

# 5 GHz帯気象レーダ用1 kW級GaN固体化電力増幅器

## 1 kW-Class GaN Solid-State Power Amplifier for 5 GHz-Band Weather Radar Systems

旭 保彰      菅藤 和博      増田 和俊

■ ASAHI Yasuaki      ■ KANTO Kazuhiro      ■ MASUDA Kazutoshi

東芝は、衛星通信基地局やレーダなどで用いられる固体化電力増幅器 (SSPA : Solid State Power Amplifier) 向けの高周波・高出力増幅素子として、C帯 (4 ~ 8 GHz) の5 GHz帯で160 W級の窒化ガリウム (GaN) 電力HEMT (High Electron Mobility Transistor : 高電子移動度トランジスタ) を開発し、これを8合成することにより小型で軽量な出力電力1 kW級の5 GHz帯気象レーダ用SSPAを開発した。このSSPAは、従来の90 W級ガリウムヒ素 (GaAs) 電力FET (電界効果トランジスタ) を使ったSSPAに比べ、容積及び質量を約1/2に小型化できた。また、従来のSSPAと同様にスプリアスレベル<sup>(注1)</sup>を低く抑えられるので占有周波数帯域幅を狭くすることができ、電波を有効利用できるという特長がある。

Toshiba has developed a compact and lightweight 1 kW-class solid-state power amplifier (SSPA) for 5 GHz-band weather radar systems utilizing a low-loss miniature 8-way combiner with 160 W-class gallium nitride high electron mobility transistors (GaN HEMTs) developed for the C-band (4-8 GHz) frequency range used in earth stations for microwave satellite communication (SATCOM), radar systems, and other applications.

The newly developed SSPA is about half the overall size and weight of conventional power amplifiers using gallium arsenide field-effect transistors (GaAs FETs), and allows the occupied frequency bandwidth to be narrower due to its excellent spurious signal suppression performance, resulting in efficient use of frequency resources.

## 1 まえがき

近年、発達した台風や、ゲリラ豪雨と呼ばれる突発的な局地的豪雨などによる気象災害が増加している。気象レーダは、降水分布や、降水域中の風向と風速などを観測してこれらの予報に役だっているほか、観測情報がインターネットで公開されて一般の人々にとっても生活に必要な存在となってきた。

わが国の気象レーダにはC帯 (4 ~ 8 GHz) で5 GHz帯の電波を使ったものと、X帯 (8 ~ 12 GHz) で9 GHz帯の電波を使ったもの<sup>(1)</sup>があり、わが国全域をカバーする広域観測には5 GHz帯の気象レーダが使われている。従来、5 GHz帯気象レーダの送信装置で用いられる電力増幅器には、マグネトロンやクライストロンなどの真空管式増幅素子が用いられていた。しかし、これらの真空管式増幅素子は、スプリアスが大きいことや寿命が短いことなどに課題があり、固体化電力増幅器 (SSPA : Solid State Power Amplifier) の実現が望まれていた。

東芝は、5 GHz帯で90 W級ガリウムヒ素 (GaAs) 電力FET (電界効果トランジスタ) を用いた出力500 W級のSSPAを開発し、これらを合成して出力電力3 kW級の気象レーダシステムを2007年に完成させた<sup>(2), (3)</sup>。

更に今回、5 GHz帯で160 W級の窒化ガリウム (GaN) 電力

HEMT (High Electron Mobility Transistor : 高電子移動度トランジスタ) を開発し、これを適用することで従来の2倍の出力電力になる1 kW級SSPAを開発した。この開発により、GaAsを使用した従来のSSPAに比べて容積及び質量を約1/2に小型化でき、気象レーダ送信装置の更なる小型化が可能になる。

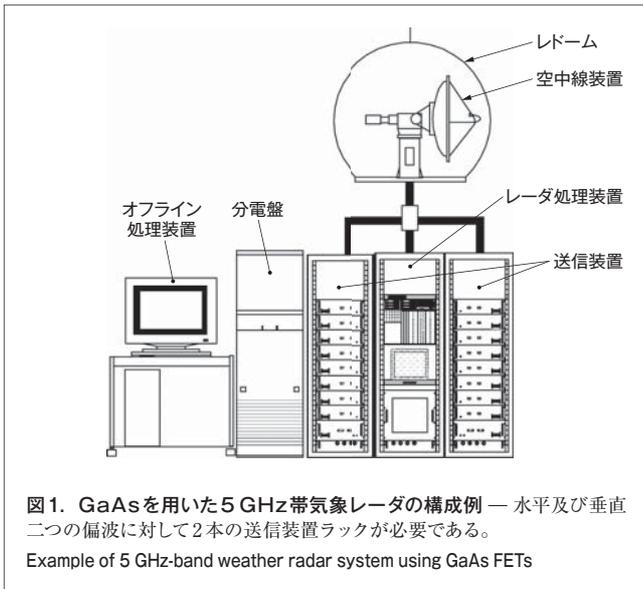
ここでは、今回開発した5 GHz帯1 kW級GaN SSPAの概要、これを実現するために採用した技術、及び性能を検証した結果について述べる。

## 2 5 GHz帯気象レーダの概要

5 GHz帯気象レーダはわが国全体で約60台が配備されており、1台での観測範囲は半径300 ~ 400 kmである。近年は、降水粒子 (雨や、雪、あられなど) の識別や降雨観測精度の向上が期待できる、水平と垂直の2種類の偏波面を持った二重偏波レーダが増えている。

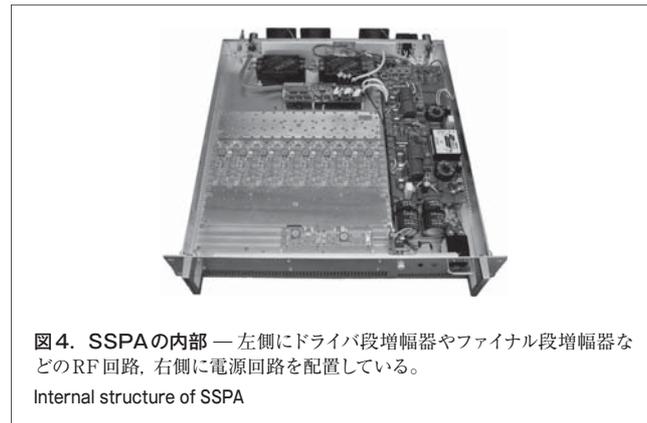
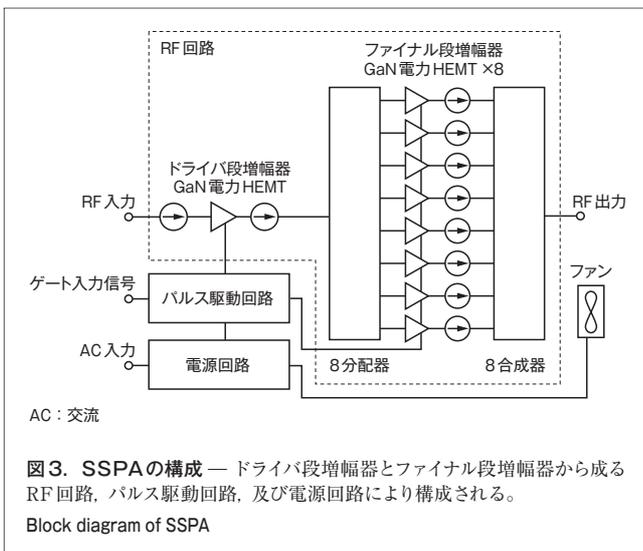
GaAs電力FETによる従来のSSPAを用いた5 GHz帯二重偏波気象レーダの構成例を図1に示す。二重偏波レーダではそれぞれの偏波用に送信装置が必要であり、従来のGaAs電力FETによるSSPAを用いた場合、ラック2本が必要である。今回開発したGaN電力HEMTを適用したSSPAは小型化に成功しており、1本のラックで2偏波分の送信装置を構成することが可能になる。

(注1) スプリアスとは発射電波に含まれる不要な周波数成分のこと。他の通信の障害となることがあるために、法令で上限レベルが規定されている。



### 3 開発した5 GHz帯1 kW級GaN SSPAの概要

今回開発したSSPAの外観を図2に、構成を図3に示す。SSPAはドライバ段増幅器とファイナル段増幅器から成る高



周波 (RF) 回路、パルス駆動回路、及び電源回路により構成される。

RF回路には、160 W級GaN電力HEMTをドライバ段増幅器に1個、ファイナル段増幅器に8個使用している。開発したGaN電力HEMTは高利得であり、ファイナル段の8個のGaN電力HEMTを1個のGaN電力HEMTでドライブする構成とし、RF回路の小型化を図っている。また消費電力及び発熱量を低減するため、SSPAを送信時だけ動作させるパルス駆動回路を備えている。

今回開発したSSPAの内部を図4に示す。背面パネルのファンにより冷却されるヒートシンク上面の左側にRF回路、右側に電源回路を配置した。パルス駆動回路は、RF回路の上面に配置してある (図4では省略)。

### 4 SSPAの技術課題とその解決施策

SSPAを高出力・小型化するにはいくつかの技術的課題があった。主なものとしては、高出力電力増幅素子の開発、合成器の低損失化、及び小型高密度実装である。これらの課題を解決し、従来のGaAs方式の500 W級SSPAと比べて、容積と質量を1/2以下にすることができた。

以下に、実施した施策について述べる。

#### 4.1 5 GHz帯160 W級GaN電力HEMTの開発

SSPAを小型化するため、GaAsと比べて出力電力が大きいGaN電力HEMTを開発した。

開発したGaN電力HEMTチップを図5(a)に示す。チップサイズは3.3×0.7 mm、総ゲート幅は約28 mmである。このGaN HEMTチップ4個を入出力内部整合回路基板とともにパッケージに実装した。そのパッケージの内部と外観を、図5(b)及び(c)に示す。パッケージサイズは24.4×17.4×4.1 mmである。

また、このGaN電力HEMTの入出力特性を図6に示す。測定周波数5.37 GHzで飽和出力電力は200 W (53 dBm) 以上、最大電力付加効率は47%以上が得られている。

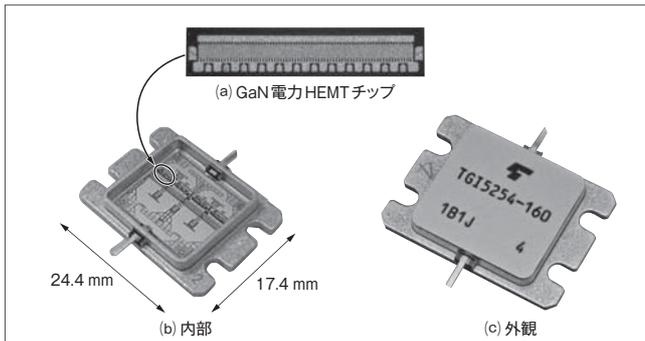


図5. 5 GHz帯160 W級GaN電力HEMT — 4個のGaN電力HEMTチップを内蔵し、内部整合回路により入出力ともに50 Ωに整合している。  
5 GHz-band 160 W-class GaN power HEMT

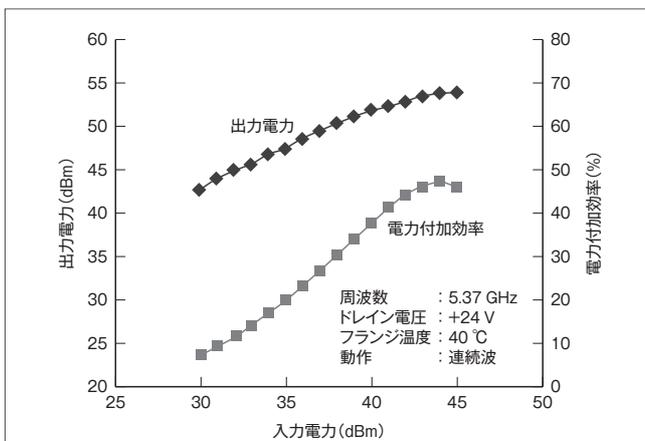


図6. 5 GHz帯160 W級GaN電力HEMTの入出力特性 — 飽和出力電力200 W (53 dBm) 以上、最大電力付加効率47%以上が得られた。  
Output power and efficiency of 5 GHz-band 160 W-class GaN power HEMT

#### 4.2 合成器の低損失化

SSPA内で8個のGaN電力HEMTの出力電力を合成する8合成器は、出力電力を向上させるため挿入損失をできるだけ低く抑えなければならない。

伝送線路の損失には、導体損、放射損、及び誘電体損がある。導体損を抑えるために導体には銀めっき処理した厚い銅板を使用し、放射損を抑えるために導体をアルミニウムのケースで囲い、誘電体損を抑えるために銅板とケース間は空気層とする構造を採用した(図7)。更に、回路を導体とケースだけのシンプルな構成にして、八つの入力ポートと合成出力ポート間を短く等長で配線し、これらの損失をいっそう低く抑えられるようにした。

この8合成器の挿入損失を実測した結果を図8に示す。5 GHz帯での挿入損失は、0.7 dB(約15%)以下という低損失を実現できた。

#### 4.3 小型高密度実装

RF回路には、3章で述べたように高出力で高利得なGaN電力HEMTを採用して小型化した。また、電源回路には、

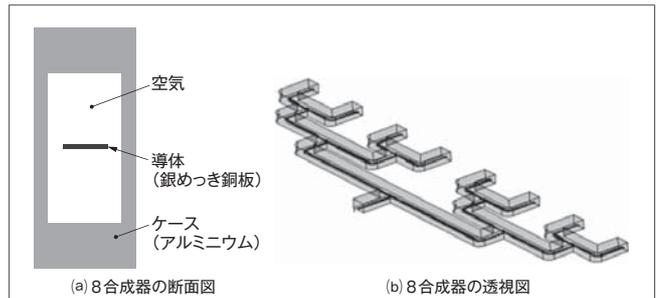


図7. 8合成器の構造 — 導体損、放射損、及び誘電体損を低く抑えるため、適した材質と構造を採用した。

Structure of 8-way combiner

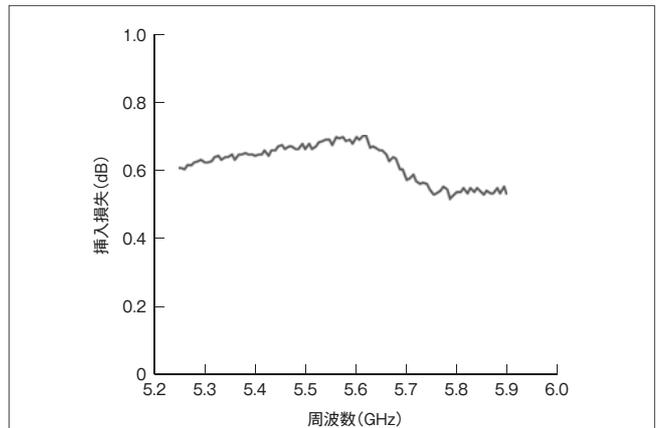


図8. 8合成器挿入損失の周波数特性 — 合成器の挿入損失は、5 GHz帯で0.7 dB以下という低い値を実現できた。

Insertion loss of 8-way combiner

AC(交流)/DC(直流)コンバータモジュールを採用して小型化している。

更に、従来のGaAs方式のSSPAでは、ヒートシンクをRF回路と電源回路で挟む構造を採用していたのに対し、今回は、RF回路と電源回路をヒートシンク上の片面に並べて配置し、小型・薄型化を実現した(図9)。

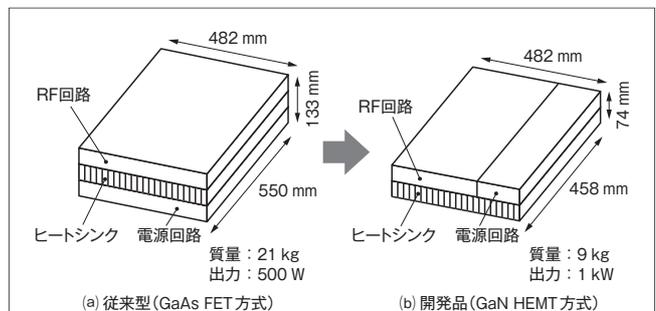


図9. SSPAの構造 — GaN電力HEMTを採用したSSPAでは、ヒートシンクの片面にRF回路と電源回路を配置することにより、小型・薄型化を実現した。

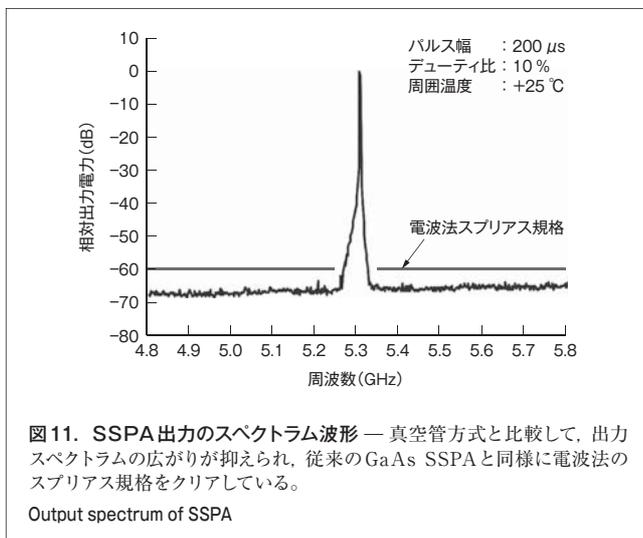
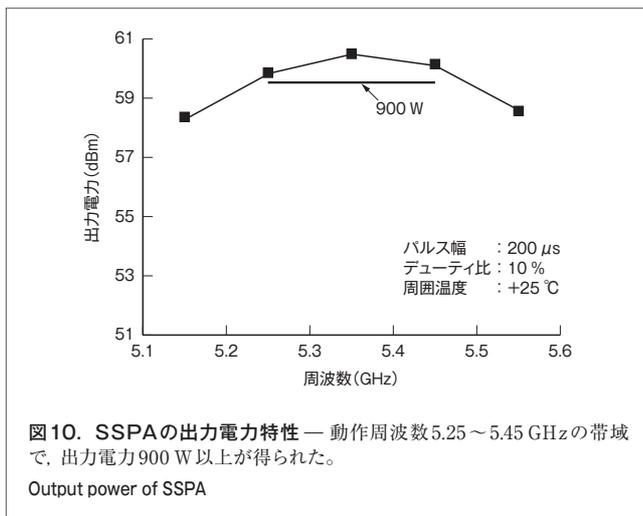
Structure of SSPA

## 5 5 GHz帯1 kW級 GaN SSPAの特性

今回開発したSSPAの仕様を、GaAs電力FET方式の500 W級SSPAと比較して、表1に示す。

表1. SSPAの主な仕様の比較  
Comparison of SSPAs using GaN HEMTs and GaAs FETs

項目	仕様		
	開発品 (GaN HEMT方式)	従来型 (GaAs FET方式)	
周波数 (GHz)	5.25 ~ 5.45	5.25 ~ 5.45	
出力電力 (W)	1 k (930 ~ 1,070)	500	
パルス幅 (μs)	200	400	
デューティ比 (%)	10	20	
AC入力	電圧 (V)	単相85 ~ 265	三相200
	周波数 (Hz)	50/60	50/60
消費電力 (W)	600	750	
動作温度範囲 (°C)	-10 ~ +40	-10 ~ +40	
外形寸法 (mm)	74 (高さ) × 482 (幅) × 458 (奥行き)	133 (高さ) × 482 (幅) × 550 (奥行き)	
	質量 (kg)	9	21



このSSPAの出力電力特性を図10に示す。5.25～5.45 GHzの帯域で900 W以上の出力電力を達成している。

また、出力のスペクトラム波形を図11に示す。クライストロンなどの真空管と比べて、固体電力増幅素子の使用によりスペクトラムの広がりが抑えられており、電波法のスプリアス規格に十分適合している。

## 6 あとがき

C帯の5 GHz帯で出力電力1 kW級のGaN SSPAを開発した。このSSPAは、従来のGaAsを使用したSSPAの約1/2に小型化でき、気象レーダの更なる小型化を可能にする。また、GaN SSPAはGaAs SSPAと同様に長寿命で信頼性が高く、クライストロン管のような1～2年ごとの定期交換が不要である。更に、送信スペクトラムの狭帯域化も同様に達成しており、電波の有効利用にも貢献できる。このSSPAは、気象レーダ以外のレーダシステムにも適用可能である。

今後、今回の成果をもとに、より小型で高出力なGaN SSPAの実現を目指す。

## 文献

- 旭 保彰 他. X帯気象レーダ用 GaN 固体化電力増幅器. 東芝レビュー. **63**, 2, 2008, p.58-61.
- Kanto, K. et al. "A C-Band 500W Solid-State Power Amplifier using 90W GaAs FETs". Workshop for Space, Aeronautical and Navigational Electronics. Perth, Australia, 2007-04, The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, Japan. 2007, p.85-90.
- 和田将一 他. 電波資源を有効に利用する5 GHz帯固体化気象レーダ. 東芝レビュー. **63**, 7, 2008, p.48-51.



旭 保彰 ASAHI Yasuaki

社会インフラシステム社 小向工場 マイクロ波技術部主務。  
マイクロ波電力増幅器及び周波数変換器回路の設計・開発に従事。  
Komukai Operations



菅藤 和博 KANTO Kazuhiro

社会インフラシステム社 電波システム事業部 マイクロ波事業推進部参事。マイクロ波電力増幅器及び送受信モジュールの開発・設計に従事。電子情報通信学会会員。  
Defence & Electronic Systems Div.



増田 和俊 MASUDA Kazutoshi

社会インフラシステム社 小向工場 マイクロ波技術部主務。  
マイクロ波電力増幅器及び送受信モジュール回路の設計・開発に従事。  
Komukai Operations