

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630161

研究課題名(和文)無線通信機器回路内電力回生技術の萌芽

研究課題名(英文)Power Recovery Technique in Integrated Circuit for Wireless Communication

研究代表者

岡村 康行(Okamura, Yasuyuki)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：80144442

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：携帯型無線通信端末の複雑化・高機能化に伴って端末の低消費電力化の取り組みが本格化している。アナログ回路においては、高能率な非線形増幅器を使用することで消費電力を低減できる。しかしながら、近年の超高速無線通信で用いられる多値変調などでは信号振幅が大きく変動する為に非線形増幅器の適用が困難である。本研究の目的は、電力回収機構を備えた新しい構造の高効率無線送信回路を実現することである。微細化による消費電力の恩恵を最大限に獲得する為に、アナログ回路機能のデジタル回路への大幅な移行に取り組む。回路において不要放射電力を回収して再利用する機構を組み込む。

研究成果の概要(英文)：Many researchers are now working to reduce power consumption of portable wireless terminals with their high-performance. In digital circuits, the process miniaturization is the major driving force to achieve the low-power consumption. However, we cannot expect to improve the analog circuits by using same method. Conventionally, nonlinear amplifiers with high efficiency are utilized for this purpose. On the other hand, this method is not available for the multilevel modulation for the reason of large signal fluctuation. Here, we propose a newly circuit architecture named out-phase architecture in which a lot of analog circuits are replaced by digital circuits to reduce the power consumption. The proposed architecture can realize many convenient functions such as highly linear power amplifiers, highly linear frequency multipliers and so on. Furthermore, we try to take the power recovery circuits into the proposed circuits to collect the unwanted power and demonstrate their usefulness.

研究分野：電気電子工学

キーワード：非線形増幅器 周波数利用効率 線形化 アウトフェーズ 集積回路 ミリ波サブミリ波通信 電力回収 電力再利用

1. 研究開始当初の背景

携帯型無線通信端末の複雑化・高機能化に伴って端末の稼働時間が低下してきている。それに伴って、端末の低消費電力化の取り組みが本格化している。無線通信端末は大きく分けてデジタル回路部、アナログ回路部に分けられ、それぞれに異なったアプローチで低消費電力化を図らなければならない。デジタル回路部の消費電力はスイッチング素子の開閉損失が主な要因であり、動作周波数が高周波数化すればするほど消費電力は増大し、回路素子が微細化し低電圧駆動化すればするほど消費電力が低下する。一般に、現在のデジタルプロセッサはシリコンプロセスの微細化によって消費電力が大きく削減されている。一方で、アナログ回路においては、電力増幅回路の電力付加効率によって規定される損失が主な要因であり、高効率な非線形増幅器を使用することで消費電力を低減できる。しかしながら、近年の超高速無線通信で用いられる多値変調などでは信号振幅が大きく変動する為に非線形増幅器の適用が困難であり、アナログ部の回路損失が増大する一因となっている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、電力回収機構を備えた新しい構造の高効率無線送信回路を実現することである。微細化による消費電力の恩恵を最大限に獲得する為に、現在アナログ回路で構成されている機能のデジタル回路への大幅な移行、高効率な非線形電力増幅器を適用可能な回路構成の検討に取り組む。さらに、これらの回路において不必要に放射されてしまう電力を回収して再利用する機構を組み込み、新しい低消費電力回路の萌芽を目指す。

3. 研究の方法

アウトフェーズ変調器の主な構成要素は、アウトフェーズ信号の生成部、電力回収機構に大きく分けられる。そこで、研究推進に当たって、これらを分割して検討を行った。さらに、将来のミリ波テラヘルツ波動作を見越してシリコン集積回路による回路要素の試作評価についても合わせて実施した。

4. 研究成果

実験を通して、提案回路により高効率な非線形増幅器を用いた際の出力歪みの抑圧、逆相モード電力の分離と回収が可能であることを実証した。最終年度までに、電力回収機構の原理実験、信号発生部の原理実験、シリコン集積化発振器について取り組んだ。最終年度は、非線形増幅器を用いた無線信号の高効率生成実験、提案回路の集積回路化、二年目に見出した高周波変調に適した新構成回路につ

いての原理検証及び要素回路の試作について試みた。これらの結果より、本研究の目的は概ね達成でき、当初の計画よりを超えた成果も得ることができたと言える。

(1) 電力回収機構の原理実験

ラットレース型ハイブリッド回路を用いた電力回収機構の原理確認実験を行った。整流回路を効率的に駆動するための最適負荷抵抗値の電圧級数法による解析を行い、負荷抵抗の最適値はダイオード内部の損失抵抗に大きく依存することを示し、信号源出力抵抗の設計を可能とした。

回収電力帰還系統設計のためのシミュレーション検討を行った。電流帰還系統のシミュレーション検討から、逆流防止用ダイオードによる電圧降下が弱電力出力時の電力回収効率に悪影響を及ぼすことがわかった。効率よい電力帰還回路を設計するためには、できるだけ低しきい値のダイオードを用いることが望ましいことがわかった。

回収する高周波電力を直接帰還する手法のシミュレーション検討を行った。増幅器出力を直接結合することで高周波電力の直接帰還を試みたところ、高い直線性を示す高効率増幅器について新しい回路構成を見出すことができた。これについては後述する。

(2) アウトフェーズ変調における様々な回路構成

飽和領域の非線形増幅器を用いたアウトフェーズ増幅器

高い線形性を示すアウトフェーズ逓倍器同期タイミング制御回路を備えた発振器対を用いたアウトフェーズ変調器

振幅 / 位相追跡回路を備えた発振器対を用いたアウトフェーズ検波器

可変負荷整合回路を備えたアウトフェーズ増幅器

様々な構成のアウトフェーズ型のアナログ信号処理回路が考えられるが、本研究では以上の 5 項目について提案・検討した。

について、歪みが大きく無線通信信号の増幅に適用困難であった従来型の高効率動作領域の非線形増幅器を、アウトフェーズ構成とすることで低歪み化できることを実験的に確認した。 について、歪みが大きく無線通信信号の増幅に適用困難であった従来型の高効率動作領域の非線形増幅器を、アウトフェーズ構成とすることで低歪み化できることを実験的に確認した。図 1 より分かるとおり、従来型では変調波の大振幅部分では利得が圧縮されて歪みが生じているのに対して、提案構

成では歪みが少なくかつ大出力が得られていることが確認できる。

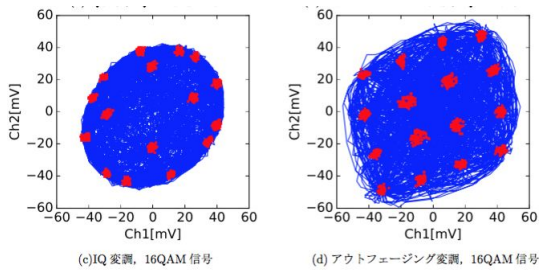


図1 16QAM 波形の変調波形（左：従来構成、右：提案構成）

について、振幅歪みが大きく電波利用効率の高い多値ベクトル変調や OFDM などの高効率変調方式の周波数変換に適用困難であった非線形低倍器を、アウトフェーズ構成とすることで低歪み化できることを実験的に確認した。図2に16QAMでの提案構成の通倍器出力を示した。歪みが少なく良好な線形性を保っている事が分かる。簡単な構成の低倍器を用いて元信号よりも2倍高い周波数のベクトル変調波を生成できることを確認した。この提案構成は、従来実現が困難であったサブミリ波帯ベクトル変調波の生成に適すると期待される。

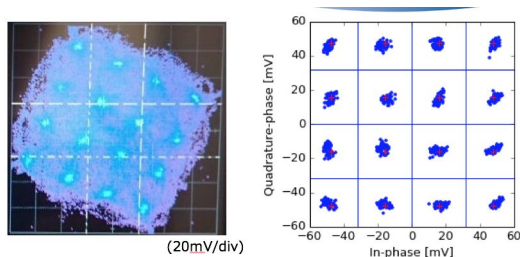


図2 16QAM 波形のアウトフェーズ型通倍出力結果（左：信号軌跡、右：コンスタレーション）

、 について、振幅変調が必要な直交変調方式と比較して、タイミング制御により任意のベクトル変調波が得られるアウトフェーズ変調方式は、無線通信機における回路要素のデジタル化をより一層進めるアーキテクチャであると期待できる。回路要素のデジタル化推進の観点から信号発生部の原理実験を行った。角度変調機能を有する DLL 発振器を用いたアウトフェーズ変調についてシミュレーション及び実験的検討を行った。入力 RF に対して逆位相信号を容易に生成可能な、振幅及び位相を追跡する帰還回路を備えた発振器のシミュレーション検討を行った。これにより、入力信号をアウトフェーズ2成分へ実時間で

分離再生するための可能性を示唆した。この回路を、大規模集積回路教育センター VDEC を経由してオンセミサンヨー 0.8um プロセスを用いて試作した。試作回路は、残念ながら稼働には至らなかった。

について、前節で述べた、新しい高周波帰還型の電力効率向上方式について検討した。並列増幅器の出力を意図的に結合させ増幅器間で励振位相差をつけることにより、それぞれの増幅器の負荷インピーダンスを制御可能であることを見出した。

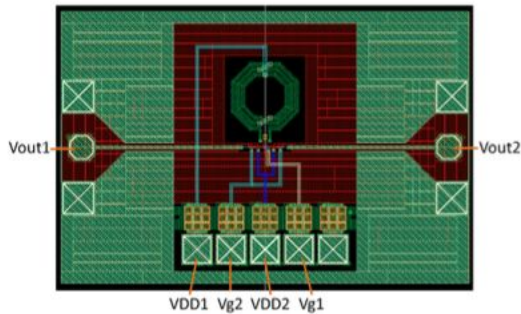
(3) シリコン集積化発振器

発振器の低位相雑音化を目指した Push-Push Oscillator の試作と雑音解析 0.8 um プロセス試作のインダクタ素子の評価
0.18um CMOS プロセスを用いた電圧制御発振器の試作
提案回路の集積回路化

について、Push-Push Oscillator については結合回路を工夫することで自己注入同期と同様の発振モードとなることがわかり、極めて長い帰還を有する特徴をもつ自己注入同期発振器と同等の位相雑音の発振器を提案構成実現できることが示唆された。

について、0.8 um プロセスにより試作されたインダクタを借り受けて評価を行った。プローブステーションの利用が困難であったため、インダクタ素子の高周波特性を精密に得ることはできなかったが、精密測定の結果とよく似たおおまかな特性を得ることができた。

について、試作した電圧制御発振器は Push-Push LC Oscillator と、Triple Push-Push Ring Oscillator である。Ring Oscillator は周波数 13.54GHz、電力 -32.6dBm の出力信号が得られた。基本波抑圧比は11dB得られた。変調感度は2.2GHz/Vで、このときの出力変動は5dB以内であった。出力電力がより改善されればアウトフェーズ増幅の信号源として利用可能と考えられる。LC Oscillator は評価が難航している。原因として、ボンディングワイヤの寄生インダクタンスが発振器の共振周波数を離調させてしまっていることが考えられる。高周波プローブを用いた再評価が望まれる。



(a) LC 振器のレイアウト全体図

図3 試作した LC Oscillator のレイアウト

について、当初の研究計画を超えた取り組みであるが、最も重要な増幅回路と整流回路のシリコン集積回路を試作・検討し、将来の実設計における改善点を見出した。その結果、薄膜 BOX-SOI 構造を用いた低しきい値のダイオードが期待できる。

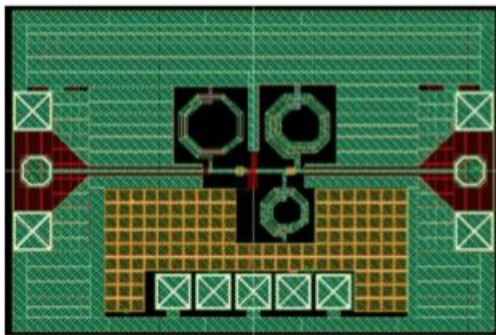


図4 試作した増幅器のレイアウト

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 11 件)

1. 石井, 塩見, 岡村, "アウトフェーズ方式によるベクトル変調波の過倍," IEICE 総合大会,九州大学,2016年3月.
2. 前田, 塩見, 岡村, "ミリ波無線通信システムへ向けた Ku 帯アウトフェーズ増幅器の試作," IEICE EST 研究会,神戸,2016年1月.
3. 遠藤, 塩見, 井上, 村田, 岡村, "光電波融合技術による分散アンテナシステムへ向けた X 帯 LC 発振器の試作," IEICE EST 研究会,神戸,2016年1月.
4. 綾, 塩見, 岡村, "F 級増幅器及びシレイ結合器を用いたアウトフェーズ増幅器の電力

付加効率に関するシミュレーション検討," IEICE 総合大会,滋賀,2015年2月.

5. 和久田, 塩見, 岡村, "アウトフェーズ送信機のための位相変調可能な PLL 発振器の設計," IEICE 総合大会,滋賀,2015年2月.
6. 高橋, 塩見, 岡村, "アウトフェーズ変調のための CMOSVCO に関する検討," IEICE EST 研究会,大阪,2015年1月.
7. 前田, 塩見, 岡村, "アウトフェーズ増幅器における電力回収機構に関する検討," IEICE MW 研究会,東京,2014年12月.
8. 大橋, 塩見, 岡村, "通倍型アウトフェーズ増幅器における変調誤差に関する検討," IEICE MW 研究会,東京,2014年12月.
9. 遠藤, 高橋, 塩見, 岡村, "アウトフェーズ増幅のための位相可変発振器の雑音特性に関する検討," IEICE MW 研究会,東京,2014年12月.
10. 坂本, 塩見, 久保田, 岡村, 三田, "非接触 MEMS 駆動を目指したマイクロ波電磁界共鳴電力伝送回路に関する研究," IEICE ICD 研究会,京都,2014年1月.
11. 高橋, 塩見, 岡村, "同相同期式 K 帯プッシュプッシュ発振器の試作," IEICE EST 研究会,名古屋,2013年6月.

〔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

<http://www.ec.ee.es.osaka-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1)研究代表者

岡村 康行 (OKAMURA, Yasuyuki)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授
研究者番号: 80144442

(2)研究分担者

塩見 英久 (SHIOMI, Hidehisa)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教
研究者番号: 00324822