

# 高出力・高効率 GaN MMIC を適用した レーダー用小型送受信モジュール

Small Transmitter/Receiver Module Employing High-Power and High-Efficiency GaN MMIC High-Power Amplifier for Radar Systems

千住 智博 SENJU Tomohiro 高橋 広次 TAKAHASHI Koji

近年、気象レーダーなどレーダーシステムの探知距離を伸ばすため、送信信号を増幅する大電力増幅器（High Power Amplifier：HPA）の高出力化が、窒化ガリウム（GaN）高電子移動度トランジスタ（HEMT）を用いて進められている。HPAの高出力化には消費電力や発熱量の増加が伴うことから、効率の向上が強く求められている。

東芝インフラシステムズ（株）は、この要求に応じて、高出力かつ高効率な GaN MMIC（Monolithic Microwave IC）HPAを用いた、X帯（8～12 GHz帯）レーダー用小型送受信（T/R）モジュールを開発した。試作した小型T/Rモジュールにより、9～10 GHzの周波数帯域において、出力電力13.5 W以上及び電力付加効率（PAE）41.4%以上の送信特性を確認できた。

To meet the need for expansion of the detection range of weather radars and other radar systems, high-power amplifiers (HPAs) that achieve higher output power through the application of gallium nitride (GaN) high electron mobility transistor (HEMT) devices have been developed in recent years. However, as increases in the output power of HPAs can lead to increased power consumption and heat dissipation, there is growing demand for improvements in the efficiency of such devices.

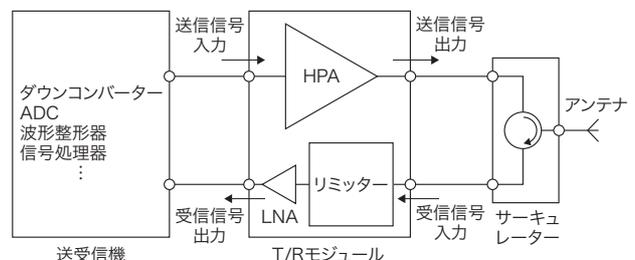
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corporation has addressed this issue by developing a small transmitter/receiver (T/R) module for X-band (8–12 GHz) radar systems employing a high-power and high-efficiency GaN monolithic microwave integrated circuit (MMIC) HPA. Experiments on prototypes have confirmed that this T/R module achieves an output power of more than 13.5 W and a power-added efficiency (PAE) of more than 41.4% in the frequency range of 9–10 GHz.

## 1. まえがき

東芝インフラシステムズ（株）は、気象レーダー<sup>(1)</sup>や航空監視レーダー<sup>(2)</sup>などのレーダーシステムを開発してきた。また、これらのレーダーシステムで使用される送受信信号を増幅するためのT/Rモジュールも開発してきた。

一般のレーダーシステムのRF（Radio Frequency）フロントエンド部の構成例を、図1に示す。T/Rモジュールは、送受信波形整形及び信号処理を行う送受信機と送受信切り替え用サーキュレーターの間に配置される。T/Rモジュールの送信部は、送信信号を所望の出力に増幅するHPAで構成される。一方、受信部は、受信信号を送受信機での信号処理に必要な振幅に増幅する低雑音増幅器（LNA）と、送信信号の一部の反射電力がサーキュレーターを介して受信系へ回り込むことによるLNAの破壊を防ぐためのリミッターで構成される。

レーダーの性能指標として重要な探知距離は、送信信号の出力と受信信号の受信感度に依存する。このため、高出力化に適したGaN HEMTを適用した送信用HPAの高出力化、受信保護用リミッターの低損失化、及び受信用LNAの低



ADC:アナログデジタル変換器

図1. レーダーシステムのRFフロントエンド部の構成例

送受信信号の増幅を行うT/Rモジュールは、送受信機とサーキュレーターの間に配置される。

Example of configuration of radio-frequency (RF) front end in typical radar system

雑音化に向けた技術開発が、近年精力的に進められている。しかし、高出力化はHPAの消費電力と発熱量の大幅な増加につながり、電源の大容量化と放熱機構の大型化を招く。そのため、送信用HPAの高効率化が強く求められている。

そこで、当社は、高出力かつ高効率を実現するため、高効率 GaN MMIC HPA を用いた X 帯レーダー用小型 T/R モ

ジュールを開発した。従来の6 W級ヒ化ガリウム (GaAs) MMIC HPAを用いたT/Rモジュールに比べ、出力電力を2倍以上、PAEを8ポイント以上向上させた。

ここでは、今回のX帯レーダー用小型T/Rモジュールの開発目標、開発ポイント、設計結果、及び試作結果について述べる。

## 2. 小型T/Rモジュールの開発目標

今回の開発における小型T/Rモジュールの開発目標を、表1に示す。高出力かつ高効率という観点において、GaN MMICチップサイズ3.6×3.6 mm以下で、出力電力41.3 dBm以上とPAE 43.5 % (typ.)を実現することを目指した。

## 3. 開発ポイント

表1に示す開発目標を満足する小型T/Rモジュールを実現するため、送信用高効率GaN MMIC HPAの開発に、以下の三つの技術を適用した。

### 3.1 高効率GaN HEMT MMICプロセス

マイクロ波電力増幅デバイスのPAEは、ドレイン効率 $\eta_D$ と電力利得 $G_p$ を用いて、式(1)で表せる。

$$PAE = \eta_D \times (1 - 1/G_p) \quad (1)$$

この式から、PAEを向上させるためには、高い $\eta_D$ と高い $G_p$ が必要なが分かる。

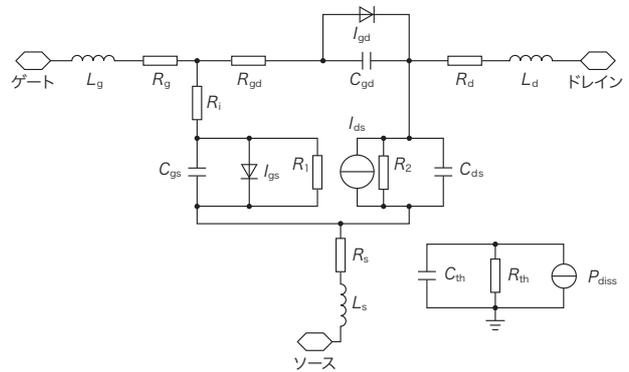
今回の開発では、AlGaN (窒化アルミニウムガリウム) / GaN HEMTのエピタキシャル条件を電気特性と寿命に対して最適化することで、従来のGaN HEMTに比べて $\eta_D$ を約10ポイント向上させた<sup>(3)</sup>。また、GaN HEMTのゲート長を従来の0.35  $\mu\text{m}$ から0.25  $\mu\text{m}$ に縮小することで、 $G_p$ を約1 dB向上させた。

### 3.2 GaN HEMTの高精度な非線形等価回路モデル

表1に示すように、小型T/Rモジュールの送信用GaN MMIC HPAには、20 dBを超える高利得が求められる。こ

れを実現するため、三つの増幅段をカスケード接続した構成を用いた。3段電力増幅器の2、3段目増幅器は、高効率化のために非線形動作が必要になる。一方、1段目増幅器は、高利得を得るために線形動作が必要になる。そこで、線形動作から非線形動作までを高精度に解析できる等価回路モデルを作成した。作成した等価回路モデルを図2に示す。

作成した等価回路モデルを用いて求めた、周波数9.3 GHzにおける $\eta_D$ と $G_p$ の計算値と実測値との比較を図3に示す。ここで、FET (電界効果トランジスタ)のゲート幅は0.3 mm、



- $L_g$  :ゲートインダクタンス
- $R_g$  :ゲート抵抗
- $R_{gd}$  :ゲート-ドレイン間抵抗
- $C_{gd}$  :ゲート-ドレイン間容量
- $I_{gd}$  :ゲート-ドレイン間電流
- $R_d$  :ドレイン抵抗
- $L_d$  :ドレインインダクタンス
- $R_1$  :ゲート-ソース間抵抗
- $C_{gs}$  :ゲート-ソース間容量
- $I_{gs}$  :ゲート-ソース間電流
- $R_2$  :出力コンダクタンス
- $I_{ds}$  :ドレイン-ソース間電流
- $R_s$  :ソース抵抗
- $C_{ds}$  :ドレイン-ソース間容量
- $L_s$  :ソースインダクタンス
- $C_{th}$  :熱容量
- $R_{th}$  :熱抵抗
- $P_{diss}$  :消費電力

図2. GaN HEMTの非線形等価回路モデル

非線形特性を高精度に解析・予測できるように、電流と電圧の関係式を作成した。

Nonlinear equivalent circuit model of GaN HEMT

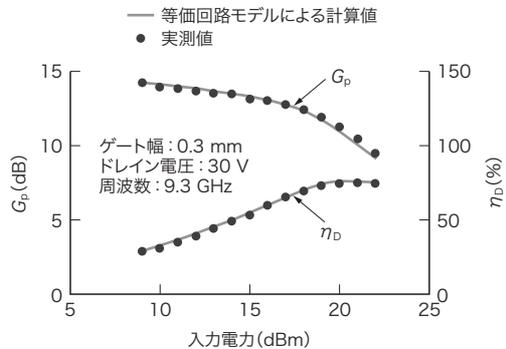


図3. 開発したGaN HEMTの入出力特性の計算値と実測値の比較

計算値と実測値は、広い入力電力範囲にわたって良く一致しており、非線形等価回路モデルの有効性を確認した。

Comparison of calculated and measured power characteristics of newly developed GaN HEMT at 9.3 GHz

表1. 小型T/Rモジュールの開発目標

Development targets for small T/R module

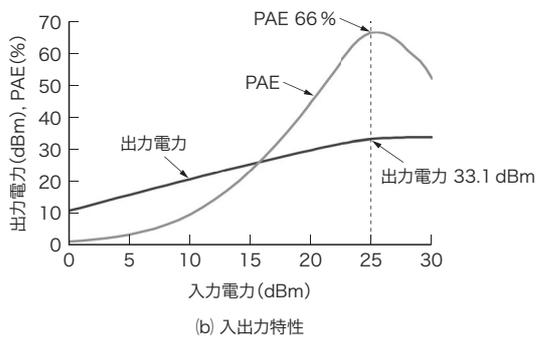
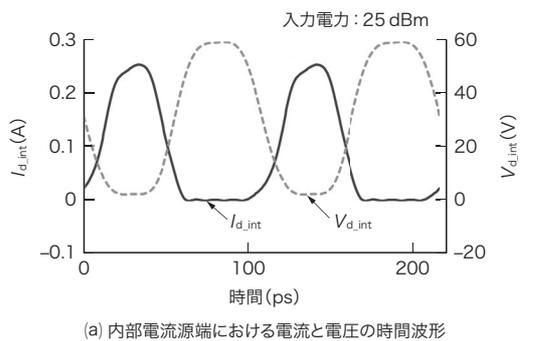
項目	仕様
周波数	9 ~ 10 GHz
ドレイン電圧	24 ~ 36 V
パルス幅	100 $\mu\text{s}$
デューティ比	10 %
電力利得	20.9 dB以上
出力電力	41.3 ~ 42.7 dBm
PAE	43.5 % (typ.)
GaN MMICチップサイズ	3.6×3.6 mm以下

ドレイン電圧は30 V、入出力整合条件は効率整合とした。広い入力電力範囲にわたって計算値と実測値は良く一致しており、非線形等価回路モデルの有効性が確認できた。

### 3.3 小型高調波処理回路

今回開発したGaN MMIC HPAは、GaN HEMTの高効率動作を実現するため、高調波波形処理技術によるF級動作モードを採用した<sup>(4)</sup>。3.2節で述べた非線形等価回路モデルを用いて設計した、X帯F級GaN HEMTのFET内部電流源端における電流 $I_{d,int}$ と電圧 $V_{d,int}$ の時間波形を図4(a)に示す。電圧波形は矩形(くけい)波に近く、電流波形は半波整流になっていることから、F級動作モードが実現されていることが分かる。入出力特性の計算結果を図4(b)に示す。入力電力25 dBm時に66%という高いPAEが得られ、高効率動作が確認できた。

F級増幅器での出力端から負荷側を見たインピーダンスは、基本波整合に加えて2倍波において短絡、3倍波において開放となる条件が必要である。これを実現するために、先端短絡1/4波長線路が用いられる。しかし、今回の開発



ドレイン電圧: 30 V    パルス幅: 100  $\mu$ s    ゲート幅: 0.6 mm  
 周波数: 9.3 GHz    デューティ比: 10%  
 p: ピコ( $10^{-12}$ )

図4. 開発したGaN HEMTのF級動作特性

入力電力が25 dBmのとき、電圧波形は矩形波に近く、電流波形は半波整流になっており、PAEは、66%という高い値が得られた。

Calculated characteristics of newly developed GaN HEMT under class F operation

では、GaN MMICチップサイズ3.6×3.6 mm以下の領域に3段構成の増幅器を取めることを目標としている。このため、回路のレイアウト面積が大型化する先端短絡1/4波長線路を用いる替わりに、ドレインバイアス給電回路と整合回路のインピーダンス条件を工夫した<sup>(4)</sup>。

## 4. 設計結果

3章で述べた各要素技術を基に、表1の開発目標を満足するGaN MMIC HPAを設計した。構成を図5に示す。利得10 dB前後のGaN HEMTを用いて20 dBを超える高利得を実現するため、整合回路を介してGaN HEMTを3段カスケード接続にした。飽和出力電力とPAEを考慮して、各増幅段に用いるGaN HEMTのゲート幅を1段目は0.6 mm、2段目は1.2 mm、3段目は3.84 mmとした。設計したGaN MMICのチップサイズは3.0×3.5 mmとなり、従来のT/Rモジュールの送信部に使用していた6 W級GaAs MMIC HPAに対して、チップ面積を19%縮小できた。

## 5. 試作結果

今回開発した小型T/Rモジュールを図6に示す。小型T/Rモジュールのパッケージ外形サイズは17.4 (縦)×9.1 (横) mmである。

送信部には、従来の6 W級GaAs MMIC HPAの代わりに、今回開発したGaN MMIC HPAを配置した。このGaN MMICチップは、ドレイン電圧30 V、周波数9.55 GHz、入力電力22 dBmの条件において、52.1%という高い

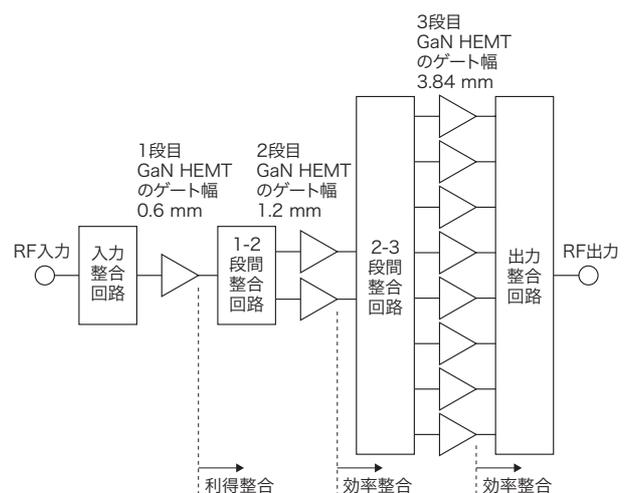


図5. 開発したGaN MMIC HPAの構成

増幅段は3段カスケード接続とした。また、飽和出力電力とPAEを考慮して、各増幅段に用いるGaN HEMTのゲート幅を1段目は0.6 mm、2段目は1.2 mm、3段目は3.84 mmとした。

Configuration of newly developed GaN MMIC HPA

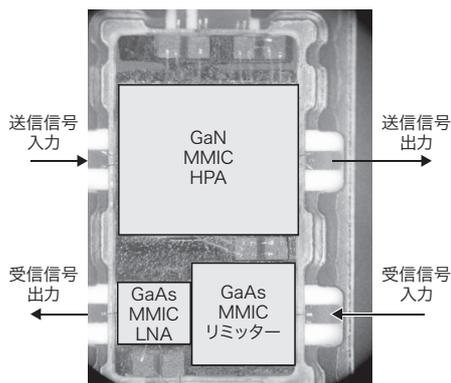


図6. 開発した小型T/Rモジュール

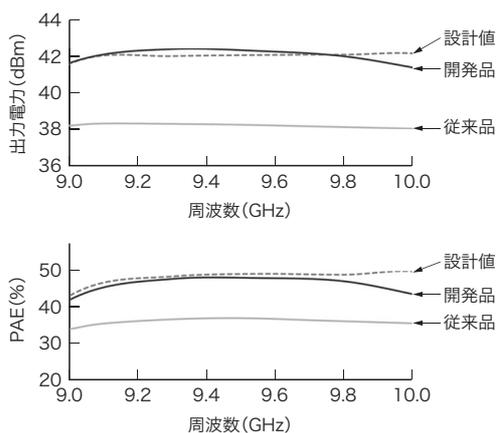
送信部に今回開発した高効率小型 GaN MMIC HPAを配置し、受信部の GaAs MMICリミッターは従来に比べ高い耐電力のものに変更した。

Prototype small T/R module

PAEと、世界最高レベル<sup>(注1)</sup>の単位面積当たりの出力電力 1.87 W/mm<sup>2</sup>を実現した<sup>(4)</sup>。

一方、送信電力の増加に伴い、サーキュレーターを介して受信系へ回り込む反射電力も増えるため、受信部は従来品よりも高い耐電力の GaAs MMICリミッターに変更した。

小型T/Rモジュールの送信部の周波数特性を図7に示す。周波数9～10 GHzにおいて、測定値は設計値と良く一致した。また、送信特性の評価結果を表2に示す。出力電力41.3 dBm (13.5 W) 以上、PAE 41.4%以上が得られており、従来品に比べて出力電力を2倍以上に高め、



ドレイン電圧: 30 V    パルス幅: 100 μs  
入力電力: 20.4 dBm    デューティ比: 10 %

図7. 開発した小型T/Rモジュールの送信部の周波数特性

周波数9～10 GHzにおいて、測定値は、設計値と良く一致した。

Frequency characteristics of prototype small T/R module

(注1) 2020年1月現在、X帯20 W級以上の GaN HEMT MMIC HPAにおいて、当社調べ。

表2. T/Rモジュールの開発品と従来品の性能比較

Comparison of transmitter performance of conventional and newly developed T/R modules

項目	性能	
	開発品 (GaN)	従来品 (GaAs)
周波数 (GHz)	9～10	9～10
ドレイン電圧 (V)	30	6.6
パルス幅 (μs)	100	100
デューティ比 (%)	10	10
電力利得 (dB)	20.9以上	17.7以上
出力電力 (dBm)	41.3～42.4	38.1～38.3
PAE (%)	41.4～47.7	33.9～36.9

PAEを8ポイント以上向上させた。

また、受信特性については、周波数9～10 GHzにおいて、受信利得18.0 dB、雑音指数2.0 dBが得られた。

## 6. あとがき

高効率 GaN HEMTと高精度な GaN HEMT非線形等価回路モデルを基にした高調波波形処理技術を適用した GaN MMIC HPAを用いて、X帯小型T/Rモジュールを開発した。開発した小型T/Rモジュールは、9～10 GHzにわたって13.5 W以上の出力電力、41.4%以上のPAEを実現し、従来品に比べて送信性能を大幅に向上させることができた。今後、今回開発した高効率化技術を様々な製品へ展開していく。

## 文献

- (1) 旭 保彰, ほか. X帯気象レーダ用 GaN 固体化電力増幅器. 東芝レビュー. 2008, 63, 2, p.58-61.
- (2) 橋田芳男, ほか. 航空管制用二次監視レーダ—SSR モードS. 東芝レビュー. 2004, 59, 2, p.58-61.
- (3) Sugita, K. et al. "The Correlations between the Crystalline Quality and the Degradation Mechanism of AlGaIn/GaN HEMTs under Off-state Stress Test". Proceedings of 34th Annual Reliability of Compound Semiconductors (ROCS) Workshop 2019. Minneapolis, MN, 2019-04, JEDEC, 2019, SESSION 1-1.3.
- (4) Ono, N. et al. "53% PAE 32W Miniaturized X-band GaN HEMT Power Amplifier MMICs". Proceedings of 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2018). Kyoto, 2018-11, IEICE. IEEE, 2018, p.557-559.



千住 智博 SENJU Tomohiro

東芝インフラシステムズ (株)  
小向事業所 基盤技術部  
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.



高橋 広次 TAKAHASHI Koji

東芝インフラシステムズ (株)  
小向事業所 基盤技術部  
電子情報通信学会会員  
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.