

Ku 波段星载行波管混合型预失真线性化器的研究

张翔, 周东方, 张毅, 孙昱
(信息工程大学 信息工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 提出了一种改善行波管放大器非线性特性的预失真新方法, 采用载波复幂级数法分析了星载行波管的非线性传输特性, 提出一种反向复幂级数的预失真线性技术。所提出的预失真器非线性特性由混合型结构实现, 包括肖特基二极管、砷化镓场效应管, 改善了行波管在 Ku 波段的幅度-幅度失真特性, 线性增益最大增加 30 dB, 对行波管线性化器的后续研究有一定参考和实用价值。

关键词: 行波管放大器; 复载波幂级数法; 线性化技术; 预失真; 肖特基二极管; 砷化镓场效应管非线性特性

中图分类号: TN6 文献标识码: A

Design of Ku-band predistortion linearizer using mixed structure circuit for satellite TWTA

ZHANG Xiang, ZHOU Dong Fang, ZHANG Yi, SUN Yu

(Institute of Information Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In this paper, a new predistortion method to improve nonlinearity of a traveling wave tube amplifiers (TWTA) is proposed. Nonlinear transfer characteristics of TWTA are analyzed using the carrier complex power series(CCPS) method. An inverse complex power series of a predistortion linearizer to linearize TWTA is also proposed. The nonlinear distortion characteristics of predistorter can be realized with the mixed structure that is composed of Schottky diode and GaAs FET. The AM-to-AM characteristic of TWTA on Ku-band is improved with maximal linear gain of 30 dB by proposed predistortion linearizer. The results provide reference and practical value to a certainty for the design of linearization used on TWTA.

Key words: TWTA; carrier complex power series(CCPS); linearization; predistortion; Schottky diode; GaAs FET nonlinearity

随着卫星通信系统传输数据容量的飞速增长, 对射频输出功率放大器(PA)线性度提出了越来越高的要求, 而行波管非线性特性产生的失真和邻道干扰等直接影响通信系统的性能, 因此星载行波管线性化技术成为卫星通信的关键。为了矫正行波管非线性失真, 目前已有多种线性化技术, 如反馈、前馈、预失真^[1]。由于预失真方法有体积小、系统复杂度低、卫星转发器直流功耗低等优点而备受青睐。

本文采用载波复幂级数方法(CCPS)分析了一般功率放大器的非线性幅度特性(AM-AM)、非线性相位特性(AM-PM), 得出预失真器的反载波复幂级数法^[1]。针对 Ku 波段某行波管提出一种新预失真方法, 仿真可获最大 20.7 dB 的线性增益。

1 载波复幂级数分析法(CCPS)

如果二端口网络是无记忆并且输入信号为窄带, 则输出信号可表示为输入信号的幂级数。但是传统的幂级

数只能表示非线性网络的幅度特性(AM-AM), 如果将输出信号的大小和相位用输入信号表示, 如式(1)所示, 则此级数也可表示非线性相位特性(AM-PM), 称为功率放大器的载波复幂级数分析法。

$$v_{os} = f_1 v_{is} + f_3 v_{is}^3 + f_5 v_{is}^5 + \dots \quad (1)$$

$$f_i = M_i e^{j\theta_i}, v_{is} = A_i e^{j\theta_i}$$

其中, f_i 为线性复增益, v_{is} 是功率放大器输入电压的向量形式, 假如工作在弱非线性区, 则输出电压可由前两项表示, 且如果输入信号的相位 θ_i 矫正为零, 则:

$$v_{os} \approx f_1 v_{is} + f_3 v_{is}^3 \quad (2)$$

$$v_{os} \approx f_1 v_{is} = f_1 A_i \quad (3)$$

如果功率放大器工作在线性区域, 则线性复增益系数可由式(4)得到。

$$f_1 = \frac{v_{os}}{v_{is}} = \frac{v_{os}}{A_i} \quad (4)$$

图 1 给出了功率放大器的复数非线性传输特性。当输出

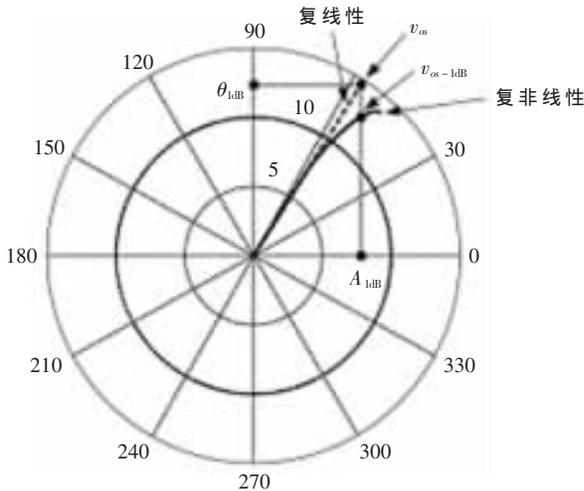


图 1 功率放大器复非线性传输特性

功率值接近 1 dB 压缩点 (P_{1dB}), 假定输入信号为 $v_{is-1dB} = A_{1dB}$, 则理想的线性复数输出信号可定义为 $v_{os} = f_1 v_{is-1dB}$ 。因此, 理想输出信号与实际输出信号 v_{os-1dB} 的关系由式(5)表示:

$$Q = \frac{v_{os-1dB}}{v_{os}} = \frac{A_{1dB}^0 e^{j\theta_{1dB}^0}}{f_1 A_{1dB}} = \frac{A_{1dB}^0}{M_1 A_{1dB}} e^{j(\theta_{1dB}^0 - \theta_n)} = 0.891 e^{j(\theta_{1dB}^0 - \theta_n)} \quad (5)$$

其中, $v_{os-1dB} = A_{1dB}^0 e^{j\theta_{1dB}^0}$, 复常数可表示 1 dB 压缩点失真分量的幅度和相位, 三阶复系数由(6)式得到:

$$f_3 = \frac{f_1(Q-1)}{A_{1dB}^2} \quad (6)$$

图 2 给出了预失真线性化结构图及信号图。如果对行波管输入信号预失真, 当 $v_{is} = g_1 A_{in} + g_3 A_{in}^3$ 时, 则非线性特性可用反载波复幂级数表示如下:

$$v_{os} = f_1 g_1 A_{in} + (f_1 g_3 + f_3 g_1^3) A_{in}^3 + 3f_3 g_1^2 g_3 A_{in}^5 + 3f_3 g_3^2 g_1 A_{in}^7 + f_3 g_3^3 A_{in}^9 \quad (7)$$

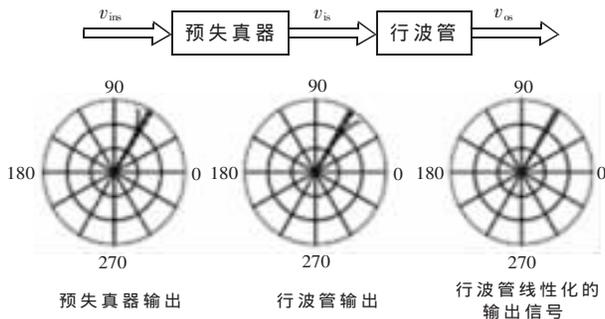


图 2 预失真线性化结构图及信号图

如果预失真的行波管有线性复增益, 则 $f_1 g_3 + f_3 g_1^3 = 0$ 。式(8)给出了预失真器反载波复幂级数的三阶项。

$$g_3 = -\frac{f_3}{f_1} g_1^3 = -\frac{f_3}{f_1} e^{j3\theta_{e1}} \quad (8)$$

$$v_{is} = v_{in} - \left(\frac{f_3}{f_1}\right) v_{in}^3 e^{j3\theta_{e1}} \quad (9)$$

从式(9)可知, 预失真线性器的反载波复幂级数取决于功率放大器的载波复幂级数。

2 两种预失真电路应用

基于以上讨论, 针对 Ku 波段下行频率工作于 11.7 GHz ~ 12.2 GHz 通信卫星的行波管提出了两种预失真电路模型。

2.1 预失真电路模型一

采用 Agilent 公司的 MGF1801 构成预失真器^[4], 仿真工具使用的是 ADS (Advanced Design System)。图 3 为 MGF1801 的输出特性曲线, 当漏极电压 $V_{GD} = (V_{GS} - V_{DS}) > V_{TH}$ 时 (V_{TH} 为管子的夹断电压), 靠近漏极处沟道未被夹断的情况, 沟道呈现电阻特性。随着 U_{DS} 的增大, 使靠近漏极区的沟道深度变浅, 沟道电阻加大, 特性曲线斜率逐渐减小。在变阻区内: 当 V_{GS} 一定时, 漏极电流 I_D 与 U_{DS} 成线性关系; 当 V_{DS} 一定时, V_{GS} 与漏极电流 I_D 不成线性关系。从这个意义上讲, 场效应管成为受栅压控制的可变电阻器。因此将场效应管偏置于这一可变电阻区时就可产生与功放相反功率扩张效应。

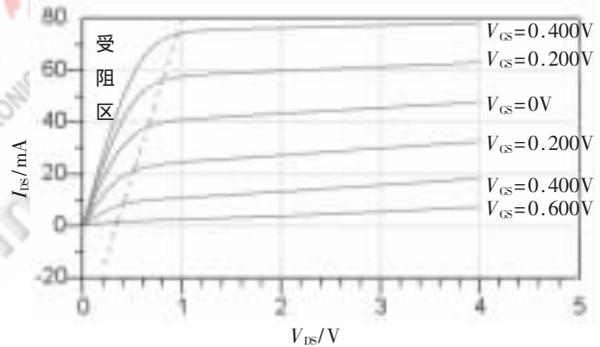


图 3 GaAsFET 实现预失真功能的变阻区示意图

在射频频段, 要实现预失真电路的增益和相位随输入功率变大而增大和负增大的功能特性, 根据金半结的变阻特性, 可采用肖特基二极管或砷化镓场效应管来搭建微波电路。又因为预失真要提供一定的功率增益, 因此该电路是有源电路。具体电路形式如图 4 所示。调节

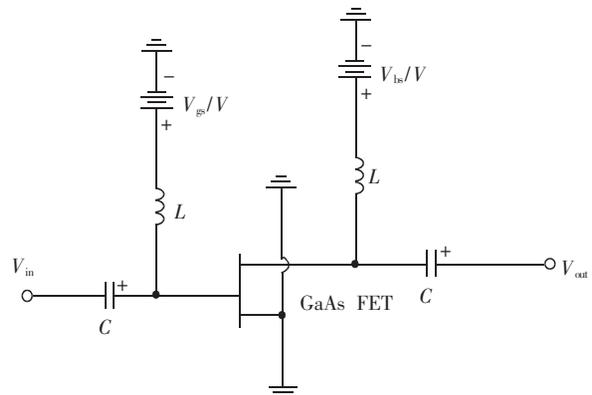


图 4 GaAs FET 预失真电路图

电路图中的可控直流偏置,以调整其幅、相特性与所需要的幅、相特性相接近即能对行波管起到较好线性化效果,仿真结果如图 5。

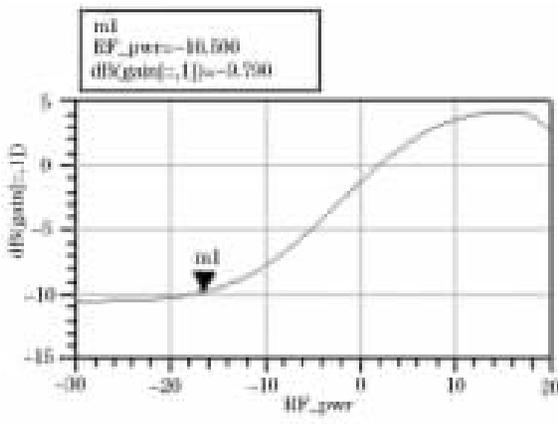


图 5 增益与输入功率关系

2.2 预失真电路模型二

从传输函数的角度来考虑预失真原理如图 6 所示。

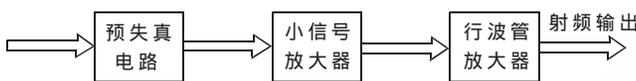


图 6 预失真结构框图

由图 6 可看出,预失真电路接在行波管前级,由于预失真电路可能有损耗,因此提出新的方案,即在其与行波管中间再级联小信号线性放大器,整个预失真电路与小信号线性放大器集成到一起称作预失真器。同时, GaAs FET 串联肖特基二极管作为预失真发生器,电路如图 7 所示。

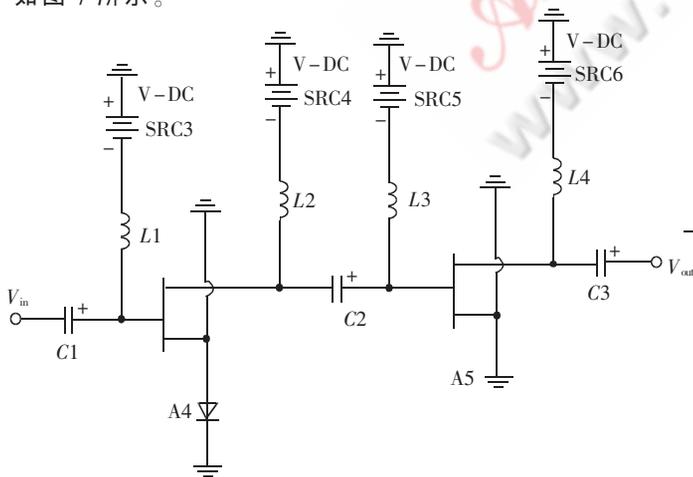


图 7 混合型预失真电路图

图 5、图 8 分别为 GaAs FET 预失真电路和混合型预失真电路的增益与输入功率关系曲线。图中横坐标为射频输入信号功率,单位为 dBm,纵坐标为预失真电路增益,单位为 dB。

3 仿真试验

本文利用 Saleh^[2]的行波管模型:

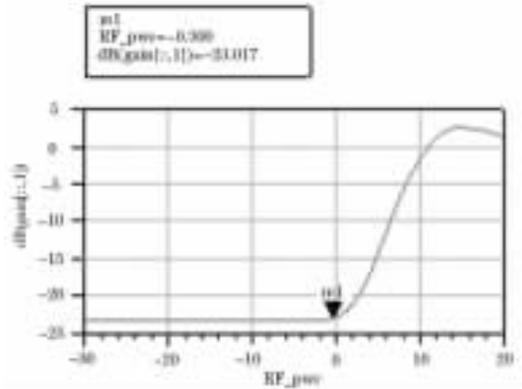


图 8 混合型预失真电路增益与输入功率关系

$$A_v(t) = \alpha_a A_u(t) / (1 + \beta_a A_u(t)^2) \quad (10)$$

$$\Delta\varphi = \alpha_\varphi A_u(t)^2 / (1 + \beta_\varphi A_u(t)^2) \quad (11)$$

其中,输入信号: $\tilde{u}(t) = A_u(t)e^{j\varphi_u(t)}$, 输出信号: $\tilde{v}(t) = A_v(t)e^{j\varphi_v(t)}$, 利用最小二乘法可拟合式(10)、式(11)的 4 个参数,结果有^[3]: $\alpha_a = 1.6623$ 、 $\beta_a = 0.0552$ 、 $\alpha_\varphi = 8.7834$ 、 $\beta_\varphi = 0.3456$, 两式的拟合均方误差分别为 0.041 和 0.508, 误差较小。

表 1 为参考文献[5]中给出的某行波管的 11 组输入输出功率及输出相位值。

表 1 TWTA 的输入输出功率及输出的相位值表

行波管输入功率/dBm	行波管输出功率/dB	行波管输出相位/rad
7.0	13.0	16.5
19.0	21.0	22.6
23.9	25.1	27.0
28.6	33.0	13.0
19.0	22.6	24.3
25.5	26.3	26.7
26.95	27.0	26.8
24.7	0.04	0.12
0.20	0.26	0.31
0.34	0.36	0.375
0.396	0.41	0.43

为了验证本文提出的混合型预失真电路的有效性,采用预失真器、小信号放大器及行波管等部件进行系统仿真,其中行波管用 Saleh 模型实现,如图 9 所示。在 11.6 GHz~12.0 GHz 频段 -10 dBm~4 dBm 的输入功率范围内可获最大 20.7 dB 线性增益。场效应管和肖特基二极管分别为 Agilent 公司的 MGF1801 和 HSCH-5330。基底为氧化铝,电容率为 9.9,厚度为 0.625 mm。图 10 和图 11

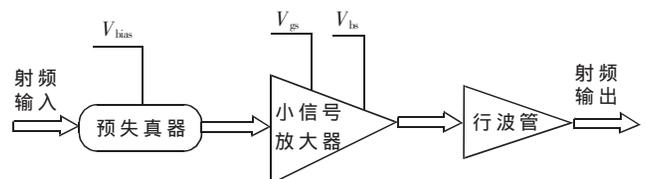


图 9 系统仿真框图

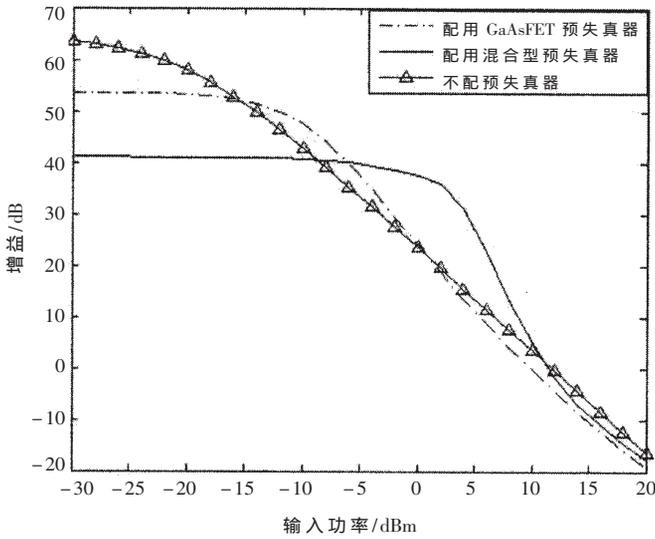


图 10 行波管配用预失真器的增益对比图

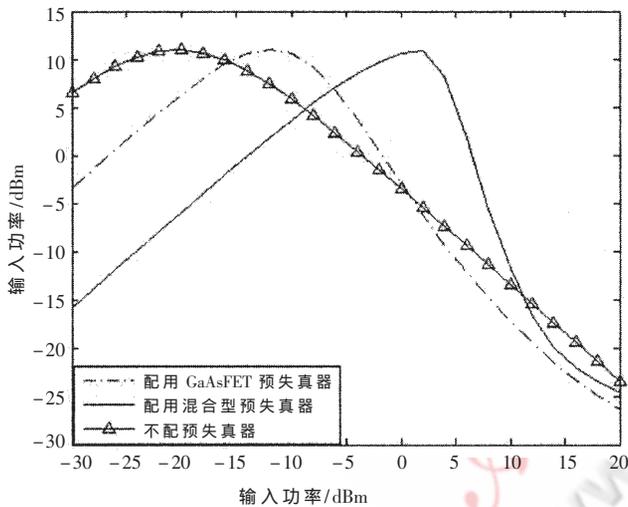


图 11 行波管配用预失真器的传输特性对比图

分别给出了行波管配用两种预失真电路的仿真结果。

从图 10 中可以看出, 配用混合型预失真器能在更大的输入范围内提高行波管线性度。与预失真电路相比较, 混合型预失真线性范围提高 15 dBm。特别在输入功率 -10 dBm~4 dBm 范围内, 可以明显看出混合型预失真器带来的线性化增益很大。同样的, 由图 11 也可以看出混合型预失真器的线性工作范围更大。

对混合型预失真电路的增益随频率变化的情况进行仿真。首先, 设置了频率扫描(11.7 GHz~12.2 GHz), 观察增益曲线。结果如图 12, 其在不同频率点上的增益非线性特性大致相同, 说明在带内增益变化比较平坦, 具有可用性。以上说明线性化器在设计频带内均工作正常。

在频率 11.7 GHz~12.2 GHz 范围内, 行波管配用混合型预失真器的增益对比图如图 13、图 14 所示。

从图 13、图 14 中可以看出在 11.7 GHz~12.2 GHz 频率范围内, 混合型预失真器对行波管的线性化效果比较一致。

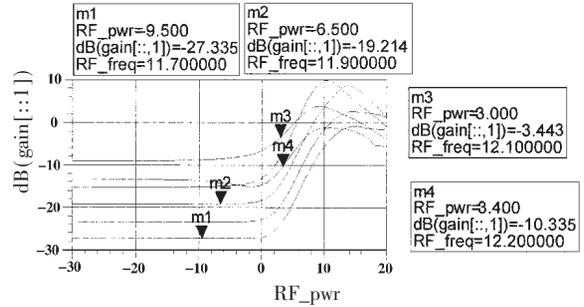


图 12 各频率下输入功率与增益关系图

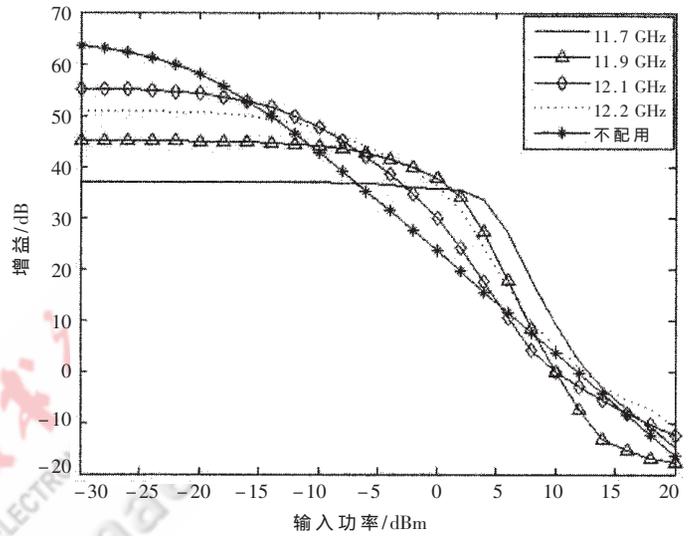


图 13 行波管配用混合型预失真器的增益对比图

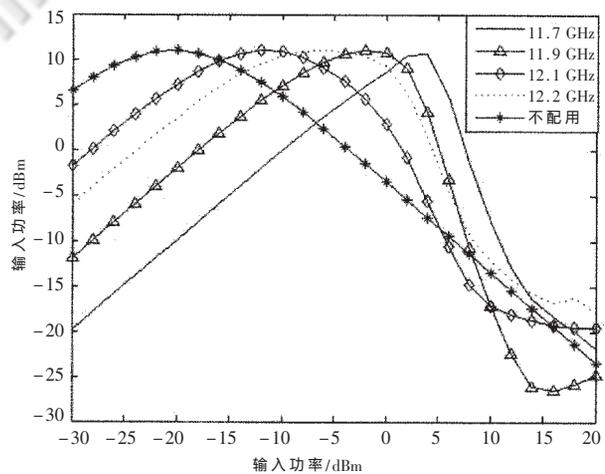


图 14 各频率下线性器传输特性曲线对比图

本文分析了一般的功率放大器的非线性幅度特性 (AM-AM)、非线性相位特性 (AM-PM), 得出预失真器的反载波复幂级数法, 提出 GaAs FET 串联肖特基二极管再级联小信号线性放大器设计预失真器的新方法。通过与 GaAs FET 预失真器的性能比较, 结果证明混合型预失真器线性化范围更大、性能更优越, 具有良好的应用前景。

本文所用的载波复幂级数分析方法、系统仿真方法及所得结论对行波管线性化器的研究有一定参考价值。

参考文献

- [1] YONG Chae Jeong, SANG Young Yun. Design of a predistortive high power amplifier using carrier complex power series analysis. Microwave Journal, 2002, 45(4): 92-102.
- [2] ADEL A. Frequency independent and frequency dependent nonlinear models of TWT amplifiers. IEEE Trans on Communications, 1981, 29(11): 1715-1720.
- [3] HAN Dong Seog, TAEWON H. An adaptive predistorter for the compensation of HPA nonlinearity. IEEE Trans on Broadcasting, 2000, 46(2): 152-157.
- [4] 宋家乾, 杜晓燕, 牛忠霞. 降低行波管放大器非线性的预失真技术研究. 微波学报, 2008, 24(5): 69-73.
- [5] 陈振国, 间怀亮, 吕林. 卫星通信技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1992: 78-83.

(收稿日期: 2008-12-20)

电子技术应用
APPLICATION OF ELECTRONIC TECHNIQUE
www.chinaaet.com