

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：21602

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560406

研究課題名(和文)高精度・複素型直交変復調器の設計技術

研究課題名(英文) Design of High-Precision Complex Quadrature Modulators and Demodulators

研究代表者

束原 恒夫 (TSUKAHARA, Tsuneo)

会津大学・コンピュータ理工学部・教授

研究者番号：10433153

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：無線LAN、携帯電話を中心に、多値変調方式(QAM)が採用され、直交変復調器の変調精度(EVM)への要求が厳しくなり、1%以下が強く望まれる。

本研究では、ローカル(L0)信号の位相誤差、ならびに振幅誤差の影響を、複素信号で表現した。直交変調器の場合には、本来欲しい正周波数成分の複素L0信号に加えて、不要な負周波数成分が発生する。したがって、複素型の直交変調器構成と複素フィルタを組み合わせることで、不要なRF変調信号成分を抑圧する構成を提案した。加えて、新たなL0位相誤差補正回路を提案し、1%以下のEVMを実現可能とした。本変調器は1.2V電源電圧にて8.2mWの低消費電力動作が可能である。

研究成果の概要(英文)：Because quadrature amplitude modulation (QAM) is applied to WLANs and cellular systems to obtain higher bit rates, an error vector magnitude (EVM) with less than 1% is strongly demanded.

We can express local oscillator (LO) signals with phase and amplitude impairments in the complex signal domain. In a quadrature modulator, the negative-frequency component of the LO signal is an undesired one. Therefore, using a complex quadrature modulator and a complex filter, we can reduce an undesired radio frequency (RF) signal. Moreover, introducing a new LO-phase-error correction circuit, we can get EVMs of less than 1%. This modulator dissipates only 8.2 mW at a 1.2-V-power supply.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子デバイス・電子機器

キーワード：無線通信回路 無線トランシーバ 直交変調回路 直交復調回路 RF回路

### 1. 研究開始当初の背景

ここ数十年間で CMOS デバイスの無線周波数 (RF) 回路応用に関する研究開発が大幅に進展し、特に 2000 年代に入ってから、近距離無線システムである Bluetooth、無線 LAN システムを中心に実用化が進められてきた。背景にはデバイスの微細化によるトランジスタ特性の高周波化ならびにデジタル CMOS 回路との混載による低コスト化が挙げられる。さらなるディープサブミクロン時代に入り、トランジスタ特性のばらつきが増大することから、素子ばらつきに強いアナログ・RF 回路のアーキテクチャの開拓が強く望まれている。一方、無線・放送システムに目を向けると、携帯電話を中心に近距離無線、GPS、地上デジタル・テレビなどが多数存在しており、ひとつの端末で各種のサービスを楽しむソフトウェア無線の研究も盛んである。さらに、2011 年の地上アナログテレビ放送停止後の周波数資源の再編に伴い、周波数も柔軟に利用できる端末が必要になってくると推測される。また、無線 LAN、第 4 世代携帯電話、デジタル・テレビを中心に、高ビットレート化を図るため、多値変調方式 (QAM) が採用され、直交変復調器の変調精度 (EVM: Error Vector Magnitude) への要求が厳しくなり、1% 以下が強く望まれるようになってきた。

最近の学会では、ソフトウェア無線機の実現に向けて、マルチバンド・マルチスタンダードに対応する CMOS トランシーバが発表されている [1]。多くの場合、ダイレクト・コンバージョン方式を用いており、送信機には RF 帯直交変調器、受信機には RF 帯直交復調器が用いられている。しかし、直交変調器の変調精度 (EVM) は 2% ~ 4% 程度であり、さらなる改善が不可欠である。

### 2. 研究の目的

本研究では、キャリアとなるローカル (LO) 信号の位相誤差、ならびに振幅ミスマッチ

(誤差) の影響を、複素信号でとらえることに着目した。周波数を高い方にシフトさせる変調器の場合には、本来欲しい「正周波数成分」の複素 LO 信号に加えて、不要な「負周波数成分」が発生する [2]。したがって、「複素型の直交変調器構成」と「複素フィルタ」を組み合わせることで、不要な複素 LO 信号に起因する不要な RF 変調信号成分を抑圧できるという発想に至った。さらに、変調器に用いる直交ミキサ自身で、LO 信号の位相誤差を抑圧できる構成 [3] を変調器用に適用することや、位相誤差抑圧の新たな手法の提案により高精度化を実現する。さらに、全回路の低電圧・省電力動作化を目指す。

### 3. 研究の方法

#### (1) アクティブ直交ミキサの低電圧動作化 (1.8V 以下) の研究

初年度には、低電圧化の手法を検討した。図 1 が提案する高精度・複素型直交変調器 (HP-CQMOD) の構成であり、2 か所の破線で囲んだ部分には、Harvey の提案したアクティブ型直交ミキサ [3] が適用可能である。

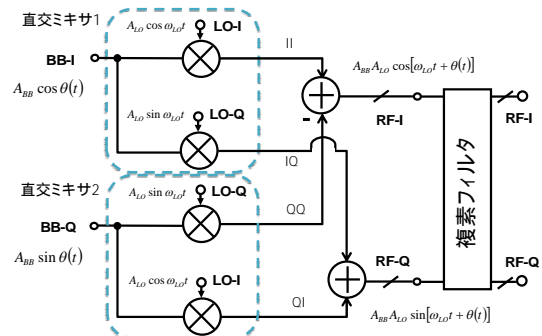


図1 高精度・複素型直交変調器

この直交ミキサはローカル (LO) 信号の位相誤差を補償する効果を持つことが、本提案の特長である。なお、各信号線上の図中の短い斜線は差動信号であることを示している。直交ミキサ 1 の出力 II と直交ミキサ 2 の出力 QQ は減算器により引き算され、同相 RF 出力である  $A_{BB} A_{LO} \cos[\omega_{LO} t + \theta(t)]$  を生成する。一方、直交ミキサ 1 の出力 IQ と直交ミキサ 2 の出力 QI は加算器により加えられて、直交 RF 出力である  $A_{BB} A_{LO} \sin[\omega_{LO} t + \theta(t)]$  を生成する。これにより、

複素型のRF変調信号が得られる。さらに、直交RF信号は、複素フィルタに入力されて、「不要なLO信号の負周波数成分 $e^{-j\omega_{LO}t}$ 」から生じた、負周波数領域の不要なRF信号を抑圧して、高精度のRF変調信号を出力する。具体的な複素フィルタとしては、受動素子からなるRCポリフェーズ・フィルタが適用できる。このフィルタでは負周波数にのみ減衰点を設けることができる特長がある。ただし、素子ばらつきへの対策として多段化が必須なので、信号が減衰し雑音指数が増加する欠点を持つ。RCポリフェーズ・フィルタを用いた構成により、従来の変調器として比較して、SSB (Single Sideband)変調のときに、不要サイドバンド抑圧比が30dB以上(振幅比で30倍以上)、改善できることを明らかにした。しかし、本構成での課題は、アクティブ型直交ミキサの動作電源電圧が2V以上と高いことである。そこで、nch-MOSとpch-MOSを用いた折り返し型アクティブ直交ミキサを考案して、1.8V以下の低電圧動作を可能とした。

(2) パッシブミキサとLO誤差補正回路を用いた低電圧・省電力化の研究

次に、さらなる低電圧化のためには、パッシブ型直交ミキサの適用が不可欠と判断し、図2に示す構成を提案した。1つのパッシブ型ミキサ(図2の乗算記号1個)には、4個のnch-MOSスイッチを用いてダブルバランス構成にしている。パッシブミキサ構成としたことで、Harvey型ミキサに見られた位相誤差補正機能が失われるので、新たなLO誤差補正回路を提案しLO部に付加している。

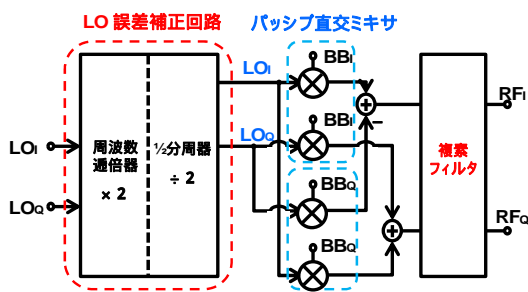


図2 パッシブ直交ミキサを用いた複素型直交変調器

本回路は、周波数2通倍回路と1/2周波数分周回路から成り立つ。元のLO位相誤差は、周波数2通倍の過程で、微小な振幅誤差に変換される。その後、1/2周波数分周回路を経由するとき、その振幅リミット機能で振幅誤差は抑圧され、かつ1/2分周の過程で正確に90°位相が異なるLO直交信号が得られる。一般的な1/2周波数分周回路は、トランジスタの縦積み数が3段となり、低電圧化が難しい。そこで、縦積み段数を2段に減らした折り返しカスコード型フリップフロップを提案した。加えて、動作周波数帯域を拡大するために、複数のフリップフロップを準備しておき、選択して動作させる形式とした。したがって、LO周波数が500MHzから5.5GHzまでの広帯域動作が可能となった。複素フィルタには、RCポリフェーズ・フィルタを適用した。

4. 研究成果

より低電圧・省電力動作に適した、3の(2)で述べたパッシブミキサ型を中心に、0.18μm CMOSデバイスパラメータを用いた回路シミュレーション結果を述べる。なお、パッシブミキサ型については、レイアウト設計とチップ試作(東京大学VDEC経由)まで実施した。

まず、電源電圧・消費電力の面から述べる。折り返しカスコード型フリップフロップの採用により電源電圧をアクティブミキサ型(3の(1)参照)の1.8Vから1.2Vに低減した。加えて、消費電力が8.2mWと従来型のHP-CQMOD [4]と比較して40%以上の消費電力の削減効果を確認した。これは、折り返しカスコード型フリップフロップのバイアス電流を入力部と出力部で独立に最適化できるためである。LO誤差補正回路の消費電流が約8割を占めており、LO誤差補正回路の構成に最適化等により、さらなる低消費電力化が可能である。

次に変調精度について述べる。元の直交LO信号の振幅誤差を0.2dB、位相誤差を5度

と大きめに仮定した時のコンスタレーションを図3に示す。5.2GHzにおけるOFDM変調の変調精度(EVM)は0.94%であり、本研究で提案したLO誤差の補正手法が効果的であることがわかる。従って、本研究で提案する直交変調器は500MHzから5.5GHzの周波数帯において、変調精度1%以下を達成することが可能である。

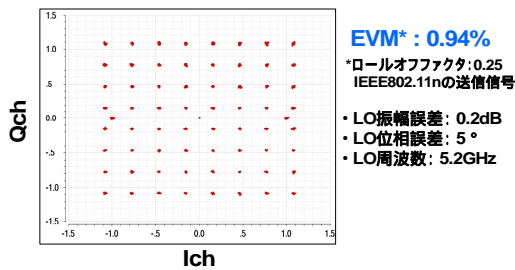


図3 変調信号を用いたときのコンスタレーションとEVM

最後に、本研究で提案するHP-CQMODはフリップフロップやパッシブミキサを要素回路として用いているため、プロセス技術の微細化によってその性能をさらに高めることができる、将来性の高い構成であるといえる。今後の課題として、複素フィルタの可変特性の実現、低損失化などが挙げられる。

【参考文献】

[1] M. Ingels et al., "A 5mm<sup>2</sup> 40nm LP CMOS 0.1-to-3GHz Multistandard Transceiver," Digest of Int'l Solid-State Circuits Conference, pp. 458-459, Feb. 2010.  
 [2] 東原恒夫, 「CMOS RF 回路設計」、丸善、2009年11月30日発行。  
 [3] J. Harvey and R. Harjani, "An Integrated Quadrature Mixer with Improved Image Rejection at Low Voltage," 14<sup>th</sup> International Conference on VLSI Design, Jan. 2001.  
 [4] Takahiro Tsushima and Tsuneo Tsukahara, "Design of Low-Voltage High-Precision Complex Quadrature Modulators," SASIMI 2012, March 8-9, 2012.

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 0件)

〔学会発表〕(計 6件)

高橋 寛太、東原 恒夫、「低電圧・高精度・

複素型直交変調器」、電気学会 電子・情報・システム部門大会、2013年9月5日、北見工業大学(北見市)

高橋 寛太、東原 恒夫、「低電圧動作高精度複素型直交変調器の設計」、電気学会電子回路研究会、2013年1月26日、(高松市)。

高橋 寛太、東原 恒夫、「高精度・複素型低電圧直交変調器の広帯域化」、第31回シリコンアナログRF研究会、2012年12月14日、会津大学(会津若松市)。

高橋 寛太、東原 恒夫、「高精度・複素型低電圧直交変調器」、電子情報通信学会ソサエティ大会、2012年9月11日、富山大学(富山市)。

対馬 孝弘、東原 恒夫、「高精度・複素型低電圧直交変調器の設計」、電子情報通信学会 2012年総合大会、2012年3月22日、岡山大学(岡山市)。

T. Tsushima and T. Tsukahara, "Design of Low-Voltage High-Precision Complex Quadrature Modulators," The 17th Workshop on Synthesis And System Integration of Mixed Information Technologies" (SASIMI 2012), R4-9, pp. 476-481, March 9, 2012 Beppu, Japan. [査読付き]

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

東原 恒夫 (TSUKAHARA, Tsuneo)

研究者番号: 10433153

(2)研究分担者

(3)連携研究者