

# 電波資源を有効に利用する5 GHz帯固体化気象レーダ

## 5 GHz Solid-State Weather Radar Contributing to Efficient Use of Radio Wave Resources

和田 将一      武藤 隆一      堀込 淳一

■ WADA Masakazu      ■ MUTO Ryuichi      ■ HORIKOMI Junichi

局地的集中豪雨に対する危機感が増しているなか、広域の降雨状況を速やかに観測できる気象レーダの重要性は増すばかりである。一方、無線通信機器の急激な拡大の影響を受け、気象レーダは使用する電波の周波数幅を狭くしていくことが求められている。

東芝は、世界最先端の半導体技術と高度な信号処理技術により、観測性能を劣化させることなく電波の利用効率を高めることのできる5 GHz帯固体化(半導体型)気象レーダを開発した。従来と同等の観測性能を維持しながら、半導体素子を用いることで周波数割当て間隔を1/4に狭めており、限られた電波資源を有効に利用する、いわば“電波環境調和型製品”である。

To prevent disasters caused by local heavy rainfall, speedy observation of rainfall over a wide area is becoming essential for weather forecasts. However, due to the limited availability of bandwidth with the rapidly increasing use of radio wave frequency resources, weather radar must make more effective use of the narrow bandwidth of radio frequencies available for radar systems.

Toshiba has developed a 5 GHz solid-state weather radar in which efficient use of radio frequencies has been achieved by adopting our state-of-the-art microwave transistor and advanced signal processing technology without degrading the conventional level of observation capability. The new radar allows the frequency separation required for interference suppression to be reduced to one-quarter, contributing to the efficient use of limited radio wave resources and meeting our goal of maximizing the eco-efficiency of products and systems.

### 1 まえがき

近年、携帯電話の情報端末化の進展や、無線LANの大容量化などに伴い、電波利用の需要が年々増加している。電波を利用する機器には使用を許可された周波数がそれぞれ割り当てられているが、一部の周波数帯域では割り当てられる周波数が枯渇しているのが現状である。電波の周波数は限られた資源であるとの認識が世界的に広まっており、電波を使用する機器に対しては限られた資源を有効に活用し、不要な電波を放射しないことが求められている。

わが国では、無線LANと気象レーダへの割当て周波数が近接しており、これらを両立していくことが急務の課題となっている。無線LANと気象レーダを両立させるための有効な手段として、気象レーダの周波数帯域を狭くすることが考えられる。しかし、地球温暖化や都市機能の集中で生じるヒートアイランド現象などにより局地的な集中豪雨の危険が増すなか、広域の降雨状況を速やかに観測できる気象レーダの重要性は増すばかりであり<sup>1)</sup>、その業務の質や量の低下を招くことは許容されるものではない。

そこで東芝は、世界最先端の半導体技術と高度な信号処理技術により、従来と同等の観測性能を維持したまま周波数割当て間隔を1/4に狭めることのできる、5 GHz帯固体化気象レーダを開発した。

ここでは、5 GHz帯固体化気象レーダの概要、送信電波の周波数特性、及び降雨観測性能の評価結果について述べる。

### 2 5 GHz帯固体化気象レーダの概要

#### 2.1 性能

5 GHz帯固体化気象レーダの外観を図1に示す。特長は、送信装置を高さ1.8 mの19インチラックで実現し、当社製のクライストロン送信装置に比べて1/2以下の小型化を図ったことである。送信装置は水平偏波用の1台だけでも動作し、図1のように垂直偏波用を含む2台構成としても動作する。水平・垂直の二つの偏波による情報は、降水粒子(雨、雪、あられ)



図1. 5 GHz帯固体化気象レーダー 従来に比べて1/2に小型化されている。  
5 GHz solid-state weather radar system

の識別や降雨観測精度の向上のために用いることができる<sup>(2)</sup>。

更に、従来は複数のラックで実現していたアンテナ制御、周波数変換、リアルタイム信号処理、監視制御、及びデータ表示など、様々な機能をレーダ処理装置という一つのラックで実現しており、送信装置と同様に、従来の製品に比べて1/2以下の小型化を実現している。5 GHz帯固体化気象レーダの主な仕様を表1に示す。

項目	仕様
送信出力	3.5 kW以上 (水平偏波) 3.5 kW以上 (垂直偏波)
デューティ比	20%以下
最小受信電力	-107 ~ -114 dBm (可変)
空中線利得	42 dB以上
ビーム幅	1.2°以下
送信パルス幅	1~350 μs (可変)
生成データ	レーダ反射因子 : Z (dBZ) ドップラー速度 : V (m/s) 速度幅 : W (m/s) 差分レーダ反射因子 : Z <sub>DR</sub> (dB) 交差偏波比 : LDR (dB) 偏波間位相差 : Φ <sub>DP</sub> (°) 比偏波間位相差 : K <sub>DP</sub> (°/km) 偏波間相関係数 : ρ <sub>HV</sub> 降雨強度 : R (mm/h)

## 2.2 送信装置の固体化

従来の気象レーダでは、送信波の電力を増幅するためにマグネトロンやクライストロンなどの電子管を用いている。電子管を用いた気象レーダは、ピーク送信電力が250 kW程度と非常に大きいですが、送信パルス幅は1~2.5 μs程度と極めて短い時間の送信しか行えない。

これに対し5 GHz帯固体化気象レーダは、電子管を用いた気象レーダに比べて、ピーク送信電力は3.5 kWと小さくなっているものの約100倍の長さのパルスを送信できるため、従来と同等以上の送信エネルギーを確保している。また、送信パルス幅の伸長に伴う距離分解能への影響については、送信波に周波数変調を加えて、受信後にパルス圧縮処理を施すことにより<sup>(3)</sup>、従来と同程度の距離分解能を確保することに成功している。実運用機と同等の性能を持つ5 GHz帯気象レーダの固体化は世界初<sup>(注1)</sup>となる。

なお、一般にレーダは送信中は受信できないことから、長いパルスを送信すると近距離の観測ができなくなる。そこで、5 GHz帯固体化気象レーダでは、大きな送信電力を必要としない近距離観測用に従来と同程度の1~2.5 μsの短いパルスを併用し、長いパルスと交互に送信をすることで、近距離から遠距離まで抜けのない観測を実現している。

(注1) 2008年4月時点、当社調べ。5.3 GHzで出力電力3.5 kW以上の固体化送信装置により実現される降雨観測を目的としたレーダとして。

## 2.3 固体化による不要波の抑圧

5 GHz帯固体化気象レーダは、観測に必要な周波数範囲を狭くし、周波数割当て間隔を1/4に狭めることを目指している。従来の気象レーダは10 MHz間隔で無線周波数が割り当てられており、10 MHz離れた周波数では中心周波数に比べて60 dB程度弱いエネルギーとなっていなければならなかった。

そこで、5 GHz帯固体化気象レーダでは、2.5 MHz離れた周波数の送信エネルギーを中心周波数よりも60 dB以上弱くすることを目標としている。そのための送信波形の形状は計算機シミュレーションなどにより理論的に求めることができるので、不要波低減のための課題は、理論どおりの送信波にいかにして送信装置から出力するかということになる。

電子管は、送信のピーク電力は高いものの、送信波をきめ細かく制御することが困難で、理論どおりの送信波を実現できず、不要な周波数帯の電波が多く含まれるという問題があった。

入出力特性の直線性と安定性が高く、波形制御に適した電力増幅デバイスとしては半導体素子があるが、従来の半導体素子は出力が小さく電子管の代替には不向きであった。しかし、半導体素子の性能は年々向上しており、近年では、S帯(2~4 GHz)の航空監視レーダ装置(ASR: Airport Surveillance Radar)において、電子管を半導体素子に置き換えた固体化レーダが実用化されている。

今回開発したガリウムヒ素を材料とする電力FET(Field Effect Transistor)の外観を図2に示す<sup>(4)</sup>。

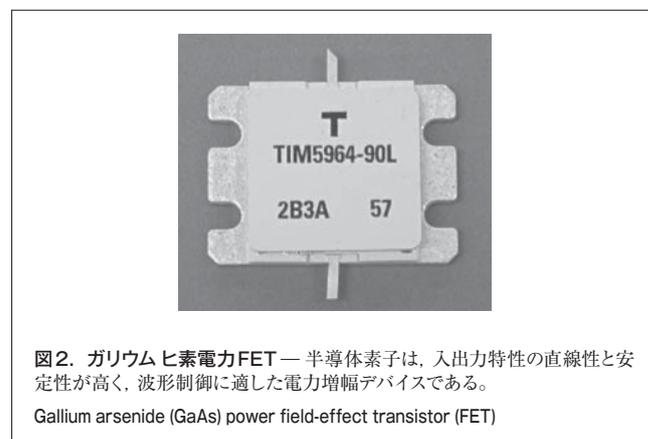


図2. ガリウムヒ素電力FET—半導体素子は、入出力特性の直線性と安定性が高く、波形制御に適した電力増幅デバイスである。  
Gallium arsenide (GaAs) power field-effect transistor (FET)

## 2.4 固体化出力増幅モジュール

レーダの運用に必要な電力を考えると、半導体素子一つの出力量では十分ではなく、一般的に複数の半導体素子を合成して増幅モジュールを製作する。今回開発した5 GHz帯出力増幅モジュール(図3)は、最終段で八つの半導体素子を合成することにより500 Wを超える出力を得ることができる<sup>(5)</sup>。5 GHz帯固体化気象レーダは、このモジュールを8個合成することで、水平・垂直偏波ともに3.5 kW以上の送信電力を達成している。



図3. 5 GHz帯出力増幅モジュール — 半導体素子を合成して500 W以上の出力電力を実現している。  
5 GHz power amplifier

電子管は半年から2年程度で交換が必要な消耗品であり、交換時に観測が停止したり、ランニングコストが高くなるなどのデメリットがある。これに対し、半導体素子は寿命が非常に長いため、電子管に比べてランニングコストの低減が期待できる。更に、8個のモジュールを合成していることから、一つのモジュールが故障しても、送信電力は低下するものの観測を継続することができ、システムの安定運用にとっても有効と言える。

### 3 5 GHz帯固体化気象レーダの性能

#### 3.1 送信電波の周波数特性

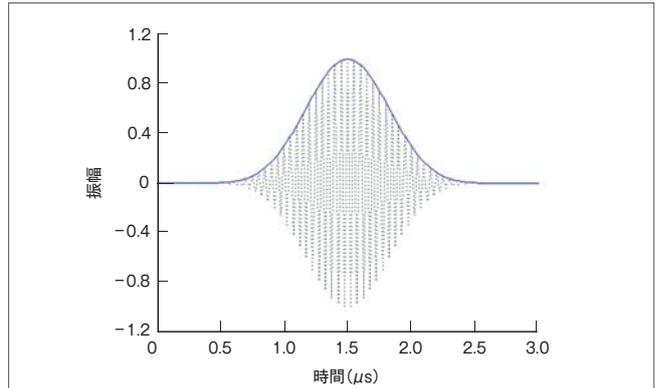
5 GHz帯固体化気象レーダは、2章で述べた半導体素子の使用で、入出力特性の直線性が高く、従来よりもきめ細かい波形制御が可能である。

一般に、パルス幅が短いほど周波数帯域は広がるが、もっとも悪い例としてパルス幅1  $\mu\text{s}$ において、シミュレーションで求めた理論送信波形と実際に送信装置から出力された送信波形を図4に示す。送信波をきめ細かく制御することで、図4(b)では理論波形(a)に比べて多少のひずみは見られるが、理論に近い送信波形を実現していることがわかる。

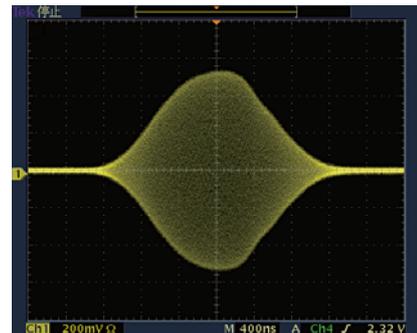
前述したように、実際の運用では、パルス幅1～2.5  $\mu\text{s}$ の短いパルスと数百 $\mu\text{s}$ の長パルスの送信を交互に行うことになるが、これらが混合された送信スペクトルを図5に示す。2.5 MHz離れた周波数のレベルは中心周波数から62.17 dB低くなっており、従来のレーダにおいて10 MHz離れた周波数で実現していた不要な電波の抑圧を、2.5 MHz離れた周波数で実現できている。

5 GHz帯固体化気象レーダは、中心周波数近傍の周波数しか放射しないことから、従来に比べて周波数の割当て間隔を狭めることができ、需要が増大している無線LANに空いた周波数を割り当てられるようになる。

なお、短パルスだけの送信時には特性がある程度悪化するが、送信用のフィルタを組み合わせることで60 dB以上の抑圧ができることを確認している。



(a) 理論波形



(b) 送信装置からの出力波形

図4. 送信波形 (パルス幅: 1  $\mu\text{s}$ ) — 送信波形のきめ細かい制御により狭帯域を実現する。

ransmission waveforms (pulse width: 1  $\mu\text{s}$ )

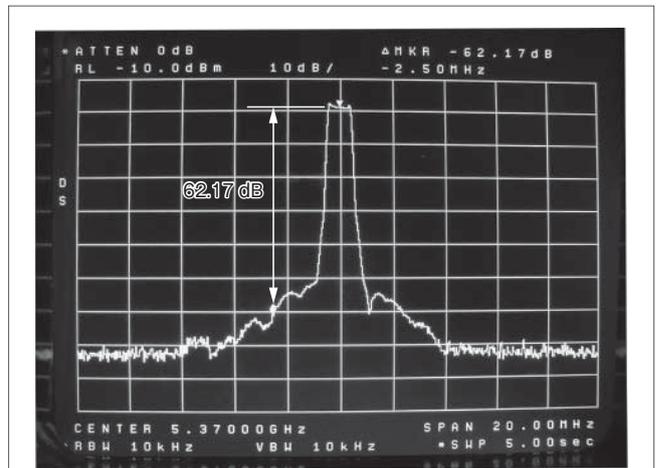
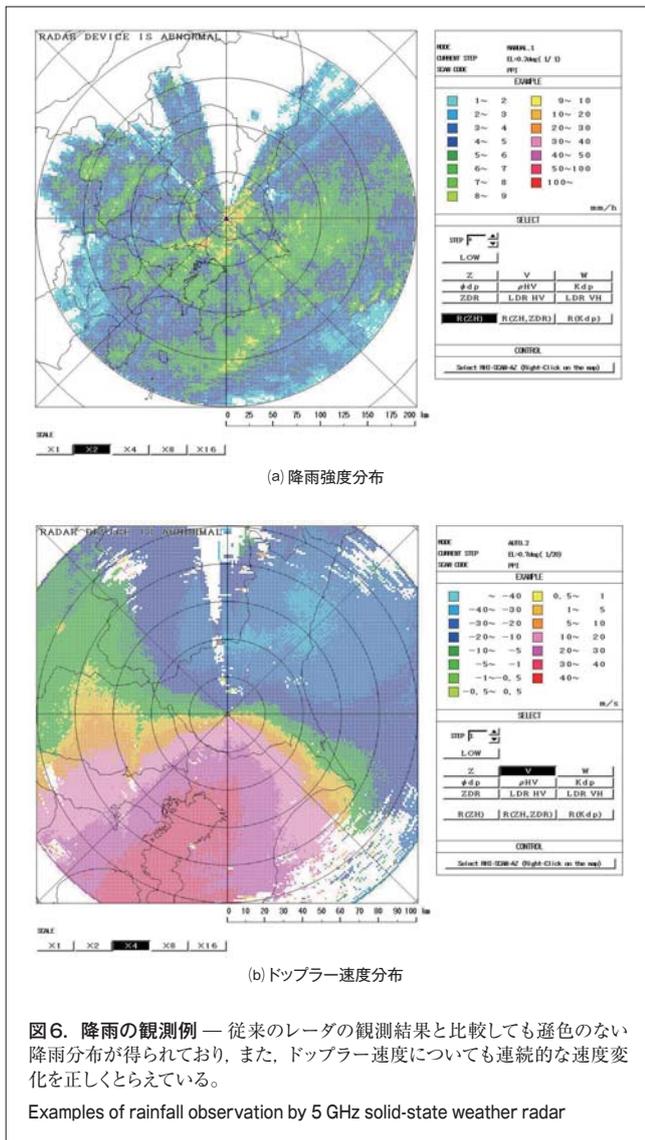


図5. 送信スペクトル (短パルスと長パルスの混合) — 中心周波数から2.5 MHz離れた周波数で60 dB以上の減衰を実現している。

Spectrum of transmission wave (mixture of short pulse and long pulse)

#### 3.2 降雨観測結果

5 GHz帯固体化気象レーダは、必要とする周波数の割当て間隔を狭めると同時に、従来と同等の観測ができることを目指している。降雨強度分布とドップラー速度分布の観測結果の



一例を図6に示す。これは比較的強い降雨の分布であるが、従来のレーダの観測結果と比較しても遜色（そんしょく）のない降雨分布が得られている。また、ドップラー速度についても連続的な速度変化を正しくとらえていることがわかる。

現在運用されている気象レーダと5 GHz帯固体化気象レーダの観測結果を定量的に比較したところ、相関係数が0.84という値が得られた。設置場所が異なり高度や時間に差が生じることを考えると、観測データは十分に高い相関が得られていると考えられる。ここで、図6の北方向にある欠落エリアは山による電波の遮へいを表しており、レーダの観測性能に起因する問題ではない。

今回の観測においては、レーダサイト周辺に強い降雨があるケースで十分な性能が確認されたが、あらゆる気象条件において従来と同等以上の性能を実現するために、今後更に評価と改善を進めていく。

#### 4 あとがき

半導体素子により送信波を増幅する5 GHz帯固体化気象レーダを開発した。このレーダは、従来と同等の観測性能を維持したまま、周波数割当て間隔を1/4に狭めることができる。

有害物質などを含まない自然環境に配慮した環境調和型製品が次々と製品化されているなか、5 GHz帯固体化気象レーダは、環境有害物質の低減はもちろん、特に電波環境に配慮した電波環境調和型製品となっている。

今後は、更なる評価と改善を進め、枯渇する電波資源を有効に活用する“電波環境トップランナー”として、世界の先駆けとなる5 GHz帯固体化気象レーダの普及に努めていきたい。

#### 謝辞

この研究は、総務省の委託研究「電波資源拡大のための研究開発」の一環として実施された。総務省並びに開発に対して有益な助言をいただいた「レーダーの狭帯域化技術の研究開発運営委員会」の委員各位に深く感謝の意を表します。

#### 文献

- 石澤 寛, ほか. 那覇空港気象ドップラーレーダ. 東芝レビュー. 59, 6, 2004, p.44 - 47.
- Bringi, V.N., et al. Polarimetric Doppler Weather Radar. United Kingdom, Cambridge University Press, 2001, 636p.
- 吉田 孝. 改訂レーダ技術. 東京, 電子情報通信学会, 1996, 307p.
- 木村英樹, ほか. C帯90 W電力FET. 東芝レビュー. 60, 6, 2005, p.48 - 51.
- 菅藤和博, ほか. A C-Band 500 W Solid-State Power Amplifier using 90 W GaAs FETs. 信学技報. 107, 2, 2007, p.85 - 90.



和田 将一 WADA Masakazu

社会システム社 小向工場 レーダ・センサ技術部参事。  
気象防災システムのエンジニアリング業務に従事。  
Komukai Operations



武藤 隆一 MUTO Ryuichi

社会システム社 小向工場 レーダ・センサ技術部経営変革エキスパート。気象防災システムの開発設計に従事。  
Komukai Operations



堀込 淳一 HORIKOMI Junichi

社会システム社 小向工場 レーダ・センサ技術部。  
気象防災システムの開発設計に従事。  
Komukai Operations