

平成22年6月1日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2008～2009  
 課題番号：20760243  
 研究課題名 (和文) ダイレクトコンバージョン OFDM 受信機におけるキャリア同期ずれ補正に関する研究  
 研究課題名 (英文) Carrier Frequency Offset Compensation in OFDM Direct-Conversion Receivers  
 研究代表者  
 林 海 (LIN HAI)  
 大阪府立大学・工学研究科・助教  
 研究者番号：40336805

研究成果の概要 (和文)：低コストのダイレクトコンバージョン受信機 (DCR) では、RF 帯信号から直接ベースバンド信号に変換することにより、I/Q 不均衡問題が発生する。本研究は、DCR 方式 OFDM と MIMO-OFDM 受信機実現に大きな障害となっていた CFO と I/Q 不均衡問題を研究対象とし、実用化可能なデジタル信号処理の補正手法を開発しました。さらに、現存の OFDM 通信システム規格でのパイロット信号に対処し得る補正法も提案しました。

研究成果の概要 (英文)：In direct-conversion receivers (DCR), I/Q imbalance has been known as a major analog impairment. This project focuses on the joint compensation of CFO and I/Q imbalance in low-cost OFDM/MIMO-OFDM DCR. A low-complexity compensation algorithm and the associated generalized periodic pilot have been proposed. Furthermore, the propose compensation algorithm has been extended to work with the conventional periodic pilot in the existing wireless standard.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：ダイレクトコンバージョン受信機、OFDM、キャリア同期ずれ

## 1. 研究開始当初の背景

ユビキタスネットワーク社会には、無線通信ネットワークは必要不可欠な存在である。無線通信ネットワークは、今後直交周波数分割多重 (OFDM) 方式が採用されるのは明らかである。一方、低コストの通信端末機を

提供することは、ユビキタスネットワーク社会実現を進める際に、重要な要因の一つである。近年、低コストのダイレクトコンバージョン受信機 (DCR) は、この問題の解決策として非常に注目を受けている。

OFDM 通信方式は、複数の直交するキャ

リアを利用し、周波数の有効利用および周波数選択性チャネルへの耐性を高めることに成功した。しかし、OFDM 信号はスペクトルの重なった多重化信号であるため、送受信機における局部発信機(L0)の周波数が一致しない、すなわち、CFOが存在する場合には、キャリア間の直交性が崩れるキャリア間干渉(ICI)が生じ、誤り率特性が著しく劣化する。OFDM方式においては、シングルキャリア方式と違いCFO補正は非常に重要な課題の一つである。一方、DCRとは、ベースバンド信号に変換する際に中間周波数を介さず、直接ベースバンド信号に変換する受信機であり、従来のスーパーヘテロダイン方式の受信機に比べ、受信機の小型化・低コスト化・省力化が可能であるという特徴を有する。しかしながら、RF帯信号から直接ベースバンド信号に変換することにより、直流オフセット(DCO)およびI/Q不均衡問題が新たに発生する。DCOとは、RF部での信号漏れを原因としたセルフミキシングにより引き起こされるものであり、また、I/Q不均衡とは、I相成分とQ相成分が理想的状態から歪むことにより引き起こされるものである。DCRでは、受信信号をI相成分とQ相成分に分解するために、 $\pi/2$ 位相差をもつRF帯キャリア信号が必要である。しかし、高周波の信号を正確な位相シフト量 $\pi/2$ をもつL0の提供は困難であり、I相成分とQ相成分が理想的状態から歪む周波数非選択性I/Q不均衡が生じる。また、広帯域の通信システムでは、IブランチとQブランチに設置されたフィルタなどアナログ部品の特性の違いにより、周波数選択性I/Q不均衡も発生する。これらのI/Q不均衡によりイメージ干渉が生じ、誤り率特性が著しく劣化する。

低価格のダイレクトコンバージョンOFDM受信機を実現するには、DCO除去、CFOおよびI/Q不均衡の補正問題を解決しなければならない。一般に、DCOはACカップリングにより前段で除去することができる。従って、CFOおよびI/Q不均衡の補正問題が非常に重要な課題となる。OFDM通信方式におけるCFO推定/補正に関する研究はかなりなされている。また、I/Q不均衡補正法は、主にL0の振幅差と位相差しか考慮しない周波数非選択性I/Q不均衡およびIブ

ランチとQブランチに設置されたフィルタなどアナログ部品の特性の違いを考慮に入れた周波数選択性I/Q不均衡、更には、CFOと周波数非選択性I/Q不均衡を考慮した三つのシナリオで考慮されている。実際には、CFOと周波数非選択性および周波数選択性I/Q不均衡が同時発生するので、これらを考慮した補正法が必要である。しかし、従来法は以下の大きな問題点が残されている。①CFO推定は非線形最小2乗問題であり、解析解は存在しない。比較的簡単な解法として1次元探索法があるが、探索範囲内すべての候補値に対してコスト関数を計算する必要がある、計算負荷が大きい。また、推定精度は探索の最小単位に依存する。②I/Q不均衡の補正係数はCFO推定値に依存する。すなわち、CFO推定なくしてI/Q不均衡の補正係数が得られないので、計算効率は非常に悪い。③CFO推定は正確なタイミング同期を必要とする。しかし、補正前のパイロット信号はCFOとI/Q不均衡の影響を受けるので、正確なタイミング同期を得るのが容易ではない。

一方、MIMO-OFDM方式において、CFO推定および補正の研究は数多く報告されているが、I/Q不均衡に関する研究は、殆ど周波数非選択性I/Q不均衡を対象とするものである。

## 2. 研究の目的

本研究では、DCR方式OFDMとMIMO-OFDM受信機の実現に大きな障害となるキャリア周波数オフセット(CFO)及びI/Q不均衡などキャリア同期ずれ問題について研究を行い、その対策を提案する。また、既存のOFDM通信システム規格でのパイロット信号に対処し得る補正法も提案する。

## 3. 研究の方法

OFDMとMIMO-OFDMシステムにおいては、それぞれCFOとI/Q不均衡が存在するときの受信信号のベースバンド数学表現式を導きます。これらの数学表現式から適切な補正構造を決定する。計算上最も利便性があり、かつ周波数領域でのキャリア配置の必要条件を満たし得る最適なパイロット信号を提案する。

次に、理想的な補正が行われた後のパイロット信号の特徴に注目し、CFOとI/Q不均衡補正係数が満たすべき関係式を導き出す。提案した補正法の有効性については、

CFO 推定範囲、推定最小 2 乗誤差、補正後の誤り率などを理論分析または MATLAB 数値シミュレーションにて明らかにする。

既存の規格からなる OFDM 通信システムに対して、提案した補正法の適用可能性を検証する。具体的には、前述の最適パイロットと既存規格のプリアンブル内のパイロットを比較することにより、提案法を既存規格のパイロットに適用できるように修正を加える。

#### 4. 研究成果

OFDM システムにおける CFO と I/Q 不均衡補正の従来法は、CFO 推定は非線形最小 2 乗問題であり、解析解は存在しないため、計算は非常に複雑である。また、I/Q 不均衡の補正係数は CFO 推定値に依存し、正確な推定を得るため、タイミング同期は不可欠である。これらの問題点の主要原因は、CFO 推定と I/Q 不均衡補正を別問題として解決している。本研究では、両者を同一問題として捉え、CFO と I/Q 不均衡補正係数を同時に推定できるアルゴリズムを提案しました。提案手法は、パイロットの周期性を利用し、線形最小 2 乗アルゴリズムを解くことにより、CFO および I/Q 不均衡補正係数をすべて解析的に求めるものであり、計算負荷が大幅に軽減できる特徴を有する。また、パイロットは周期性を持っており、タイミング同期ずれがあっても周期性の変わりがないため、提案方法はタイミング同期誤差に対して頑丈であることも確認できました。さらに、周期性パイロットとチャネル推定パイロットを併用することで、802.11a 標準に対応した補正法の開発も成功しました。

MIMO-OFDM システムに対しては、CFO と I/Q 不均衡が存在するときの MIMO-OFDM 受信信号のベースバンド数学表現式を導きました。計算上のメリットを有する周期性パイロット信号を提案しました。時不変 MIMO チャネルを通り、共通の CFO と受信アンテナ毎に違う I/Q 不均衡の影響を受けたパイロット信号を分析する。分析の結果により、二つ補正構造とそれぞれの補正法を検討しました。一つは受信アンテナ毎に補正を行う、補正した信号を従来通り合成する方法である。もう一つは、受信アンテナ毎に周波数選択性 I/Q 不均衡のみを補正し、残り CFO と周波数非選択性 I/Q 不均衡を含む信号を、合成過程にて補正する方法である。

前年度の研究成果を踏まえ、この二つアプローチに対して、理想的な補正と合成が行われたときの、CFO、I/Q 不均衡補正係数、更には合成係数が満たすべき関係式を導き出し、補正パラメータを求めました。

一方、時変 MIMO チャネルの場合、CFO と I/Q 不均衡が存在するときの MIMO-OFDM 受信信号のベースバンド数学表現式も導きました。そこで、CFO を等価チャネルの状態方程式に吸収し、カルマンファイタを用いてチャネルの変化をトラッキングする方法を提案しました。提案法は、CFO、I/Q 不均衡の補正をチャネル等化の一部とみなす、さらに、サイクリックプレフィックスの位相回転を起因としたキャリア間干渉を判定帰還フィルタリングにて除去しました。サブキャリアごとでの補正ができ、計算量が非常に少ない時変 MIMO-OFDM システムの CFO と IQ 不均衡補正法を開発しました。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① J. Gao, X. Zhu, H. Lin, A. Nandi, Independent component analysis based semi-blind I/Q imbalance compensation for MIMO OFDM systems, IEEE Trans. Wireless Communications, 査読有, 9, 2010, 914-920
- ② H. Lin, X. Zhu, K. Yamashita, Low complexity pilot-aided compensation for carrier frequency offset and I/Q imbalance, IEEE Trans. Communications, 査読有, 58, 2010, 448-452
- ③ U. Yunus, H. Lin, K. Yamashita, Joint estimation of carrier frequency offset and I/Q imbalance in the presence of time-varying DC offset, IEICE Trans. Communications, 査読有, E93-B, 2010, 16-21
- ④ U. Yunus, H. Lin, K. Yamashita, A robust frequency offset estimator in the presence of time-varying DC offset, IEICE Trans. Communications, 査読有, E92-B, 2009, 3288-3296
- ⑤ H. Lin, K. Yamashita, Subcarrier allocation based compensation for carrier frequency offset and I/Q imbalances in OFDM systems, IEEE Trans. Wireless Communications, 査読有, 8, 2009, 18-23

- ⑥ H. Lin, T. Nakao, W. Lu, K. Yamashita, On the estimation of carrier frequency offset and DC offset for OFDM systems, IEICE Trans. Communications, 査読有, E91-B, 2008, 3288-3296
- ⑦ H. Lin, X. Wang, and K. Yamashita, A low-complexity carrier frequency offset estimator independent of DC offset, IEEE Communications Letters, 査読有, 12, 2008, 704-707

[学会発表] (計4件)

- ① H. Lin, Kalman filtering based compensation from I/Q imbalance and CFO in time-varying MIMO OFDM systems, IEEE Global Communications Conference, 2009年12月2日, Hawaii, USA
- ② J. Gao, Blind I/Q imbalance compensation using independent component analysis in MIMO OFDM systems, IEEE Wireless Communications & Networking Conference, 2009年4月8日, Budapest, Hungary
- ③ H. Lin, Hybrid domain compensation for analog impairments in OFDM systems, IEEE Global Communications Conference, 2008年12月1日, New Orleans, USA
- ④ H. Lin, Pilot-aided low-complexity CFO and I/Q imbalance compensation for OFDM systems, IEEE International Conference on Communications, 2008年5月22日, Beijing, China

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: OFDM システムにおけるアナログ損失のハイブリッドドメイン補償方法

発明者: 林海、下勝己

権利者: 大阪府立大学

種類: 特許権

番号: 特願 2008-282640

出願年月日: 2008年11月1日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

林海 (LIN HAI)

大阪府立大学・工学研究科・助教

研究者番号: 40336805