

# 衛星通信地球局用Ka帯 8W GaN HEMT MMIC

松塚隆之\* 中島宣雄\*\*  
金谷 康\* 小山英寿\*  
一戸洋暁\*

*Ka-band 8W GaN HEMT MMIC for Satellite-communication Earth Stations*

*Takayuki Matsuzuka, Ko Kanaya, Hiroaki Ichinohe, Nobuo Nakajima, Hidetoshi Koyama*

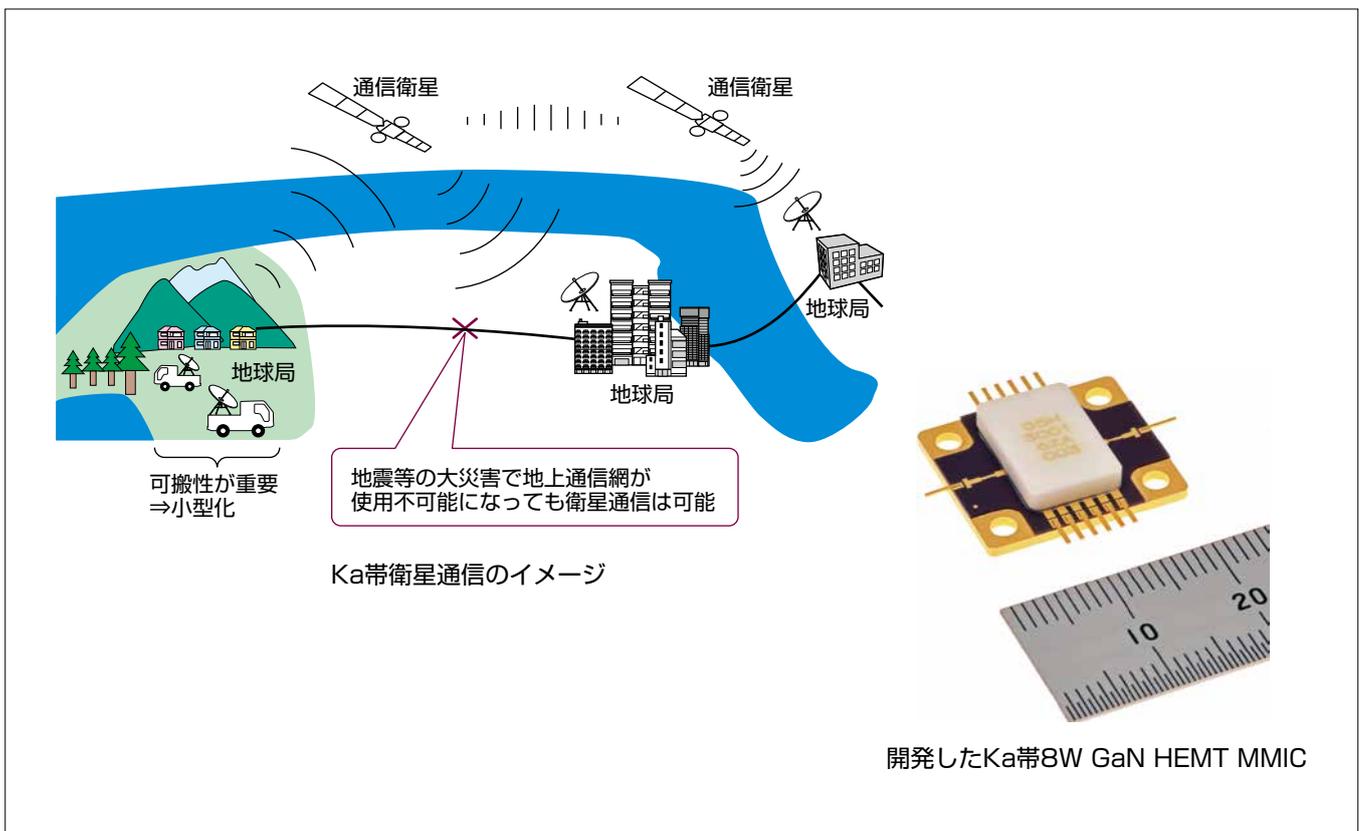
## 要 旨

Ka帯衛星通信地球局用送信機の小型化のために、電力増幅器には高出力化が求められてきた。その要求に応えるために、高出力高周波半導体素子の新製品として、8Wの出力電力を持つGaN(窒化ガリウム) HEMT(High Electron Mobility Transistor) MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)を開発した。

従来のGaAs(ヒ化ガリウム)に代わり、高絶縁破壊耐圧を持つ材料であるGaNを採用し、半導体チップ構造を高周波帯用に最適化することで、Ka帯で高電圧動作化、高電力密度化を図り、小型で高出力なMMICチップを実現

した。また、GaN HEMTを多段構成としたときの問題点であった歪(ひずみ)特性の悪化を抑制するために、三菱電機のKu帯GaN HEMT MMIC製品<sup>(1)</sup>で実績のある並列ダイオード型リニアライザをMMICチップ上に装荷することで歪特性の向上を図り、3次相互変調歪が-25dBcを満足する時の出力電力(線形出力電力)は、29GHzで33dBm/トーンを実現した。

高出力電力品の実現によって、電力増幅器を構成する合成部品点数の削減が可能になり、衛星通信地球局の電力増幅器の小型化に寄与する。



## Ka帯衛星通信のイメージとKa帯衛星通信地球局に用いられるKa帯8W GaN HEMT MMIC

衛星通信としてはL、S、Ku帯等の周波数を用いたサービスが提供されているが、高速大容量通信へのニーズの高まりから既存周波数が逼迫(ひっばく)しつつあり、Ka帯を利用した衛星通信が検討されている。三菱電機では、衛星通信地球局用送信機の小型化に貢献するため、電力増幅器の最終段に用いられるKa帯8W GaN HEMT MMIC“MGFG5H3001”を開発した。

## 1. ま え が き

現在の衛星通信ではC帯やKu帯の周波数が主流である。しかし近年の通信容量の急激な増大に伴う周波数の逼迫懸念から、今後はKa帯の利用が進むと予測されている。Ka帯衛星通信地球局用送信機で、比較的出力の小さなものでは現在の主流であるGaAsからGaNへの置き換えによる高出力化が期待されている。比較的出力が大きなものではTWTA(Travelling Wave Tube Amplifier)が主流であるが、GaNへの置き換えによって送信機の小型化と信頼性向上に寄与できる。しかし、GaN特有の、いわゆるソフトコンプレッションに起因する歪特性が低下する問題などによって、GaNへの置き換えが進んでいなかった。

本稿では、歪特性を補償するためにリニアライザを搭載したKa帯GaN MMICの開発成果について述べる。GaNを採用することで従来のGaAsよりも高いドレイン電圧で動作させることができ、飽和出力8Wを達成した。また、リニアライザで歪特性を補償することで、3次相互変調歪が-25dBcを満足する時の出力電力は29GHzで33dBm/トーンを達成した。これらによってKa帯衛星通信地球局用送信機の小型化に貢献できる。

## 2. リニアライザによる低歪化

### 2.1 リニアライザ内蔵の目的

衛星通信用増幅器に要求される性能には、飽和出力電力のほかに線形出力電力と称する歪特性がある。線形出力電力とは、主信号と3次相互変調信号との比である3次相互変調歪IM3(3rd Order Intermodulation Distortion)がある値(例えば-25dBc)となる出力電力である。一般に、増幅器を高出力化させれば線形出力電力も向上する。しかし、高出力化に伴い増幅器のサイズやコストも増大する問題がある。Ka帯では一定の利得を確保するためにゲート幅が小さなHEMT、すなわち飽和出力電力が低いHEMTを使用するため、高出力化は容易ではない。高出力化の一手法としてGaNの適用があるが、GaNは入力電力が低い段階から利得が低下し始めるソフトコンプレッション現象を持っており、高出力化しても線形出力電力は向上しにくい。そこで今回、Ka帯で増幅器とは逆の歪特性を持つリニアライザをGaN HEMT MMICチップに内蔵し、増幅器の歪特性を補償することで、高出力化によるサイズ・コストの増大を抑制しつつ、低歪特性を持つMMICの実現を目的とする。

### 2.2 Ka帯リニアライザの動作原理

増幅器のAM-AM(Amplitude-Amplitude)特性、AM-PM(Amplitude-Phase)特性と逆のAM-AM特性、AM-PM特性を持つリニアライザを増幅器に接続することで、AM-AM特性、AM-PM特性が相殺され、MMIC全体で

平坦(へいたん)なAM-AM特性、AM-PM特性が得られ、IM3を低減できる。

このMMICには小型化に有利な並列ダイオード型リニアライザを採用した。通常の並列ダイオード型リニアライザはダイオードの可変抵抗成分を利用してAM-AM特性を補償し、ダイオードの容量成分は無視する。このMMICはKa帯という高周波での動作ゆえにダイオードの容量成分を無視できない。このため、このリニアライザはダイオードの容量成分をAM-AM特性の補償に利用する構成にした。図1にダイオード容量のアノード電圧依存性、図2にリニアライザのAM-AM特性を示す。HEMTプロセスでのダイオードの容量成分は図1のようにアノード電圧に対して非線形に変化する。図1の①の領域では容量値が大きくダイオードのインピーダンスは小さい。これは図2の①小信号動作領域に対応しており、小信号動作時はリニアライザの通過損失が大きくなる。一方、入力電力振幅が図1②の領域に入ってくると、入力電力増加に伴い容量値が低くなり、ダイオードのインピーダンスが大きくなるため、図2の②での大信号動作時はリニアライザの通過損失は小さくなる。これらによって、リニアライザのAM-AM特性は図2に示すように入力電力に従い損失が低減する特性となり、増幅器のAM-AM特性と逆の特性が得られる。

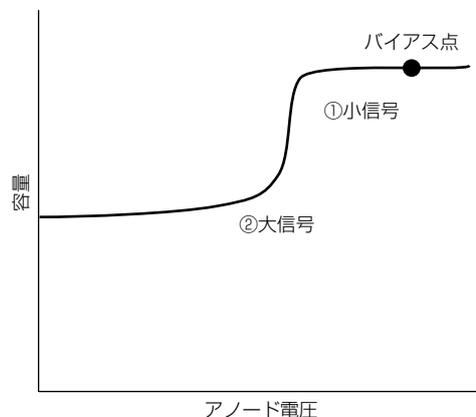


図1. ダイオード容量のアノード電圧依存性

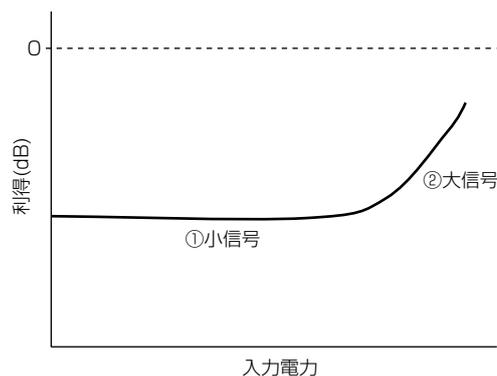


図2. リニアライザのAM-AM特性

### 3. 開発成果

#### 3.1 MMICの概要

図3に開発したMMICの構成を示す。3段増幅器の前段に先に述べたリニアライザを配置した。リニアライザの前段に配置したバッファ増幅器の役割は、リニアライザによる通過損失の増大を補償することと、リニアライザへの入力電力を適切な電力レベルまで増幅することによってリニアライザのAM-AM特性、AM-PM特性と後段の3段増幅器のAM-AM特性、AM-PM特性を互いに逆特性となるように設定することである。これによって、歪特性を補償することができる。

開発したMMICチップの外観を図4に示す。開発したMMICチップはGaN HEMTプロセスで製作した。チップサイズは3.6×3.1(mm)である。先に述べたとおり、システムの通信性能に大きな影響を与える歪特性を改善するため、並列ダイオード型リニアライザを搭載している。リニアライザの後段は3段増幅器構成とし、最終段のトランジ

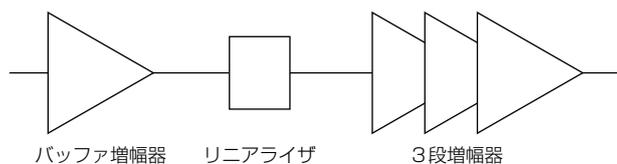


図3. MMICの構成

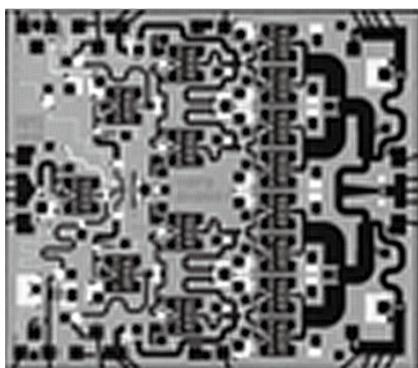


図4. 開発したMMICチップ

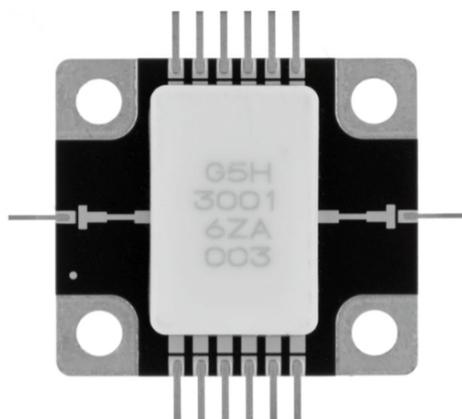


図5. パッケージ実装状態のMMIC

スタのゲート幅は4.8mmである。パッケージ実装状態のMMICを図5に示す。パッケージは熱伝導に優れた銅を主原料とするベース材の上に、高周波及び直流信号を伝送するためのセラミック基板を配置している。MMICチップ保護とKa帯での性能確保のために中空構造の封止方式を採用した。また従来の高出力半導体製品でよく用いられていた気密パッケージはコストが高いため、より安価な構造を目指して非気密のパッケージを開発し、図5に示すようなセラミック製キャップを樹脂でセラミック基板に固定する構造にした。

#### 3.2 MMICの特性

開発したMMICのバイアス条件は、ドレイン電圧24V、アイドル状態でのドレイン電流2.1Aである。リニアライザを構成するダイオードのバイアス条件は、線形出力電力が最大となるよう-1Vに設定した。

##### 3.2.1 小信号特性

開発したMMICの小信号Sパラメータの測定結果を図6に示す。動作帯域の中心周波数29GHzで、利得17dB、入力反射損失11dB、出力反射損失12dBの特性が得られた。

##### 3.2.2 入出力特性, 歪特性

開発したMMICの入出力特性を図7に示す。帯域の中

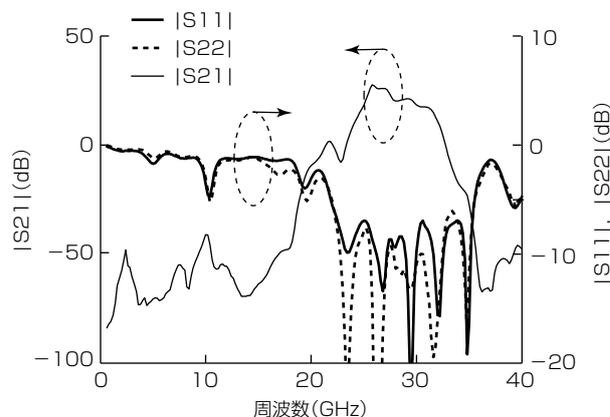


図6. 小信号Sパラメータの測定結果

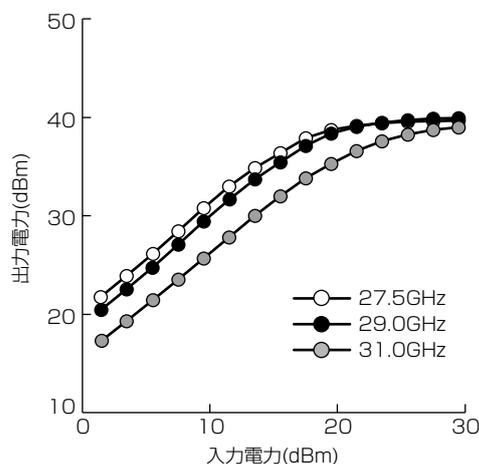


図7. 入出力特性

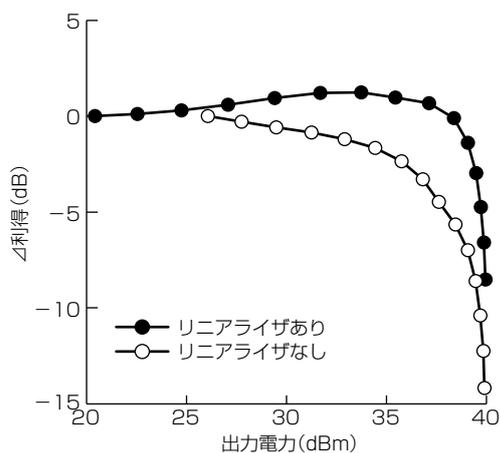


図8. AM-AM特性の測定結果

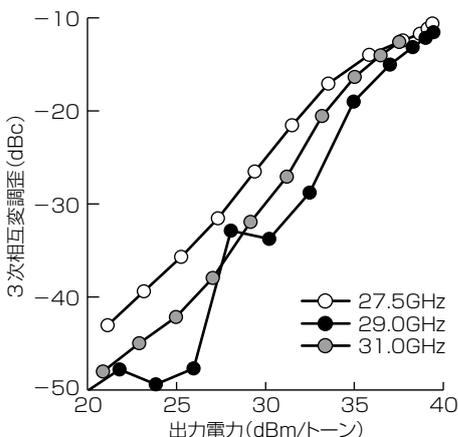


図9. 3次相互変調歪の測定結果

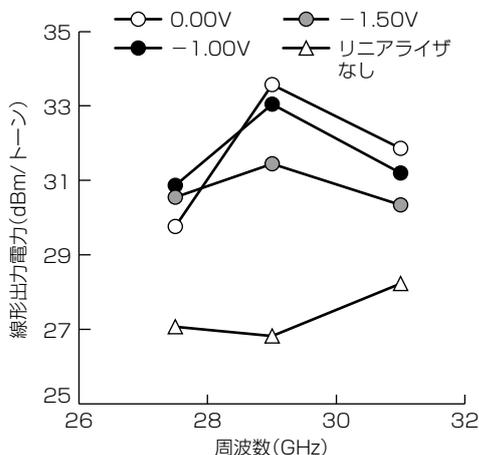


図10. 線形出力電力のリニアライザバイアス電圧依存性

心周波数29GHzで飽和出力39dBmが得られた。

図8にMMICのAM-AM特性の測定結果を示す。リニアライザがない場合はGaN特有のソフトコンプレッションが顕著に現れているが、リニアライザを搭載したMMICではリニアライザで増幅器のAM-AM特性を補償することによって、設計の狙いどおり平坦なAM-AM特性が得られ

表1. 衛星通信用Ka帯8WクラスのGaN MMIC製品の特性比較

	周波数 (GHz)	飽和出力 (dBm)	線形出力電力 (dBm/トーン)
参考文献(2)	28.0~31.0	40.0~40.4	28.5~31.0
開発製品MGFG5H3001	27.5~31.0	39.0~40.0	31.0~33.0

ていることが分かる。図9に通信用増幅器として重要な歪性能指標である3次相互変調歪を測定した結果を示す。3次相互変調歪が-25dBcとなる出力電力(線形出力電力)は29GHzで33dBm/トーンを達成した。

図10にリニアライザのバイアス電圧による線形出力電力の変化を示す。リニアライザなしの場合と比較して、リニアライザを搭載したMMICは、27.5~31.0GHzの動作帯域内全域で線形出力電力が改善されていることを確認できた。また、リニアライザを動作させない場合と比較して29GHzでは線形出力電力を6dB改善できた。

表1にKa帯8WクラスのGaN MMIC製品の特性比較を示す。重要な歪特性の指標である線形出力電力は、周波数27.5~31.0GHzで31.0~33.0dBm/トーンと世界トップレベルを達成した(注1)。

(注1) 2018年11月13日現在、当社調べ

#### 4. むすび

高い線形出力電力を持つKa帯衛星通信地球局用MMICを開発した。GaNを採用することで、従来のGaAsよりも高いドレイン電圧で動作させることができ、飽和出力電力8Wを達成した。また、システムの通信性能に大きな影響を与える歪特性を改善するために、小型化に有利な並列ダイオード型リニアライザを搭載した。開発したMMICはリニアライザが増幅器のAM-AM特性、AM-PM特性を補償することでMMIC全体としての平坦なAM-AM特性が得られていることを確認した。リニアライザを搭載したMMICは、29GHzで、リニアライザなしの場合と比較して線形出力電力が6dB改善し、33dBm/トーンを達成した。これらによってKa帯衛星通信地球局用送信機の小型化に貢献できる。

なお、今回開発した製品は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)のイノベーション実用化助成事業の成果の一部を活用している。

#### 参考文献

- (1) 金谷 康, ほか: リニアライザ内蔵Ku帯GaN HEMT MMIC, 三菱電機技報, **89**, No.5, 267~270 (2015)
- (2) Campbell, C. F., et al.: High Efficiency Ka-Band Gallium Nitride Power Amplifier MMICs, IEEE COMCAS (2013)