

コグニティブ無線を実現するリコンフィギュラブルRF回路技術の研究開発 (102103015)

Reconfigurable RF Circuits for Cognitive Radios

研究代表者

岡田健一 東京工業大学大学院理工学研究科電子物理工学専攻

Kenichi Okada Tokyo Institute of Technology

研究期間 平成 22 年度～平成 24 年度

概要

利用者に周波数を意識させないコグニティブ無線は、無線技術として究極の目標の一つであるが、未だに実用化の目途は立っていない。携帯可能でチューナブルな無線機が実現できないからである。本研究課題では、コグニティブ無線機の実現に向けて、CMOS ワンチップによるチューナブル無線機の研究開発を行う。従来、携帯機器向け無線回路の周波数可変範囲は高々300MHz 幅程度であったが、リコンフィギュラブルRF回路技術により、400MHz から10GHz で利用可能なチューナブルRFフロントエンドを実現する。設計・試作・実装・測定を通して、本申請技術を商用化が可能なレベルまで高めることを目標とする。

1. まえがき

コグニティブ無線の実現には、チューナブルな無線機が不可欠である。本研究では、コグニティブ無線に必要な広帯域な局部発振器および広帯域な受信機の検討を行った。

2. 研究開発内容及び成果

2.1 広帯域電圧制御発振器

広帯域電圧制御発振器の実現に向け、分数分周が可能な注入同期発振器とLC型発振器を組み合わせる方式について検討した。従来はロックレンジが狭いという課題があり、本研究では自己キャリブレーション機能を備え、等価的にロックレンジを広げることができる広帯域発振器により解決した。LC型発振器で9-12GHz程度の周波数を生成する。注入同期発振器では分周比に応じて発振周波数をあらかじめ調整する必要があるが、この際、PLLで生成した周波数との比較を行い、周波数調整を行う。この際、分数比での比較が必要になり、通常はディザリングによる消費電力と回路規模の増加が懸念される。PLLからの出力とILFDからの出力と両方を分周することにより、単純な整数分周のみで周波数キャリブレーションを可能とする方式(図1)を考案し、実際に、10MHzから6.6GHzまでの直交出力を実現する世界発の単一LC共振器によるPLLを実現した。CMOSプロセスで実装し、面積はわずか0.38mm²であった(図2)。差動出力が可能のため2倍波を取り出すことにより、10MHzから13.2GHzの出力が可能である。本プロジェクトにおける最終目標である400MHzから10GHzでの出力周波数範囲を大きく上回る回路を実現した。

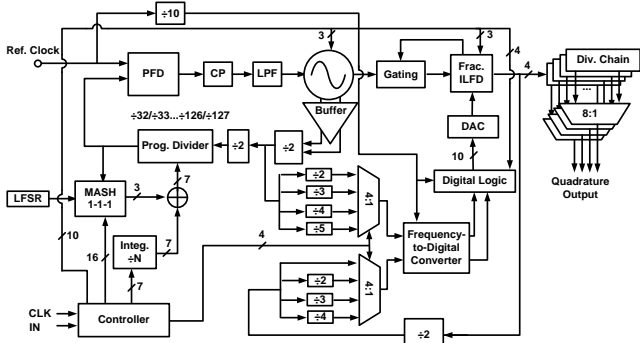


図1：広帯域電圧制御発振器の回路図

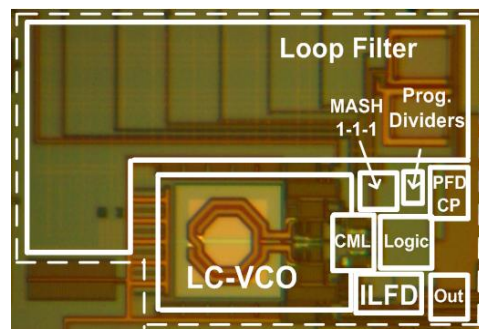


図2：チップ写真

2.2 リファレンスクロック注入による低消費電力低位相雑音発振器

発振器には、LC型とリング型がある。LC型は位相雑音が良い反面、面積が大きい。リング型は、面積は小さく、周波数可変範囲も広いが、位相雑音が悪い。リング型発振器の位相雑音改善のため、リファレンスクロックを直接注入する方法について検討を行った。

図3は従来の注入同期型PLLを示す。注入同期により、低ジッタ化が可能であるが温度や電源変動があると動作が不安定になる。また、アナログLPFを利用するため回路面積も大きい。図4が提案型の二重ループを用いる注入同期PLLである。主発振器を注入同期し、補助発振器により周波数補償を行う。温度や電源変動に対して安定に動作が可能である。ループ部は完全にデジタル回路で構成され、2つの発振器間の周波数オフセットの校正が可能である。CMOSプロセスで実装し、0.022mm²の面積で(図5)、0.5-1.6GHzをわずか0.97mWで出力できるPLLを実現した。図6に、最新の研究成果報告との比較を示す。本研究成果では大幅な小型化・低ジッタ化を達成した。

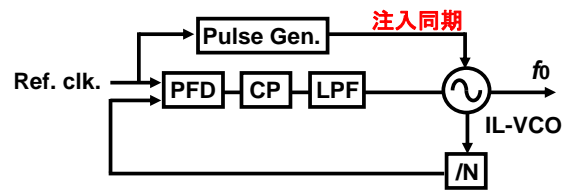


図3：従来の注入同期型PLL

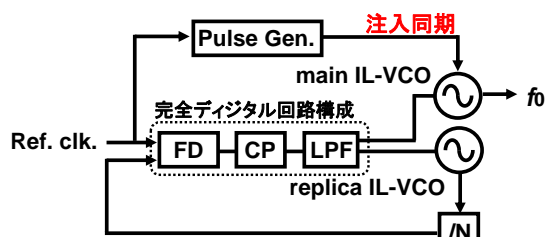


図4：提案する二重ループ型注入同期型PLL



図5：提案する二重ループ型注入同期型PLL

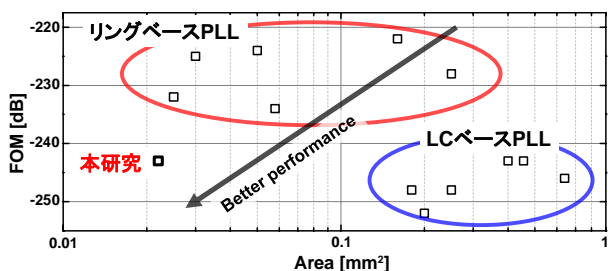


図6：論文データとの性能比較

2.3 広帯域低雑音増幅器

コグニティブ無線実現のためには、広帯域な受信機が必要である。送信機は、自分で送信する所望波のみを考慮すればいいのに対して、広帯域な受信機は所望波以外にも妨害波が混入するため、雑音指数だけでなく、線形性への考慮が非常に重要となる。広帯域な低雑音増幅器を実現するためには、シャントフィードバック型とコモンゲート型があるが、シャントフィードバック型は消費電力が大きいため、本研究ではコモンゲート型において、さらなる性能改善のため、容量帰還による性能改善について検討した。

シングルエンド型のコモンゲート型低雑音増幅器(CG LNA)では入力整合をとると、トランジスタのトランスコンダクタンス g_m と入力インピーダンス R_s の積が1となるので、雑音指数 $NF=1+\gamma+4R_s/R_L=2.71\text{dB}$ となる(負荷インピーダンス $1\text{k}\Omega$)。また、従来知られる容量クロスカプル型LNA(CCC-CG LNA)では雑音指数が 1.86dB となる。図7に示す提案型では、入力段のトランジスタに対して、入出力を容量で接続する回路構成をとる。帰還量を調整することにより、雑音指数の改善と線形性の向上が可能である。提案するC-feedback CCC-CG LNAでは雑音指数は 1.44dB となり、大幅な性能改善を実現できる。実際にCMOSチップとして作製し、その有効性を確認した。

また、上記の広帯域低雑音増幅器とミキサとの間にチューナブルなフィルタを挿入することにより、チューナブルな受信機を実現した。

3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取り組み

本研究開発課題は、非常に多数のバンドを用いる携帯電話向けの無線機回路技術としての利用を想定したものであ

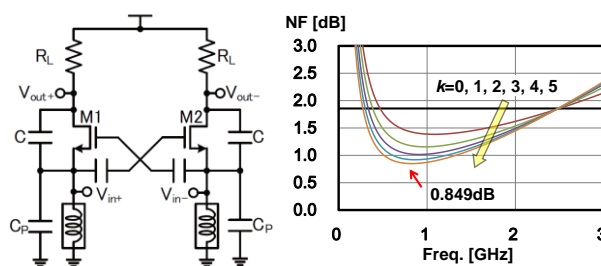


図7：容量フィードバックを用いたコモンゲート型低雑音増幅器

るが、そもそも、様々な無線通信規格へ柔軟に対応することが可能な技術であり、携帯電話以外への広範な応用が期待できる。モバイル機器での利用において、国ごとに規格の異なるテレビ受信機や、規格の乱立するセンサーネットワーク機器への柔軟な対応が可能である。日本の得意とする白物家電でのホームネットワーク技術や、その相互接続の柔軟性確保が可能であり、製品の早期展開に寄与できる。

4. むすび

本研究ではコグニティブ無線に利用可能なチューナブルな無線機を実際にCMOSチップとして作製し、提案回路技術の有効性を実証した。また、提案回路技術は、無線機に限定されず幅広い応用が期待できる。

【誌上発表リスト】

- [1] A. Musa, *et al.*, "A Compact, Low Power and Low Jitter Dual-Loop Injection Locked PLL Using All-Digital PVT Calibration," IEEE Journal of Solid-State Circuits (JSSC), Vol. 49, No. 1 (2014/01)
- [2] W. Deng, *et al.*, "A 0.022mm² 970μW Injection-Locked PLL with -243dB FOM using Synthesizable All-Digital PVT Calibration Circuits," IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), pp.248-249 (2013/02)
- [3] T. Ito, K. Okada, and A. Matsuzawa, "A Wideband Common-Gate Low-Noise Amplifier Using Capacitive Feedback," IEICE Transactions on Electronics, Vol. E95-C, No. 10, pp. 1666-1674 (2012/10)

【受賞リスト】

- [1] 岡田 健一、船井学術賞、“リコンフィギュラブルアナログ回路設計技術の研究”、2012年4月14日
- [2] 伊藤 利彦、村上 壘、岡田 健一、松澤 昭、LSIとシステムのワークショップ 優秀ポスター賞、“オンチップチューナブルノッチフィルタを用いたマルチバンド無線受信機の研究”、2011年5月18日
- [3] 岡田 健一、文部科学大臣表彰 若手科学者賞、“リコンフィギュラブルRF回路設計技術の研究”、2011年4月11日(他11件)

【報道掲載リスト】

- [1] “二重ループ構造で注入同期現象安定化・低消費電力のクロック生成実現”、科学新聞、2013年3月15日
- [2] “ISSCC 2013・東工大、集積回路内における注入同期現象の安定化技術を開発”、マイナビニュース、2013年2月18日
- [3] “二重ループ構造により注入同期現象を安定化 ー小型・低ジッタ・低消費電力のクロック生成を実現ー”、東京工業大学プレスリリース、2013年2月15日

【本研究開発課題を掲載したホームページ】

<http://www.ssc.pe.titech.ac.jp/~okada/index.html>