

# 非直交アクセス方式に基づく大容量データ通信および高信頼・低遅延制御通信の創出 (155003003) Non-Orthogonal Multiple Access Targeting High Data Rate, Ultra Reliability, and Low Latency

## 研究代表者

落合秀樹 横浜国立大学

Hideki Ochiai Yokohama National University

研究期間 平成 27 年度～平成 29 年度

## 概要

クラウドサービスの普及による情報データの大容量化、さらには多数の自動車や無人航空機の制御通信に対する需要の急速な拡大に鑑み、本研究開発では、限られた周波数資源において大容量データ通信および高信頼・低遅延制御通信の2つの指標を達成し得る、新たな無線アクセス技術の創出を試みた。主要な成果として、1) Golay 系列および超直交畳み込み符号とMIMO-OFDMに基づいた低ピーク電力・低遅延・高信頼非直交マルチアクセス技術の確立、2) ラティス構造およびターボ原理に基づく新たな符号化変調技術の考案、が挙げられる。特に前者においては、基礎理論の構築に加え、プロトタイプのハードウェア実装およびソフトウェア無線機を用いたリアルタイム伝送実験により、その有効性を確認した。

## 1. まえがき

クラウドサービスの普及による情報データの大容量化、さらには多数の自動車や無人航空機の制御通信に対する需要と IoT デバイス利用の急速な拡大に鑑み、本研究開発は、大容量データ通信および高信頼・低遅延制御通信の2つの指標を達成する新たな無線アクセス技術の創出を目的とする。具体的には、(1)直交周波数分割多重 (OFDM) 方式をベースとした物理レイヤにおいて、サブキャリアを部分的に重複させることでユーザ間の非直交通信を簡易に実現するアクセス技術の提案、(2)ラティス構造とターボ原理に基づく新しい符号化変調方式の導入による大容量化の実現、が挙げられる。特に(1)では、OFDM の周波数拡散に Golay 系列を適用して低いピーク対平均電力比 (PAPR) の信号波形を生成することで、効果的に周波数ダイバーシチ利得を得ながら同時にパワーアンプの電力効率改善を実現でき、信頼性を犠牲にすることなく通信距離の拡大と低消費電力化を達成する。また(2)により、限られた復号処理において優れた誤り率特性を達成できる。よって本研究開発の成果は、逼迫する周波数資源の有効利用を促進させるとともに、無線通信システムのさらなる大容量化・低遅延化・高信頼化に貢献するものである。

## 2. 研究開発内容及び成果

本研究開発を通じて、理論的および実用的観点から無線通信システムの周波数および電力利用効率の向上に資する多くの研究成果を得た。以下では、主要研究成果である(1)低PAPR・高信頼・低遅延非直交アクセス方式の構築、(2)大容量通信を実現するターボ・ラティス符号および多元ターボ符号に基づく符号化変調方式の提案、に焦点を絞って記述する。

(1)高信頼・低遅延非直交アクセス方式に関する研究成果  
本研究開発で提案したアクセス方式は、各ユーザは低レートかつ高い誤り訂正能力を有する超直交畳み込み符号 (SOCC: Super-Orthogonal Convolutional Code) により符号化を行うとともに、これを通常の Walsh 系列ではなく直交 Golay 系列により変調して OFDM 伝送することで信号の PAPR 低減を実現する。一方受信側では、SOCC に対してビタビ復号を用いることで、レイテンシを抑えた実装が可能である。また、誤り訂正符号化後に Golay 系列により周波数拡散することで、周波数選択性伝搬路において周波数ダイバーシチ効果を得ることが可能となる。しかしながら、OFDMA など従来のシステムで想定される固定のサブキャリア割り当てに基づくアクセス方式では、時間領域で誤り訂正符号を適用しても、必ずしも十分な周

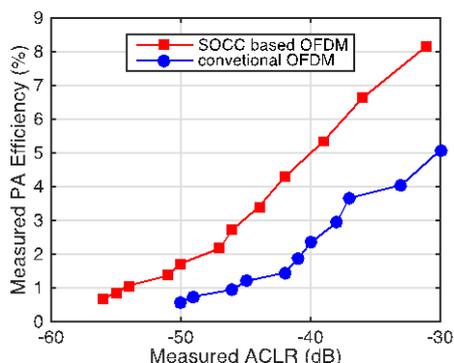


図1 電力効率と非線形ひずみのトレードオフ測

波数ダイバーシチ利得を達成できない。そこで、Golay 系列をなすサブキャリアを等間隔でホッピングさせる手法を提案し、その有効性を理論解析により明らかにした。また、非直交アクセス方式をマルチユーザ MIMO 環境へ拡張するとともに、各ユーザの平均 SNR に応じて適した符号化率およびサブキャリア数を割り当てる適応符号化方式を提案した。具体的には、現実的なシナリオとして基地局は複数のアンテナを有すること、また各ユーザは通信カバレッジ内に点在するため、平均 SNR が異なることを考慮し、各ユーザに一定の最小伝送レートおよび信頼性を保証しながら総スループットを最大化する、独自のリソース割り当て (適応符号化) 手法を考案した。

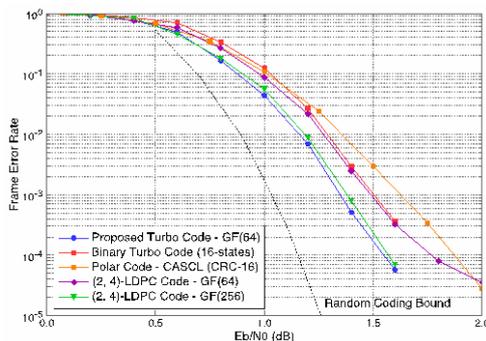


図2 フレーム誤り率特性の比較

さらに提案システムをFPGA基板で実装するとともに、その有用性を検証した。まず、ハードウェア記述言語 (HDL) を用いて論理合成を行い、生成された送信回路から動作ク

ロックに合わせてリアルタイムに提案シンボルが生成できることを確認した。また提案システムは、ホッピング系列にGolay系列を使用し、信号のダイナミックレンジを3dB以下に制限することで、送信信号の電力増幅時の電力変換効率の大幅な改善をねらっているが、この効果を確認するため、テストベッドを構築した。ここでは、先のFPGAボードで生成したベースバンド信号をベクトル信号生成器によりRF信号へ変換した後、パワーアンプ (PA) モジュールを用いて増幅し、その出力電力とひずみ成分を測定した。測定結果を図1に示す。本図は、非線形ひずみによる隣接チャネル漏洩電力比 (ACLR) と測定された電力増幅効率の関係を示している。一般にアンプへ入力する信号の電力を抑える (バックオフを大きくする) と、非線形ひずみの影響は抑えられるが、入力信号から増幅された出力信号の電力も抑えられるため、電力効率が低下する。よってこのような図では、左にいくほど隣接チャネルへの干渉電力は小さくなるが、電力変換効率も劣化する。一方、ピーク電力の低減を行えば、同じ干渉電力においても高い電力効率が達成できる。今回は通常のOFDM信号と提案方式の生成信号の比較を行った。図1より、例えば許容ACLRを-40dBとした場合、通常のOFDMでは2.5%の効率しか達成できないのに対し、提案手法では5%程度の効率 (従来の2倍) となることを示している。以上のように、理論解析のみでなくFPGAボードを用いたハードウェア実装、および実際のパワーアンプモジュールを用いたテストベッド構築による電力効率の測定評価により、提案方式のフィージビリティおよび有効性を確認することができた。

最後に、送受信機のプロトタイプをソフトウェア無線機 (USRP) により実装し、実際にリアルタイム伝送実験を行うことでその有用性を示すことに成功した。本実装では、ベースバンド信号のIQデータをLabVIEWによりリアルタイムに生成し、それを送信用USRPに直接取り込みことでRF送信信号を生成した。また、受信用USRPで受信した信号に対して同期捕捉、復調およびピタビ復号までの一連の処理を行った。テキストデータのリアルタイム送受信によるデモンストレーションを通して、実装した送受信系が正しく動作することを確認した。

#### (2)ターボラティス・多元ターボ符号に関する研究成果

一般に通信路容量に近接する誤り訂正符号および符号化変調方式においては、復号誤り率特性とその復号に要する計算量との間にトレードオフの関係がある。本研究開発では、2元入力・多元出力畳み込み符号と畳み込みラティス符号との縦続接続方式の考案による伝送レートの改善、および多元ターボ符号の最適化による (復号演算を一定とした場合の) フレーム誤り率 (FER) 特性の大幅な改善、の2つの主要な成果を得た。以下では、紙面の制約上、後者の研究成果に焦点を絞り記述する。

2元のターボ符号は従来から強力な誤り訂正符号として知られるが、比較的高いエラーフロアを生じることが欠点であった。一方で2元のLDPC符号は、符号長が十分に大きい場合において優れた誤り率特性を達成できるが、多元化すれば比較的短い符号長でも大幅な特性改善が得られることが広く知られている。しかしながら多元LDPC符号は復号に要する演算量が大きいが問題点として指摘されている。一方、ターボ符号の多元化表現自体はすでに他の研究者らにより検討されているが、良い特性を持つ符号の設計が困難であることから、その優位性は示されていない。これに対して本研究開発では、ユニオンバウンドと修正EXITチャートのハイブリッド設計に基づく多元ターボ符号の最適化手法を考案し、得られた符号の優位性を計算機シミュレーションにより明らかにした。図2に

BPSKを用いた場合のGF(64)で最適設計した提案ターボ符号と、2元ターボ符号、CRCとリスト復号を併用したポーラ符号、多元LDPC符号の各FER特性を比較した (これらの符号の符号化率と符号長は同等である)。図より、提案符号がより多値のGF(256)で設計した多元LDPC符号の特性を凌ぎ、また参考として示した理論限界であるRandom Coding Boundに最も近接することがわかる。よって提案符号は、演算量とFER特性の観点から多元LDPCよりも優れたトレードオフ関係を達成し得ることが示された。さらに本手法を多値変調へ応用することで、FER特性を犠牲にすることなく大容量化が可能であることも明らかにした。

### 3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取り組み

本研究開発で得られた要素技術を実社会で役立てるためには、唯一無二の独自の通信規格を確立して実装するか、国際標準化活動への参画が必須である。引き続き、本研究開発成果の実用性を示していくとともに、これらの技術をコアとした共同研究を推進する予定である。

### 4. むすび

本研究開発では、大容量データ通信および高信頼・低遅延通信の2つの指標を達成し得る新たな無線アクセス方式および符号化変調技術を創出し、それらの有用性を明らかにした。

#### 【誌上发表リスト】

- [1]Y. Hori and H. Ochiai, "A new uplink multiple access based on OFDM with low PAPR, low latency, and high reliability," IEEE Transactions on Communications, vol.66 no.5 pp1996-2008 (2018年5月1日)
- [2]Y. Hori and H. Ochiai, "Uplink multiple access based on MIMO-OFDM with adaptive super-orthogonal convolutional codes for ultra reliable and low latency communications," in Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), 6 pages (2018年5月20日)
- [3]T. Matsumine and H. Ochiai, "A serial concatenation of binary-input nonbinary-output convolutional code and recursive convolutional lattice code," IEEE Access, vol.6 9 pages (2018年5月24日)

#### 【申請特許リスト】

- [1]落合秀樹、松峯利樹、「符号化装置、符号化方法およびプログラム」、日本、特願 2016-130872、特開 2018-6987 (2016年6月30日)
- [2]落合秀樹、松峯利樹、「符号化装置」、日本、特願 2016-173099、特開 2018-42035 (2016年9月5日)

#### 【受賞リスト】

- [1]堀勇太、高信頼制御通信研究専門委員会ベストポスター賞、「低レート符号化 OFDM に基づく非直交マルチアクセス方式における MUD に関する一検討」、2015年12月17日
- [2]Vikash Singh、IEEE VTS Tokyo Chapter 2017 Student Paper Award (VTC2017-Spring)、「An efficient time switching protocol with adaptive power splitting for wireless energy harvesting relay networks」、2017年6月5日
- [3]松峯利樹、IEEE VTS Tokyo Chapter 2018 Student Paper Award (VTC2018-Spring)、「A design of non-binary turbo codes over finite fields based on Gaussian approximation and union bounds」、2018年6月4日