

通信用広帯域増幅器の基礎と適用事例

Design Basics and Examples of Wideband Power Amplifiers for Wireless Communication

小松崎 優治[†]Yuji KOMATSUZAKI[†][†] 三菱電機 (株) 情報技術総合研究所

概要

多種多様な新しいサービスの提供に向けた第5世代移動通信方式(5G)の円滑な立ち上がり、新たな動作周波数帯の追加や既存の複数周波数帯との併用による通信容量の増強を見据えた5Gの次の世代

(Beyond 5G/6G)の実現に向け、移動通信の送信機を構成するキーコンポーネントの一つである増幅器の開発が盛んに行われている。Beyond 5Gでは、第4世代移動通信方式(4G)及び5Gの周波数範囲を1つの移動通信基地局で複数カバーすることが望まれるとともに、運用コストの削減や基地局装置の設置性向上のため低消費電力化が求められる。そのため増幅器には、複数のRF周波数帯に対応するための広帯域動作と、低消費電力化のため的高效動作の両立が課題となる。本講座では、主にドハティ増幅器型の負荷変調技術に着目し、高效な通信用広帯域増幅器の基礎と適用事例を紹介する。

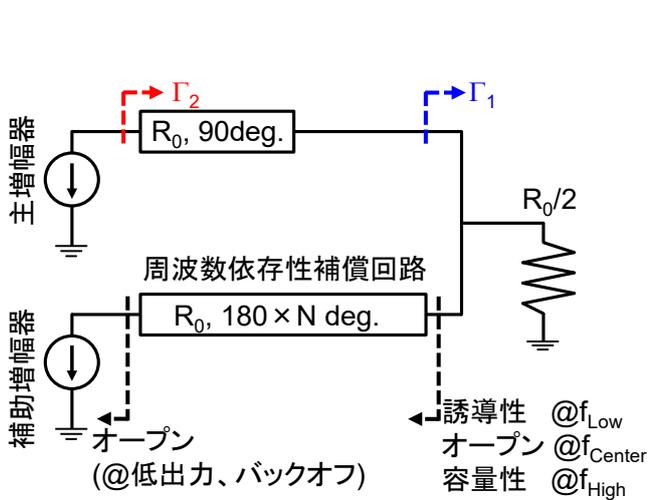
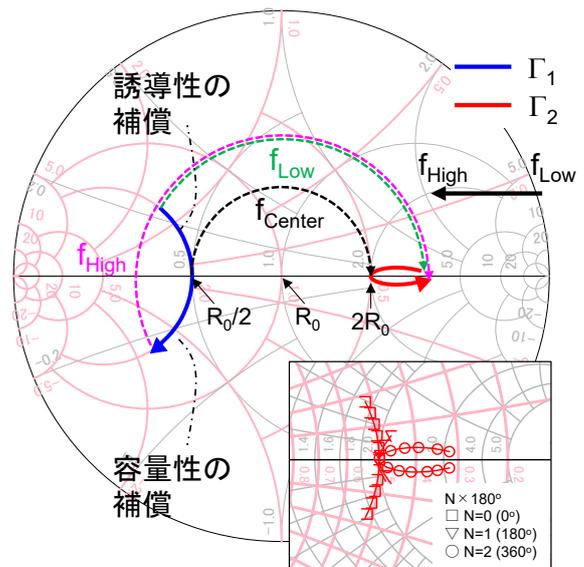


図1 周波数依存性補償回路を装荷した広帯域ドハティ増幅器



Abstract

Beyond 5G/6G, it is desirable for mobile base stations to cover multiple 4G and 5G frequency ranges, and low power consumption is required to reduce operating costs and improve the ease of installation of base station. Therefore, the challenge for amplifiers is to achieve both wideband and highly efficient operation. This course focuses mainly on load modulation techniques of Doherty amplifier type and introduces the fundamentals and application examples of highly efficient wideband amplifiers for wireless communications towards Beyond 5G/6G.

1. 移動通信の高効率増幅器の基本構成

まず、移動通信の高効率動作を実現する増幅器の基本構成について示す。一般的に、増幅器は飽和領域で効率が最大となり、バックオフ領域では効率が低下する。これに対し、高速・大容量通信に向けては、ピーク帯平均電力比(PAPR: Peak-to-Average Power Ratio)が大きく、変調帯域幅が広帯域な信号が使用されるため、増幅器には飽和から大バックオフした点での高効率化が求められる。移動通信で利用される大バックオフ時の代表的な高効率化技術としては、電源変調技術と負荷変調技術があげられる。

電源変調技術の具体的な増幅器構成としては、エンベロップトラッキング増幅器[1]があげられる。エンベロップトラッキング増幅器は、RF増幅器と高速な可変電圧電源で構成され、RF増幅器に供給する電源電圧を送信信号の包絡線に時間的に追従させる(図3(a)参照、電源電圧変調時の負荷線の動き)。これにより、増幅器の電圧振幅は常に飽和した状態となり、大バックオフした点での高効率動作が達成される。エンベロップトラッキング増幅器では、広帯域なRF増幅器を適用すれば複数のRF周波数帯に対応することが可能になるが、変調帯域幅が広帯域な信号に対しては非常に高速な可変電圧電源が必要となる。

負荷変調技術の具体的な増幅器構成としては、ドハティ増幅器[1]があげられる。ドハティ増幅器は、主増幅器と補助増幅器の2つの増幅器が並列し、主増幅器の出力に4分の1波長線路が接続された構成をとる。さらに、信号の小さい領域では補助増幅器が停止するように構成する。これは例えば、補助増幅器をC級バイアス(トランジスタのゲート電圧を閾値以下にバイアス)にすることで実現できる。このような構成をとることで、増幅器の動作状況に応じて4分の1波長線路が負荷変調を実現し、飽和から大バックオフにかけて、主増幅器の電圧振幅を常に飽和することが可能になる(図3(b)参照、負荷変調時の主増幅器の負荷線の動き)。これにより、補助増幅器が停止する効果も加わって、大バックオフした点での高効率動作が達成される。この負荷変調は、原理的に変調帯域幅が広帯域な信号に対しても有効なため、Beyond 5G/6Gに適しており、特に基地局向け増幅器として適用が盛んである。一方で、ドハティ増幅器はその構成上、RF周波数的には狭帯域な特性になってしまう点が課題であった。この原因は、主増幅器の出力側の4分の1波長線路が周波数依存性を持つためである。近年、この課題を解決する提案が多数されており、以降の章ではそのひとつの基本的な考え方と適用事例を紹介する。

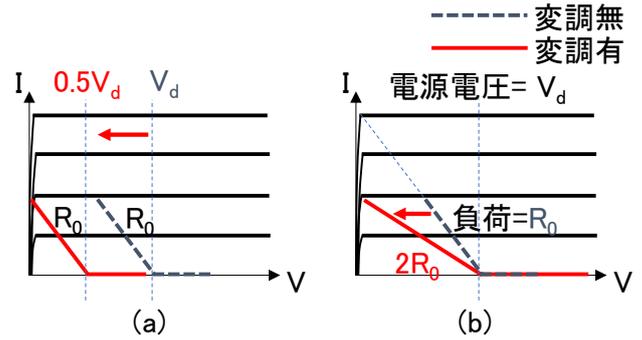


図3 高効率化技術のバックオフ時のI-V上での負荷線の動き (a) 電源変調 (b) 負荷変調

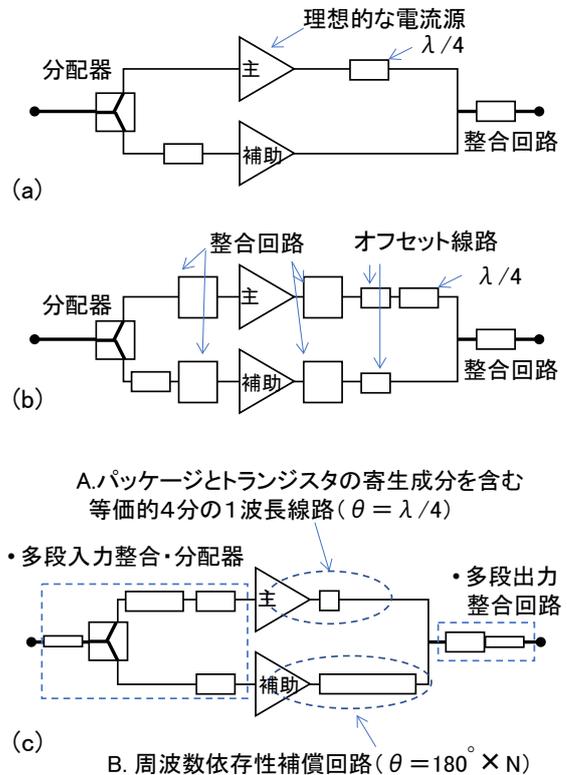


図4 ドハティ増幅器の構成の比較 (a) 理想回路 (b) 一般的な回路 (c) 広帯域化回路

2. ドハティ増幅器の広帯域化

図4にドハティ増幅器の理想回路(a)と一般的な回路(b)、そして広帯域化回路(c)の比較を示す[2]。理想的な回路(a)では、増幅器は電流源とみなされ、寄生のリアクタンスは含まれない。それに対し、従来の一般的なドハティ増幅器(b)では、整合回路とオフセット線路を主増幅器と補助増幅器の出力側に接続する。一般的に、増幅器を構成するトランジスタは寄生リアクタンスを含み、かつインピーダンスを50Ω系に整合するため、整合回路が必要になる。加えて、オフセット線路は、抵抗性の負荷変調を起こす目的で電気長を調整するために必要な線路で、整合回路

の後に接続される。主増幅器側には、オフセット線路の後に4分の1波長線路が接続される。一方、広帯域化回路を装荷したドハティ増幅器(c)では、整合回路とオフセット線路に代わり、パッケージとトランジスタの寄生成分を含む等価的な4分の1波長線路を主増幅器トランジスタの電流源に接続する(図4(c)のA部参照)。加えて、周波数補償回路を補助増幅器の出力に接続する(図4(c)のB部参照)。次にこれらの構成と広帯域化の原理について説明する。

図5にパッケージとトランジスタの寄生成分を含む等価的な4分の1波長線路の回路図を示す。図5に示すパッケージとトランジスタの寄生成分と、一部の外部回路を組み合わせることで、ある周波数において特性インピーダンス Z_c かつ電気長 $\lambda/4$ となる、等価的な4分の1波長線路を作ることが可能である。このとき Z_c は任意に選択することが可能であり、設計に自由度を与える。多くのドハティ増幅器では、整合回路やオフセット線路を含むため、トランジスタの電流源から主増幅器と補助増幅器との合成点までの電気長が4分の1波長より大きい(たとえば 270° や 450°)。あるいは、寄生成分を打ち消す回路要素を有する。それに対し、(c)の構成はトランジスタの電流源に直接4分の1波長線路を接続する構成であるため、一般的な回路(b)のように整合回路やオフセット線路が接続されておらず、広帯域にドハティ回路を構成することが可能である。

図1に周波数依存性補償回路を含む広帯域ドハティ増幅器の回路図を示す。この図では、増幅器の飽和動作時の最適負荷を R_0 としており、4分の1波長線路の特性インピーダンスも R_0 に設定している。周波数依存性補償回路は、主増幅器に装荷された4分の1波長線路の周波数依存性を補償する。周波数依存性補償回路は、補助増幅器のパッケージとトランジスタの寄生成分を含んで構成され、補助増幅器の電流源から見て2分の1波長($\lambda/2$)の整数倍(N)の電気長を有する。特性インピーダンスと電気長は、主増幅器に装荷された4分の1波長線路の周波数依存性を打ち消す適切な値に設計する。

図2に主増幅器出力からみた反射特性 Γ_2 の周波数依存性を示す。周波数依存性補償回路の電気長が $\lambda/2 \times 2$ (360°)の場合の、主/補助合成点の反射特性 Γ_1 から Γ_2 にかけての負荷変調の変成も示す。周波数依存性補償回路が、 Γ_1 からみると、低周波時には誘導性に、高周波時には容量性になることがわかる。これによって、低周波/高周波時に4分の1波長より短く/長くなってしまった主増幅器側線路の負荷変調を補償され、負荷変調後のインピーダンス Γ_2 が実軸に集約され、主増幅器の飽和動作時の最適負荷の2

倍、 $2R_0$ に広い周波数で整合されていることが分かる。

適用事例として、図6に周波数依存性補償回路を適用した広帯域 GaN ドハティ増幅器の試作機を、図7にその電気特性の周波数依存性測定結果を示す[2]。ドレインバイアス電圧は30Vである。入力信号は、帯域幅20MHz、PAPR7.5dBのLTE Downlink信号を用いた。図7の出力電力と効率はいずれも ACLR=-50dBcを達成した最大値である。3.0-3.6GHzの広帯域にわたってドレイン効率45.9-50.2%を達成した。測定結果の比帯域は、広帯域ドハティが5Gの複数帯域をカバーできることを示している。

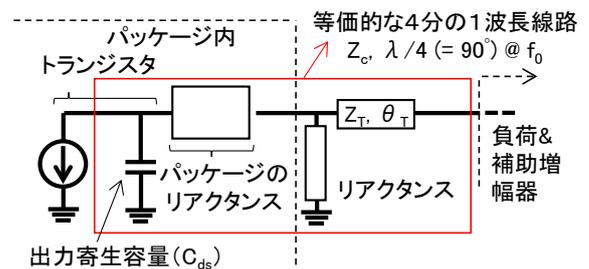
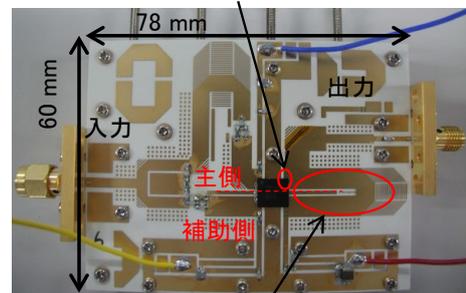


図5 パッケージとトランジスタの寄生成分を含む等価的4分の1波長線路の回路図

A. パッケージとトランジスタの寄生成分を含む等価的4分の1波長線路



B. 周波数依存性補償回路

図6 周波数依存性補償回路を適用した広帯域ドハティ増幅器

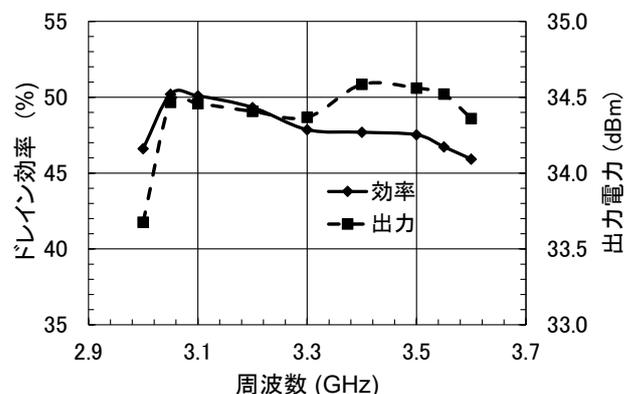


図7 ACLRが-50dBcの点における出力電力とドレイン効率の周波数依存性測定結果

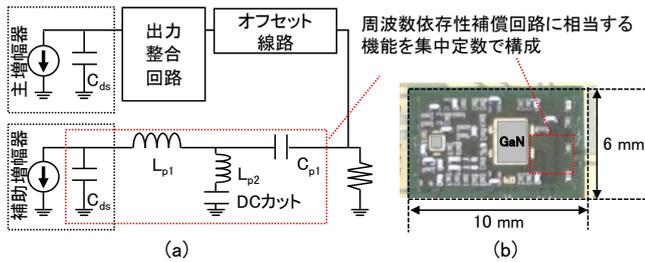


図8 小型周波数依存性補償回路 (a) 回路構成 (b) 広帯域 GaN ドハティ増幅器モジュール

図6の周波数依存性補償回路は規模が大きく、多素子アンテナに適用する場合は小型化が課題となる。一方で、周波数依存性補償回路は線路である必要はなく、同等な機能を集中定数で構成してもよい。図8に小型周波数依存性補償回路の構成例と広帯域 GaN 増幅器モジュールへの事例を示す[3]。PAPR 8.0 dB、変調帯域 20 MHz の信号を用いて評価した結果、3.4-3.8GHz において PAE 42.9-47.8%、Gain 26.9-28.6 dB、Pout 37.7-38.5 dBm が得られており、小型・高効率・広帯域が求められる移動通信に有効な増幅器は既に実用の段階にある。

3. 負荷変調増幅器の広帯域化

4分の1波長線路を用いた負荷変調の発展的な技術として、周波数に応じて負荷変調のモードを変更する研究が進められている。図9に周波数に応じた負荷変調のモード変更による広帯域化の概念図を示す[4]。例えば、中心周波数 f_0 で増幅器 1 側に 90° 、増幅器 2 側に 180° の線路を装荷すると、 90° 線路によりドハティ型の負荷変調が成立するので、増幅器 1 側を主増幅器としたドハティ増幅器として動作する。ここで、中心周波数の半分の周波数 $0.5f_0$ での動作を考えると、増幅器 2 側に 90° 線路があらわれるので、増幅器 2 側を主増幅器としたドハティ増幅器として動作させることができる。さらに、片側に $90+\alpha^\circ$ 、もう片側に $90-\alpha^\circ$ の線路を備えた場合、もう一つの負荷変調方式であるアウトフェージング増幅器として動作することが知られており、周波数 $0.66f_0$ でこの条件を満たす。このように、周波数に応じて負荷変調のモードを変更することで、通信用高効率増幅器の抜本的な広帯域化を実現できる可能性がある。

本原理の適用事例として、周波数の変化に対して連続的に 5 つの負荷変調モードを実現する超広帯域増幅器の試作評価結果を図10に示す。高効率に、移動通信の Sub-6 GHz で利用される主要な帯域が広くカバーされており、本広帯域化技術の通信の大容量化と低消費電力化への貢献が期待される。

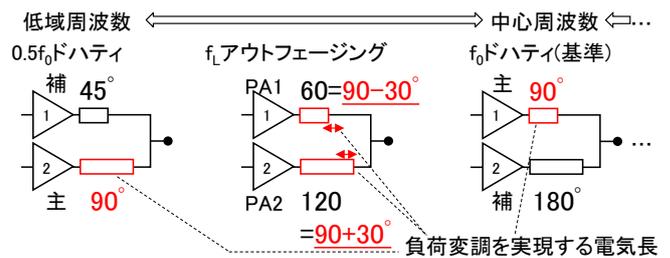


図9 周波数に応じた負荷変調の変更による広帯域化の概念図

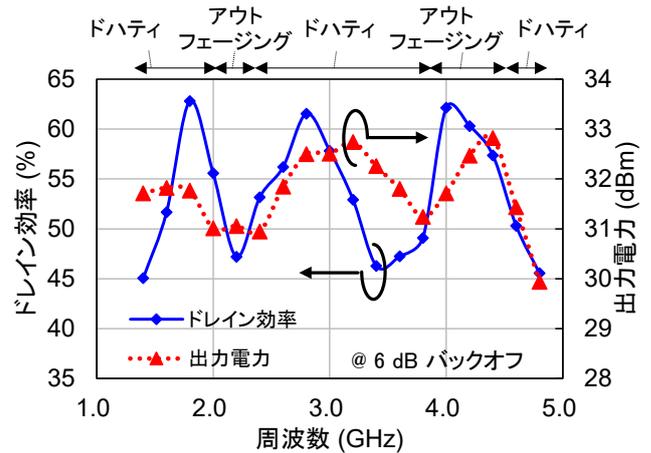


図10 周波数に応じて負荷変調を変更する超広帯域増幅器の周波数依存性評価結果

4. まとめ

本講座では、高効率な通信用広帯域増幅器の基礎と適用事例を紹介した。

文献

- [1] S. C. Cripps, RF Power Amplifiers for Wireless Communications, 2nd ed. Norwood, MA, USA: Artech House, 2006.
- [2] Y. Komatsuzaki et al., "3.0-3.6 GHz Wideband, over 46% Average Efficiency GaN Doherty Power Amplifier with Frequency Dependency Compensating Circuits," in Proc. IEEE Topical Conf. on RF/Microwave Power Amplifiers for Radio and Wireless Applications, pp.22-24, Jan. 2017.
- [3] S. Sakata et al., "A Fully-Integrated GaN Doherty Power Amplifier Module with a Compact Frequency-Dependent Compensation Circuit for 5G massive MIMO Base Stations," in Proc. IEEE MTT-S Int. Microw. Symp., Jun. 2020.
- [4] Y. Komatsuzaki et al., "A Novel 1.4-4.8 GHz Ultra-Wideband, over 45% High Efficiency Digitally Assisted Frequency-Periodic Load Modulated Amplifier," in Proc. IEEE MTT-S Int. Microw. Symp., Jun. 2019.

著者紹介

小松崎 優治 三菱電機 (株) 主席研究員、
komatsuzaki.yuji@bx.mitsubishielectric.co.jp