

# 一种用于K波段空间行波管模拟预失真电路的设计方法

刘婷<sup>\*①②</sup> 苏小保<sup>①②</sup> 王刚<sup>①②</sup> 赵斌<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院大学 北京 100049)

**摘要:** 空间行波管(TWT)预失真电路小型化、轻量化要求使得电路调试难度变大,迫切需要一种预失真电路精确仿真及设计方法来指导产品设计。该文在分析肖特基二极管等效电路模型基础上选择二极管MA4E2039作为非线性发生器件,并建立了MA4E2039的二极管仿真模型。之后通过分析反射式预失真电路结构,获得了影响电路性能的关键参数,并在元器件和版图联合仿真阶段对这些关键参数进行精确仿真。最后对依据仿真结果进行加工的预失真电路进行测试,发现仿真结果和电路实测结果偏差小于15%,将预失真电路与K波段行波管放大器级联实现在输入回退4 dB时3阶交调达到23.77 dBc,实现了行波管的线性化。可见该方法能够用于指导空间行波管预失真电路设计,帮助提高产品开发周期,对于预失真电路的小型化设计也有重要指导意义。

**关键词:** 行波管; 模拟预失真; 肖特基二极管; 增益及相位扩张

中图分类号: TN124; TN830.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2023)12-4576-09

DOI: 10.11999/JEIT221181

## A Design Method for Analog Predistortion Circuit of K-band TWT

LIU Ting<sup>①②</sup> SU Xiaobao<sup>①②</sup> WANG Gang<sup>①②</sup> ZHAO Bin<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The requirement of miniaturization and lightweight of space Travelling Wave Tube (TWT) predistortion circuit makes the circuit debugging more difficult. Therefore, an accurate simulation and design method of predistortion circuit is urgently needed to guide the product design. Based on the analysis of Schottky diode equivalent circuit model, the diode MA4E2039 is selected as a nonlinear generator, and the diode simulation model of MA4E2039 is established. Then, the key parameters affecting the performance of the circuit are obtained by analyzing the structure of the reflective predistortion circuit, and these key parameters are simulated accurately in the co-simulation stage of components and layout. Finally, the pre-distortion circuit processed according to the simulation results is tested, and it is found that the deviation between the simulation results and the measured results is less than 15%. By cascading the predistortion circuit with the K-band TWTA, the third-order intermodulation reaches 23.77 dBc while the IBO=4 dB. Therefore, this method can be used to guide the design of pre-distortion circuit of space TWT, help to improve the product development cycle, and also has important guiding significance for the miniaturization design of pre-distortion circuit.

**Key words:** Travelling Wave Tube (TWT); Analog predistortion; Schottky diode; Expansion of gain and phase

### 1 引言

随着宽带多媒体业务和移动高速数据通信业务的发展,当前无线和卫星通信系统通信容量需求不断提高,俄罗斯于2017年发射的ViaSat-2卫星其总数据吞吐量达到了300 Gbit/s<sup>[1]</sup>,为了适应这种大

信息吞吐量应用需要卫星系统会采用更大信号带宽和频谱利用率更高的调制方式,如OFDM, 8PSK, 64QAM等峰均比较高的非恒包络调制方式,同时采用各种技术提高信号信噪比,而衡量放大器非线性指标载波交调比(C/IM)会叠加在信号本身的信噪比上恶化其结果<sup>[2]</sup>。据相关文献报道对于多载波通信系统交调比至少需要26 dBc,行波管输出功率需要回退7 dB,才能实现信号有效解调,而采用

收稿日期: 2022-09-08; 改回日期: 2022-12-20; 网络出版: 2022-12-23

\*通信作者: 刘婷 [liuting003392@aircas.ac.cn](mailto:liuting003392@aircas.ac.cn)

线性化技术后行波管输出功率只需回退3 dB即可达到C/IM的要求<sup>[3]</sup>。因此针对空间行波管的线性化技术对功率获取相当不易的卫星通信系统有着广泛应用需求。在功率回退法、负反馈、前馈及预失真等众多线性化技术中，模拟预失真技术有着成本低、电路简单、带宽宽等优点，被大量用于空间行波管的线性化技术中<sup>[4]</sup>。

目前国内外针对模拟预失真技术的研究和文献较多，大部分研究通过改进电路拓扑结构获取更优的性能指标，一般都会在设计阶段尽可能多地保留可调节变量，电路在加工完成后需要进行大量调试工作才可实现最初设计指标，包括增益及相位扩张量、幅频特性等<sup>[5-10]</sup>。空间行波管线性化器的应用环境要求其具有轻量化、小体积的外形特点，星用线性化器一般采用微组装工艺进行设计生产。在常用通信频段如Ku及K波段，采用介电常数9.9的陶瓷基板加工特性阻抗为50 Ω的微带其宽度仅0.24 mm，射频器件也采用不带封装的裸芯片，电路本身的小尺寸及器件的敏感性两方面原因导致电路组装完成后可用的调试及测量手段较少。因此如何在产品设计阶段将产品性能及指标进行精确仿真，实现产品设计指标和实际测试值的高度吻合，是目前小型化星用线性化器的设计难点，从目前国内发表的文献来看针对预失真电路精确仿真及设计的文献较少<sup>[11]</sup>。

常用的模拟预失真电路有反射式、传输型及两支路合成式<sup>[12-14]</sup>，文中设计及仿真采用的预失真电路为反射式结构。本文提出一种用于反射式预失真电路的精确仿真方法，通过分析反射式电路拓扑结

构得到影响预失真电路的关键参数，重点关注影响预失真电路仿真效果的肖特基二极管模型，通过制作TRL校准件及微波网络分析方法获取肖特基二极管模型参数，通过应用二极管模型及针对关键参数优化设计得到整个预失真电路精确仿真结果。对采用该设计方法设计加工的电路进行测试，其测试结果和仿真数据吻合良好，说明二极管模型正确性及仿真设计方法合理性。该设计方法对微组装工艺实现的K波段预失真电路设计有重要指导意义。

## 2 预失真电路分析

设计采用反射式预失真电路拓扑结构，原理图如图1所示。信号由分支线耦合器端口1进入，在端口2, 3输出幅度相等相位相差90°的信号并向右传输，利用由并联二极管支路和负载支路在A, B两点产生的阻抗不匹配将信号反射回端口2, 3，信号再次经耦合器返回端口1, 4。由端口2, 3最终返回端口1的信号由于幅度相等相位相差180°相互抵消，由端口2, 3最终返回端口4的信号由于幅度相等相位相同叠加输出，这种电路结构实现了输入和输出信号的良好隔离。整个预失真电路产生非线性的关键器件为肖特基二极管，肖特基二极管扩散电容小，具有良好的开关特性，适用于高频领域，常用于混频器、检波器及预失真电路。为满足预失真电路特性，需要根据二极管spice模型参数、安装方式及工作频率等因素合理选择肖特基二极管。文中选用的肖特基二极管为MACOM公司生产的反并联二极管MA4E2039。

耦合器直通端/耦合端等效电路图如图2(a)所

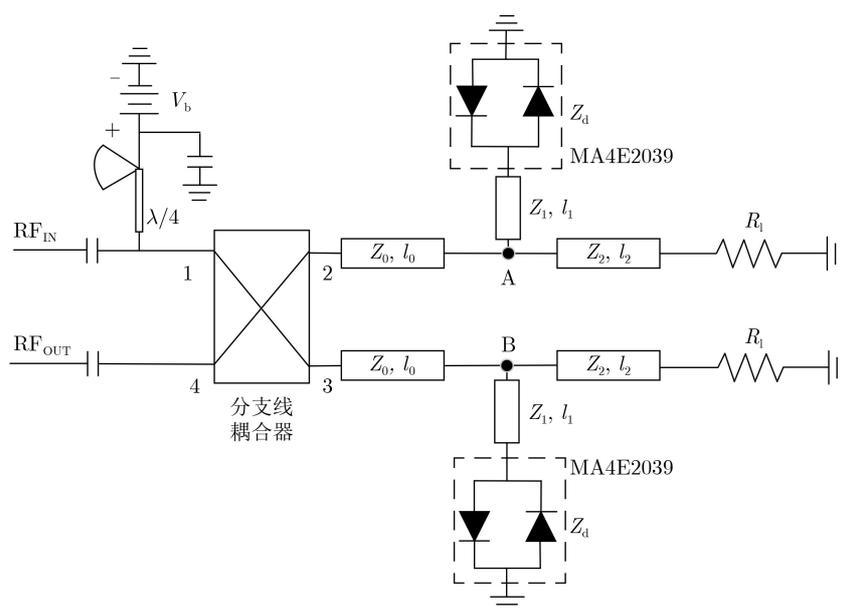
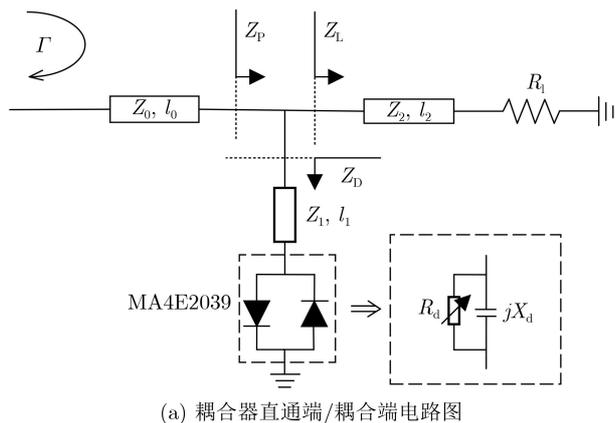
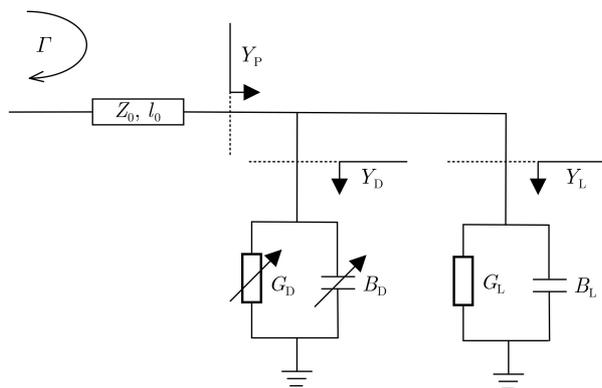


图1 预失真电路原理图



(a) 耦合器直通端/耦合端电路图



(b) 耦合器直通端/耦合端等效电路图

图2 耦合器直通端/耦合端电路图及等效电路图

示, 为方便电路分析将反并联二极管MA4E2039阻抗等效为 $Z_d = R_d + jX_d$ , 二极管通过微带线( $Z_1, l_1$ )连接到主线, 其输入阻抗用 $Z_D$ 表示。负载电阻 $R_L$ 通过微带线( $Z_2, l_2$ )连接到主线, 其输入阻抗用 $Z_L$ 表示, 采用输入阻抗计算公式, 得到式(1)及式(2)

$$Z_D = Z_1 \frac{Z_d + jZ_1 \tan(\beta l_1)}{Z_1 + jZ_d \tan(\beta l_1)} \quad (1)$$

$$Z_L = Z_2 \frac{R_L + jZ_2 \tan(\beta l_2)}{Z_2 + jR_L \tan(\beta l_2)} \quad (2)$$

考虑到 $Z_D$ 和 $Z_L$ 并联连接, 后面采用导纳 $Y_D$ 和 $Y_L$ 分别替代 $Z_D, Z_L$ 进行公式推导, 如式(3)及式(4)所示, 其中 $G_D, B_D$ 值和二极管阻抗 $Z_d$ 、特性阻抗 $Z_1$ 及长度 $l_1$ 有关,  $G_L, B_L$ 值和 $R_L$ 、特性阻抗 $Z_2$ 和长度 $l_2$ 有关。

$$Y_D = G_D + jB_D \quad (3)$$

$$Y_L = G_L + jB_L \quad (4)$$

这样耦合器直通端/耦合端等效电路图2(a)可以用图2(b)代替, 耦合器端口2和端口3的反射系数均可由式(6)表示。由于由端口2和端口3反射的信号在端口4叠加输出, 所以整个预失真电路的传输特性完全由式(6)所示的反射系数决定。

$$G_P = (G_D + jB_D) + (G_L + jB_L) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Gamma &= \frac{Z_P - Z_0}{Z_P + Z_0} = \frac{G_0 - G_P}{G_0 + G_P} \\ &= \frac{(G_0 - G_D - G_L) - j(B_D + B_L)}{(G_0 - G_D - G_L) + j(B_D + B_L)} \end{aligned} \quad (6)$$

通过以上分析可见, 影响预失真电路传输特性的关键参数包括以下4类:

- (1) 二极管阻抗 $Z_d$ ;
- (2) 微带线( $Z_1, l_1$ )的特性阻抗 $Z_1$ 和长度 $l_1$ ;
- (3) 负载电阻 $R_L$ ;
- (4) 微带线( $Z_2, l_2$ )的特性阻抗 $Z_2$ 和长度 $l_2$ 。

在产品阶段可通过优化以上4类变量来实现所需预失真电路的传输特性, 包括增益及相位扩张、增益平坦度等。其中(2)~(4)类变量在设计过程中确定, 电路调试过程不可更改。而二极管阻抗 $Z_d$ 可通过调试阶段调整二极管偏置电压实现, 因此该电路加工后可调试变量少, 想要实现电路设计指标, 需要对电路进行精确设计仿真。

### 3 肖特基二极管模型建立

通过预失真电路分析可知, 肖特基二极管通过自身在电路中的阻抗来影响预失真电路的传输特性, 因此二极管的电路模型对于仿真精确度有着重要影响。常用的二极管模型包括等效电路模型及3维全波仿真模型。两种方法都需要对二极管结构及工艺有着深刻理解。预失真电路中用到的二极管为Macom公司生产的梁氏引线反并联肖特基二极管MA4E2039, 该二极管具有较小串联电路及较低寄生电容, 截止频率可达到110 GHz, 可满足毫米波预失真电路使用要求。

MA4E2039由两个二极管反并联实现, 采用平面二极管结构, 单个管芯的结构截面图如图3(a)所示, 用于预失真电路的肖特基二极管主要利用其阳极金属和外延层半导体接触形成的肖特基势垒结, 该结主要包含结电阻 $R_j$ 及结电容 $C_j$ , 也是产生非线性关键部分。除此之外, 应用到毫米波的二极管模型还应包括由结构、封装及安装方式带来的寄生参数, 包括阳极金属和焊盘之间的寄生电容 $C_{fp}$ 、空气桥结构引入的寄生电感 $L_f$ 和电阻 $R_{fg}$ 、阳极焊盘和阴极焊盘之间在空气部分寄生电容 $C_{pa}$ 和在衬底部分中的寄生电容 $C_{ps}$ 。同时二极管串联电阻 $R_s$ 由 $R_{fg}, R_{spd}, R_{con}$ 三者共同决定。梁氏引线肖特基二极管一般采用焊接或者粘接的方式和电路其他部分产生电连接, 这会引入安装焊盘电容 $C_{p1}$ 和 $C_{p2}$ 。综上所述, 考虑到二极管本征电路及毫米波段的寄生效应, 得到如图3(b)所示适用于毫米波应用的肖特基二极管等效电路模型。

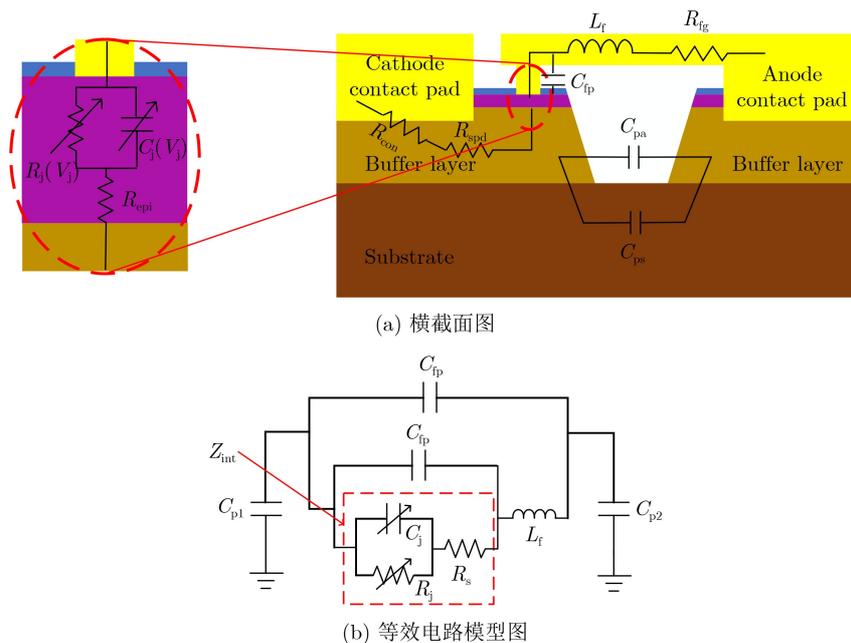


图3 梁氏引线肖特基二极管横截面图及等效电路模型

肖特基二极管的模型分为本征部分及寄生部分，本征部分模型采用二极管spice模型，一般包含  $E_G$ ,  $X_{TI}$ ,  $K_F$ ,  $A_F$ ,  $F_C$ ,  $I_S$ ,  $R_S$ ,  $N$ ,  $C_{j0}$ ,  $V_J$ ,  $M$ ,  $V_B$ ,  $I_{BV}$ ,  $T_T$  等14项模型参数。实际上，二极管模型是由器件不同工作区域的方程组组成的。其中  $E_G$ ,  $X_{TI}$ ,  $K_F$ ,  $A_F$ ,  $F_C$  等5项参数可以直接从工艺过程及器件材料中获得。 $I_S$ ,  $R_S$ ,  $N$  等3项参数由二极管工作于正偏状态下的正偏电压和电流特性得到。 $C_{j0}$ ,  $V_J$ ,  $M$  等3项模型参数由结电容和反偏电压特性得到。 $V_B$ ,  $I_{BV}$  等2项参数由器件反向击穿I-V特性曲线获得。 $T_T$  为反映器件反向恢复时间的参数。本征部分的参数可在直流及低频下测量并计算获得。表1为MA4E2039单个二极管的本征模型参数。

二极管寄生部分模型参数包括寄生电容  $C_{fp}$ ,  $C_{pp}$ , 寄生电感  $L_f$ , 以及考虑安装焊盘引入的寄生电容  $C_{p1}$  和  $C_{p2}$ , 这部分寄生参数需要在工作波段进行测试并采用微波网络分析方法计算获得。为了获得二极管真实S参数，设计并加工了TRL校准件。获取二极管寄生模型参数的具体过程如下：

(1) 设计并加工包含直通、反射及传输线的TRL校准件及安装肖特基二极管的实际电路；

(2) 对二极管实际电路中的二极管焊盘采用有限元分析软件进行仿真，获取焊盘部分的S参数，并将S参数转换为传输参数，和二极管本征部分叠加二极管寄生电容仿真获得的S参数转换成的传输参数进行级联获取整个二极管实际电路的S参数；

(3) 通过TRL校准并测试实际二极管电路的S参数，获得去嵌入射频接头、微带过渡等影响的二极管不同偏置电压下真实S参数；

表1 MA4E2039单个二极管本征模型关键参数

参数	单位	含义	值
$I_S$	A	反向饱和电流	9.5e-14
$R_S$	$\Omega$	串联电阻	5.1
$N$	-	发射系数	1.16
$C_{j0}$	pF	零偏结电容	0.025
$M$	-	分级系数	0.5
$E_G$	eV	能带宽度	1.43
$F_C$	-	正偏耗尽层电容系数	0.5
$T_T$	s	渡越时间	1e-11
$V_J$	V	结电势	0.7
$B_V$	V	反向击穿电压	7
$I_{BV}$	A	反向击穿电压下电流	1e-5
$X_{TI}$	-	饱和电流温度系数	2

(4) 通过测得的真实二极管S参数，对包含本征部分及寄生部分的二极管模型进行修正，以其最大范围内逼近测试结果。

通过以上方法最终获得可用于预失真电路的肖特基二极管精确模型。

#### 4 预失真电路精确仿真

预失真电路实际使用过程中级联在行波管功率放大器(TWTA)前端，理想预失真电路产生的增益及相位扩张和行波管产生的增益及相位压缩正好相反，补偿了行波管的非线性，使其总体上呈现出线性特征。在获得肖特基二极管仿真模型后，预失真电路的精确仿真过程分以下两步进行：(1)根据行波管增益及相位特性获取理想预失真电路特性曲

线；(2)通过关键参数优化预失真电路特性曲线，使其逼近理想预失真电路特性曲线。

### (1) 获取理想预失真电路特性

研究中所用TWTA饱和功率为65 W，饱和输入功率为-3.5 dBm。其增益及相位压缩特性如图4(a)所示，通过仿真获得如图4(b)所示理想预失真电路的增益及相位扩张特性，最终两者级联后的增益及相位特性如图4(c)所示，可见经过线性化后整体的放大器的增益压缩小于等于2.6 dB，相位压缩小于等于10°。

### (2) 结合关键参数优化预失真电路特性

将第3节得到的二极管模型带入预失真电路进行仿真，并对影响预失真电路特性的关键参数进行优化来使得仿真结果尽量逼近理想预失真电路特性。其中可供优化的变量包括：二极管偏置电压 $V_b$ 、微带线( $Z_1, l_1$ )的特性阻抗 $Z_1$ 和长度 $l_1$ ，负载电阻 $R_1$ 、微带线( $Z_2, l_2$ )的特性阻抗 $Z_2$ 和长度 $l_2$ 等6个变量。图5仅展示了微带线( $Z_1, l_1$ )长度 $L$ 及宽度 $W$ 对仿真结果的影响，可见 $W$ 固定为0.635 mm时， $L$ 从0.625 mm到0.889 mm逐渐变大时，增益扩张也随之变大，扩张量变化近5 dB，而相位扩张随着 $L$ 变大基本保持不变。当 $L$ 固定为0.762 mm时， $W$ 从0.508 mm到0.762 mm逐渐变大时，增益扩张和相位扩张均变大，其中增益变化5 dB，相位变化约30°。

通过同样仿真方法对二极管偏置电压 $V_b$ 、负载电阻 $R_1$ 、微带线( $Z_2, l_2$ )的长度 $L$ 及宽度 $W$ 等其余4个变量对扩张量的影响也进行分析。二极管偏置电压 $V_b$ 从1.68 V逐渐变大到1.82 V时，增益扩张的起翘点会往功率大的方向偏移，增益扩张变小约1 dB，相位扩张变大约10°。负载电阻 $R_1$ 从380  $\Omega$ 逐渐变大到420  $\Omega$ 时，增益扩张变小约0.5 dB，相位扩张变大约10°。微带线( $Z_2, l_2$ )的长度 $L$ 从1.35 mm逐渐变大到1.65 mm，增益扩张变大约6 dB，相位扩张变大约40°。微带线( $Z_2, l_2$ )的长度 $W$ 从0.18 mm逐渐变大到0.33 mm，增益扩张变大基本不变，相位扩张变大约4°。

针对预失真电路的增益及相位扩张的目标值，对影响扩张量的6个参数偏置电压 $V_b$ 、负载电阻 $R_1$ 、微带线( $Z_1, l_1$ )长度 $L$ 及宽度 $W$ 、微带线( $Z_2, l_2$ )的长度 $L$ 及宽度 $W$ 在一定范围内遍历仿真，最终选择的参数如下：微带线( $Z_1, l_1$ )长度的 $L$ 及宽度 $W$ 分别为0.762 mm和0.635 mm、偏置电压 $V_b$ 为1.75 V、负载电阻 $R_1$ 为400  $\Omega$ 、微带线( $Z_2, l_2$ )的长度 $L$ 及宽度 $W$ 分别为1.524 mm和0.242 mm。最终在器件和版图联合仿真中获得中心频率20.7 GHz且 $V_b$ 为1.75 V时获得增益扩张2.86 dB及相位扩张34.0°的仿真结果。此时输入功率为3.5 dBm，饱和增益为-7.96 dB，小信号增益为-10.82 dB。仿真结果如图6所示。

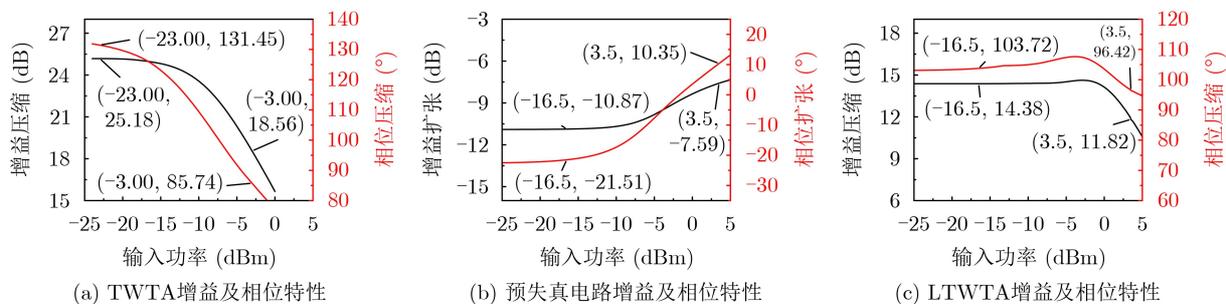


图4 TWTA及模拟预失真增益及相位特性

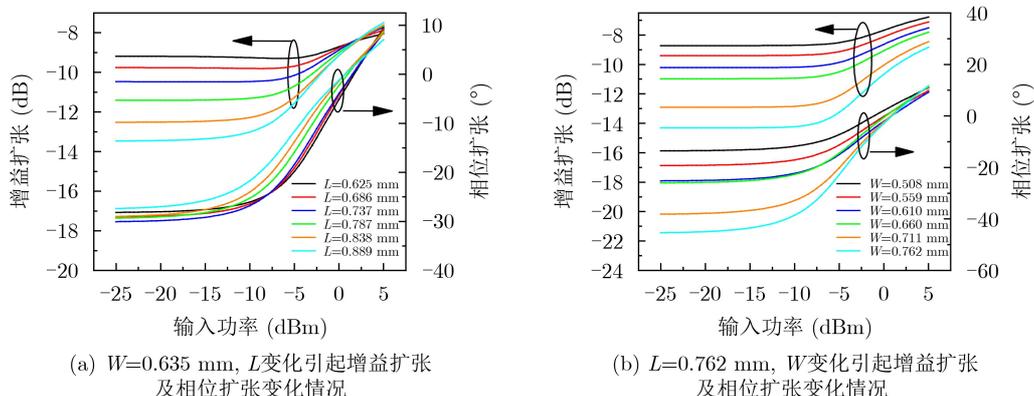


图5 微带线( $Z_1, l_1$ )长度 $L$ 及宽度 $W$ 对仿真结果的影响

### 5 测试结果

为了满足卫星系统小型化、轻量化应用需求，实际加工的预失真电路采用0.254 mm厚介电常数为9.9的氧化铝陶瓷基板，微带线结构为NiCr/Ni/Au，总体厚度约7 μm，电阻采用方阻为100 Ω的TiN薄膜。接地由陶瓷基板上金属化通孔实现，通孔电阻不超过50 mΩ。机壳为可伐镀金材质，采用2.92-K的射频接头。对微组装后的电路采用R&S矢量网络分析仪RAV40进行测试，测试前对矢量网络分析仪进行了SOLT校准。二极管偏置电压 $V_d$ 为设置为1.75 V。测试结果表明电路在中心频点20.7 GHz实现增益扩张2.81 dB，相位扩张34.80°，带内饱和和增益平坦度及小信号增益平坦度分别为0.59 dB及1.03 dB。因为该电路采用输入输出完全对称的拓扑结构，其输入输出反射系数一致，且低于-13 dB。矢量网络分析仪实际测试结果如图7所示：

从频率、输入功率、增益及相位扩张、增益平

坦度等7个指标对比仿真数据和测试数据，发现饱和和输入功率、增益扩张、相位扩张、等指标仿真和实际测试数据差异均小于15%，吻合度较高。综合来看，该仿真方法能够用于指导模拟预失真电路设计，大幅提高产品开发周期。

整个预失真电路(含射频输入输出接头)尺寸约为4.85 cm×1.7 cm，符合小型化要求，如图8。整个电路按照设计值加工组装，未采用任何调试手段即实现了设计目标，大大简化了生产过程，非常适合批量生产。

对采用以上设计方法设计加工的预失真电路级联TWTA进行测试，搭建的测试平台如图9所示。采用R&S矢量网络分析仪RAV40测试其增益及相位特性，采用Keysight频谱分析仪N9030A测试3阶交调。模拟预失真输出功率较小，在模拟预失真后级联低噪声放大器及压控衰减器以匹配TWTA输入功率。低噪声放大器在20.2~21.2 GHz  $P_{1\text{ dB}}$ 为18 dBm，低噪放及压控衰减器增益平坦度均低于1.0 dB，保

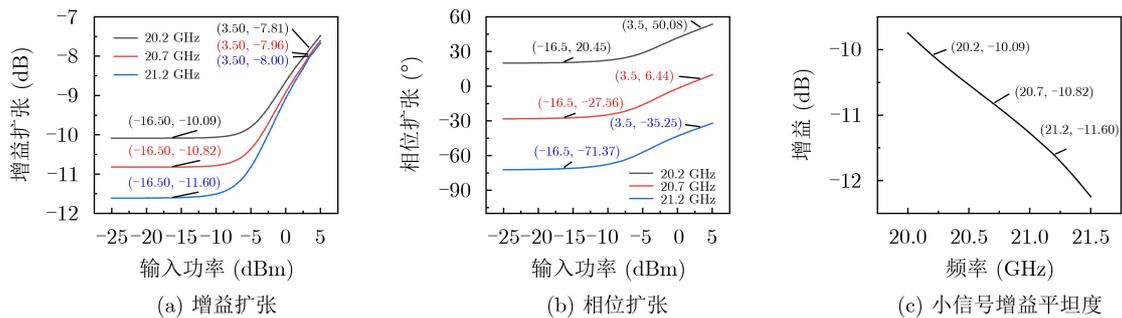


图6 预失真电路增益及相位扩张、增益平坦度仿真结果

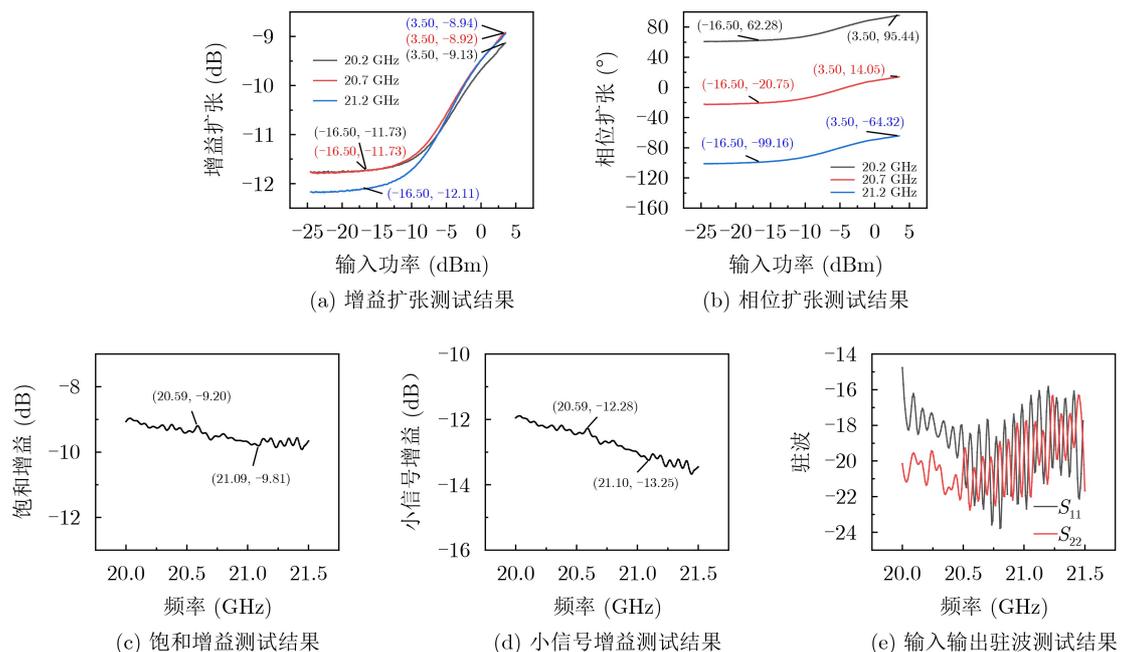


图7 预失真电路增益及相位扩张测试结果

证其接入系统后能够将TWTA推动至饱和工作状态且不影响系统本身非线性及增益平坦度,模拟预失真级联TWTA后增益及相位测试结果如表2所示。

模拟预失真级联TWTA后增益及相位随着输

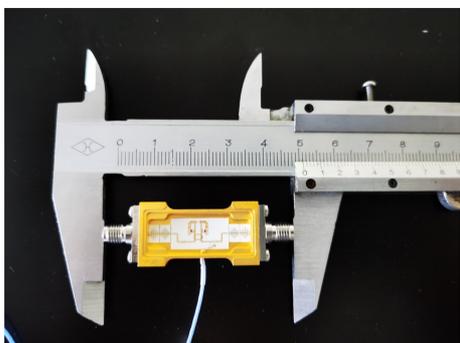


图8 预失真电路实物照片

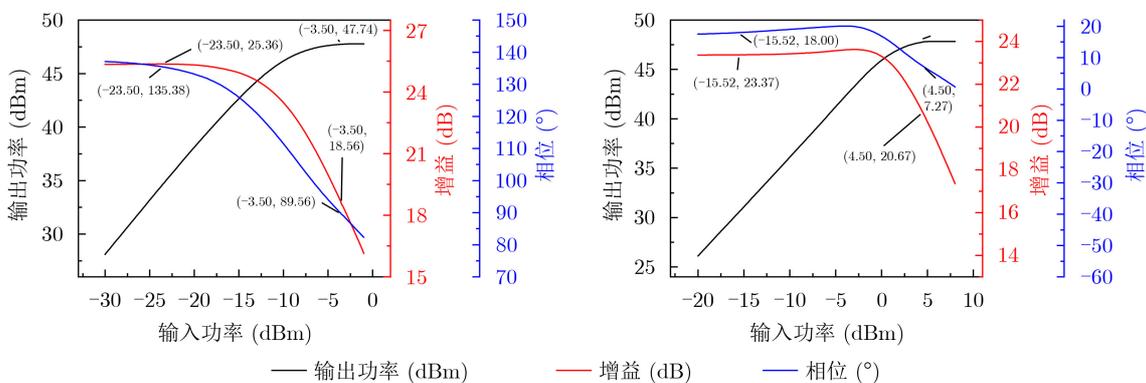


图9 模拟预失真级联TWTA后测试平台

入功率变化情况如图10所示,由测试结果可见,模拟预失真级联TWTA后增益压缩由原来6.8 dB减小到2.7 dB,相位压缩由原来45.8°减小到10.7°。3阶交调测试结果如图11所示(频谱分析仪显示结果),模拟预失真级联TWTA后3阶交调均有很大改善,输入功率回退5 dB时3阶交调由原来14 dBc提高到24 dBc,并且输入功率回退越多,3阶交调指标改善越大。

### 6 结论

本文提出了一种用于空间行波管模拟预失真电路精确设计和仿真的方法,该方法需要分析肖特基二极管结构后建立其等效电路模型,通过TRL校准件获取肖特基二极管S参数并进行微波网络分析方法计算获得二极管仿真模型中的各参数,最后利用获得的完整二极管模型进行反射式模拟预失真电路设计。对采用该方法设计加工的产品进行加工测试,结果表明在整个工作频段内实测结果和仿真结果偏离度小于15%,且将预失真电路和行波管放大器级联后测试,增益压缩由原来6.7 dB减小到2.7 dB,相位压缩由原来45.8°减小到10.7°,输入功率回退4 dB时3阶交调由原来14 dBc提高到23.77 dBc。可见采用该方法设计加工的模拟预失真电路不需要额外调试,可大幅提高产品开发周期,对行波管模拟预失真电路的设计具有重要指导意义。



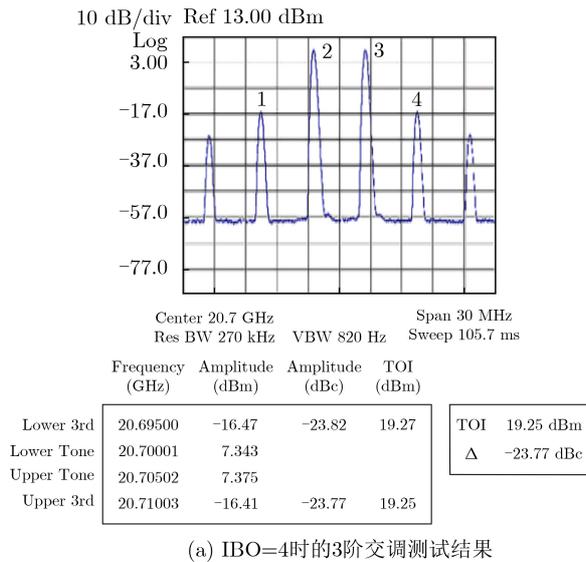
(a) TWTA相移及增益压缩特性

(b) LTWTA相移及增益压缩特性

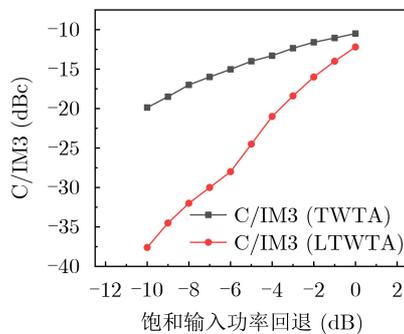
图10 模拟预失真级联TWTA后增益及相位测试结果

表2 预失真电路仿真及实测指标比对

项目	20.2 GHz		20.7 GHz		21.2 GHz		偏差(%)
	仿真	实测	仿真	实测	仿真	实测	
饱和输入功率(dBm)	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	/
直流电压(V)	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	/
增益扩张(dB)	2.28	2.60	2.86	2.81	3.60	3.17	≤12
相位扩张(°)	29.63	33.16	34.00	34.80	36.12	34.84	≤12
饱和增益(dB)	-7.81	-9.13	-7.96	-8.92	-8.00	-8.94	≤15
小信号增益(dB)	-10.09	-11.73	-10.82	-11.73	-11.60	-12.11	≤13



(a) IBO=4时的3阶交调测试结果



(b) 模拟预失真级联TWTA后3阶交调随输入回退变化

图 11 模拟预失真级联TWTA后3阶交调测试结果

### 参考文献

- [1] KATZ A, GRAY R, and DORVAL R. Linearizers for Q- and V-band TWTA[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018, 65(6): 2371–2377. doi: 10.1109/TED.2018.2806199.
- [2] KENNINGTON P B. High-Linearity RF Amplifier Design[M]. Boston: Artech House, 2000: 33.
- [3] KATZ A. TWTA linearization[J]. *Microwave Journal*, 1996, 39(4): 78, 80, 85–86, 88–90.
- [4] VILLEMAZET J F, YAH I, LEFEBVRE B, et al. New Ka-band analog predistortion linearizer allowing a 2.9GHz instantaneous wideband satellite operation[C]. 2017 12th European Microwave Integrated Circuits Conference, Nuremberg, Germany, 2017: 302–305. doi: 10.23919/EuMIC.2017.8230718.
- [5] 刘洁, 胡波雄, 王刚, 等. 一种两支路行波管预失真线性化电路[J]. *电子测量技术*, 2014, 37(4): 12–14, 32. doi: 10.19651/j.cnki.emt.2014.04.004.
- [6] 周斌, 黄微波, 范培云. 一种应用于Ka频段空间行波管放大器的宽带线性化器[J]. *真空电子技术*, 2014(3): 65–67. doi: 10.3969/j.issn.1002-8935.2014.03.019.
- [7] 鲍鑫, 张德伟, 邓海林, 等. 新型Ka波段模拟预失真线性化器[J]. *信息工程大学学报*, 2018, 19(3): 297–300. doi: 10.3969/j.issn.1671-0673.2018.03.008.
- [8] 熊杰, 方龔, 辜文婷, 等. 一种星载Ka频段宽带线性化器设计[J]. *空间电子技术*, 2019, 16(4): 12–16. doi: 10.3969/j.issn.1674-7135.2019.04.003.
- [9] 李宝建, 瞿波, 夏雷, 等. Q波段宽频带线性化器设计[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33(2): 023004. doi: 10.11884/HPLPB202133.200206.
- [10] 刘正, 刘刚, 李琦. 小型化星载模拟预失真器的研制[J]. *中国空间科学技术*, 2019, 39(5): 55–60. doi: 10.16708/j.cnki.1000-758X.2019.0040.
- [11] 周丽, 王超杰, 揭海, 等. 超宽带桥T型模拟线性化器设计[J]. *电子科技大学学报*, 2020, 49(1): 98–101. doi: 10.12178/1001-0548.2019044.
- [12] 谢小强, 吴健苇, 穆继超, 等. 一种基于共面线的毫米波宽带预失真线性化技术[J]. *上海航天*, 2018, 35(4): 54–60. doi: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.04.009.

- on coplanar line[J]. *Aerospace Shanghai*, 2018, 35(4): 54–60. doi: [10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.04.009](https://doi.org/10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.04.009).
- [13] 邓海林, 陈会超, 周东方, 等. 一种补偿量可调的反射式预失真线性化器[J]. *真空科学与技术学报*, 2018, 38(8): 657–662. doi: [10.13922/j.cnki.cjovst.2018.08.03](https://doi.org/10.13922/j.cnki.cjovst.2018.08.03).
- DENG Hailin, CHEN Huichao, ZHOU Dongfang, *et al.* Design and evaluation of modified reflective predistortion linearizer with tunable compensation[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2018, 38(8): 657–662. doi: [10.13922/j.cnki.cjovst.2018.08.03](https://doi.org/10.13922/j.cnki.cjovst.2018.08.03).
- [14] 邓海林, 张德伟, 白维达, 等. 一种行波管用毫米波射频预失真线性化器[J]. *电子学报*, 2017, 45(7): 1784–1791. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2017.07.032](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2017.07.032).
- DENG Hailin, ZHANG Dewei, BAI Weida, *et al.* A millimeter-wave RF predistortion linearizer for travelling wave tube amplifier[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2017, 45(7): 1784–1791. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2017.07.032](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2017.07.032).
- 刘 婷: 女, 助理研究员, 研究方向为行波管线性化技术.  
苏小保: 男, 研究员, 研究方向为长寿命高可靠高效率行波管.  
王 刚: 男, 研究员, 研究方向为微波电子信息系统与电路.  
赵 斌: 男, 研究员, 研究方向为微波电子信息系统与电路.
- 责任编辑: 马秀强