

小松崎優治*
Yuji Komatsuzaki
新庄真太郎*
Shintaro Shinjo
Rui Ma †
Rui Ma

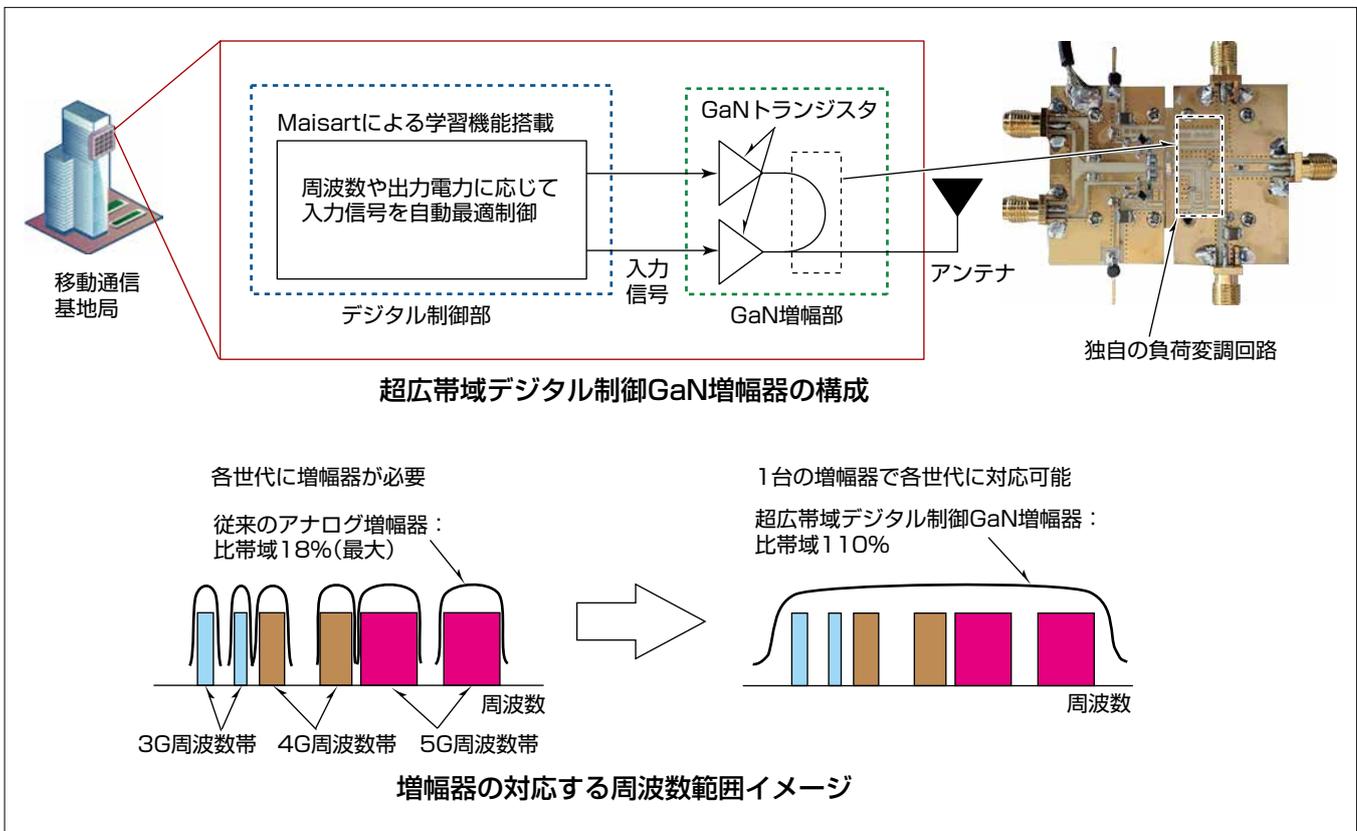
超広帯域デジタル制御GaN増幅器

Ultra - Wideband Digitally Controlled GaN Amplifier

要旨

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などによる通信容量の増強を見据えた5Gの次の世代(Beyond 5G)の実現に向け、移動通信基地局を構成するキーコンポーネントの一つであるGaN(窒化ガリウム)増幅器の開発が盛んに行われている。Beyond 5Gでは、第3世代移動通信方式(3G)、第4世代移動通信方式(4G)及び5Gの周波数範囲を一つの移動通信基地局でカバーすることが望まれるとともに、基地局装置の設置性を高めるため低消費電力化が急務になる。GaN増幅器には、複数の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の高効率動作の両立が課題になっている。

今回、アナログGaN増幅部とデジタル制御部を組み合わせた新たな発想の増幅器を開発した。GaN増幅部には二つのGaNトランジスタを並列配置し、広帯域を実現する独自の負荷変調回路を用いて信号を合成することによって、3Gから5Gの主要周波数帯を1台の増幅器でカバーする広帯域動作を実現した。また、デジタル制御部には三菱電機のAI(Artificial Intelligence)技術“Maisart”による学習機能を搭載し、増幅器の動作状態に応じた最適な二つの入力信号の組合せを選択させることで周波数や出力電力に応じた高効率動作を実現した。これによって、従来のアナログ増幅器と比べて6倍となる比帯域110%の周波数範囲で動作効率40%以上を達成した。今後大容量通信化と低消費電力化へ貢献していく。



GaN増幅部とデジタル制御部で構成する超広帯域デジタル制御増幅器

5Gを中心とした複数の周波数帯に1台で対応できる移動通信基地局向け超広帯域デジタル制御GaN増幅器を試作した。この増幅器はGaN増幅部とデジタル制御部を組み合わせた新たな発想の構成を採用し、GaN増幅部には独自の負荷変調回路の適用による広帯域化、デジタル制御部にはMaisartの適用による入力信号の自動最適制御を実現することで、広帯域動作と高効率動作の両立を実現した。

1. ま え が き

スマートフォンやタブレットなどの移動通信のトラフィックの増加対策や、多種多様な新しいサービス・アプリケーションの実現に向け、5Gの開発が進められている。また、新たな通信周波数帯の追加や既存の複数周波数帯の併用などによる通信容量の増強を可能にする5Gの次の世代Beyond 5Gや第6世代移動通信方式(6G)の検討も開始された。

基地局装置は、主に信号送受・信号処理部と、信号を増幅する増幅器から構成される。これまでは3G、4G、5Gの移動通信基地局ごとに信号送受・信号処理部と増幅器が必要であったが、将来的には各通信世代を一つの基地局で運用することが望まれるであろう。同時に、基地局装置の設置性を高めるために低消費電力化への対策が急務になっている。移動通信基地局の導入から廃棄までを含めたTCO (Total Cost of Ownership: 総保有コスト)の低減もまた重要な課題になる。これらの要求・課題に応えることが要求されるキーコンポーネントの一つがGaN増幅器である。

GaN増幅器には、複数の周波数帯に対応するための広帯域動作と、低消費電力化対策のための高効率動作との両立が課題になる。これまでのアナログで動作する増幅器では、その構成上、広帯域動作と高効率動作の両立には限界があった。そこで、今回、アナログとデジタルを融合させた新たな発想の構成からなるGaN増幅器を提案し、その限界を打ち破ることに挑戦した。

本稿では、アナログで動作するGaN増幅部とデジタル制御部から構成する超広帯域デジタル制御GaN増幅器を示し、その試作結果について述べる。GaN増幅部には二つのGaNトランジスタを並列配置し、広帯域を実現する独自の負荷変調回路を用いて信号を合成する。またデジタル制御部には三菱電機のAI技術Maisartによる学習機能を搭載し、増幅器の動作状態に応じて二つの入力信号を自動最適制御することで周波数や出力電力に応じた高効率動作を実現する。試作の結果、従来の移動通信用高効率増幅器⁽¹⁾と比べて6倍となる比帯域110%の周波数範囲で動作効率40%以上を達成し、この増幅器構成の有効性を確認した。今後、移動通信基地局の大容量通信化と低消費電力化への貢献が期待される。

2. 移動通信基地局用増幅器の技術動向

移動通信のトラフィック量は急激に増大している。これに伴い、移動通信基地局に用いられる増幅器などの高周波デバイスに対する効率、動作帯域幅、動作周波数に対する

要求は年々高まっている。この章では、増幅器の変遷と現在主流になっている構成の特徴を示す⁽²⁾。

2.1 移動通信基地局向け増幅器の変遷

図1に2000年頃に立ち上がった3G、2010年頃に立ち上がった4G、そして5Gの各世代の移動通信基地局向け増幅器に用いられたデバイスや増幅器の構成の変遷を示す。

3G及び更にその前の世代で用いられた通信は、動作周波数は最大2 GHz、伝送速度も最大2 Mbps程度であった。このため、増幅器に用いられるデバイスはSi(シリコン)系のLDMOS(Laterally Diffused Metal-Oxide-Semiconductor)が主流であった。その後、4G、5Gと世代が上がるにつれ、動作周波数は5 GHz程度まで上昇し、伝送速度もギガオーダーまで増加した。このため現在では、高周波帯での動作に優れ、広帯域動作が可能なGaNが増幅器のデバイスとして主に用いられるようになってきている。

他方、3G及び更にその前の世代では、アナログ変調方式やデジタルのFM(Frequency Modulation)変調方式や直交変調方式が用いられていた。このため、増幅器は飽和電力付近での性能が重視されてAB級などのバイアス条件で動作する飽和電力付近での効率特性に優れた線形増幅器が主に用いられていた。現在では64QAM(Quadrature Amplitude Modulation)/OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)変調などのマルチキャリア多重変調方式が用いられるようになり、大きなバックオフ電力(増幅器の最大出力電力と平均出力電力の差。変調信号の最大振幅と平均振幅の差に対応)付近での動作効率が重視されるようになってきており、ドハティ増幅器と呼ばれる構成が移動通信基地局向け増幅器の主流になっている。

2.2 ドハティ増幅器の構成の特徴

ドハティ増幅器とは1936年にW. H. Dohertyによって考案された負荷変調による高効率化技術を用いて構成された増幅器である。一般に増幅器の効率は、バックオフ動作

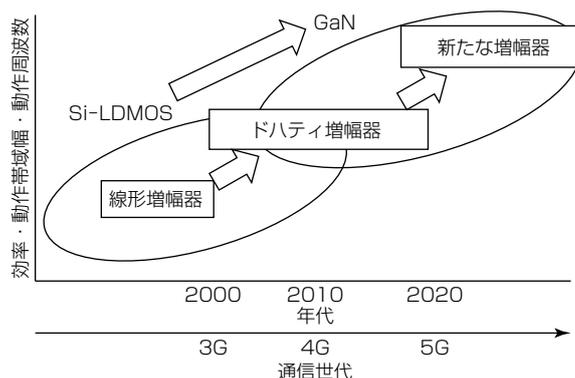


図1. 移動通信基地局向け増幅器の変遷

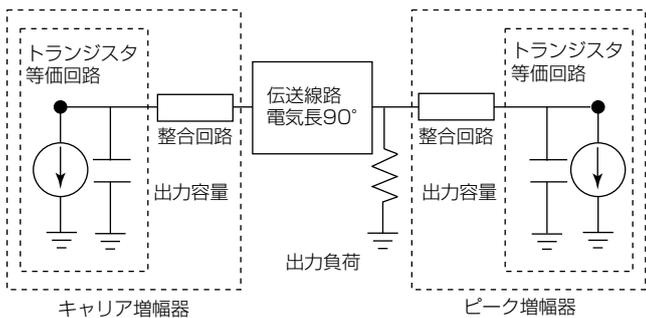


図2. ドハティ増幅器の出力部の構成

時には飽和動作時と比べると大きく低下する。例えばバックオフ10dBの出力電力での効率は、A級増幅器の場合は最大効率の1/10、B級増幅器の場合は $1/\sqrt{10}$ まで低下してしまう。そこでバックオフ時の動作効率を改善するために考案されたのがドハティ増幅器である。

特徴的であるドハティ増幅器の出力部の構成を図2に示す。ドハティ増幅器は、AB級又はB級にバイアスされた増幅器(キャリア増幅器)とC級にバイアスされた増幅器(ピーク増幅器)の二つの増幅器から構成される。キャリア増幅器の出力側には波長の4分の1の長さの線路(電気長 90° の伝送線路)が設けられており、ピーク増幅器がオフ状態になる低出力動作時と、ピーク増幅器がオン状態になる高出力動作時で負荷インピーダンス条件を変化させる。この負荷変調を利用してバックオフ動作時の高効率化を実現するのがドハティ増幅器の動作原理である。図2のとおり、ドハティ増幅器は構成上、電気長 90° の伝送線路、又はそれに相当する回路が必要になる。しかしながら、伝送線路の電気長は周波数に依存して 90° から変化してしまうため、ドハティ増幅器を広帯域にわたって正しく動作させることは困難である。そのため、5G以降の移動通信システムの実現に向けては、ドハティ増幅器にかわる広帯域性と高効率性を両立させる新しい増幅器が望まれている。

3. 超広帯域デジタル制御GaN増幅器

3G、4G、5Gが並存していくこれからの時代、移動通信基地局の導入から廃棄までを含めたTCOを低減していくためにも、1台の増幅器で各世代の複数の周波数帯に対応できることが望まれている。そのためには、広帯域性と高効率性を兼ね備えた新たな構成の増幅器の開発が必要になると考えている。

3.1 アナログとデジタルを融合させた増幅器構成⁽³⁾

今回開発した超広帯域デジタル制御GaN増幅器は、アナログで動作するGaN増幅部と、増幅部への入力信号を生成するデジタル制御部を組み合わせた新たな発想の増

幅器である。図3に超広帯域デジタル制御GaN増幅器のGaN増幅部の回路構成を示す。GaN増幅部は、並列配置した二つのGaNトランジスタと、その出力側に接続した非対称な形をした独自の負荷変調回路によって構成する。デジタル制御部には、二つのGaNトランジスタに入力する信号間の最適な振幅と位相の組合せを瞬時に選択するために、AI技術Maisartによる学習機能を搭載する。これによって、周波数や出力電力に応じて、増幅部への入力信号の自動最適制御が可能になる。

図3の中心周波数 f_0 時を基に回路構成について述べる。一方のGaNトランジスタFET1には周波数 f_0 で 90° の電気長を持つ出力回路を、他方のGaNトランジスタFET2には 180° の電気長を持つ出力回路を装荷する。この際、出力容量などの寄生成分は出力回路に取り込み、トランジスタ等価回路上の電流源端に、特性インピーダンスがトランジスタの最適負荷インピーダンス R_{opt} の等価的な伝送線路が接続された構成をとる。この構成によって、周波数に応じてFET1及びFET2の出力回路の電気長が変化することを利用し、負荷変調の動作モードを切り替えて広帯域動作を実現する。

次に、各周波数での動作モードについて述べる。周波数 f_0 付近では、FET1の出力に 90° 線路が接続された状態になる。この場合、二つの入力信号に関して、適切な位相差で振幅比を制御することで、FET1側をキャリア増幅器、FET2側をピーク増幅器として駆動し、ドハティ増幅器として動作できる。次に、周波数 $1/2f_0$ 及び $3/2f_0$ 付近での動作を考える。この場合、 f_0 時とは逆にFET2の出力に 90° 線路が接続された状態になる。したがってFET1側をピーク増幅器、FET2側をキャリア増幅器として駆動することでドハティ増幅器として動作できる。さらに周波数 $2/3f_0$ 付近では、FET1の出力に 60° 線路、FET2の出力に 120° 線路が接続された状態になり、 $90 \pm 30^\circ$ の関係に

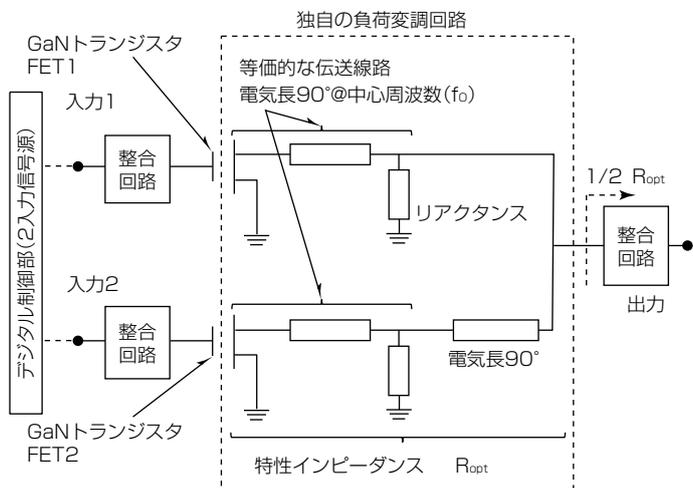


図3. GaN増幅部の回路構成

なる。この場合には、二つの入力信号を同振幅で位相差を制御して、FET1とFET2をそれぞれ駆動することでアウトフェーシング増幅器として動作できる。同様に、周波数 $4/3f_0$ 付近では、 $2/3f_0$ 付近と逆相のアウトフェーシング増幅器として動作できる。

独自の負荷変調回路によって増幅器の広帯域動作が可能になる一方、厳密に動作モードが規定できる前記の周波数条件以外の周波数やトランジスタの非線形性も考慮すると、二つのGaNトランジスタに入力する2入力信号間の振幅や位相の組合せは無数に存在する。中には、増幅器として動作はするものの効率が低くなってしまいう組合せも含まれるため、周波数や出力電力に応じて高い効率での動作を実現する2入力信号の組合せを求める必要がある。しかし、人手で探索すると、非常に長い時間を要するという問題があるため、デジタル制御部にはMaisartによる学習機能を搭載して、出力電力や動作効率などで決定される増幅器の特性を最大化する、最適な2入力信号の組合せを自動最適制御させることで、周波数や出力電力に応じた増幅器の高効率動作を実現する。

3.2 試作結果

試作したGaN増幅部の外観と測定系を図4に示す。このGaN増幅部とデジタル制御部を組み合わせ、無変調信号を用いた高周波性能評価を実施した。6.0dBバックオフ動作時の動作効率と出力電力の周波数依存性評価結果を図5に示す。独自の負荷変調回路の適用によって、3Gから5Gまでの主要な周波数帯をカバーする1.4から4.8GHzの超広帯域動作を確認した。また、周波数や出力電力に応じた増幅器の入力信号の自動最適制御によって、2入力信

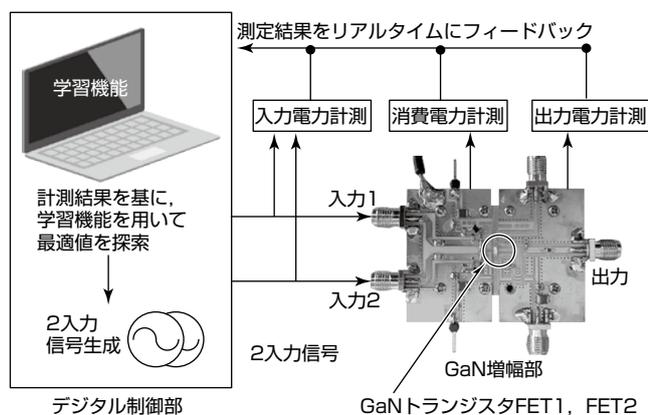


図4. 試作したGaN増幅部の外観と測定系

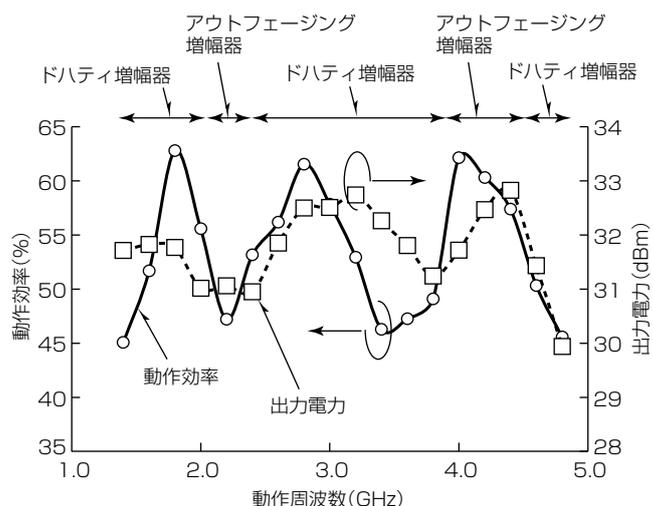


図5. 動作効率と出力電力の周波数依存性評価結果

号の振幅と位相の関係性を最適化して、周波数に対して周期的に負荷変調のモードが変化する所望の動作を確認した。その結果、動作効率40%以上での高効率動作を達成した。

4. む す び

3G, 4G, 5Gの各通信世代を一つの基地局で運用するとともに、基地局装置の設置性を高めるというニーズに応えるために、6GHz以下の複数の周波数帯に1台の増幅器で対応できる超広帯域デジタル制御GaN増幅器を開発した。この増幅器はアナログで動作するGaN増幅部と、増幅部の動作モードを制御する入力信号を生成するデジタル制御部を組み合わせた新たな発想の増幅器である。今後、実際の変調信号を用いた評価を進め、多種多様なサービス・アプリケーションを実現する大容量通信に貢献するとともに、TCO低減のため移动通信基地局の低消費電力化に寄与していくことを期待する。

参考文献

- (1) Komatsuzaki, Y., et al.: 3.0-3.6GHz Wideband, over 46% Average Efficiency GaN Doherty Power Amplifier with Frequency Dependency Compensating Circuits, IEEE Topical Conference on RF/Microwave Power Amplifiers for Radio and Wireless Applications (PAWR), 22~24 (2017)
- (2) Ma, R., et al.: A GaN PA for 4G LTE-Advanced and 5G, IEEE Microwave Magazine, 18, No.7, 77~85 (2017)
- (3) Komatsuzaki, Y., et al.: A Novel 1.4-4.8GHz Ultra-Wideband, over 45% High Efficiency Digitally Assisted Frequency-Periodic Load Modulated Amplifier, IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), 706~709 (2019)