

1. ま え が き

大規模災害時の通信確保や地上通信網の整備が地理的に難しい地域での通信手段として、Ku帯(12.4~18GHzの周波数の総称)衛星通信が注目されている。衛星通信市場では送信機の小型化や高出力化が要求されており、送信機の最終段では従来のGaAsを用いた内部整合FETから、高出力化に有利なGaNを用いた内部整合HEMTへ置き換わりつつある。最終段の高出力化に伴い、ドライバ段にも高出力化が求められておりGaNの適用が期待されている。しかし、GaN特有のソフトコンプレッションに起因する歪特性の低下問題があるため、GaNへの置き換えは進んでいなかった。特に、多段構成となるドライバ段はソフトコンプレッションが段数に比例して大きくなるため、GaNの適用が難しかった。

今回、高出力化・小型化の要求に応えるため、最終段及びドライバ段を全てGaNで構成したMMICアンプを開発した。また、振幅歪や位相歪がアンプと逆特性を持つリニアライザとバッファアンプをMMICに集積し、歪特性の改善を図った。これによって、従来、複数のGaAs内部整合FETで構成されていた送信機を1つのGaN MMICで置き換えることが可能となった。

本稿では、リニアライザを内蔵したKu帯GaN HEMT MMIC“MGFG5H1503”の開発について詳細を述べる。CW(Continuous Wave)動作で、飽和出力は43dBm(20W)、利得は23dBと、高出力・高利得な特性が得られた。また、今回開発したリニアライザによって、衛星通信で重要なパラメータである線形出力が41dBm(12.6W)と、リニアライザなしでのMMICと比較して約4dB改善した。GaNプロセスを用いた高出力MMICとしては世界最高の線形出力を持つデバイスを実現した。また、このMMICを用いることで、MMICの後段に接続される内部整合HEMTと動作電圧を24Vで統一できるため、電源の小型化・低コスト化にも有効である。これらによって、Ku帯衛星通信用送信機の高性能化・小型化・低コスト化に貢献することができる。

2. MMICの設計

この開発の目的はMMICの高出力・高利得化・低歪化であるため、目標飽和出力は43dBm(20W)、目標利得は20dB、目標線形出力は40dBm(10W)とした。帯域はKu帯衛星通信で用いられる13.75~14.5GHzとした。MMICは図1のように、3段アンプの前段にバッファアンプとリニアライザを設置した。次に、3段アンプ及びリニアライザの設計について述べる。

2.1 3段アンプ部の設計

MMICに適用するHEMTセルのゲート幅は14GHz帯でも十分な利得を持つ1.2mmとした。使用するHEMTセル

の出力電力密度は14GHz帯で3.0W/mmである。最終段のゲート幅は1.2mmセルの8合成である9.6mmとした。出力回路の合成損失、パッケージ損失、自己発熱による出力低下を考慮しても十分なマージンがある。目標利得を達成するために、アンプは3段構成とした。ドライバ段については、歪が低い線形領域で後段をドライブできるように、ゲート幅比は1:2として1, 2段目のゲート幅を各々2.4mm, 4.8mmとした。高出力化と低歪化を達成するための、出力側負荷は出力整合、入力側負荷は歪整合とした。この3段アンプの前段に次節で述べるリニアライザを設けた。

2.2 リニアライザ部の設計

図2にリニアライザによる低歪化のイメージ図を示す。アンプに2信号を入力した場合、アンプの出力には3次相互変調信号が発生する。歪特性の指標として、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)があるが、通信品質を向上させるには、IM3は極力低い方がよい。一般に、アンプは入力電力増加に従い、利得は減少、位相は正に変化するAM-AM, AM-PM(Amplitude Modulation: AM, Phase Modulation: PM)特性を持つ。AM-AM, AM-PM特性はIM3に大きく影響する。一方、リニアライザでは、AM-AM, AM-PMをアンプと逆の特性にすることができる。アンプとリニアライザとを接続することでAM-AM, AM-PMが相殺されて、MMIC全体で平坦なAM-AM, AM-PM特性が得られ、IM3レベルを低減することができる。

リニアライザによってIM3を低減できるが、チップ面積

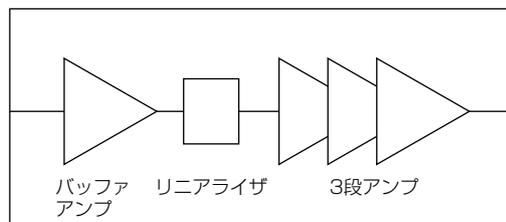


図1. MMICの構成

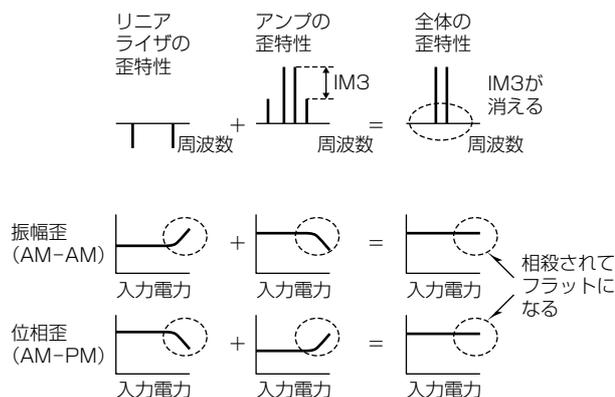


図2. リニアライザによる低歪化イメージ

が増加することは望ましくない。このMMICではAM-AMを線形化しやすく、また、チップの小型化に有利な並列ダイオードリニアライザ⁽¹⁾を採用した。図3に並列ダイオードリニアライザの回路図を示す。バイアス回路の抵抗とダイオードからなる簡素な回路であるため、3段アンプのチップ面積を増加させずにMMICに適用できる。

通常の並列ダイオードリニアライザでは、ダイオードのカソードにピアホールを接続して接地するが、Ku帯ではピアホールの寄生インダクタンスを無視できない。このMMICではカソードインダクタ L_c を設け、設計パラメータとして利用した⁽²⁾。図4にカソードインダクタンスをパラメータとしたリニアライザのAM-AM、AM-PM特性を示す。ピアホールの寄生インダクタンスである30pHで

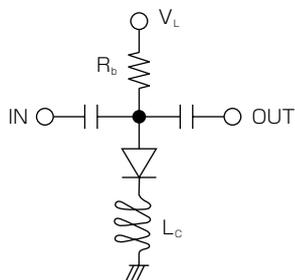
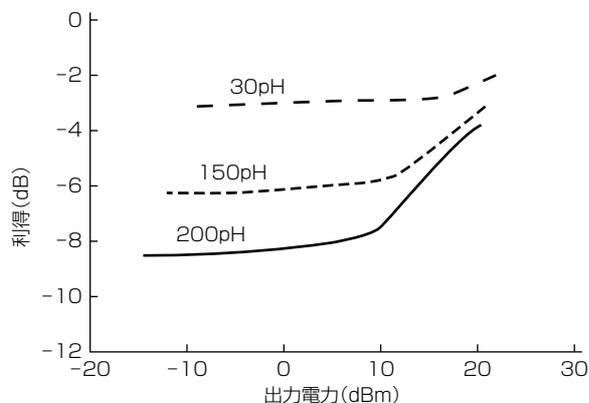
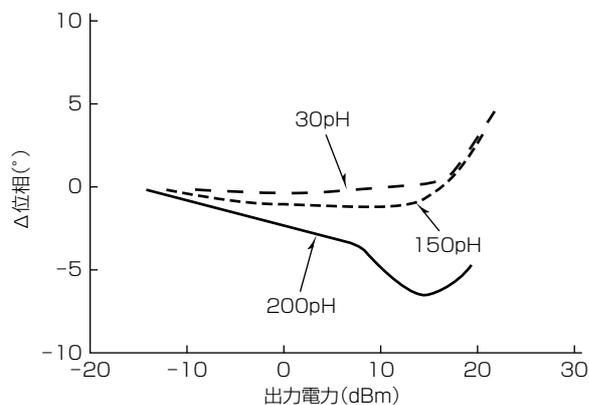


図3. 並列ダイオードリニアライザの回路図



(a) AM-AM



(b) AM-PM

図4. リニアライザのAM-AM, AM-PM特性

はリニアライザの挿入損失は低いものの、利得増加幅は狭い。150pHでは利得増加幅は広いが位相歪がアンプと同方向でありアンプの位相が相殺されない。200pHでは利得増加幅が広く、かつ、位相がアンプと逆特性であり、アンプのAM-AM、AM-PMを相殺することができる。ピアホールの寄生インダクタンスは30pHであるため、このMMICには170pHのカソードインダクタを挿入した。

また、入力端子とリニアライザをアイソレートし、リニアライザの挿入損失8dBを補償できるバッファアンプをリニアライザの前段に設けた。

3. 測定結果

オンウェーハで直流特性及びSパラメータのテストを実施した後、パッケージに実装し、専用の評価治具で大信号特性を測定した。大信号特性は全てCWモードで測定した。

図5にリニアライザ内蔵MMICの入出力特性を示す。飽和出力は43dBm (20W)、線形利得は23dB、電力付加効率 (Power Added Efficiency : PAE) は22%であり、2章で述べた目標値を達成した。また、衛星通信で使用する13.75~14.5GHzで、周波数によらない出力、利得特性を実現した。

図6, 図7にMMICのAM-AM特性, AM-PM特性, IM3特性をそれぞれ示す。リニアライザ効果の確認のため、リニアライザとバッファアンプなしの3段アンプMMICの特性も示す。AM-AM特性は、リニアライザありの方が利得圧縮開始点が高く、1dB利得圧縮点が2dB向上している。AM-PM特性は、リニアライザありの方では位相歪が±5°以下に抑制されている。IM3が-25dBcとなる線形出力は、リニアライザなしでは37dBm (5W)であるが、リニアライザありでは41dBm (12.6W)と、線形出力が約4dB向上している。どちらの歪特性もリニアライザによる効果が大きいことが分かる。

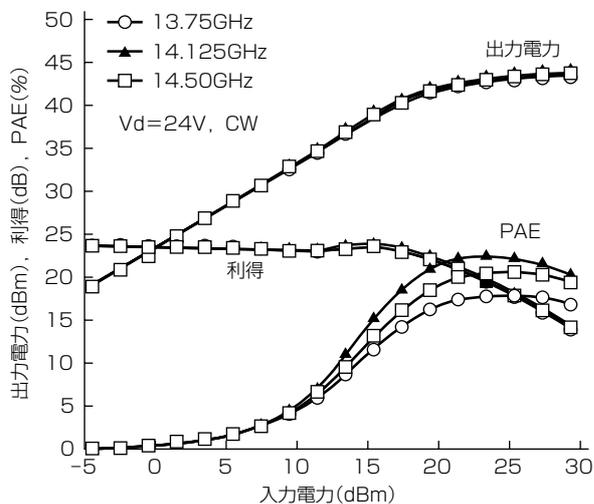


図5. MMICの入出力特性

表 1. Ku帯高出力MMIC製品の特性比較

製品形名(メーカー)	ゲート長(μm)	動作電圧(V)	飽和出力(dBm)	線形出力(dBm, Total Power)
TGA2579-2-FL ⁽³⁾ (Qorvo, Inc.)	0.25	25	43	35
TGA2239 ⁽⁴⁾ (Qorvo, Inc.)	0.15	22	46	40
MGFG5H1503(三菱電機株)	0.25	24	43	41

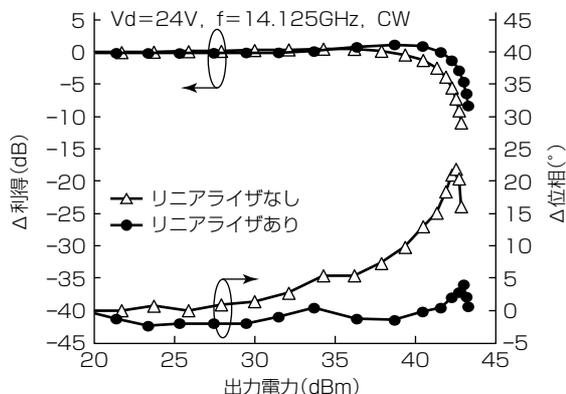


図 6. MMICのAM-AM, AM-PM特性

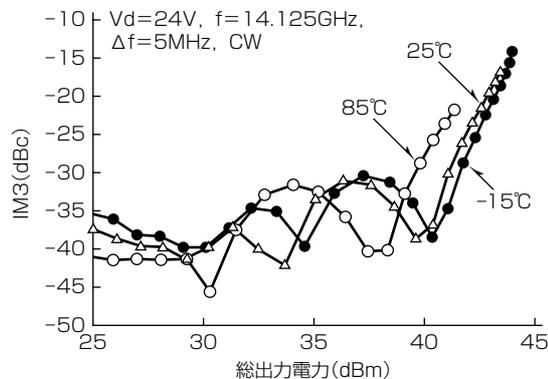


図 8. IM3の温度特性

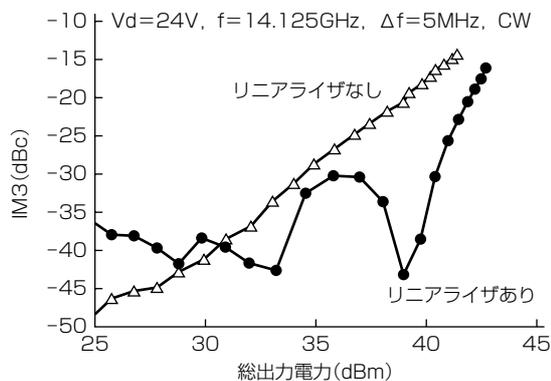


図 7. MMICのIM3特性

図 8 にIM3の環境温度依存性を示す。低温 -15°C ～高温 $+85^{\circ}\text{C}$ にて、線形出力は 41.8dBm (15.2W)～ 40.1dBm (10.2W)であり、線形出力の温度係数は $-0.018\text{dBm}/^{\circ}\text{C}$ である。線形出力以下において、低温～高温に渡り規定値 -25dBc を上回ることなくIM3を低減できている。

表 1 に、Ku帯での数10W級のMMIC製品の特性比較を示す。今回開発したMMIC“MGFG5H1503”は、衛星通信で要求される線形出力は 41dBm と、GaN MMICとしては世界最高の線形出力を持っている。一般に、飽和出力を高くすれば線形出力を向上できるが、ゲート幅が大きくなるためチップ面積や消費電力も増加する。この開発では、リニアライザによって飽和出力を高くすることなく、すなわち、チップ面積を増加させずに良好な線形性を実現した。

4. む す び

リニアライザを内蔵したKu帯GaN HEMT MMIC “MGFG5H1503”の開発について述べた。目標である 43dBm (20W)の飽和出力を達成し、リニアライザによって衛星通信に要求される $\text{IM3} = -25\text{dBc}$ 時の出力を 41dBm (12.6W)とし、リニアライザなしのMMICと比較して約4 dB改善し、世界最高の線形出力を実現した。このMMICによって、Ku帯衛星通信で、高い通信品質を保ちつつ、かつ、送信機の小型化が可能となる。

参 考 文 献

- (1) Yamauchi, K., et al.: A microwave miniaturized linearizer using a parallel diode with a bias feed resistance, IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., **45**, No.12, 2431～2435 (1997)
- (2) Kanaya, K., et al.: A Ku-band 20 W GaN-MMIC Amplifier with Built-in Linearizer, 2014 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig, THP-8 (2014)
- (3) 20 Watt Ku-Band GaN Power Amplifier, Qorvo, Inc. <http://www.triquint.com/products/p/TGA2579-2-FL>
- (4) 13-15.5GHz 35W GaN Power Amplifier, Qorvo, Inc. <http://www.triquint.com/products/p/TGA2239>