

早稲田大学大学院国際情報通信研究科

# 博士論文概要

## 論文題目

ウェーブレット変換を用いた OFDM タイミング再生方式に関する研究  
Study on OFDM timing recovery scheme using Wavelet conversion

申請者

澤田	勝
Masaru	SAWADA

国際情報通信学専攻  
ワイヤレスシステム研究Ⅱ

## 背景

近年、無線通信システムだけでなく有線通信システムにおいても、データ速度高速化を目的として変復調方式に OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiple Access 方式の有効性を実証され、実用化が図られている。OFDM 方式は、構成するサブキャリア間の直交性を利用することにより、各隣接するサブキャリア信号スペクトルを半分ずつに重ね合わせることで通常のシングルキャリア方式に比して周波数帯を利用する効率を 2 倍にできる。しかし、今まで OFDM 信号の解析はサブキャリア間の直交性を前提として、時間変数の OFDM 信号波形をフーリエ変換により、周波数を変数とする信号に変換することで相互のサブキャリア間での干渉が発生しないこととして検討されてきている。すなわち、各サブキャリアは相互に直交関係にあるとされていることから広帯域信号において常に直交関係が成立し、高効率な OFDM 伝送が可能であると考えられてきた。

## 研究の目的

本研究では、これからの超高速伝送に OFDM 方式を用いて実現する上で、サブキャリア間の直交性を前提とした解析ではなく、本来の OFDM 信号のもつ性質を、ウェーブレット信号解析を用いて解析することで時間と周波数空間に変換し、OFDM 信号が有する本来の性質を詳細な解析することの試みを行った。ウェーブレット信号解析は与えられた信号の局所的信号の類似性を用いて分析することから、直交性を前提とすることなく周波数と時間の解析することが可能である。本論文においては、従来の OFDM の直交性による解析ではなく、OFDM 信号のより精緻な信号歪みを解析することを目的として、ウェーブレット信号解析により不連続点検出により OFDM 信号の解析を行った結果について明らかにした。位相・利得変調の変化点に起因する信号歪みの発生は、今後の OFDM 信号の超高速通信を実現する上で、OFDM 信号の受信同期タイミングの高速化を不可能とし、チャンネル間干渉やシンボル間干渉歪みの発生となり OFDM の制約になることが考えられる。本研究は、サブキャリアの直交性を基本とした OFDM 信号の連続した信号解析ではなく、OFDM 信号が持つ非連続性を抽出するウェーブレット信号解析を用いて、周波数と時間領域に OFDM 信号を分解し信号解析し、逆ウェーブレット変換により OFDM 信号の再合成を行ったのでその結果について明らかにする。この課題を明らかにすることは、これからの通信において超高速通信の必要が高まり今後のさらなる高速データ伝送の実施化が可能となることが期待される。

本研究を進める上で、最初に OFDM 信号を解析するための、OFDM 信号の送受信シミュレーションモデルの構築を実施した。時間領域の OFDM サブキャリアは直交性を前提とするが、フーリエ変換した周波数領域のサブキャリアの直交性は必ずしも保たれない。サブキャリアをシンボルレートに時間制限する窓関数のロールオフ率に依存して、フーリエ変換後のサブキャリア周波数帯域が拡がり隣接するサブキャリア同士が干渉する。ロールオフ率を大とすると時間領域のパルス長が小となり、周波数領域におけるサブキャリア帯域が縮小する。隣接するシンボル間の干渉が抑えることで周波数領域におけるサブキャリアの直交性が得られる。最適なタイミングでサンプリングされた離散時間信号モデルでは、OFDM 復調は離散フーリエ変換で定義される。有限長のシンボルレート信号列から離散時間フーリエ変換する場合、OFDM シンボルレート信号の周期性の制約からサンプリングタイミングを正確に再生する必要がある。直交するサブキャリアと複素数 OFDM 信号では、受信側サブキャリアのリファレンス信号との複素数内積演算によりコンステレーションマップを再生する方法は、サンプリングタイミングの制約条件を緩和できる。複素数信号の周波数と位相オフセットは、周波数領域でシフト操作により補償できる。

ウェーブレット変換は、複素数受信信号を時間周波数領域に変換する。サブキャリアを振幅位相変調した場合、隣接するシンボル間ですべてのサブキャリアの振幅と位相が非線形に変化することから、OFDM シンボル間に信号の不連続性が生じ、ウェーブレット変換で不連続性を検出することでシンボルレートタイミングが検出される。シンボルレート信号に対し既知のパイロット信号のサブキャリア内積演算から、受信信号とリファレンス信号との位相差から周波数オフセットを得られる。シンボルレート複素数信号を周波数シフトすることで

タイミングリカバリが実現される。

## 本論文の構成

本論文は、序章も含めて5章で構成されている。

第1章は序章であり、信号空間内における OFDM 信号に関する本研究を行うこととなった動機を研究の概要について述べている。特に OFDM 信号を解析する上で信号解析を、直交性を前提とすることなく不連続点解析によるウェーブレット信号解析信号を採用した理由について述べている。

第2章では、不連続性解析を行うことを目的として、OFDM シンボルレート信号の連続時間と離散時間モデルを比較し、シンボルレートのサンプリング列とサブキャリアのコンステレーションマップ係数の離散フーリエ変換計算方法について理論的検証を行った結果について示している。

本章では I/Q 信号による周波数変換システムと比較を行う方法について述べている。ウェーブレット信号解析によりベースバンド信号は、時間・周波数領域の2次元配列に展開される。この2次元配列から特定の周波数帯域、時間領域の信号成分を抽出または、信号成分に影響せず高域成分を除去する方法について示している。

本章のまとめとして、従来の OFDM の符号化、復号化において逆離散フーリエ変換、離散フーリエ変換を用いること概念を OFDM シンボル信号空間として相互の関係を定義することで示した。

第3章では、サンプリング理論をもとに OFDM 信号をウェーブレット解析により生成し、サブキャリアのコンステレーションベクトルとヒルベルト空間の連続信号のシンボルレート信号との対応関係を示した。シンボルレート信号をパルス状ランダム信号と扱い、信号空間内の信号として対応が可能となる。ウェーブレット解析により得られて OFDM 信号の通信システムとして適用し、伝送特性について評価を行い通信システムへの適用の可能性について明らかにした。

第4章では、ウェーブレット解析を用いた OFDM システムの評価として第3章で述べたウェーブレット解析による不連続性検出で得られた OFDM 信号解析の有用性を述べ、従来の信号の直交性を基礎とした OFDM 信号生成方法に比して信号歪解析を精緻に実施でき、今後の更なる高速通信システムの実施の可能性について明らかにしたことを述べている。また、第2章で示した OFDM の変調と復調を離散フーリエ変換、逆離散フーリエ変換の OFDM シンボル信号空間との関連で離散フーリエ変換、逆離散フーリエ変換ではできなかったウェーブレット解析により OFDM シンボル間の不連続性の検出方法について信号空間の中で関係性を明らかにした。

第5章では、まとめと今後の展望として、OFDM の広帯域性が重要となる次世代通信システムへの適用方法について述べ、今後の研究でウェーブレット変換の信号処理への応用について展望を明らかにしている。

## まとめ

OFDM シンボルレート信号を、直交基底、内積演算を定義したヒルベルト空間でモデル化することで、復調処理のタイミングリカバリと波形等化システムを統合したモデルを構築する。Wavelet 信号解析により、OFDM フレームを周波数・時間領域に分解する。従来のフィルタ処置による帯域分離と波形等化処理の代替として、Wavelet 信号解析によるフレーム処理を提案する。解析信号による周波数変換により、ミキサ回路の削減と信号利得を改善する。