

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 17 日現在

機関番号：24403
研究種目：若手研究（B）
研究期間：2011～2012
課題番号：23760342
研究課題名（和文） ワイドバンド通信システムにおける I/Q インバランスのブラインド補正に関する研究
研究課題名（英文） Blind I/Q Imbalance Compensation in Wideband Communication Systems
研究代表者 林 海（LIN HAI） 大阪府立大学・大学院工学研究科・准教授 研究者番号：40336805

研究成果の概要（和文）：本研究は、低コストかつ高品質のワイドバンド受信機の設計を目指すものであり、特に、安価な回路部品が引き起こす回路歪みである I/Q インバランスについて研究を行い、現行の通信システムに応用可能なデジタルブラインド補正方法を開発した。

研究成果の概要（英文）：This research focused on low-cost and high-performance receiver in wideband communication systems. In particular, we studied I/Q imbalance caused by low-cost components in direct-conversion receivers and developed low-complexity blind compensation methods.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：通信・ネットワーク工学

キーワード：通信方式（無線、有線、衛星、光、移動）

1. 研究開始当初の背景

近年の通信トラフィックの増大に伴い、通信路容量の限界に迫る新たな通信技術が導入され、無線通信システムでは、既に直交周波数分割多重（OFDM）方式が通信方式の主流となっている。OFDM 通信方式とは、信号を直交するサブキャリアで多重化する方式であり、周波数利用効率が高いなどの利点が知られている。一方、光通信システムにおいても、従来の強度変調方式からコヒーレント方式に移り、更に、OFDM 変調方式の応用までが検討されている。また、更なる通信容量の向上のため、これらのワイドバンド通信システムでは、高次変調と共に、高い符号化率をもつ符号も同時に採用されている。このように複雑に変調された信号の復調では、受信機アナログ回路部分において、理想状態からの不整合があれば、その影響により低い信号対雑音干渉電力比（SINR）となり、大幅な復号誤り特性となる。そのため、高精度な部

品の使用が必要となるが、高精度な部品は高価であり、端末コストの増大につながる。

通信端末の開発には、性能とコストの両面から考慮することは非常に大切である。最近の半導体技術の進歩により、デジタル信号処理（DSP）に基づいた補正技術は、費用効果の高い解決法として注目されている。これは、ダイレクトコンバージョン方式受信機（DCR）に安価な部品を採用し、できるだけハードウェアのコストを抑え、同時にベースバンド受信 DSP チップにより、回路ひずみを補正するアルゴリズムを追加することである。DCR とは、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、従来方式に比べ、高周波数帯の部品数が少なく、受信機の小型化・低コスト化・省電力化が可能である。しかしながら、直流オフセット（DCO）および I/Q インバランスなどの回路ひずみが発生する。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 インバランスとは、I 相と 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。受信信号を I 相と Q 相成分に分解するためには、 $\pi/2$ 位相差をもち、かつ同振幅からなる 2 個のキャリア信号が必要である。しかしながら、高周波の信号を正確な位相シフト量 $\pi/2$ をもつ局部発信機(LO)を提供することは困難であり、I 相と Q 相成分が理想的状態から歪む周波数非選択性 I/Q インバランスを生じる。また、ワイドバンド通信システムでは、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 インバランスも発生する。DCO は、通常は AC カップリングによって除去できるが、アナログでの I/Q インバランス補正は困難とされている。

I/Q インバランスはイメージ干渉信号を引き起こすため、直交周波数分割多重 (OFDM) におけるデジタル補正はサブキャリア対毎に行う周波数領域チャネル等化に吸収できる。しかし、この方法は理想的な周波数同期が必要条件であり、LO の周波数ずれが存在する場合には、多数のキャリア間干渉が生じ、非常に複雑な補正になる。時間領域での補正は、CFO など他の干渉成分を補正する前にインバランスそのものを補正するので、比較的簡単な補正ができる。今まで、周波数選択性 I/Q インバランスに対応可能な三つの時間領域補正構造が提案され、それぞれに単一実数フィルタ (SRVF)、単一複素数フィルタ (SCVF)、複素複素数フィルタ (MCVF) が使われている。一方、補正構造にある補正係数を求める推定法としては、パイロットを利用する方法とブラインド法がある。パイロット法は収斂が早いなどのメリットがあるが、CFO、位相雑音など他の干渉成分の影響も受けやすく、また特定のパイロットに依存するという欠点もある。反対に、ブラインド法は信号の統計的な特性を用いるので、他の干渉成分に影響されにくく、また特定の通信規格に依存しないため、汎用性は非常に優れている。これまでの研究には、SCVF と MCVF 構造に対応するブラインド法が提案されているが、SRVF 構造でのブラインド法はまだ報告されていない。

2. 研究の目的

高速大容量ワイドバンド通信システムにおいては、高次変調と直交周波数分割多重 (OFDM) などの複雑な変調方式が採用されているため、受信回路のアナログ部品に対しては、非常に高い品質精度が要求され、製造コスト増大の一因となっている。本研究は、低コストかつ高品質のワイドバンド受信機的设计を目指すものであり、特に、安価な回路

部品が引き起こす回路歪みである I/Q インバランスについて研究を行うと共に、現行の無線および光通信システムに応用可能なデジタル補正方法、特に通信規格に影響を受けないブラインド補正方法を開発する。

3. 研究の方法

本研究は I/Q インバランスの SRVF 補正構造に対応する補正係数推定のブラインドアルゴリズムを開発する。

信号の二次統計量を用いて、SRVF 構造の特徴を生かしたブラインド推定アルゴリズムを提案する。提案した方法に基づき、オーバーサンプリングした信号の二次統計量を分析し、相互相関関数も利用することによるロバストな推定アルゴリズムも提案する。

具体的な研究方法は研究達成目標に従い、問題の数学モデルの構築、重要な関係式の導出、解決法の提案、理論性能分析、数値シミュレーション検証の手順で行いました。

4. 研究成果

本研究では、Q ブランチに SRVF を置く、補正にかかる計算量が少ない時間領域の補正構造を採用し、特定の通信規格に依存しないブラインド補正法を開発する。

周波数非選択性 I/Q インバランスは LO の振幅差と位相差であり、周波数選択性 I/Q インバランスは I ブランチと Q ブランチそれぞれにある異なる周波数応答をもつ二つ Lowpass フィルタ G_I と G_Q に表せる。この二つ Lowpass フィルタ周波数応答の違いを表すフィルタは差分フィルタ d と定義する。IQ インバランスを受けた受信信号のモデルから、フロントエンドの I A (Image Attenuation) と差分フィルタ d の関係式を導き、図 1 で示す。

(r は IA の値であり、 d_0 と d_{tail} は d のタップである) この結果から、高い IA ほど、 d の値は狭い範囲に制限されることがわかる。

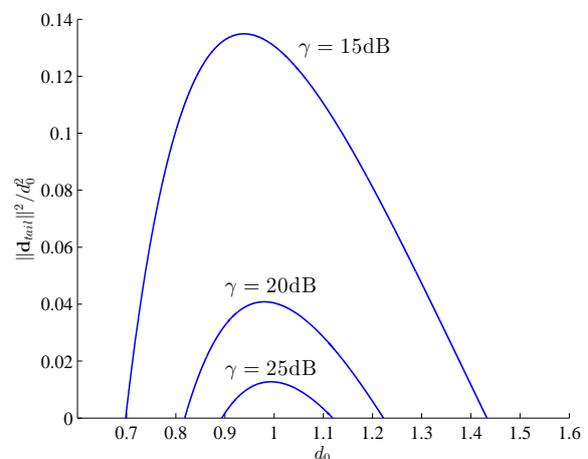


図 1

フィルタ d の長さも制限される場合、 d が最小位相 (Minimum Phase) であることが証明され、その関係が成立する条件は図 2 で示す。

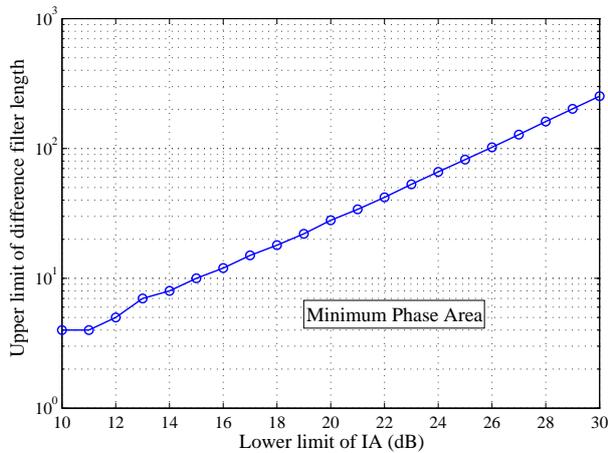


図 2

通常のフロントエンドは以上の条件に適するため、I/Q インバランス補正構造の係数推定を差分フィルタの同定問題に置き換える新たな推定法を提案できる。一方、I と Q ブランチ信号の表現式から、差分フィルタの振幅特性を二つブランチ信号の自己相関関数 (ACF) から求めることがわかる。同時に、最小位相の性質を利用し、差分フィルタの位相特性が得られる。提案した方法の手順は以下のようにまとめられる：

- ① 時間平均を用いて I ブランチと Q ブランチ信号の ACF と相互相関関数を計算する。
- ② 二つブランチの ACF の高速フーリエ変換を計算する。
- ③ 高速フーリエ変換の結果から d の振幅特性を求める。
- ④ ヒルベルト変換を用いて、振幅特性から d の位相特性を求める。
- ⑤ 高速逆フーリエ変換を用いて、 d の周波数応答から d のインパルス応答を求める。
- ⑥ 相互相関関数と d のインパルス応答を用いて、 L_0 の位相誤差を求める。

提案法の有効性を検証するため、数値シミュレーションを行いました。シミュレーション条件は以下である：

- ① 1024 サブキャリア OFDM システム、サブキャリア間隔 15kHz、64QAM 信号変調
- ② 36 タップフェージングチャネル、指数減衰プロファイル
- ③ キャリア周波数 2GHz、移動体速度 100km/h
- ④ チャネル情報既知、ZF 等化

周波数非選択性 I/Q インバランスしか考慮していない補正法 [13]、複素数補正フィルタを用いた方法 [7][8] と比較した。図 3 と図 4

の結果から、提案法は信号帯域における良好な IRR (Image Rejection Ratio) 性能を有するため、SER (Symbol Error Rate) の改善が確認されました。

さらに、計算量について、複素数補正フィルタを用いた従来法に比べ、全体的に計算量の減少も確認できました。

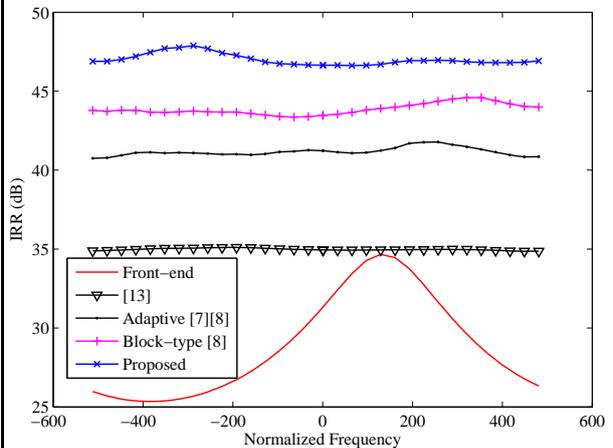


図 3 IRR 性能評価

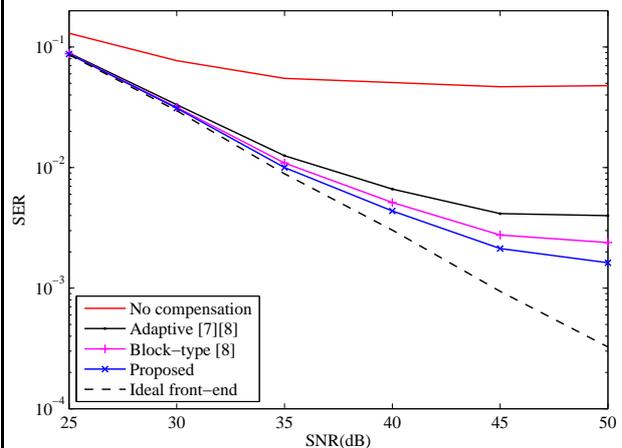


図 4 SER 性能評価

一方、外部環境などの影響でフロントエンド性能が著しく劣化し、すなわち、差分ファイルが非最小位相の場合、オーバーサンプリング手法を導入し、相互相関関数の特性を用いることにより、解析的に差分ファイルを求めることも成功した。

本研究の結果から、推定段階と補正段階両方に非常に少ない計算量の I/Q インバランスの補正法が得られ、さらに提案法は通信規格に影響を受けないブラインド法のため、応用範囲が広く、低コスト、高品質のワイドバンド受信端末の実現に向けての意義が非常に多大である。

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 2 件)

(1) H. Lin, K. Yamashita, Time domain blind I/Q imbalance compensation based on real-valued filter, IEEE Trans. Wireless Commun., 査読有, vol.11, 2012, pp. 4342-4350

(2) H. Lin, T. Onishi, R. Kume, K. Yamashita, Frequency offset and I/Q imbalance estimation for orthogonal frequency division multiplexing based wireless local area networks, Physical Communication, 査読有, vol.5, 2012, pp. 209-216

[学会発表] (計 4 件)

① Y. Jiang, X. Zhu, E. Lim, H. Lin, and Y. Huang, Semi-Blind CoMP system with Multiple-CFO estimation and ICA based equalization, IEEE GLOBECOM 2012, 2012 年 12 月 5 日, アメリカ

② R. Kume, H. Lin, and K. Yamashita, Repeated preamble based carrier frequency offset estimation in the presence of I/Q imbalance, IEEE ICC 2012, 2012 年 6 月 14 日, カナダ

③ H. Lin, and K. Yamashita, Blind frequency-dependent I/Q imbalance compensation using system identification, IEEE GLOBECOM 2011, 2012 年 12 月 7 日, アメリカ

④ T. Onishi, M. Hossain, H. Lin, K. Yamashita, Blind OFDM carrier frequency offset estimation in the presence of DC offset, IEEE WiMob 2011, 2011 年 10 月 12 日, 中国

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: I/Q インバランス補償方法および I/Q インバランスを補償する複素複調器と受信装置

発明者: 林海、山下勝己

権利者: 大阪府立大学

種類: 特許

番号: 特願 2011-265271

出願年月日: 2011 年 12 月 02 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[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・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 40336805

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: