

Design Consideration on Class-F GaN HEMT Amplifier for Microwave Power Transmission System

Kazuhiko Honjo, Ryo Ishikawa, Yoichiro Takayama

(Advanced Wireless Communication Research Center, The University of Electro-Communications)

Abstract

Realizing 5.8GHz-band high-efficiency power amplifiers with appropriate linear characteristics is one of the key issues for microwave power transmission systems such as SPS and the other wireless power transmission systems. Class-F amplifiers with a pre-distortion circuit can be considered as an unquestionable candidate for this purpose. To perform perfect class-F operation, load impedance for a transistor output current source is set to be zero at even order harmonics and is set to be infinity at odd order harmonics, while a power factor of minus unity is retained for a fundamental frequency. In the class-F amplifier design, an obstacle is the existence of parasitic capacitance and inductance in a transistor. These parasitic elements should be perfectly cancelled up to at least 29 GHz that corresponds to the 5th order higher harmonics.

This paper describes a novel method for solving above issue. A reactance function that has zeros at even harmonic frequencies and that has poles at odd harmonic frequencies is expanded to a L-C ladder circuit including parasitic elements through the use of the second Cauer canonical form. One stage of the L-C ladder circuit can be approximately replaced to a distributed circuit element for higher frequency operation. The proposed method allows parasitic compensation up to an arbitrary harmonic order by adding zeros and poles. According to the proposed method, a class-F amplifier using an AlGaN/GaN HEMT has been fabricated at 5.8 GHz. The fabricated class-F amplifier delivered high efficiency characteristics, with a maximum drain efficiency of 79.9%, a maximum power-added efficiency (PAE) of 71.4%, and an output power of up to 33.4 dBm at 5.86 GHz. In addition, an independently biased two-diode linearizer has been successfully developed for compensating sophisticated AM-AM and AM-PM conversion characteristics for the class-F amplifiers.

マイクロ波無線電力送電用高効率GaN-HEMT F級電力増幅器の基本技術*

○本城 和彦 石川 亮 高山 洋一郎

電気通信大学 先端ワイヤレスコミュニケーション研究センター

1. はじめに

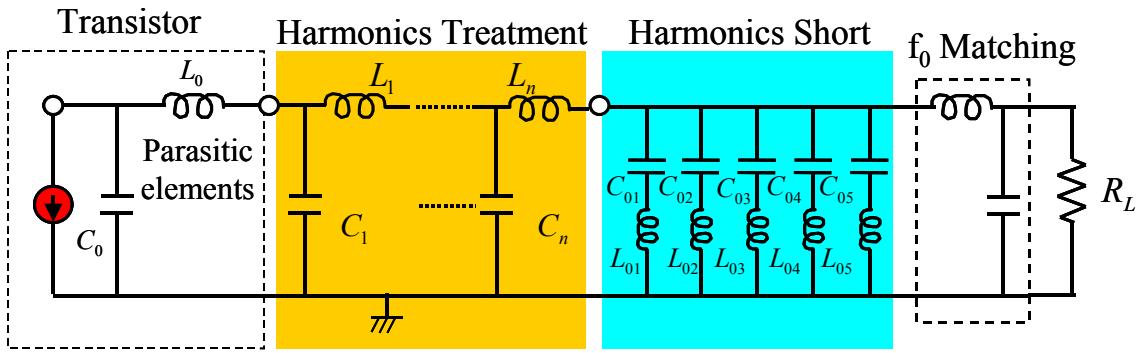
マイクロ波無線電力伝送を実現するためには直流エネルギーをマイクロ波エネルギーに変換する機能を有する増幅器が重要なコンポーネントとなる。電力伝送効率を上昇させるために、増幅器には高効率性が要求されるのはもちろんであるが、電力ビームを制御するためには低 AM-AM 変換特性および低 AM-PM 変換特性で代表される高線形性も要求される。本論文では、これらの要求を満たすマイクロ波高効率 GaN-HEMT F 級電力増幅器の設計手法について述べる。

2. 寄生素子を考慮した F 級増幅器設計

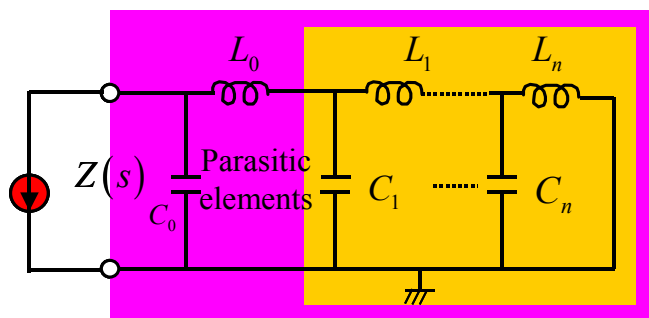
高効率化のためには、トランジスタにおける電流波形と電圧波形の重なりを無くし、トランジスタからの発熱を零に近づける必要がある。このため F 級増幅器では、トランジスタの等価出力電流源から負荷側を見込んだインピーダンスを、偶数次高調波で短絡、奇数次高調波で開放にして高調波における電力損失を零にするとともに、基本波での力率を-1にする F 級増幅器が有望である。しかしながら、無線電力伝送に用いる 5.8GHz 帯を基本波とする F 級増幅器では、5 次高調波でも 29GHz のミリ波領域の信号処理が必要となり、トランジスタ等価出力電流源と F 級負荷回路との間に介在する寄生キャパシタや寄生インダクタの影響が無視できない。このため、高効率化が阻害されていた。そこで本論文では、図.1 に示すように、全ての高調波で短絡となるポイントを作るとその点の左側の回路は寄生素子を含めて純リアクタンス回路となり零点と極を交互に有する回路となるが、この零点を F 級増幅器の偶数次高調波に一致させ、極を奇数次高調波に一致させればよいことに着目した。

$$Z(s) = \frac{b_1s + b_3s^3 + b_5s^5}{a_0 + a_2s^2 + a_4s^4 + a_6s^6} = \frac{b_5}{a_6} \frac{(s^2 + (2\omega_0)^2)(s^2 + (4\omega_0)^2)}{(s^2 + \omega_D^2)(s^2 + (3\omega_0)^2)(s^2 + (5\omega_0)^2)} \quad (1)式$$

寄生素子の数に応じて擬似極、さらには擬似零点を必要に応じて配置し、回路系へ自由度を与えると、目的どおりの回路が実現できる。具体的には F 級のための目標関数(式(1))を連分数化し、L-C 梯子型回路から導かれる連分数表現式 (式(2)) と係数比較することにより、寄生素子を考慮した任意次数までの F 級増幅器が直ちに設計できる。求められた集中定数パラメータは図.2 に示すように分布定数回路に変換してマイクロ波ミリ波帯で実現可能な回路とする。この方法では、これまで実現されていなかった 4 次以上の任意の次数までの完全 F 級条件が、寄生回路素子が介在している条件下でも実現されることになり、



Two Terminal Pure Reactance Network for Harmonics



$$Z(s) = \frac{1}{C_0 s + \frac{1}{L_0 s + \frac{1}{C_1 s + \frac{1}{L_1 s + \frac{1}{C_2 s + \frac{1}{L_2 s + \frac{1}{C_n s + \frac{1}{L_n s}}}}}}}}$$

図.1 寄生素子を含む高調波回路の純リアクタンス化

(2)式

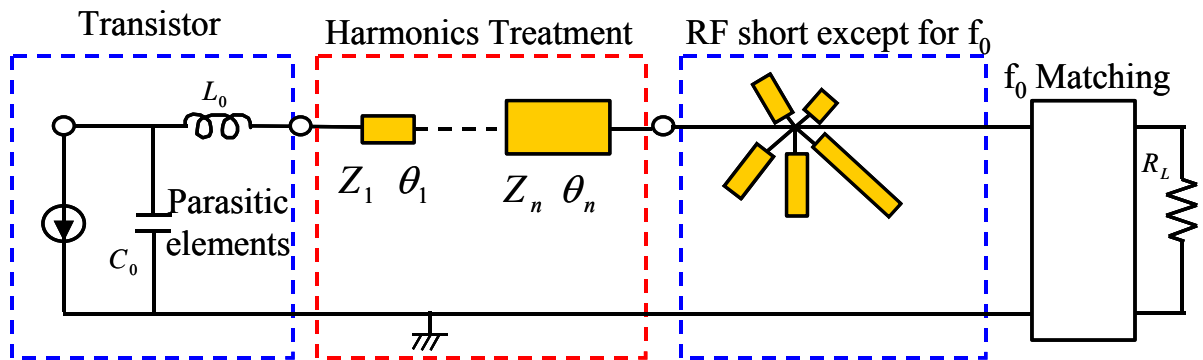


図.2 分布定数回路への変換

3. GaN HEMT を用いた 5.8 GHz 帯高効率増幅器の実現

本提案手法を AlGaIn/GaN HEMT(東芝製)を用いた F 級増幅器に適用し設計試作した。図.3 は増幅器写真で、高調波短絡スタブは多層化し中心点をビアで結んで構造となっている。回路は誘電正接 0.002 の樹脂基板を用いて電磁界解析により構造設計を行なった。入力回路には 2 次高調波の入力側へ負帰還を避けるためのスタブが設けられている。図.4 に示されたように 5.8GHz において増幅器ドレーン効率 82.9%、付加電力効率 74.9%のシミュレーション値を得た。また、試作増幅器の実験値では、ドレーン効率 79.9%、付加電力効率 71.4%が達成された。

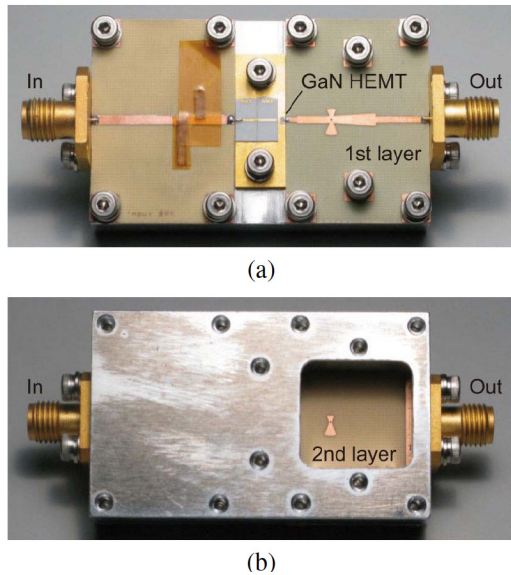


図.3 5.8GHz帯 GaN HEMT F級増幅器写真

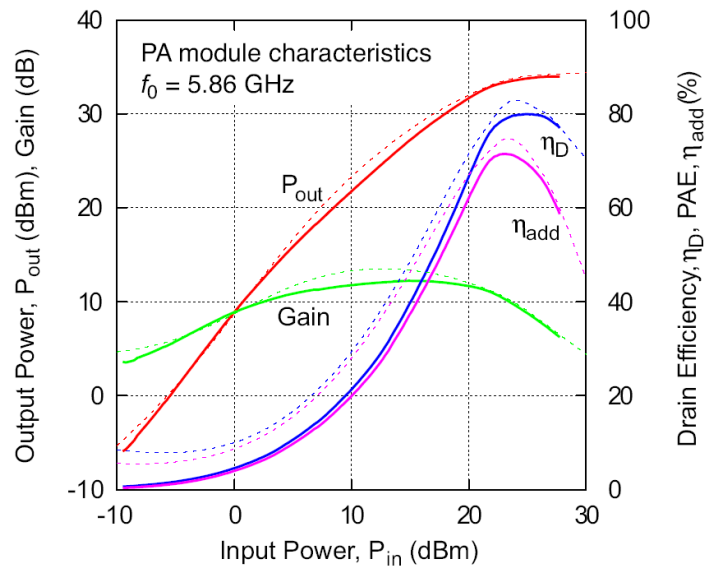


図.4 入出力電力・効率特性
(実線：実験値、破線：シミュレーション値)

4. F級増幅器の線形化

F級増幅器のドレーン効率を劣化させることなく、AM-AM変換特性ならびにAM-PM変換特性を改善できるバイアス独立制御型2ダイオードプレディストorterを開発し、1.9GHz帯がN HEMT F級増幅器に適用し、図.5に示すようにAM-AM変換特性ならびにAM-PM変換特性を大幅に改善できた。これにより高効率アレイ素子の出力・位相制御が可能となる。

5. おわりに

寄生素子を考慮し、任意次数F級増幅器の設計法を提案し、良好な結果を得た。また、ドレーン効率を劣化させずにF級増幅器を線形化できることを示した。

6. 文献

(1) K. Kuroda, R. Ishikawa, K. Honjo, IEEE Trans. MTT, vol. 58, No. 11, pp. 2741-2749, Nov. 2010

(2) A. Ando, Y. Takayama, T. Yoshida, R. Ishikawa, K. Honjo, AMPC2009 Proceedings, Dec. 2009

*T第13回SPSシンポジウム、2010年10月28-29日に発表

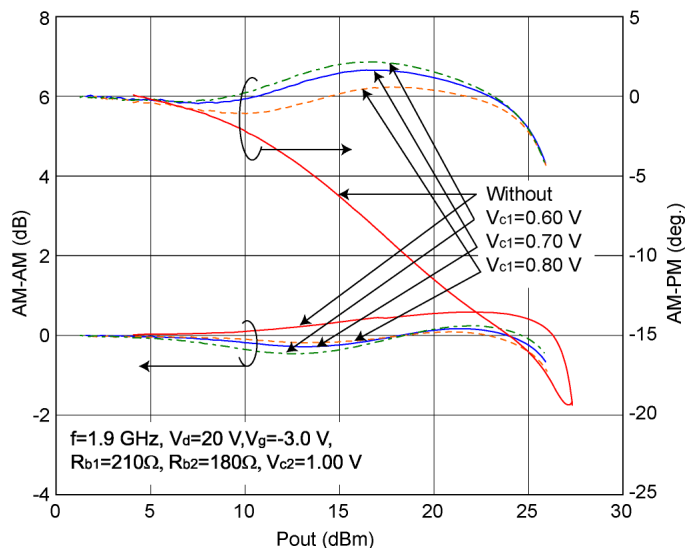


図.5 独立バイアス制御型2ダイオードプレディストorterによるF級増幅器の線形化