

# X帯気象レーダ用 GaN 固体化電力増幅器

## GaN Solid State Power Amplifier for X-band Weather Radar Systems

旭 保彰 里見 明洋 菅藤 和博

■ ASAHI Yasuaki ■ SATOMI Akihiro ■ KANTO Kazuhiro

東芝は2006年11月に、衛星通信基地局やレーダなどで用いられるマイクロ波固体化電力増幅器向けの高周波及び高出力素子として、X帯(8~12 GHz)における出力50 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)<sup>(1)</sup>を開発した。今回、当社はこの50 W級GaN電力HEMTを低損失合成器で4合成し、9 GHz帯で出力電力200 Wの気象レーダ用固体化電力増幅器の開発に成功した。

クライストロンやマグネトロンを使った従来の電力増幅器に比べ、今回開発した固体化電力増幅器は小型で信頼性が高く、また、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 200 W (at 9 GHz) solid-state power amplifier (SSPA) for X-band (8-12 GHz) weather radar systems utilizing a 4-way combiner of new gallium nitride high electron mobility transistors (GaN HEMTs) of over 50 W.

Compared with conventional power amplifiers such as klystrons and magnetrons, the newly developed SSPA is smaller in volume, offers higher reliability, and allows the occupied frequency bandwidth to be narrower due to suppression of the spurious level.

### 1 まえがき

これまでX帯における出力100 W級の電力増幅器は、ガリウムヒ素(GaAs)電力FET(電界効果トランジスタ)を並列接続することで、固体化電力増幅器を実現できていた。一方、出力200 W級の電力増幅器は、並列接続するFET数の増加に伴う合成効率低下が支障となり、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きた。しかし、これらの真空管式増幅素子は、スプリアスや寿命の短さに問題があり、200 W以上の出力領域でも固体化電力増幅器の実現が望まれていた。

S帯(2~4 GHz)やC帯(4~8 GHz)までの比較的低い周波数では、すでにシリコントランジスタやGaAs FETによる固体化電力増幅器への置換えが始まっているが、更に高周波のX帯では高出力デバイスがなかったため、100 Wを超える固体化電力増幅器の実現が難しかった。

東芝は今回、X帯(8~12 GHz)50 W級窒化ガリウム(GaN)電力HEMT(High Electron Mobility Transistor:高電子移動度トランジスタ)を使用し、X帯200 W 固体化電力増幅器を開発した。この固体化電力増幅器は、GaN電力HEMTを低損失合成器で4合成することにより出力電力200 Wを実現している。

(注1) 発射電波に含まれる不要な周波数成分のこと。ほかの通信に妨害を与え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。

### 2 X帯気象レーダの概要

気象レーダでは主に5 GHz帯(C帯)と9 GHz帯(X帯)の電波が利用されている。C帯よりも高い周波数を使うX帯気象レーダは降雨により信号が減衰しやすいが、小型で設置が容易という利点がある。当社製X帯気象レーダの外観を図1



図1. X帯気象レーダ—マルチパラメータレーダ方式に対応した2系統の送受信装置を、ラック1本に収めている。

X-band weather radar system

に示す。水平と垂直の偏波面を持った2種類の電波を使用するマルチパラメータレーダ方式を採用し、雨滴からの反射信号から雨量や、風速、粒子種別など様々なパラメータを取得することができる。従来のクライストロン電力増幅器ではラックが1本必要である。

### 3 固体化電力増幅器の技術課題と解決方法

マイクロ波固体化電力増幅器の高出力化にはいくつかの技術課題がある。主なものとして、高出力電力増幅デバイスの実現、合成器の低損失化、アイソレータ<sup>(注2)</sup>の低損失化、及び放熱対策がある。これらの技術課題に対する開発施策を以下に述べる。

#### 3.1 50 W級 GaN 電力 HEMT

50 W 級 GaN 電力 HEMT を図2に示す。GaN 製 HEMT チップ二つが実装され、内部整合回路により入出力端子とも50 Ωに整合されている。

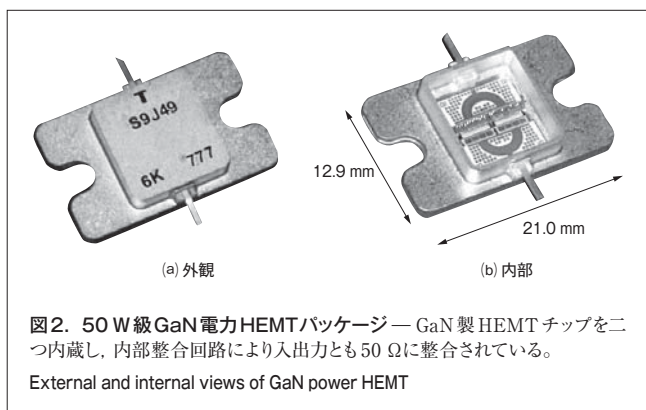


図2. 50 W 級 GaN 電力 HEMT パッケージー GaN 製 HEMT チップを二つ内蔵し、内部整合回路により入出力とも50 Ωに整合されている。  
External and internal views of GaN power HEMT

#### 3.2 合成器の低損失化

合成器の挿入損失は、出力電力向上のためできるだけ低く抑えなければならない。電磁界シミュレータを用いたシミュレーションで、合成器の挿入損失が最小となるように構造及び基板パターンを最適化した。損失の種類としては、誘電体損、導体損、及び放射損がある。放射損と誘電体損が低く抑えられるように、薄い誘電体基板を誘電損失のない空気層で挟んで、アルミニウムケースに入れて、放射損を低減する構造を採用した(図3)。

この合成器の試作評価を行った結果、9 GHz 帯において挿入損失0.4 dB (約10%)以下を得た(図4)。

#### 3.3 アイソレータの低損失化

アイソレータは、反射電力から GaN 電力 HEMT を保護するために使用する。当初選定したアイソレータでは、入力電力を増加させると数十 W 程度で挿入損失が増加する、非線形現象

(注2) 二つのポートを持ち、一方方向にだけ信号を伝えるマイクロ波部品。

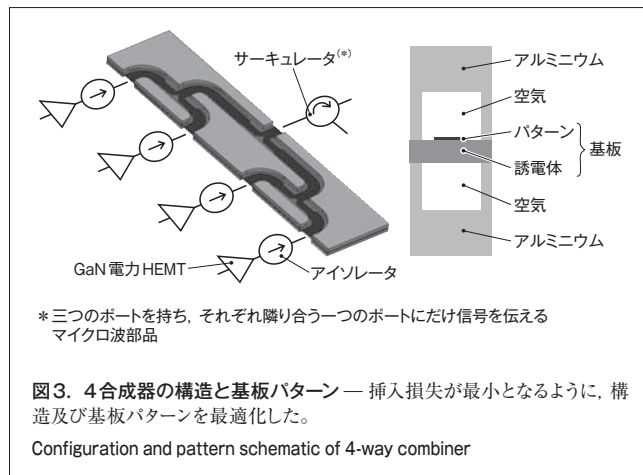


図3. 4 合成器の構造と基板パターンー 挿入損失が最小となるように、構造及び基板パターンを最適化した。

Configuration and pattern schematic of 4-way combiner

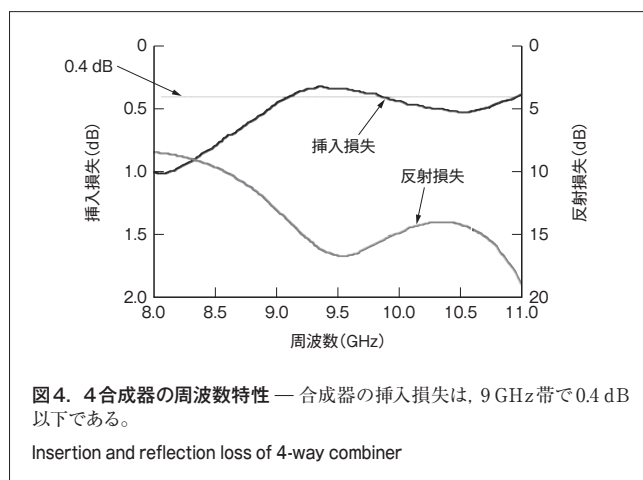


図4. 4 合成器の周波数特性ー 合成器の挿入損失は、9 GHz 帯で0.4 dB 以下である。

Insertion and reflection loss of 4-way combiner

象が発生した。これに対応するためアイソレータメーカーと協力し、非線形現象が発生しにくく、挿入損失が0.4 dB (約10%)以下と小さいアイソレータを開発した。

#### 3.4 放熱対策

GaN 電力 HEMT は、信頼性を確保するため、チャンネル温度200℃以下で使用する必要がある。GaN 電力 HEMT 1個当たりの発熱量は約11 W である。チャンネル温度が200℃以下となるように熱解析シミュレーションを行い、周囲温度が35℃において GaN 電力 HEMT パッケージの取付面温度が50℃以下となる、アルミニウム製ヒートシンクと空冷ファンによる放熱構造とした。

## 4 今回開発した X 帯 GaN 固体化電力増幅器

今回開発した GaN 固体化電力増幅器の外観を図5に示す。19 インチラックの高さ約180 mm のスペースに、横に2台並べて収納できるサイズである。GaN 固体化電力増幅器の内部写真を図6に示す。アルミニウム製ヒートシンクの上面にドライバ段アンプやファイナル段アンプなどの RF (Radio Frequency) 回路、下面に電源回路を配置し、裏面パネルの冷却ファンに



図5. GaN 固体化電力増幅器 — 横に2台並べて、19 インチラックの高さ約180 mm のスペースに収納できるサイズである。

X-band GaN SSPA

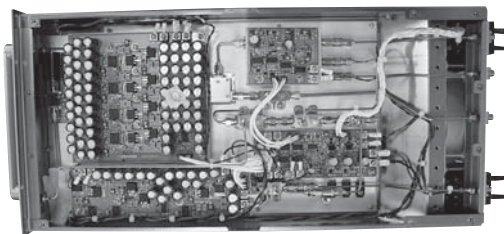


図6. GaN 固体化電力増幅器の内部 — ドライバ段アンプとファイナル段アンプの上面に、パルス駆動用ドライバ基板を配置している。

Internal view of X-band GaN SSPA



図7. ドライバ段アンプの内部 — GaN 電力 HEMT を2素子内蔵している。

Internal view of driver amplifier

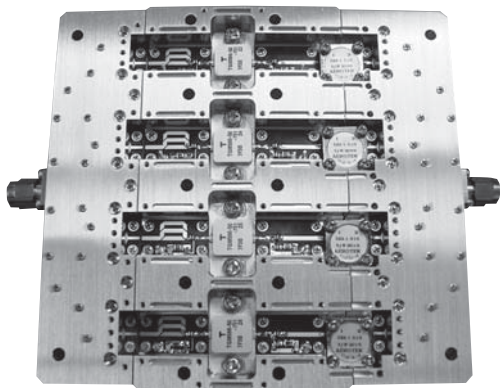


図8. ファイナル段アンプの内部 — 分配器, GaN 電力 HEMT (4素子), アイソレータ (4個), 及び合成器から構成されている。

Internal view of final-stage amplifier

よって放熱を行う。ドライバ段アンプとファイナル段アンプの上面にパルス駆動用ドライバ基板を配置し、消費電力及び発熱量低減のために、送信のときだけ電力増幅器を動作させて、受信時に停止するようにしている。

ドライバ段アンプとファイナル段アンプの内部をそれぞれ図7、図8に示す。ドライバ段アンプに50 W級 GaN 電力 HEMT を2個、ファイナル段アンプに4個使用している。

GaN 固体化電力増幅器の系統図を図9に示す。50 W 級 GaN 電力 HEMT の開発によってドライバ段アンプとファイナル段アンプの小型化が実現できたため、受信機能及び電源回路もケース内に入れる設計とした。

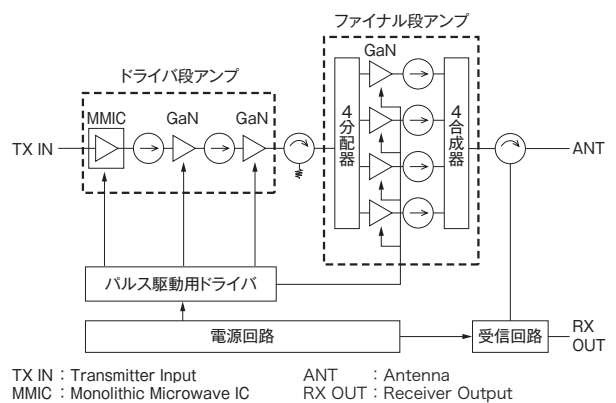


図9. GaN 固体化電力増幅器の系統図 — ドライバ段アンプ、ファイナル段アンプ及びパルス駆動用ドライバにより構成される。

Block diagram of X-band 200 W SSPA

## 5 X 帯 GaN 固体化電力増幅器の特性

GaN 電力 HEMT のドレイン印加電圧 25 V において、目標の出力電力 200 W を達成した (図10)。ドレイン電圧を更に上げ

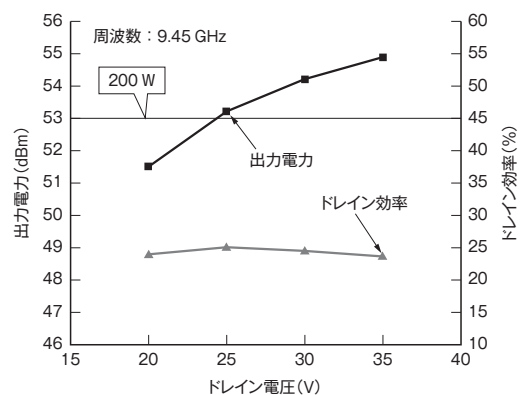


図10. GaN 固体化電力増幅器の出力電力 (ドレイン電圧依存性) — ドレイン電圧 25 V において、目標の 53 dBm (200 W) を達成した。

Output power and efficiency at 9.45 GHz of X-band 200 W SSPA

ると出力電力も増加するが、出力電力の増大に伴って、HEMTのチャネル温度も上昇する。GaN電力HEMTの信頼性を確保するため、チャネル温度が200℃以下となるようにGaN固体化電力増幅器の出力定格を200Wとしている。この固体化電力

増幅器の周波数特性を図11に示す。8.9～9.6GHzで200W以上を達成している。出力スペクトラム波形を図12に示す。クライストロンなどの真空管と比較すると、帯域の広がりや抑えられ、電波法スプリアス規格に適合している。最後に、今回開発したGaN固体化電力増幅器の特性を表1に示す。

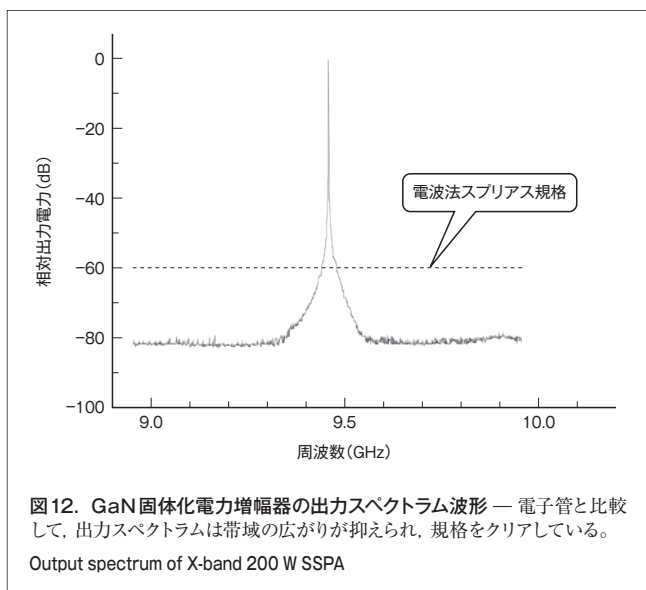
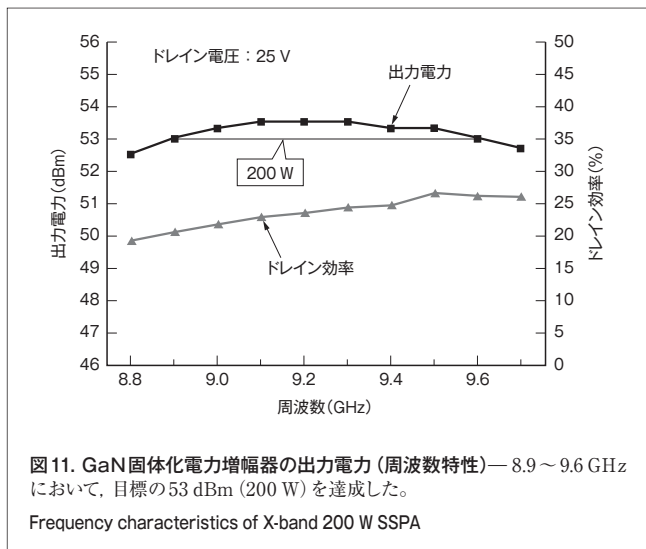


表1. 今回開発したGaN固体化電力増幅器の特性  
Performance of X-band 200 W SSPA

項目	特性
周波数	8.9～9.6 GHz
出力電力	200～224 W
パルス幅	32 μs
デューティ比	7%
電源電圧(直流)	48 V
消費電力	129 W
サイズ	164(高さ)×214(幅)×452(奥行き) mm

## 6 あとがき

8.9～9.6GHz帯において、出力電力200WのX帯GaN固体化電力増幅器を開発した。今回GaN電力HEMTを使用した固体化電力増幅器は、小型化の実現により19インチのユニットシャーシに2台収納することができ、受信機能も内蔵している。GaN固体化電力増幅器は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により、電波を有効利用できる。

今後、今回の成果を基に、より高い周波数領域での電力増幅器の高出力化を進め、より小型のGaN固体化電力増幅器の実現を目指していく。

## 文献

- (1) 高木一考, ほか. X帯50W級GaN電力HEMT. 東芝レビュー. 62, 4, 2007, p.42-45.



旭 保彰 ASAHI Yasuaki

社会システム社 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の回路設計・開発に従事。  
Komukai Operations



里見 明洋 SATOMI Akihiro

社会システム社 小向工場 マイクロ波技術部。  
マイクロ波電力増幅器及び送受信モジュールの回路設計・開発に従事。  
Komukai Operations



菅藤 和博 KANTO Kazuhiro

社会システム社 小向工場 マイクロ波技術部参事。  
マイクロ波電力増幅器及び送受信モジュールの回路設計・開発に従事。電気情報通信学会会員。  
Komukai Operations