

学位論文要旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	直交符号のマッチドフィルターバンクの小規模化と その CDMA 方式の高機能化への応用に関する研究
氏名(Name)	黒田 翔
<p>近距離無線通信応用分野では, IoT ビジネスを念頭にしてインターネットや移動体通信網を通じて様々なニーズに対応できるような無線通信規格が提供されている. 代表的な近距離無線規格として Zigbee, Bluetooth, 無線 LAN が挙げられる. また LPWA (Low Power Wide Area) と呼ばれる低速ではあるものの低電力で最大数十 Km の伝送が可能な規格も登場している. 近年, 5G と呼ばれる第 5 世代移動通信システムのサービスが開始され, 4K 動画の配信を含めた高度なサービスが実用化された. 高度道路交通情報システム (ITS) や自動運転に活用することが議論され, さらに地方にも活発に展開されてきている. しかし通信エリア内に基地局を数百メートル毎に配備する必要があり, そのようなインフラが整っていない地域においては対応できないし, 基地局(アクセスポイント)と子局(端末)間でのやり取りが基本なので, 大容量, 低遅延を利点としても, 移動端末間を動的にネットワークで結んでいくような応用には不向きである. また従来, 高機能な送受信回路を実際にハードウェア上に実装しようとする, 回路規模が増大するだけでなく通信システム全体が複雑となることから, 技術面およびコスト面にも大きな課題が存在している.</p> <p>本研究目標は, 複数の移動端末間でも複雑な通信制御を必要とせず, 様々なニーズに柔軟かつ高安定の無線ネットワークを構築可能であり, 低コストで実現可能な無線通信方式の提供である. その基盤として ZCZ-CDMA がある. これは, 零相関領域 (Zero Correlation Zone) を有する拡散系列セットである ZCZ 符号を用い, 通信エリア内で同期制御信号発生器より一定間隔毎に送信される同期制御信号でタイミングを合わせて複数端末がほぼ同時に情報フレームを送信し, また, 多重化された情報信号を受信し, 情報復調する準同期 CDMA (符号分割多元接続: Code Division Multiple Access) 方式である. 理論的には, 非希望波の他局間干渉が無く, 希望信号の遅延波もうまく活用することにより効果的に情報復調できるので, 複数端末が同時に通信していても一対一通信のように振る舞い, そのために精密な電力制御や複雑な通信制御を必要としない.</p> <p>本論文では, 上記目標を実現するために, 高機能かつ回路規模を低く抑えたコンパクトな ZCZ-CDMA の設計について議論する. まず, 各端末からの多重化された情報シンボルと ZCZ 符号のすべての系列とを同時に相関(復調)処理できるマッチドフィルターバンク (Matched Filter Bank: 以下, MFB) の小規模化を行う. これは, アダマル行列を含むフーリエ変換行列が高速フーリエ変換に相当する因子分解できることを利用して, 回路素子数を減少させる. 次に MFB を活用することにより一度の同期制御信号区間で高速に同期を確立できる同期方式を提案する. これは, 同期制御信号の送信中に各送信端末は信号を送信しないとの条件下で, ZCZ 符号のうちの一つを同期用系列として割り当て, 受信シンボルと他端末に割り当てられたすべての系列との相関特性も利用することにより, 同期点の信号値より多元接続数倍になって現れる不要なサイドローブを大幅に減衰させ, 同期点を際立たせる方式である. また, ある程度高速に伝送することを考えると, 遅延波への対策のために零相関領域を広</p>	

くする必要がある。そのために、情報シンボルを複数個並べ、それをインターリーブして送信することで、系列数(同時多元接続数)の数学的上界を保ったまま零相関領域をブロックサイズ倍に拡張することができるブロック符号化方式が提案されている。ブロック符号化では、チャンネル推定におけるレイク受信を必要とし、計算量が増大してしまうが、MFBを活用することにより、チャンネル推定における逆行列の計算量を減少させることが可能な方式を提案する。これは、複数系列を一度に復調可能なMFBを活用することで、受信局の回路規模を抑えて実現可能である。

本論文は、以下の6章から構成される。

第1章では、本研究の背景と目的、本研究の位置づけ、および本論文の構成について述べる。

第2章では、本論文の議論の前提となる直交性を有する多相系列について述べる。特に、代表的なユニタリ行列である、離散フーリエ変換行列および複素アダマール行列を用いて表現できる、系列の各要素の絶対値が1となるような複素要素を有する多相系列について、その拡散系列の行列表現および整数環上の論理関数について定義する。

第3章では、MFBの原理を説明したのち、代表的な多相系列セットであるZadoff-Chu系列およびZCZ符号の小規模化について議論する。これは、多相系列セットを複素アダマール行列による行列表現し、高速アダマール変換に関連する因子分解を用いることで実現できる。特に、これまで議論がなされていないZadoff-Chu系列に対する一般化されたMFBの小規模化についても述べる。また、もし拡張されたZCZ符号のように、行列表現が難しい多相系列セットであったとしても、与えられた生成関数(整数 $q$ を法とする整数環上の論理関数)よりシステムティックに小規模化できることを述べる。これはいかなる直交符号においても、一般的に、論理関数により表現することで小規模化が可能になることを意味する。さらに、FPGA上で実際にMFBを実装し、その回路規模を対比することで本設計が有効であることを確認する。

第4章では、準同期CDMAおよびその同期補足について説明したのち、同期点を瞬時に見つけることが可能な方式について提案し、議論する。これは、MFBを活用して受信側ですべての系列との相関を利用することによって、不要なサイドローブのみを大幅に減衰させ、同期制御信号の出力がインパルス特性に近づく。これにより、ひとつの情報フレームで即座に同期確立ができるので、初回のアクセス確立時や、通信路状況の悪化により通信が一時中断した場合の通信復帰を高速化できる。その有効性を、幾つかの通信路環境下における同期誤り率として計算機シミュレーションで評価する。

第5章では、ひとつの送信局が複数のZCZ系列を用いてブロック符号化することにより、チャンネル推定における逆行列の計算量を減少させることが可能な方式を提案し、議論する。これは、複数系列を一度に復調可能なMFBを活用することで、受信局の回路規模を抑えて高信頼な伝送を実現できる。さまざまな設定のもとで誤り特性を計算機シミュレーションにより評価する。

第6章にて本研究を総括し、今後の研究課題について述べる。

(様式 9 号)

## 学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	黒田 翔
審査委員	主 査：松藤 信哉
	副 査：多田村 克己
	副 査：浜本 義彦
	副 査：山口 真悟
	副 査：松元 隆博
論文題目	直交符号のマッチドフィルターバンクの小規模化とその CDMA 方式の高機能化への応用に関する研究 Study on Compacting Matched Filter Banks for Orthogonal Codes and Their Application to Advanced CDMA System
<p><b>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</b></p> <p>移動通信端末に対しても無線ネットワークを柔軟に構築可能な近距離無線通信方式が提供できるならば、モノのインターネット (IoT) をはじめ、様々なニーズへの応用が期待できる。有効な通信方式として、零相関領域 (Zero Correlation Zone) を有する系列セット (ZCZ 符号) を用いた準同期の符号分割多元接続方式 (ZCZ-CDMA) がある。これは、通信エリア内の各端末がほぼ同期を確立できるように、適当な端末から同期制御信号が一定間隔毎に発信される。送信側では、受信側に割り当てられた系列を用いて情報シンボル列 (フレーム) を拡散し、それを同期制御信号の適当なタイミングに合わせて送信する。受信側では、そのタイミングに合わせて、多重化された受信信号と割り当てられた系列との相関を取るマッチドフィルター (MF) により、情報シンボル列は干渉無しに復号可能となる。</p> <p>本研究では、実現容易性とさらなる高機能化を兼ね備えた ZCZ-CDMA の構築を中心に議論している。まず、受信シンボルと ZCZ 符号の全ての系列との相関を同時に取れるマッチドフィルターバンク (MFB) の小規模設計法を提案する。ここで、系列は、1 と -1 からなる 2 相系列を含む絶対値が 1 の多相系列に一般化して議論される。任意の直交符号の生成関数 (整数環上まで一般化した論理関数) を与えることができれば、離散フーリエ変換行列を含む複素アダマール行列を基にした行列表現が可能となり、さらに高速アダマール変換に相当する行列の因子分解の適用により、回路素子数を最少化することができる。また、実際に、FPGA 上で 3 相 ZCZ 符号の MFB を試作し、回路規模の低減について検証している。</p> <p>次に、実装容易となった MFB の応用として、同期制御信号の同期点を 1 フレーム区間で検出可能な同期捕捉方式を提案している。これは、ZCZ 符号内の 1 つを同期制御信号用の系列とし、それ以外を拡散系列として割り当て、受信信号と全系列との相関出力を利用することにより、同期制御信号区間と時間的に独立した受信情報フレーム信号区間を際立たせる方式である。従来とは違い、追従することなく同期点を即座に検出可能である。これは、同期制御信号対雑音比における同期誤り率のシミュレーション結果により、多重数が増えるほどその効果が増大することを示している。これにより、多数端末の同時接続に強く、迅速に相手端末とのアクセスを確立できることになるので、移動端末間との通信に対しても効果的である。</p> <p>次に、マルチパスフェージング通信路環境下における超遅延により生じる誤り率の増大に対してもシステム全体の通信容量を保持できる ZCZ-CDMA を提案している。それは、一つの端末に複数系列を割り当て、一纏めにした情報シンボル列 (ブロック) を複数系列より拡散し、インターリーブするブロック符号化方式である。特に、ブロックサイズ、系列数、環境に対する誤り率特性により通信性能を明確化している。これにより、MFB の適用による回路実現容易</p>	

(別紙様式第 10 号)

であり、通信内容に応じて通信品質を確保できる QoS を考慮した ZCZ-CDMA を提供できる。ここで、多端末からの干渉の影響は無いが、自端末からの符号間干渉が生じるために、通信路推定による逆行列計算による復調法を用いる必要がある。行列の次数はブロックサイズに相当するので、系列数が多ければ逆行列の計算が容易になり高速に復号化できることになる。

上記の諸技術は、電波だけでなく光通信や超音波通信、あるいは、電子透かし等にも適用可能である。また、ZCZ 符号だけでなく他の直交符号への応用も考えられる。

公聴会における主な質問内容は、MFB の小規模化における回路設計と FPGA による試作に関するもの、同期捕捉に関する提案方式の性能評価や従来方式との違いに関するもの、IoT への応用における提案方式と 3G~5G の携帯電話方式の適用との違いに関するもの、電子透かしの適用技術に関するものなどについてであった。いずれの質問に対しても発表者から適格かつ十分な回答がなされた。

以上より、本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問などの応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記の通りである。（関連論文 計 8 編）

- 1) S. Kuroda, S. Matsufuji, Y. Ida, T. Matsumoto, "High-Speed Synchronization Acquisition Methods of Quasi-Synchronous CDMA," Journal of Signal Processing, Vol.21, No.6, pp.273-279, 2017.11.
- 2) S. Kuroda, S. Matsufuji, Y. Ida, T. Matsumoto, T. Hayashi, "Design of Compact Matched Filter Banks of Polyphase ZCZ Codes," IEICE Transactions on Fundamentals (9 月掲載予定)
- 3) S. Kuroda, T. Matsumoto, Y. Ida, S. Matsufuji, "On a Block Coding ZCZ-CDMA Scheme with High-Speed Processing," Proc. of IWSDA'15, pp.220-224, 2015.9.