

広帯域・高効率S帯240W GaN増幅器

杉谷拓海* 半谷政毅***
 吉岡貴章** 山中宏治***
 小坂尚希**

Broadband and High Efficiency S-band 240W GaN Power Amplifier

Takumi Sugitani, Takaaki Yoshioka, Naoki Kosaka, Masatake Hangai, Koji Yamanaka

要旨

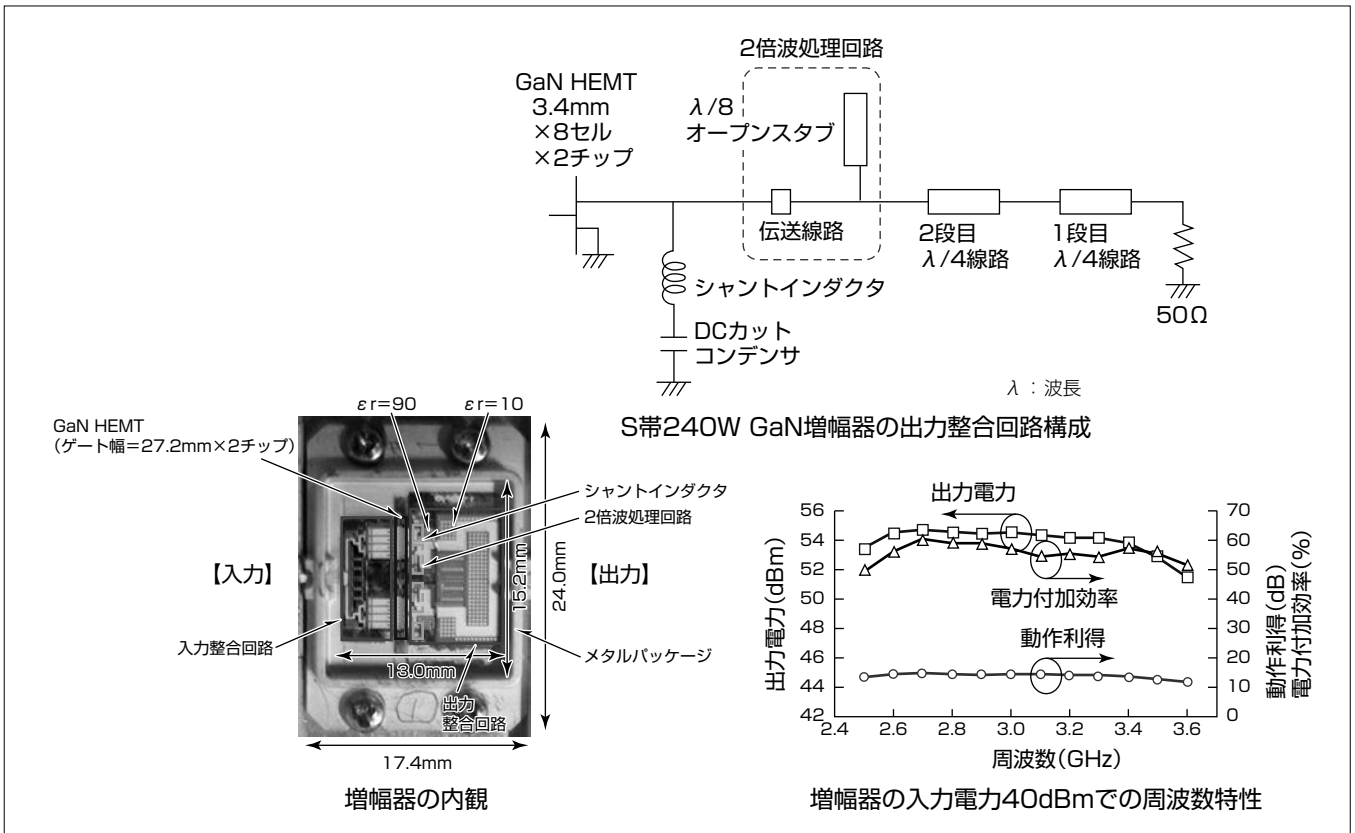
高出力増幅器の出力電力、効率及び動作周波数帯域幅は、レーダや通信分野で、探知距離、消費電力及び通信速度などのシステム性能を決定する重要な要素である。

三菱電機では送信機の高出力・高効率化を可能にし、かつ長期信頼性を持つ窒化ガリウム (GaN) 高電子移動度トランジスタ (High Electron Mobility Transistor : HEMT) を用いた高出力増幅器の開発を進めている。GaN HEMT は絶縁破壊耐圧が高いため、高電圧動作が可能である。そのため、増幅器の高出力化に適した材料として有望視され、様々な周波数帯で利用できるGaN高出力増幅器の開発に大きな期待が寄せられている。その中でもS帯は、船舶監視や航空管制など種々のレーダ用途に広く利用される周

波数帯域である一方、用途によって運用される周波数が異なっている。そこで今回の開発では、種々の用途に汎用的に使用できるよう、S帯レーダバンドの全帯域をカバーする2.6~3.4GHz(比帯域27%)での動作を開発目標とした。

高出力かつ高効率を広帯域で得るために、シャントインダクタ型整合回路と2倍波処理回路を出力整合回路に適用することによって、この開発品は国内外のS帯レーダバンドの全帯域をカバーする2.6~3.4GHzで、出力電力240W以上、電力付加効率54.4%以上の特性を持ち、世界最高^(注1)の広帯域特性を達成した。この結果は、当社製GaN高出力増幅器の優位性を示すものであり、GaN高出力増幅器の今後ますますの発展に寄与するものである。

(注1) 2017年1月10日現在、当社調べ



広帯域・高効率S帯240W GaN増幅器の出力整合回路構成及び内観と周波数特性

シャントインダクタ型整合回路と2倍波処理回路を出力整合回路に適用することによって、この開発品は国内外のS帯レーダバンド(2.6~3.4GHz)で出力電力240W以上、電力付加効率54.4%以上の特性を持ち、世界最高の広帯域特性を達成した。

1. ま え が き

近年、マイクロ波レーダの探知距離拡大や機器の省電力化の要求に伴い、レーダ用送信機の高出力・高効率化の要求が高まっている。従来、レーダ用送信機には、マグネトロンやクライストロンなどの電子管、又はガリウムヒ素を用いた半導体固体増幅器が広く搭載されてきた。しかし、前者は装置が大きく寿命が短い、後者は出力電力密度に限界があって高出力化が難しい等の問題があった。そこで当社では、送信機の高出力・高効率化を可能にし、かつ長期信頼性がある窒化ガリウム高電子移動度トランジスタ(GaN HEMT)を用いた高出力増幅器の開発を進めている。GaN HEMTはその材料物性から絶縁破壊耐圧が高く、高電圧動作が可能である。そのため増幅器の高出力化に適した材料として有望視され、各種用途に利用できるGaN高出力増幅器の開発に大きな期待が寄せられている。

当社ではGaN HEMTの登場以来、内部整合型GaN高出力増幅器の高出力・高効率化開発に取り組んできた。中でもレーダ用途としては、200W級C帯GaN高出力増幅器を気象観測用として世界で初めて^(注2)製品化した⁽¹⁾。

これまでの開発技術を基として、今回新たにS帯レーダ用GaN高出力増幅器を開発した。S帯は、船舶監視や航空管制など種々のレーダ用途に広く利用される周波数帯域である一方、用途によって運用される周波数は異なる。この開発では、種々の用途に汎用的に使用できるように、S帯レーダバンドの全帯域をカバーする2.6~3.4GHz(比帯域27%)での動作を開発目標に設定した。

広帯域動作を可能とするため、シャントインダクタと2倍波処理回路から構成される出力整合回路を新たに開発し、高出力増幅器に適用した。その結果、2.6~3.4GHzで出力電力240W以上で電力付加効率54.4%以上の特性を持つ高出力増幅器を実現した。

本稿では、開発した出力整合回路の構成と、この構成を

適用したGaN高出力増幅器について述べる。

(注2) 2014年2月13日現在、当社調べ

2. 出力整合回路の構成と設計

高効率な特性を広帯域に得るために、オープンスタブとシャントインダクタを伝送線で接続した出力整合回路の構成を新たに開発した。図1に、出力整合回路の構成を示す。出力整合回路は、シャントインダクタ、2倍波処理回路、及び2段の $\lambda/4$ 線路で構成しており、このうち2倍波処理回路は、長さが基本波に対して $\lambda/8$ (2倍波に対して $\lambda/4$)の2倍波反射用オープンスタブ及び伝送線で構成している。200W級の出力電力を得るため、総ゲート幅27.2mmのGaN HEMTを2チップ使用した。各チップのセル数は8であり、各セルのゲート幅は3.4mmである。ここで、広帯域整合を実現するための2倍波及び基本波の整合原理について述べる。

2.1 2倍波処理回路の動作原理

シャントインダクタは2倍波に対してほぼ開放回路と見なせるため、2倍波反射位相は伝送線の電気長を調整す

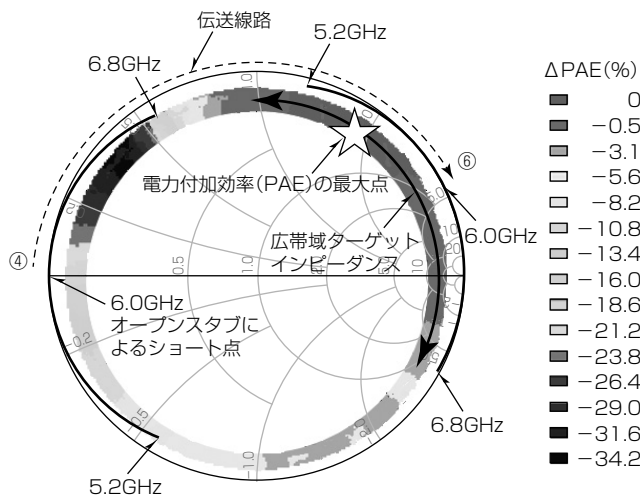


図2. 2倍波に対する出力インピーダンス変成の軌跡

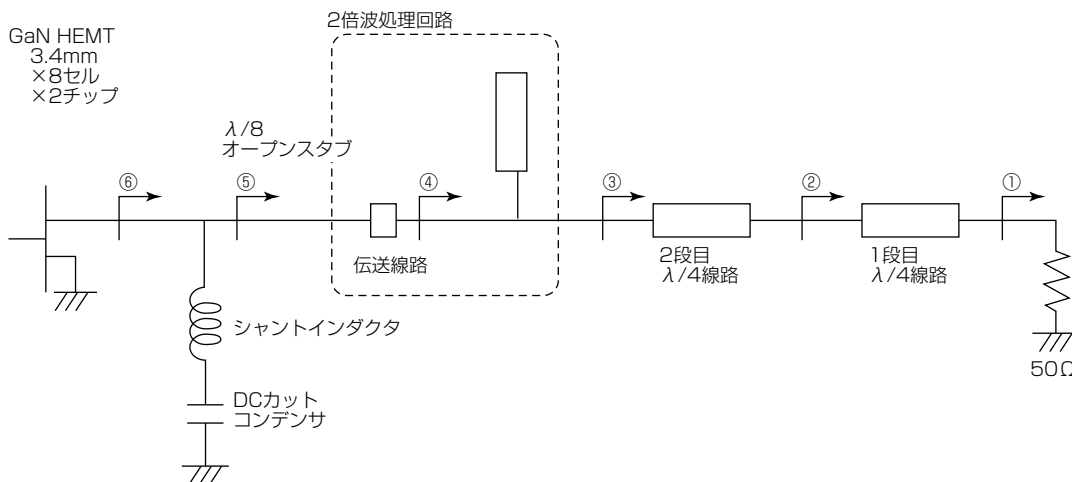


図1. 出力整合回路の構成

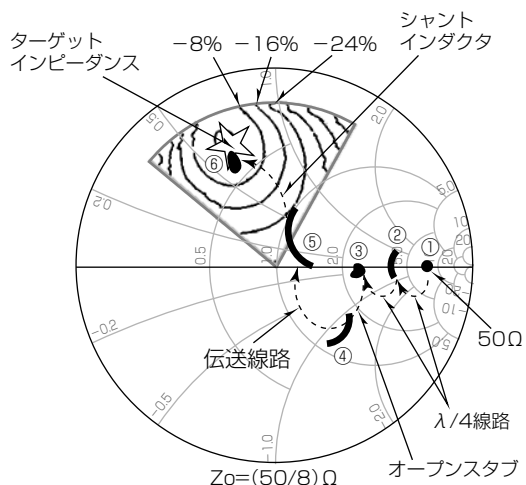


図3. 50Ωからターゲットインピーダンスへの基本波に対する出力インピーダンス変成の軌跡

ることで制御できる。図2に、2倍波(5.2~6.8GHz, 比帯域27%)に対する出力インピーダンス変成の軌跡とこの開発品に使用したGaN HEMTの電力付加効率の2倍波反射位相依存性を示す。図2の④と⑥は、図1の各地点から外部負荷側を見込んだインピーダンスに対応する。2倍波反射位相が電力付加効率のボトルネックに整合することを避けるため、2倍波の中心周波数6GHzの反射位相を30度付近に整合するよう、伝送線路の電気長を設定した。この結果、比帯域27%にわたる2倍波に対して、電力付加効率最大値からの低下量を5%以内に収めた“広帯域ターゲット”インピーダンスに整合することを実現した。

2.2 基本波の整合原理

図3に、50Ωからターゲットインピーダンスへの基本波に対する出力インピーダンス変成の軌跡を示す。なお、基本波のターゲットインピーダンスは、1セルトランジスタのロードプル測定から、実験的に見いだしたものである。図3の①~⑥は、図1の各地点から外部負荷側を見込んだインピーダンスに対応する。シャントインダクタをGaN HEMTに直結することで、50Ωから地点⑤へのインピーダンス変成比を低減できる。加えて、2倍波処理回路は図3に示すとおり基本波整合にも利用される。この結果、3段のλ/4線路を使用した場合と比較して、広帯域特性を小型に実現できる。

3. GaN高出力増幅器の評価結果

図4に、開発したS帯GaN高出力増幅器の内観を示す。高出力増幅器は、GaN HEMT、入力整合回路、出力整合回路から構成され、全ての部品は外形サイズ24.0×17.4(mm)のメタルパッケージに実装されている。1段目λ/4線路はアルミナ基板上に、2段目λ/4線路、2倍波処理回路並びにシャントインダクタは、高誘電率基板上にパターン形成されている。

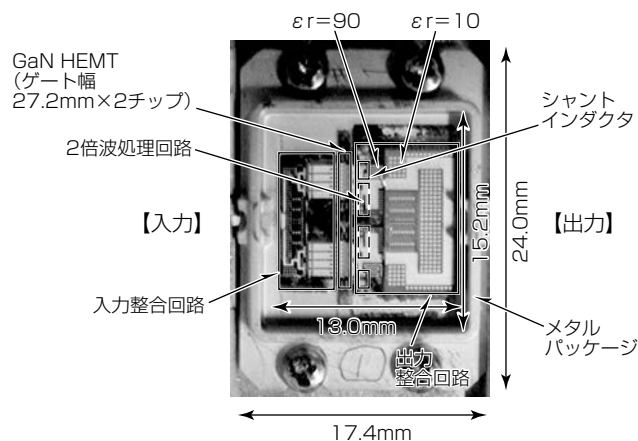


図4. S帯GaN高出力増幅器の内観

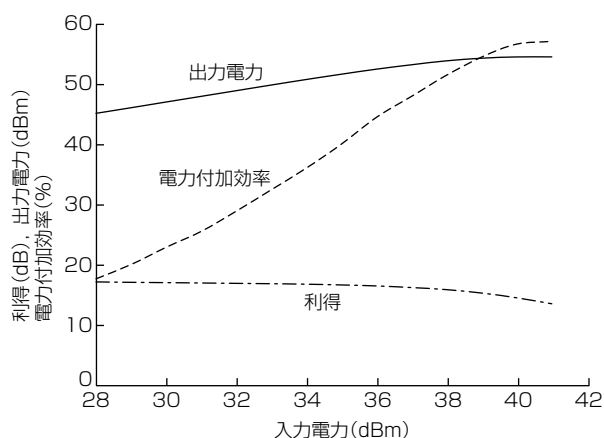


図5. S帯GaN高出力増幅器の周波数3.0GHzでの入出力特性

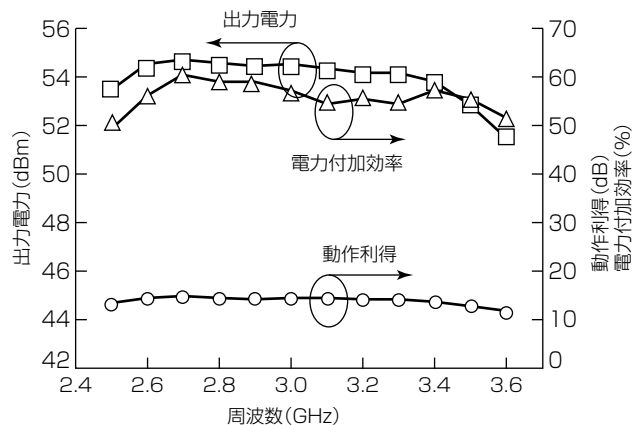


図6. S帯GaN高出力増幅器の入力電力40dBmでの周波数特性

図5に、S帯GaN高出力増幅器の周波数3.0GHzでの入出力特性を示す。デューティ比10%のパルス動作、ドレイン電圧47Vでの特性であり、外部負荷は入出力ともに50Ωである。3.0GHzで、出力電力282W(54.5dBm)、電力付加効率57.2%が得られた。図6に、S帯GaN高出力増幅器の入力電力40dBmでの出力電力、電力付加効率、動作利得の周波数特性を示す。周波数2.6~3.4GHzにわたる動作比帯域27%で、出力電力240W(53.8dBm)以上、電力

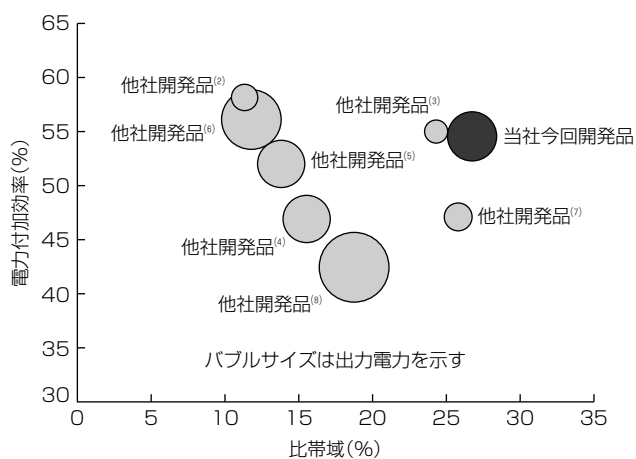


図7. 100W級超のS帯GaN高出力増幅器での他社開発品との性能比較

付加効率54.4%以上の特性が得られた。図7に、100W級超のS帯GaN高出力増幅器での他社開発品⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾との性能比較を示す。当社が今回開発したS帯GaN高出力増幅器が、もっとも広帯域な特性を持っている。

4. む す び

高効率な特性を広帯域に実現するための出力整合回路を新たに開発し、内部整合型S帯GaN高出力増幅器に適用した。開発品は、国内外のS帯レーダバンドの全帯域をカバーする2.6~3.4GHzで、出力電力240W以上、電力付加効率54.4%以上の特性を持ち、世界最高の広帯域特性を達成した。この結果は、当社製GaN高出力増幅器の優位性を示し、GaN高出力増幅器の今後ますますの発展に寄与するものである。

参 考 文 献

(1) 三菱電機広報発表 2014年2月13日：5GHz帯高効率高出力GaNデバイスを開発

<http://www.MitsubishiElectric.co.jp/news/2014/pdf/0213-s04.pdf>

(2) Motoi, K., et al.: A 72% PAE, 95-W, single-chip GaN FET S-band inverse class-F power amplifier with a harmonic resonant circuit, 2012 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 1~3 (2012)

(3) Cheron, J., et al.: Wideband 50W packaged GaN HEMT with over 60% PAE through internal harmonic control in S-band, 2012 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 1~3 (2012)

(4) Krishnamurthy, K., et al.: A 250W S-band GaN HEMT amplifier, 2007 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium, 1~4 (2007)

(5) Wood, S. M., et al.: Hybrid and monolithic GaN power transistors for high power S-band radar applications, 2012 7th European Microwave Integrated Circuits Conference, 421~424 (2012)

(6) Deguchi, H., et al.: A 2.6GHz band 537W peak power GaN HEMT asymmetric Doherty amplifier with 48% drain efficiency at 7dB, 2012 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 1~3 (2012)

(7) Alexander, A., et al.: A 120Watt GaN power amplifier MMIC utilizing harmonic tuning circuits for S-band applications, 2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 1~3 (2015)

(8) Krishnamurthy, K., et al.: Wideband 400W pulsed power GaN HEMT amplifiers, 2008 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 303~306 (2008)