符号と CDMA への適用について, 電子情報通信学会技術研究報告, WBS2015-26, pp. 69-74, July 2015.

㉜ 亀野晃弘, 松藤信哉, 林隆史, 黒田翔, 井田悠太, 松元隆博, Bent 型 ZCZ 符号の構成について, 電子情報通信学会技術研究報告, WBS2015-18, pp. 31-34, July 2015.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松藤 信哉 (MATSUFUJI Shinya)
 山口大学・大学院創成科学研究科・教授
 研究者番号：00173873

(2) 研究分担者

松元 隆博 (MATSUMOTO Takahiro)
 山口大学・大学院創成科学研究科・准教授
 研究者番号：10304495

井田 悠太 (IDA Yuta)
 山口大学・大学院創成科学研究科・助教
 研究者番号：20711229