

GaN HEMT を用いた アウトフェーシング増幅器

Outphasing Amplifier Using GaN HEMTs

住吉 高志*
Takashi Sumiyoshi

前島 貴
Takashi Maehata

高い電力効率を持つ増幅器は、発生する熱が少なく軽微な放熱機能で動作が可能となるため、通信装置の小型化、軽量化、低コスト化に対して有効である。特に Massive Multiple Input Multiple Output (MIMO) では、多数の増幅器を使用するため、より高効率な増幅器が必要とされており、窒化ガリウム高電子移動度トランジスタ (GaN HEMT) による増幅器の普及が携帯電話基地局用途で進んでいる。一方変調波効率の向上を目的とした増幅器技術として負荷変調が注目されており、中でも、アウトフェーシング増幅器は、従来のドハティ増幅器よりも、変調波効率が高効率に実現できることが知られている。今回、当社 GaN HEMT を用いたアウトフェーシング増幅器の設計試作評価を行った。その結果、増幅器の高効率化により従来のドハティ増幅器の構成と比較し1増幅器あたり1.1W消費電力を削減でき64送信のMassive MIMO基地局で70.4Wの消費電力を削減でき基地局の小型化に貢献できることを確認できた。

High-efficiency power amplifiers generate little heat and operate with a small heat dissipation function, making them effective in reducing the size, weight, and cost of communication devices. In particular, since many amplifiers are used in Massive Multiple-Input Multiple-Output (MIMO), amplifiers with higher efficiency are required, and those based on gallium nitride high electron mobility transistors (GaN HEMTs) are becoming popular for cell phone base station applications. On the other hand, load modulation is attracting attention as an amplifier technology for improving modulation wave efficiency, and among them, outphasing amplifiers are known to achieve higher modulation wave efficiency than conventional Doherty amplifiers. In this study, we conducted a design prototype evaluation of an outphasing amplifier using our GaN HEMTs. The result confirmed that the higher efficiency of the amplifier reduces power consumption by 1.1 W per amplifier compared to the conventional Doherty amplifier configuration. In a 64 transmitters Massive MIMO base station, a power reduction of 70.4 W is achieved, contributing to the miniaturization of the base station.

キーワード：GaN、HEMT、アウトフェーシング増幅器

1. 緒 言

高い電力効率を持つ増幅器は、発生する熱が少なく軽微な放熱機能で動作が可能となるため、通信装置の小型化、軽量化、低コスト化に対して有効である。特に Massive Multiple Input Multiple Output (MIMO) では、多数の増幅器を使用するため、より高効率な増幅器が必要とされており、窒化ガリウム高電子移動度トランジスタ (GaN HEMT^{*1}) による増幅器の普及が携帯電話基地局用途⁽¹⁾で進んでいる。窒化ガリウム (GaN) は、シリコン (Si) や砒化ガリウム (GaAs) と比較して、バンドギャップが大きく、飽和電子速度も大きいことから、高出力かつ高速の電子デバイスとして適しており、また、熱伝導性に優れた半絶縁性SiC基板にGaN HEMT構造を形成することで、良好な放熱特性もよく高い電力効率を実現されている。その中でも当社はGaN HEMTの研究開発を2000年から始め、2006年に世界で初めて量産開発を実現して以来GaN HEMT市場を牽引している。一方変調波効率の向上を目的とした増幅器技術^{(2)~(4)}として負荷変調が注目されており、中でも、アウトフェーシング増幅器⁽⁵⁾は、ドハティ増幅器^{*2}よりも、変調波効率が高効率に実現できることが知られている。図1のようにこれまで実用レベルではドハティ増幅器が使用されてきたが、昨今のエネルギー事情から更な

るに増幅器の低消費電力が求められており、今後携帯電話基地局用世代が5Gから6Gに進むにつれ、2入力でRF(無線)信号を増幅する高効率増幅器が有力な候補となり、アウトフェーシング増幅器が注目されている。今回当社GaN HEMTデバイスでアウトフェーシング増幅器を設計、試作、評価を行ったので本稿で報告する。

以下、2章にアウトフェーシング増幅器の概要、3章に設計事例及び実測結果、4章にまとめを記載した。

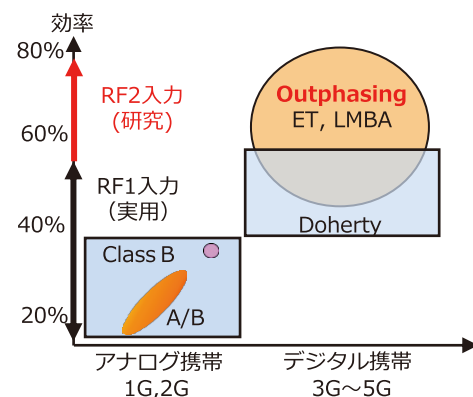
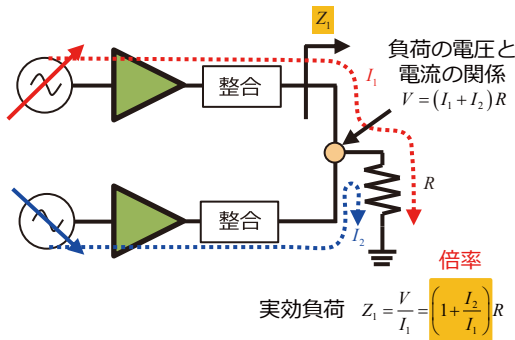


図1 携帯電話用基地局における増幅器のトレンド

2. アウトフェーシング増幅器

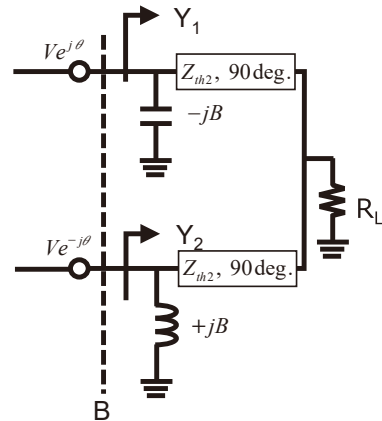
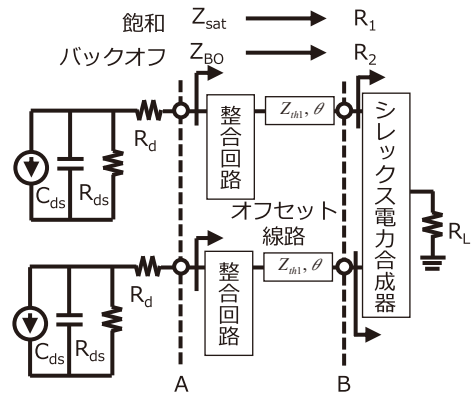
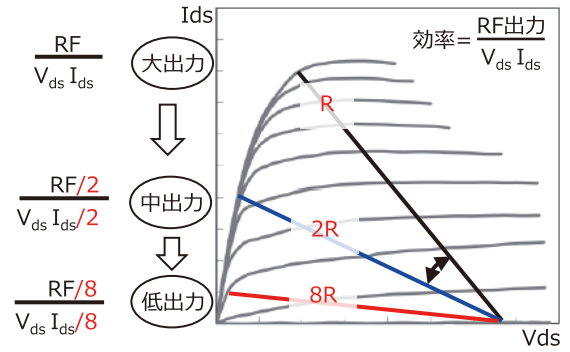
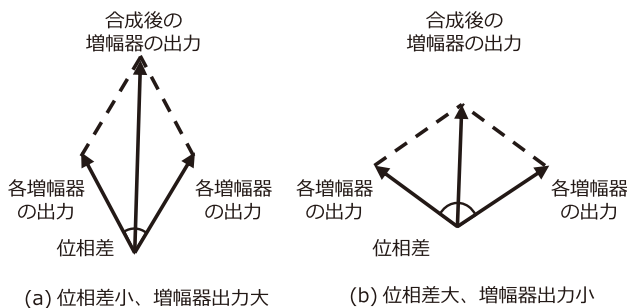
アウトフェーシング増幅器について説明する。図2のように2入力の信号源を持ち、 I_1 、 I_2 の比率と位相差により負荷Rの倍率（実効負荷）を変更し、図3のようにRF出力を変更する。実効負荷を変更することで図4のようにRF出力に応じた最適負荷を使用することができ、低出力でも高効率を実現できる。実際の回路としては、図5のようにデバイスに対して整合回路を入出力に有し、シレックス電力合成器にて2つの回路が電力合成される構成となる。図6にシレックス合成回路について記す。シレックス電力合成器は入力位相差によって生じるリアクタンスを補償する2種のリアクタンス補償（ $-jB$ と $+jB$ ）とインピーダンス変換器から構成されている。アウトフェーシング増幅器は、上述の通り2つの増幅器が電力合成する際に大きな負荷変動を行い、高効率動作を実現している。

以下の節では、アウトフェーシング増幅器設計として設計に使用した増幅器モデル、整合回路設計、シレックス電力合成器の順に紹介する。



I_1, I_2 の比率と位相差によりRの倍率変更： $R \sim 8R$

図2 アウトフェーシング増幅器構成



3. アウトフェージング増幅器の設計

3-1 設計用増幅器モデル

設計の事前準備として設計用増幅器モデルを作成した。市場で入手可能な増幅器モデルとして特に限定するものではないが、ここでは、FOCUS製 Model Generation による Cardiff モデルを使用したため、その事例について報告する。Cardiff モデルは、増幅器モデルのベースとなる無線性能を **図7** に示すロードプル^{*3}装置によって測定し、Cardiff 増幅器モデルを用いて測定データをデータベース化し、高周波回路シミュレータ内で利用することができる。

今回作成したデバイスのモデルと実測の入力電力による利得及び位相の比較結果を **図8** に記す。利得で 0.2dB 以下、位相で 0.1° 以下と非常に相関が取れていることがわかる。この増幅器モデルと高周波シミュレータを用いアウトフェージング増幅器の回路設計を行った。

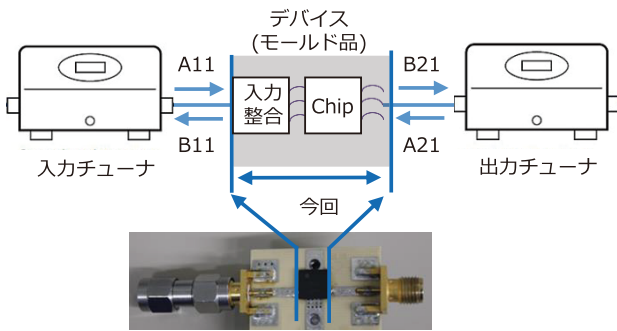


図7 モデル作成時のロードプル測定系

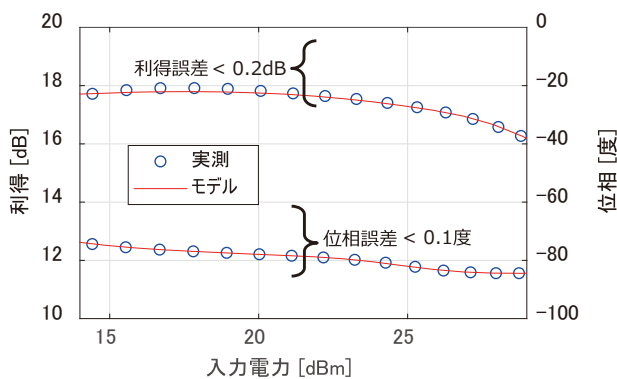


図8 取得した GaN デバイスモデルの利得、位相比較

3-2 増幅器の整合回路設計

本検討では、設計の目標として周波数 3.5GHz、飽和出力^{*4}電力 48dBm (60W)、バックオフ^{*5}出力 10dB の出力電力 38dBm (6W) でドレイン効率 50% となるように設計を行った。

設計にあたっては、高周波シミュレータによるハーモニクバランス解析を活用した。設計時の回路構成を **図9** に記す。設計時の回路構成としては入力整合回路、3-1項で記した当社 GaN HEMT の増幅器モデル、出力整合回路、オフセットライン、インピーダンス変換器、負荷 ZL で構成している。出力整合回路は、主として飽和出力で電力整合を行い、一方オフセットライン（特性インピーダンスを飽和出力時の整合負荷を利用し電力整合を維持）は、バックオフ出力時の負荷を抵抗成分に整合している。したがって後続するシレックス電力合成器は、抵抗負荷との接続となり容易に設計を進めることができる。負荷 ZL を **図2** や **図4** で説明したようにアウトフェージング位相に応じて変化させ、その際の出力対ドレイン効率特性を確認し、目標性能に到達するように設計を行った

設計結果を **図10** に記す。**図10** より前述した設計目標に飽和出力電力 48dBm (60W) とバックオフ出力 10dB の出力電力 38dBm (6W) でドレイン効率 50% 到達していることがわかる。本設計結果を用い試作評価を行ったので次項で報告する。

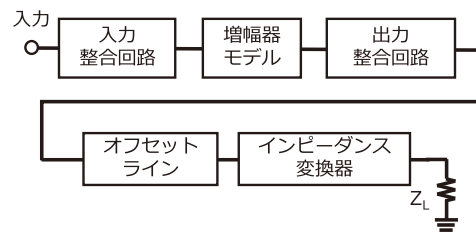


図9 アウトフェージング増幅器設計時の回路構成

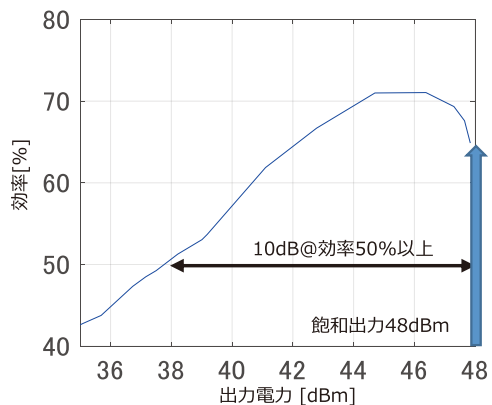


図10 アウトフェージング増幅器設計結果

3-3 シレックス電力合成器の設計

前述のとおりオフセットラインを用いることで増幅器出力負荷が抵抗成分として設計されているため、**図5** の R₁、R₂ と **図6** に示すシレックス電力合成器の入力インピーダンス

Y_1 、 Y_2 と整合させることができる。図6においてシレックス電力合成器は、飽和出力とバックオフ出力において、リアクタンス補償を行い、前述した2種類の抵抗負荷 R_1 、 R_2 が入カインピーダンスとなるよう設計する。入力インピーダンス Y_1 、 Y_2 は式(1)にて表現され、飽和出力及びバックオフ出力時に $1/R_1$ 、 $1/R_2$ と一致する。式(1)の実部、虚部をそれぞれ整理することで、3つの設計諸元(θ_m 、 B 、 Z_{th2})を式(2)にて求めることができる。ここで、 θ_m は、バックオフ時のRF信号の位相差とし、飽和時は、 $\pi/2 - \theta_m$ がRF信号の位相差、 B がリアクタンス補償となる。リアクタンス補償は図11のようにアウトフェーシング位相 θ_m を用いてリアクタンス補償1、リアクタンス補償2を求めることができる。

$$\begin{cases} Y_1 = \frac{2R_L}{Z_{th2}^2} \cos^2 \theta - j \frac{R_L}{Z_{th2}^2} \sin(2\theta) + jB \\ Y_2 = \frac{2R_L}{Z_{th2}^2} \cos^2 \theta + j \frac{R_L}{Z_{th2}^2} \sin(2\theta) - jB \\ B = \frac{R_L}{Z_{th2}^2} \sin(2\theta_m) \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{cases} \theta_m = \tan^{-1} \sqrt{\frac{1+m}{1-m}} \\ Z_{th2} = \sqrt{(1+m)R_1R_L} \\ B = \frac{1}{R_1} \sqrt{\frac{1-m}{1+m}} \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

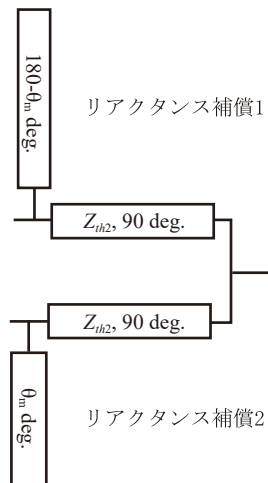


図11 今回設計したシレックス電力合成器の構成図

3-4 試作評価結果

試作したアウトフェーシング増幅器を写真1に、試作評価結果と設計結果を図12に示す。写真1のMNはMatching Network (MN) である。入力信号はパルスCWにて評価を行った。図13のように試作評価結果と設計結果で非常に

相関が取れていることがわかる。また、図13には、アウトフェーシング増幅器で使用した同デバイスで設計したドハティ増幅器との実機性能比較も示した。図13よりドハティ増幅器と比較しアウトフェーシング増幅器の方が効率が高いことがわかる。また図13の増幅器についてLTE変調信号で変調波効率を確認したところ、アウトフェーシング増幅器で出力6Wにおいて効率54%、ドハティ増幅器で49%と5ptの効率改善が確認された。

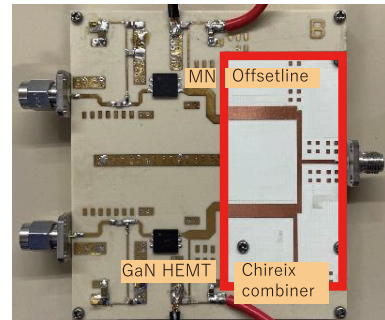


写真1 アウトフェーシング増幅器 (試作機)

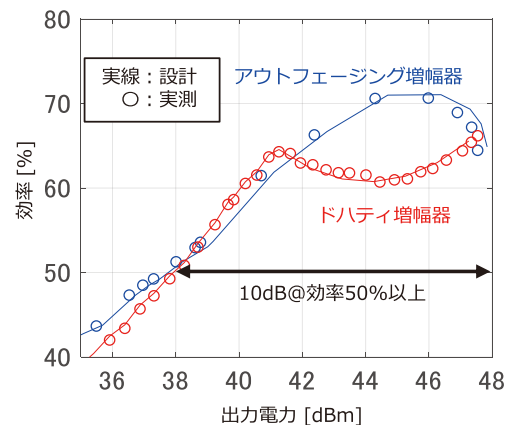


図12 アウトフェーシング増幅器とドハティ増幅器比較 (実測、設計)

4. 結 言

当社 GaN HEMT を用いたアウトフェーシング増幅器について、CWパルス信号にて周波数3.5GHz、飽和出力60W、出力6W (バックオフ10dB) 効率50%、変調波効率で、アウトフェーシング増幅器効率54%、ドハティ増幅器49%とドハティより5ptの高効率特性を実現した。増幅器の高効率化により従来のドハティ増幅器が1増幅器あたり12.2Wの消費電力で本取組のアウトフェーシング増幅器は11.1Wの消費電力となり1増幅器あたり1.1W消費電力を削減でき64TのMassive MIMO基地局で70.4W消費電力を削減でき、基地局の小型化に貢献できることを確認で

きた。

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP20017）の結果得られたものである。

用語集

※1 HEMT

High Electron Mobility Transistor：半導体接合界面に誘起される2次元電子を利用したトランジスタ。不純物散乱の影響の少ない高電子濃度のチャネルが形成できる。

※2 ドハティ増幅器

負荷変調方式の1つ。ドハティ増幅器の原理は、並列に配置されたキャリア増幅器とピーク増幅器を用い、低出力の時はキャリア増幅器のみが、高出力の時は2台の増幅器が動作するというものである。

※3 ロードプル

トランジスタの大信号特性の評価方法の1つ。チューナーと呼ばれる負荷可変装置を用いて、整合条件を変えながらRF特性を評価する。

※4 飽和出力

増幅器において入力電力を増加させても出力が増加せず飽和する出力。

※5 バックオフ

飽和出力から平均出力を引いた値。

執筆者

住吉 高志*：伝送デバイス研究所 主席



前島 貴：伝送デバイス研究所 主幹博士（工学）



*主執筆者

参考文献

- (1) A. Grebennikov, J. Wong, and H. Deguchi, "High-Power High-Efficiency GaN HEMT Doherty Amplifiers for Base Station Applications," IEICE Trans. Electron., vol. E104-C, no. 10, pp.488-495 (Oct. 2021)
- (2) N. Ui, H. Sano, and S. Sano., "A 45% Drain Efficiency, -50dB ACLR GaN HEMT Class-E Amplifier with DPD for W-CDMA Base Station," 2006 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), pp. 718-721, Session WE3B-4, San Francisco, CA, USA (June 2006)
- (3) N. Ui and S. Sano., "A 100W Class-E GaN HEMT with 75% Drain Efficiency at 2GHz," 2006 European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC), pp. 72-74, Session EuMIC04-4, Manchester, UK (June 2006)
- (4) N. Ui, H. Sano, and S. Sano., "A 80W 2-stage GaN HEMT Doherty Amplifier with 50dB ACLR, 42 % Efficiency 32dB Gain with DPD for W-CDMA Base station," 2007 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), pp. 1259-1262, Session TH1A-4, Honolulu, HI, USA (June 2007)
- (5) H. Chireix, "High Power Outphasing Modulation," Proc. IRE, vol. 23, no. 11, pp. 1370-1392 (Nov. 1935)