

	おおか しょうじ
氏名	大高 章二
授与学位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成13年3月14日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	昭和62年3月 東北大学大学院工学研究科電子工学専攻前期課程 修了
学位論文題目	携帯無線端末用アナログフロントエンド部の 小形化と低消費電力化に関する研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 澤谷 邦男 東北大学教授 坪内 和夫 東北大学教授 安達 文幸

論 文 内 容 要 旨

本論文は、携帯無線端末の小形化、低価格化、低消費電力化を目的に、研究・開発を行なった無線アナログフロントエンド部の集積回路(IC)設計技術について論じたものである。小形化、低価格化に向く無線方式は、中間周波数(IF)段がない直接変換方式である。しかし、この方式は消費電力が大きく、無線特性を劣化させる特有の問題を抱えている。一方、低消費電力化で有利な無線方式は、ヘテロダイン方式である。しかし、この方式は直接変換方式に比べて容量が大きくなり、価格も高くなる欠点がある。本論文では、これら2つの無線方式に用いる無線アナログ回路の研究を通し、直接変換方式特有の問題を解決する回路技術を無線アナログ回路の低消費電力化技術に焦点を当てて論じた。

第1章では、本研究の背景を述べるとともに、研究課題を明確化する。研究課題は大きく分けて2つある。1つは、直接変換方式無線部における研究課題である。送信部においては、電力増幅器(PA)-電圧制御発振器(VCO)干渉の低減、RF帯90度移相器のベクトル誤差の改善、RF帯可変減衰器の減衰量設定誤差の改善である。受信部における研究課題は、受信ミキサの直流オフセット、2次歪を低減することである。特に、PA-VCO干渉問題、直流オフセット問題、2次歪問題は、LO(Local Oscillator)周波数とRF周波数が同一であることが原因である。もう1つの課題は、無線アナログフロントエンド部の低消費電力化である。これは、伝送信号が広帯域化する次世代の無線システムでは特に問題となる。なぜならば、伝送信号が広帯域化すると、IF周波数が現行よりも高くなるため、IF段のアナログ回路の消費電力は必然的に高くなるからである。

第2章では、無線機のアナログフロントエンド部に必須な90度移相器、送受信ミキサ、可変利得増幅器および可変減衰器の様々な回路例を示し、それぞれの回路の特性を比較した。

直接変換方式に用いる 90 度移相器は、RF 周波数帯で動作するため、低消費出力の観点から CR-RC ブリッジ回路を用いたアナログ型が有利であることを述べた。また、アナログ方式において振幅精度と移相精度の高精度化を同時に図る研究動向を述べた。送受ミキサは、雑音、LO 電力依存性、消費電力の観点から、スイッチ型ミキサであるシングルバランミキサ (SBM) およびダブルバランミキサ (DBM) が優れた特性を示すことを述べた。また、第 4 章で議論する直交 I/Q ミキサに用いる DBM に対して、LO 信号および RF 信号の平行性を得ることが重要な課題であることを述べた。可変利得増幅器は、使用する周波数帯や要求される可変利得幅、雑音等など全ての比較項目に対して優れた回路個性はなく、用途により使い分けが必要である。本章では、第 3、4、5 章で研究開発する可変利得増幅器の研究動向を示すとともに、その研究課題を明確にした。さらに、無線システムの要求と回路特性の対応を明確にした。

第 3 章では、小形化、低価格化に向く直接変換方式を採用した、送信部の集積化技術について議論する。直接変換方式送信部で最も問題となる点は、PA 出力周波数と VCO 出力周波数が同じであることにより生じる PA-VCO 干渉である。この対策として、LO 信号系に周波数ダブラを挿入し、PA と VCO の出力周波数を変える従来の構成を採用した。試作した送信ブロック IC は、周波数ダブラ、90 度移相器付き直交変調器、可変減衰器を集積した。直接変換方式の回路技術での課題は、周波数ダブラの低消費電力化を行うこと、高精度な直交(I/Q)LO 信号を得ること、RF 信号の利得設定を高精度に行なうことである。以下に、これらの回路技術の課題に対して本論文で提案した回路技術をまとめる。

周波数ダブラは、ギルバート乗算器と提案した電流駆動型 90 度移相器により構成した。提案した 90 度移相器は高利得特性が得られ、矩形波入力に対しても単一波と同様に高移相精度を維持できる特徴をもつ。これにより、周波数ダブラの低消費電力化が可能になった。周波数ダブラの f_{lo} 漏洩は目標仕様値 -25 dBc 以下に抑えられており、PA-VCO 干渉を十分抑圧できるものと考えられる。

90 度移相器付き直交変調器では、ベクトル誤差を左右する 90 度移相器とリミッタ増幅器の特性について考察を加えた。ここでも、90 度移相器の高利得化が重要な役割を果たすことを示した。提案した高利得 90 度移相器は、周波数ダブラで提案した電流駆動型 90 度移相器のキャパシタと共振するオンチップインダクタを付加することにより、さらに高利得化を図ったものである。この移相器を用いることにより、低 LO 入力電力に対してもベクトル誤差が小さい良好な特性が得られた。この移相器の高利得化技術は、直交変調器の性能を劣化されることなく、周波数ダブラの低消費電力化を測ることに役立つ。また、直交変調器の無調整化手法にも有効である。

可変減衰器は、エミッタ縮退抵抗を用いた差動増幅器を基にした、デジタル制御電流スイッチ型可変減衰器を採用した。エミッタ縮退抵抗と負荷抵抗の抵抗比により減衰量(利得)を制御できるので、高精度の減衰量が得られる。しかしながら、エミッタ縮退抵抗とその両端に寄生するキャパシタにより、最大減衰量が低下するため、高精度でしかも広い可変

幅の可変減衰器が得られない。この問題を明らかにするとともに、高精度、広可変幅でも低消費電力に適した可変減衰器を提案した。高精度、広可変幅を得るため、エミッタ縮退抵抗の値を小さくした。これに対して、線形性を維持するためには、電流を多く流す必要がある。この電流を相殺するため、可変減衰器の出力バッファ回路を取り除いた構成を提案した。可変減衰器は利得をもつ必要がなく、負荷抵抗の値を小さく設定できるので、出力バッファ回路を取り除いても重大な特性劣化は生じない。さらに、エミッタ縮退抵抗の両端に寄生するキャパシタを小さくするため、電流源とエミッタ縮退抵抗を用いた増幅器の間に、電流スイッチを挿入する回路構成を提案した。

これらの各回路ブロックを集積化した送信ブロック IC を試作し、特性評価を行なった結果、目標仕様値を満足する結果が得られた。送信ブロック IC は、PHS 無線端末用アナログフロントエンド部に適用可能である。さらに、ここで開発した無線アーキテクチャ技術や回路技術は、他の無線システムにも適用可能である。

第4章では、直接変換方式を採用した PHS 用受信ブロック IC の高集積化技術について議論した。本章では、直流オフセットおよび2次歪の低減を図った直接変換直交 I/Q ミキサに焦点を当てて論じた。なぜならば、直流オフセットおよび2次歪は、主に直交 I/Q ミキサで発生し、これらが受信特性の劣化を招くためである。直流オフセットは、RF 信号線に漏洩した LO 信号が自己混合(セルフミキシング)した結果として出力されるものである。一方、RF 信号の2次歪はベースバンド帯域に周波数変換されるので、所望波を汚してしまう。

ミキサ動作の考察から、SBM に比べて、DBM は直流オフセットおよび2次歪が小さくことを明らかにした。この理由は、DBM に入力される信号 RF 信号の同相成分を除去する作用をもつからである。また、DBM に入力される LO 信号のオフセット電圧 σ_{LO} と2次歪は比例関係になることを論じた。LO 信号電力と LO 信号のオフセット電圧 σ_{LO} は反比例の関係になるので、LO 入力電力を高めることにより2次歪は低減できることを解析し、この現象を実験で確認した。

DBM の特性を十分引き出させるためには、同相成分のない平衡な RF 信号を DBM に入力する必要がある。このため、提案したオンチップバランを DBM の前段に備えた。オンチップバランは LC 共振回路を並列に2つ接続した構成としたので、線形性が高く、低消費電力である。直流オフセットの原因となる RF 入力端子への LO 信号漏洩を小さくするため、第3章で議論した高利得90度移相器を用いた。これにより、LO 入力電力を小さくできるので、RF 入力端子へ漏洩する LO 電力も低減できる。さらに、回路レイアウトの対称性を利用して、RF 端子へ漏洩する LO 電力を低減した。この高利得90度移相器は、リミッタ増幅器のオフセットを低減させる効果があるので、DBM に与える LO 信号の平衡度を高めること、すなわち、LO 信号のオフセット電圧 σ_{LO} を小さくすることにも寄与するものである。信号の利得を可変にするため、エミッタ面積比を利用して分流比(利得)を決める可変利得増幅器を新たに提案した。また、この可変利得増幅器はオンチップバランと組み合わせることにより、さらに低消費電力化を図った。

受信ブロック IC の評価結果は、受信部の目標仕様を満たすものである。したがって、直流オフセットキャンセラを用意し、オフセット電圧をデジタル的に補償すれば、本 IC は PHS 用アナログフロントエンド部に使用できる。ここで議論した直流オフセット、2 次歪の低減手法は今後の直接変換方式受信部 IC の開発に役立つものである。

第 5 章では、ヘテロダイン方式を用いた次世代 CDMA 用 IF 段可変利得増幅器の広帯域化、低消費電力化を実現する回路技術について論じた。次世代の CDMA システムでは、現 CDMA システムである N-CDMA システムに比べて信号帯域幅が広くなるとともに、RF 周波数も高くなると予想される。この場合、IF 周波数を現状のままで一定にすると、IF フィルタの挿入損失が大きくなり、イメージ信号の減衰量が小さくなる。これは、受信部の歪特性や雑音特性を劣化させる。この劣化を抑えるため、IF 周波数を高めることが有効である。しかしながら、IF 周波数を高くすると、可変利得増幅器など IF 段の回路の消費電力が大きくなる問題がある。

本章では、低消費電力でしかも高速な IF 段可変利得増幅器を提案し、その有効性を議論した。まず、低消費電力、高速性に関して、従来から知られる 4 つの可変利得増幅器を比較検討し、信号加算可変利得増幅器が優れていると結論づけた。しかし、信号加算可変利得増幅器は linear-in-dB 特性を示す範囲が狭いため、広い可変範囲(たとえば 80dB 以上)が要求される場合、可変利得段数が増加し、結果的に消費電力が高くなる。

信号加算可変利得増幅器の linear-in-dB 特性の可変範囲を広くするため、利得制御信号のプリディストーション回路を付加することを提案した。この手法を用いると、信号加算可変利得増幅器を 2 段縦列接続することにより、80 dB の linear-in-dB 特性を得ることができる。これにより、可変利得増幅器の低消費電力化、低雑音化を実現した。

信号加算可変利得増幅器は温度依存性をもつため、温度補償を行なう必要がある。このため、温度に比例した電流と利得制御信号の乗算結果を用いた温度補償手法を提案した。また、初段の相互コンダクタンス増幅器の温度補償に関しても、温度に比例した電流を用いた温度補償手法を提案した。

試作した可変利得増幅器は回路基板に実装して評価した結果、提案した可変利得増幅器は広い linear-in-dB 特性をもち、低消費電力でしかも高速性、低雑音性にも優れていることを確認した。さらに、提案した温度補償手法を用いれば、linear-in-dB 特性の利得偏差や温度変動も小さくできることを実測にて検証した。試作した可変利得増幅器は、次世代の CDMA システム端末に使用可能であるとともに、現状の CDMA システムである N-CDMA の端末に使用できる。

以上、携帯無線端末の小形化、低価格化、低消費電力化を目的に、直接変換方式無線アナログフロントエンド部の高集積化の研究を行なうとともに、ヘテロダイン方式を用いた次世代 CDMA システム用 IF 段可変利得増幅器の低消費電力化について論じた。本論文で研究・開発した回路設計技術は、今後の無線アナログフロントエンド部の回路設計技術に役立つものと考えられる。

論文審査結果の要旨

携帯無線端末の機能をさらに高めるためには、無線アナログフロントエンド部の小形化と低消費電力化が重要である。直接変換送受信方式は従来のスーパーヘテロダイン方式に比べて小形化の点で有利であるが、局部発振器と高周波電力増幅器の間の干渉、消費電力の増大、直流オフセット、2次歪などの問題がある。著者は、新たな回路構成を提案することにより、これらの問題を解決すると共に、次世代の移動通信に要求される広帯域 IF 段可変利得増幅器の低消費電力化を達成した。本論文はこれらの研究成果をまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、無線アナログ回路について従来の研究動向ならびに要求される技術課題を明らかにしている。

第3章では、直接変換方式を用いた送信部について述べている。まず、従来の電圧駆動型に代えて電流駆動型の高利得90度移相器を提案し、これを用いた周波数ダブラを採用することにより、局部発振器と高周波電力増幅器の間の干渉を抑制して低消費電力化が達成できることを示している。また、この移相器にインダクタを付加することにより、直交変調器用の移相器のさらなる高利得化、高調波削減、及び低電圧化を図っている。さらに、RF可変減衰器については寄生容量を小さくした回路構成を提案し、その高精度化を達成している。これらの研究により、消費電力を従来に比べて20%低減するなど、送信部の性能を改善しており、高く評価できる。

第4章では、直接変換方式受信部について述べている。従来のダブルバランスドミキサの前段にLC共振器を付加してRF信号の平衡性を高め、また、第3章で提案した移相器を用いてローカル信号の平衡性を高めることにより2次歪を抑制すると共に、後段のリミッタ増幅器の直流オフセットを低減する手法を提案して、その有効性を示している。これらは、有用な知見である。

第5章では、従来の分流型可変利得増幅器1段当たりの可変幅を大きくするために、利得制御補償回路を考案し、増幅器の段数を削減して低消費電力化を図っている。また、利得制御信号に温度特性を加えることにより温度依存性を打ち消す手法を提案している。これらは、次世代移動通信に要求される広帯域IF段可変利得増幅器の特性を改善したもので、優れた研究成果である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、携帯無線端末機用アナログフロントエンド部の小形化と低消費電力化を図るために、直接変換送受信方式の問題点を解決する回路構成を提案してその有効性を示すと共に、広帯域IF段可変利得増幅器の低消費電力化を達成したもので、無線通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。