

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：32407

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420317

研究課題名(和文) チャネルグループ化により隣接チャネル妨害信号抑圧を行う無線受信LSI設計技術

研究課題名(英文) The Wireless-Receiver-LSI Design Technique for Suppressing Adjacent Channel Interference Signal using Channel-Grouping Method

研究代表者

宇賀神 守 (UGAJIN, Mamoru)

日本工業大学・工学部・教授

研究者番号：90506164

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：高いイメージ抑圧性能を持つ2段変換型受信回路を考案した。多位相のアナログ信号に含まれる誤差を自動補正する構成になっており、抵抗および容量値のばらつきが0.1%以下ならば、60dB以上のイメージ抑圧が得られることをモンテカルロシミュレーションにより示した。

3位相の複素バンドパスフィルタの帯域可変制御の検討では、SC回路において2種類の等価抵抗可変方式を考案し、外部信号で通過帯域の可変制御が可能なフィルタを実現した。3相信号周波数変換では、周波数変換において偶数次歪によるノイズの折り返しを抑えることができる改良スイッチ型ミキサを考案し、無線受信感度を約2dB程度向上できることを示した。

研究成果の概要(英文)：A high-image-rejection wireless receiver with an N-phase active RC complex filter is proposed and analyzed. Signal analysis shows that the double-conversion receiver with $(N+N^*)$ mixers corrects the gain and phase mismatches of the adjacent image. Monte Carlo simulations evaluate the relation between image-rejection performances and the dispersions of device parameters for the double-conversion wireless receiver. The simulations show that the image rejection ratio of the adjacent image depends almost only on R and C mismatches in the complex filter.

For controlling the pass-band of a 3-phase active complex filter, switched capacitor architectures were analyzed. Then two types of circuits were devised and designed. Modified 3-phase mixers for canceling folding noises by even-order distortions were devised and analyzed. In principle, 3-phase signal processing could eliminate the folding noise by the 3-order distortion, thus the degradation of the mixer noise figure were reduced by 2 dB.

研究分野：工学

キーワード：無線受信回路 イメージ妨害信号 多位相アナログ信号 電子回路

1. 研究開始当初の背景

LSI プロセスの微細化進展により、LSI のチップコストが急激に増加している。無線トランシーバーLSI においては、高周波回路に用いる大面積のオンチップインダクタがコスト増加の一因になっている。このため各研究機関では、インダクタを用いない RF 回路の研究を進めている。しかし、インダクタを用いない電圧制御型発振器 (VCO) においては共振器の Q 値が非常に小さいため、位相雑音の低減が困難である。またインジェクションロック技術により位相雑音を低減する手法が提案されているが、インジェクションロックでは周波数可変範囲が大幅に制限されてしまうという問題が起こる。

チップコストの増加と同様に、電源電圧の低下および無線周波数の高周波化に伴い、インダクタを用いた従来型 VCO においても低い位相雑音特性を実現することが困難になりつつある。この課題を解決するため各研究機関では VCO の回路構成を改良する検討が行われている。

2. 研究の目的

- (1) 本研究では、VCO の回路構成を改良するのではなく、PLL のフィードバック帯域を大きくすることで、発振器位相雑音を大幅に低減し、発振器構成に依らず多くの無線システムに適用する。
- (2) PLL フィードバック広帯域化に伴う問題は、可変 IF チャンネル選択フィルタ技術およびデジタル IC による可変 IF 変復調技術を開発することで解決する。
- (3) 低 IF 無線トランシーバーの受信信号では、希望信号とイメージ妨害信号が同じ IF にダウンコンバートされる。このためイメージ信号を高精度に抑圧するイメージ抑圧受信回路構成を実現する。

3. 研究の方法

- (1) イメージ除去性能に対する要求条件の厳しい無線スペックに対応するため、高イメージ抑圧型無線受信回路構成を検討する。
- (2) モンテカルロ法を使って回路素子ばらつきとイメージ抑圧性能の関係を精査することで、(1)の効果確認を検証する。
- (3) 可変 IF チャンネル選択フィルタ技術は、原理的に動作が安定で、周波数可変範囲を拡大できる 3 相のアクティブ複素フィルタに焦点を絞り検討する。周波数可変方法は、スイッチ・キャパシタによる可変抵抗を用いる。可変方法はキャパシタ・アレイによる容量値可変型とスイッチ周波数可変型の併用方式を検討する。
- (4) 3 位相を用いた無線受信回路を実現するため、位相雑音の小さい 3 相 LC-VCO の実

現を図る。

4. 研究成果

(1) 非常に高いイメージ抑圧性能を実現するため、3 以上の任意の自然数 N について、 $(N+N^2)$ 個の周波数ダウンコンバージョン・ミキサを用いる 2 段変換型受信回路構成を考案した。N=3 の場合の回路構成を図 1 に示す。本方式で発生する 3 種類のイメージ (IMG1~IMG3) のうち、受信機性能に最も影響を与える IMG1 を高精度に除去できる構成になっている。

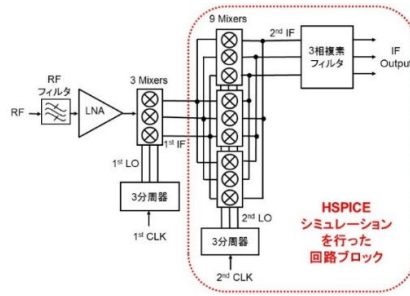


図 1 高イメージ抑圧型無線受信回路構成

また、動作原理を N 相信号による信号解析により解析的に証明した。本無線受信機回路は、第 1 の中間周波数信号と第 2 の局発信号に含まれている誤差を補正する機能があるため、イメージ抑圧性能は相対誤差の積の値で決定され、図 2 に示すように 1% 程度の相対誤差がある場合でも 80dB 程度の IMG1 抑圧が実現できる。

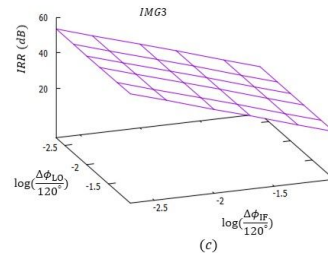
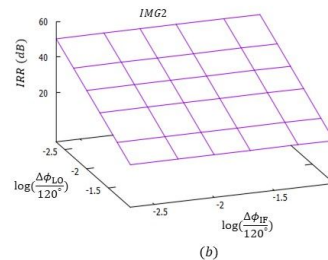
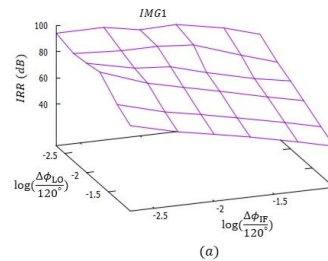


図 2 位相誤差とイメージ抑圧性能の関係

(2) (1)は、回路を構成するトランジスタや抵抗、容量などに特性ばらつきがない場合の結果である。このため、素子特性ばらつきに対するイメージ抑圧性能をモンテカルロ計算を用いて評価した。モンテカルロ計算では、回路を構成する全てのトランジスタ幅、抵抗および容量の大きさを個別かつ独立にランダムにばらつかせる。ばらつきはガウス分布を想定し、標準偏差の相対値をシミュレーションの入力変数とした。素子をばらつかせた状態の受信機で希望信号およびイメージ妨害信号に対する受信機の信号増幅度を計算し、その2値の比をイメージ除去率(IMRR)と定義する。

図3は、抵抗、容量、およびトランジスタ幅の相対標準偏差とIMRR平均値の関係を示している。図よりIMRR値の向上には抵抗および容量値のばらつきを抑えることが重要である。IMG1に対して60dB以上のIMRR値を得るには、抵抗および容量値のばらつきを0.1%以下にばらつきを抑える必要がある。

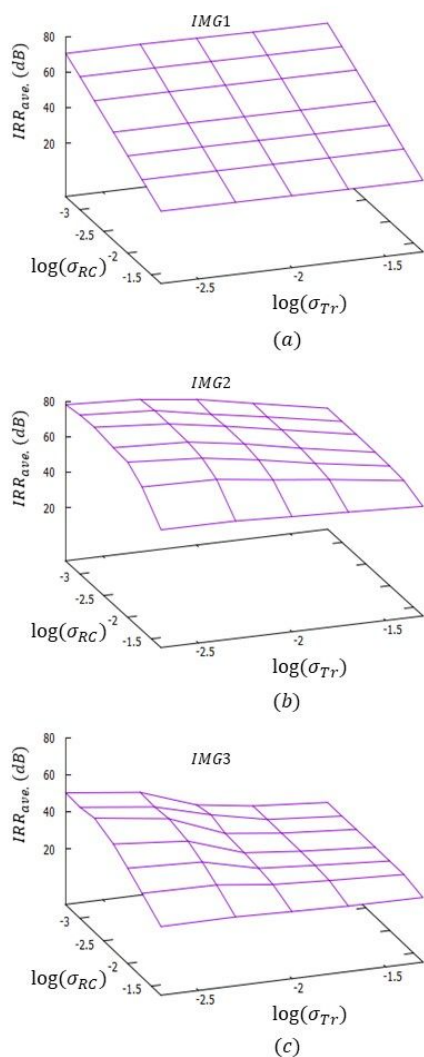


図3 IMRR平均値と素子ばらつきの相対標準偏差との関係

(3) 3位相の反転増幅器出力を電流加算することで、負性抵抗型LC発振器の位相雑音を低減できる見通しを得た。

(4) 3位相の複素バンドパスフィルタの帯域可変制御の検討では、SC回路において2種類の等価抵抗可変方式を検討し、外部信号で通過帯域の可変制御が可能なフィルタを実現した。クロック周波数制御方式では可変時に高いバンド幅の安定性を持つが、容量制御方式と比べ細やかな帯域の調整が難しく、SC回路の改善によりバンド幅の安定性を得ることができた容量制御方式がフィルタ回路の可変化には適した構成であるとわかった。

(5) 3相信号周波数変換における折り返しノイズ低減法の検討では、3次歪によるノイズの折り返しが原理的に発生しないことを確認した。このため、周波数変換において偶数次歪によるノイズの折り返しを抑えることができる改良スイッチ型ミキサ(図4)を考案した。このミキサの6相スイッチ制御信号はduty比1/3のフル振幅クロック信号で記号(、+60°、+240°)は制御信号の位相を示している。図に示す構造によりスイッチがonであるduty比が等価的に1/2に変換され、かつスイッチがonである期間の信号を積分する機能を兼ね備えている。このため、偶数次歪によるノイズの折り返しをほぼ100%除去できる。以上により無線受信感度を約2dB程度向上できることが分かった。

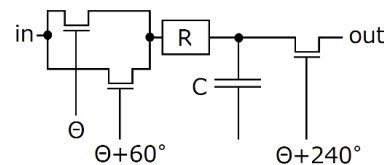


図4 改良スイッチ型ミキサの構成

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)

Mamoru Ugajin, Takuya Shindo, Tsuneo Tsukahara, Takefumi Hiraguri, An (N+N2)- Mixer Architecture for a High-Image-Rejection Wireless Receiver with an N-Phase Active Complex Filter, IEICE Trans. on Fundamentals, 査読有, Vol. E100-A, 2017, 1008-1014

DOI:10.1587/transfun.E100.A.1008

Mamoru Ugajin, Yuta Kobayashi, Tsuneo Tsukahara, High-Image-Rejection Wireless-Receiver Architecture with a

3-Phase Active RC Complex Filter, IEICE Electronics Express, 査読有, Vol.12, 2015, 1-6
DOI:10.1587/elex.12.20150329

〔学会発表〕(計 7 件)

Mamoru Ugajin, Takuya Shindou, Image-Rejection-Performance Assessment of Double-Conversion Wireless Receiver with 3-Phase Complex Filter Using Montecarlo Simulation, ISCIT 2015, 299-302, October 8, 2015, Nara-shi, Nara Prefecture, Japan, DOI:10.1109/ISCIT.2015.7458366

内田凌雅, 宇賀神守, 3 相信号周波数変換における折り返しノイズ低減法の検討, 電子情報通信学会 東京支部学生会 第 22 回研究発表会, 2017 年 03 月 4 日, 東京都・港区

山崎翔太, 宇賀神守, 負性抵抗型 3 相 LC 電圧制御発振回路の研究, 電子情報通信学会 東京支部学生会 第 22 回研究発表会, 2017 年 03 月 4 日, 東京都・港区

松本直樹, 宇賀神守, 3 相複素バンドパスフィルタの帯域可変制御の検討, 電子情報通信学会 東京支部学生会 第 22 回研究発表会, 2017 年 03 月 4 日, 東京都・港区

内田凌雅, 松本直樹, 宇賀神守, $(3+3^2)$ ミキサ受信機におけるミキサ改良による折り返しノイズの低減, 2016 電子情報通信学会総合大会, 2016 年 03 月 15 日, 福岡県・福岡市

宇賀神守, 3 相複素フィルタを用いた高イメージ抑圧無線受信機の検討, 電気学会 電子・情報・システム部門大会, 2015 年 08 月 27 日, 長崎県・長崎市

宇賀神守, 小林雄太, 東原恒夫, 3 相複素 RC バンドパスフィルタを用いた高精度イメージ抑圧無線受信機構成の検討, アナログ RF 研究会, 2014 年 12 月 3 日, 京都府・京都市

〔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〕

無し

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

宇賀神 守 (UGAJIN, Mamoru)
日本工業大学・工学部・教授
研究者番号: 9 0 5 0 6 1 6 4

(2) 研究分担者

東原 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: 1 0 4 3 3 1 5 3

(3) 連携研究者

無し

(4) 研究協力者

無し