

# ロードプルシミュレーションによる 60GHz 帯高効率 F 級増幅器の最適設計

7309158 渡邊邦彦

## 1. はじめに

近年、環境への影響を配慮して省エネルギー化への社会的な要請が増している。また、通信の高速化・大容量化や周波数資源の枯渇などにより、ミリ波などの高周波帯を用いた高速無線通信の実現が望まれている。これら 2 つの課題を解決するためには、ミリ波帯などで動作する高速、かつ高効率なデバイスが必要である。高電子移動度トランジスタ (HEMT: High Electron Mobility Transistor) は高い電子移動度による優れた高周波特性を持ち、高速無線通信において有効なデバイスとして注目されている。したがって、HEMT を用いたミリ波帯高効率増幅器は、高速かつ省エネルギーという目標を達成する。これまでの研究では、60GHz において電力付加効率(Power Added Efficiency: PAE)17.3%[1]等が報告されているが、本研究ではこれを超越する PAE を得られる電力増幅器の実現を目標とする。

本研究では、ロードプルシミュレーションを用いて F 級増幅器を設計し、シミュレーションにて PAE を求めた。シミュレーションには、Agilent Technologies 社の Advanced Design System を用い、トランジスタモデルは東北大学電気通信研究所に提供していただいた InGaAs 系 HEMT から作成したモデル[2]を使用した。HEMT のゲート長は 80nm、ゲート幅は(25×10)μm である。

## 2. ロードプル法

ロードプル法とは、パワーアンプにおいてトランジスタから見た出力負荷インピーダンスを変化させて出力電力を測定し、スミスチャート上に等高線を描く方法である。この方法を用いることで、最も出力の高いトランジスタの負荷インピーダンスを求めることができる。今回はシミュレーションにおいてロードプル法を実施した。

## 3. F 級増幅器の動作原理

スイッチング動作をする高効率な増幅器の一つとして F 級増幅器が存在する[3]。図 1 に F 級増幅器の概念図を示す。スイッチング動作とは、電流が流れている時には電圧がゼロとなり、逆に電流が流れていない時に電圧が発生する動作のことである。トランジスタの消費電力はトランジスタ

を流れる電流と電圧の積であるので、理想的なスイッチング動作の下ではトランジスタの消費電力はゼロである。F 級増幅器は、トランジスタから見た負荷のインピーダンスを各高調波に対して調整することでドレイン電流・電圧波形を整形し、スイッチング動作を実現する。トランジスタから見た負荷のインピーダンスは、偶数次高調波に対して短絡、奇数次高調波に対して開放となるように設計する。したがって、トランジスタのドレイン電圧は基本波と奇数次高調波のみとなり方形波に、ドレイン電流は基本波成分と偶数次高調波成分のみとなり半波整流波となる。

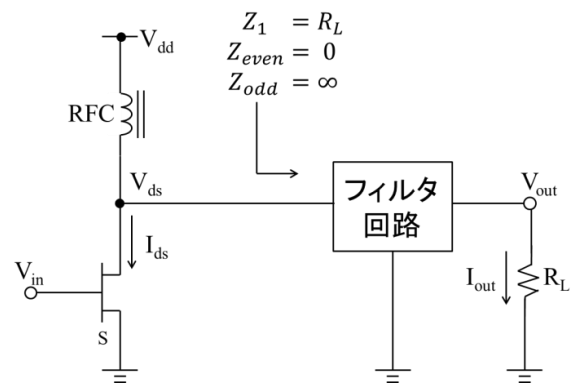


図 1 F 級増幅器概念図

## 4. 回路設計

### 4.1. ロードプルシミュレーション

ロードプルシミュレーションの結果を図 2 に示す。この曲線の中心が今回用いた HEMT の最も PAE の高くなる負荷インピーダンスである。

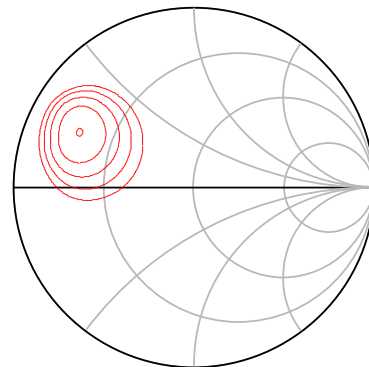


図 2 等効率曲線

## 4. 2. F 級増幅器の設計

まず、高調波処理部を設計する。今回の回路は三次高調波までを処理するように設計した。TL<sub>2</sub>はオープンスタブで、三次高調波に対して入力インピーダンスが短絡となる電気長 90°である。ゆえに、三次高調波において TL<sub>1</sub>はショートスタブと等価であり、電気長を適切な長さに設計すれば、奇数次高調波において入力インピーダンスが非常に高くなる。TL<sub>1</sub>の電気長は出力容量 C<sub>out</sub>(=86.5fF)を考慮して式(1)を用いて算出した[4]。また、ドレイン側のバイアス回路に基本波のλ/4 波長線路を設けることで、偶数次高調波に対して入力インピーダンスが短絡となる。その後、トランジスタから見た負荷回路の入力インピーダンスをロードプルシミュレーションによって得た値となるように整合回路で調整する。以上より設計した F 級増幅器を図 3 に、諸元を表 1 に示す。

$$l_1 = \frac{\lambda_0}{6\pi} \tan^{-1} \left( \frac{1}{3\omega_0 C_{out} Z_0} \right) \quad (1)$$

- l<sub>1</sub> : TL<sub>1</sub> の長さ
- λ<sub>0</sub> : 基本波の波長
- ω : 基本角周波数
- C<sub>out</sub> : トランジスタの出力容量
- Z<sub>0</sub> : 伝送線路の特性インピーダンス

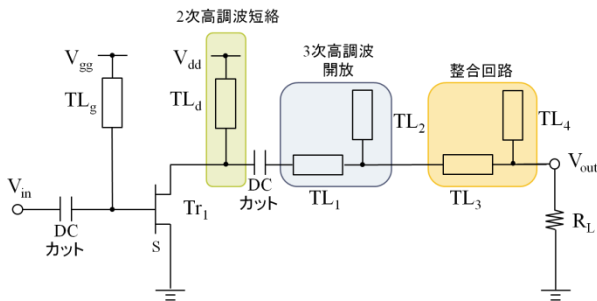


図 3 設計した F 級増幅器

表 1 設計した F 級増幅器諸元

動作周波数	60 GHz	
Tr <sub>1</sub>	ゲート長	80 nm
	ゲート幅	25×10 μm
V <sub>gg</sub>	-0.7 V	
V <sub>dd</sub>	0.7 V	
R <sub>L</sub>	50 Ω	
TL <sub>1</sub>	3.4°	
TL <sub>2</sub>	30°	
TL <sub>3</sub>	32.7°	
TL <sub>4</sub>	67.5°	
TL <sub>g</sub> , TL <sub>d</sub>	90°	
DC カット	1 pF	

## 5. 設計した F 級増幅器のシミュレーション結果

シミュレーションした F 級増幅器の入出力特性を図 4 に示す。電力付加効率は最大で 52% となり、その時の入力電力は 1.3mW, 出力電力は 8.7mW である。

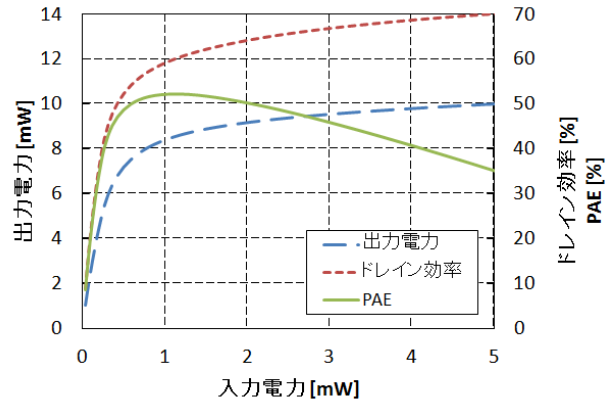


図 4 入出力特性

## 6. まとめ

本研究では、ロードプル法を用いてトランジスタの最適負荷インピーダンスを求め、60GHz で動作する高効率 F 級増幅器を設計し、シミュレーションを行った。その結果として、電力負荷効率 52% という良好な値を得た。今後、設計した回路を試作し、評価を行う。

## 参考文献

- [1] Lin, J, Boon, C. C, Yi, X, Lim, W. M, "A Compact Single Stage V-Band CMOS Injection-Locked Power Amplifier With 17.3% Efficiency," Microwave and Wireless Components Letters, IEEE, Vol. PP, Issue. 99, pp. 1-3, Jan. 2014.
- [2] 小山雅史, "InGaAs HEMT の小信号等価回路と大信号等価回路の作成", 東京理科大学電気電子情報工学科卒業論文, Feb. 2012.
- [3] F. H. Raab, "Class-F power amplifiers with maximally flat waveforms," IEEE Trans. Microw. Theory Tech. vol. 45, no. 11, pp. 2007-2012, Nov. 1997.
- [4] 谷口 慶治, 曾 寧峰, 森 幹男, "マイクロ波回路とミスチャート", 共立出版, p. 141, 2010.