

## Ka 波段宽频带高线性空间行波管研制

黄明光<sup>①</sup> 朱丹<sup>②</sup> 何俊<sup>\*①</sup> 郝广凯<sup>②</sup> 李海强<sup>①</sup> 赵建东<sup>①</sup> 李现霞<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(上海航天技术研究院 804 所 上海 201109)

**摘 要:** 该文对 Ka 波段空间行波管宽频带、高线性、高效率的慢波系统进行设计, 通过动态渐变技术实现了低相位失真、高效率的指标要求。在此设计基础上研制的 Ka 波段空间行波管实现了宽频带(25~27 GHz)、低非线性失真(非线性相移  $\leq 40^\circ$ , AM/PM  $\leq 2.86^\circ/\text{dB}$ , 三阶交调  $\geq 10.39\text{ dBc}$ )、高效率(总效率  $\geq 51.7\%$ )。经数传系统测试, 误码  $P_e$  优于  $10^{-6}$  的情况下  $C/N_0$  有 2.4 dB 裕度, 满足了卫星数传系统对多通道并行传输方案的工作需求。

**关键词:** 空间行波管; Ka 波段; 宽频带; 高线性度

中图分类号: TN124

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)11-2777-05

DOI: 10.11999/JEIT161267

## Development of Ka-band Broadband, High-linearity Space Traveling Wave Tube

HUANG Mingguang<sup>①</sup> ZHU Dan<sup>②</sup> HE Jun<sup>①</sup> HAO Guangkai<sup>②</sup>

LI Haiqiang<sup>①</sup> ZHAO Jiandong<sup>①</sup> LI Xianxia<sup>①</sup>

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

<sup>②</sup>(Shanghai Academy of Spaceflight Technology 804, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** In this paper, the design of Ka-band broadband, high-linearity and high-efficiency slow-wave system is proposed for Space Traveling Wave Tube (TWT). The dynamic phase-shifting technique is used to achieve low phase distortion and high efficiency. Based on this design, the Ka-band TWT is developed to realize wideband (25~27 GHz), low nonlinear distortion (non-linear phase shift  $\leq 40^\circ$ , AM / PM  $\leq 2.86^\circ/\text{dB}$ , third order intermodulation  $\geq 10.39\text{ dBc}$ ), high efficiency (total efficiency  $\geq 51.7\%$ ). By the digital transmission system test, the error code  $P_e$  is better than  $10^{-6}$  in the case of  $C/N_0$  2.4 dB margin, it meets the satellite data transmission system for multi-channel parallel transmission program work requirements.

**Key words:** Space Traveling Wave Tube (TWT); Ka band; Wide bandwidth; High linearity

### 1 引言

Ka 波段的毫米波通信具有瞬时带宽宽、系统结构小、重量轻、波束方向好和保密性能高的特点。其中, 高效率 Ka 波段空间行波管放大器因其高可靠、高效率等特点而广泛应用于各类卫星中, 是通信微波链路中的关键组件之一。空间行波管放大器是用于卫星通信系统的微波放大组件, 它能把微弱的通信信号放大, 以增强通信质量、增加通信距离, 具有高速数据传输能力的中继卫星的中继链路就是通过微波通信来实现的。Ka 频段的毫米波通信具有瞬时带宽宽、通信容量大、传输速率高、系统结构小、重量轻、波束方向好和保密性能高的特点, 因

此 Ka 频段是卫星通信的主要频段。其中, 作为中继卫星的末级功率放大器的毫米波空间行波管放大器是中继链路系统中核心的关键器件。

目前, 随着卫星通信技术发展和通信需求的不断增加, 卫星数传系统为了提高数传速率需要拓宽单通道的调制带宽, 同时采用多通道并行传输的方案。这就提出了宽频带、高线性、高效率空间行波管的研制需求。常用的提高行波管线性度的方法有以下 4 种: (1)功率回退技术<sup>[1-3]</sup>: 通过回退使得行波管工作在线性区改善线性度; (2)预失真线性化器<sup>[2,4]</sup>: 在行波管前端加一个线性化器来改变行波管的 AM/PM 特性; (3)交调信号和谐波注入技术<sup>[5-7]</sup>: 通过信号注入(包括注入二次谐波, 注入三阶互调和同时注入二次谐波和三阶互调)来压缩行波管中的三阶互调; (4)行波管非线性参数的优化设计<sup>[8-10]</sup>: 通过优化慢波结构参数来提高线性度。改善线性度的前 3 种方法, 适用于窄带(工作带宽在几百 MHz)

收稿日期: 2016-11-24; 改回日期: 2017-08-29; 网络出版: 2017-09-13

\*通信作者: 何俊 skyboyhj@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61401430)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61401430)

工作条件,难以满足宽频带(工作带宽 $\geq 1000$  MHz)的工作需求。因此,本文结合螺旋线行波管工作频带宽的特点,采用动态速度渐变技术对相互作用效率和非线性失真进行综合设计,满足卫星数传系统多通道并行传输的需求。

## 2 宽频带、高线性、高效率行波管的设计

卫星数传系统要求空间行波管不但效率高,而且还要有良好的线性。非线性失真是空间行波管最重要的性能指标之一。在行波管非线性区,经过行波管传输的信号产生失真,非线性失真的参量有相位失真、AM/PM失真等。当行波管工作在非线性区域时,经过行波管传输的输出信号相对于输入信号的绝对相移量随频率成非线性变化的特性。信号从输入端传输到输出端,放大器对各个频点的时延不同导致了相位失真。

AM/PM转换是行波管的另一个重要参量,反映了高频激励的变化所引起的行波管内相移量的变化。由于激励信号的增大,引起从电子注拉出能量的增大,从而使电子注速度下降。随着电子注速度的下降,线路上的高频波速度下降,使行波管的相移量增大。通常用相移量与输入功率变化的曲线的斜率来定义:

$$\text{AM/PM} = \frac{\Delta\theta}{\Delta P_{\text{in}}} \quad (1)$$

提高慢波系统的相互作用效率是提高空间行波管效率的一个方面,同时空间行波管的线性也与慢波系统有关。所以,慢波系统的设计是空间行波管设计过程中的一个重要环节。采用动态速度渐变技术(DVT)可以有效地提高慢波系统的相互作用效率,同时降低空间行波管的非线性失真。

动态速度渐变螺旋线慢波结构通常如图1所示,该电路由输入段 $L_1$ 、中间段 $L_2$ 和输出段组成,输出段又分为动态速度渐变段 $L_3$ 和均匀输出段 $L_4$ ,各段的螺距分别为 $P_1, P_2, P_3, P_4$ 和 $P_5$ 。输入端 $L_1$ 用来建立增长波,提供一个群聚良好的电子注,通过确定输入段长度,应该使输入段获得至少20 dB

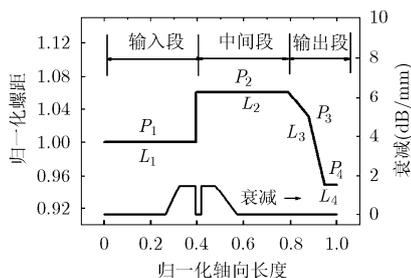


图1 Ka波段空间行波管的螺距分布图

的增益以保证获得增长波。中间段 $L_2$ 是相速增加段,起到相位补偿的作用。为了减小行波管的相位失真,相速增加段的参数将是最有效的调节参数,并且适当增加该段的长度和螺距都将有助于减小相位失真,实现行波管的低线性失真设计。动态速度渐变段 $L_3$ 和均匀输出段 $L_4$ ,实现高频场与电子注的再同步,在更长相互作用距离上进行有效的能量交换,以提高整个管子的电子效率。通过上述各段相互作用段螺距和长度的优化设计,兼顾各相互作用段对行波管电子效率和相位失真的影响,实现行波管高效率、低线性失真的综合设计。

随着计算机模拟仿真技术的发展,利用计算机模拟可以快速地完成双渐变螺旋慢波系统的设计。本文根据动态速度渐变的设计思路和技术,利用中国科学院电子学研究所自主研发的 IESTWT 软件对动态速度渐变慢波系统的相互作用效率和输出功率进行了模拟,完成了Ka波段50 W空间行波管的慢波系统的优化设计。图1给出了Ka波段50 W空间行波管的螺距分布情况,相互作用区域分为3段:输入段(螺距值为 $P_1$ )、中间段(螺距值为 $P_2$ )、输出段(螺距值由 $P_2$ 渐变至 $P_3$ ,再渐变至 $P_4$ )。

图2给出了中心频点26 GHz处,Ka波段50 W空间行波管的功率、增益、电子效率模拟结果。从图中可知,输出功率为57.4 W,增益为52.5,电子效率为15.1%。图3给出了该管在26 GHz处的AM/AM, AM/PM曲线,从AM/AM曲线可知饱和点处的相移失真为 $30.1^\circ$ ,从AM/PM曲线可知最大值为 $3.5^\circ/\text{dB}$ 。图4给出了工作频带25~27 GHz内,行波管主要性能参数的模拟结果:输出功率 $\geq 55.5$  W,增益 $\geq 52.2$  dB,电子效率 $\geq 14.5\%$ 。

## 3 行波管性能测试及系统联试结果

按照计算机模拟优化的设计方案,研制并完成了Ka波段50 W空间行波管。图5给出了在2 GHz的工作频带内,行波管输出功率、增益、电子效率及整管效率的测试结果。从测试结果可知,25~27

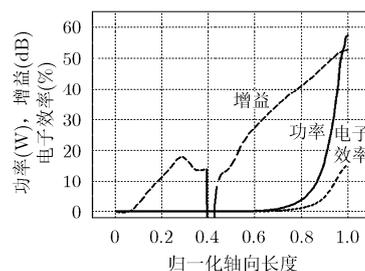


图2 Ka波段50 W空间行波管的功率、增益、电子效率模拟结果

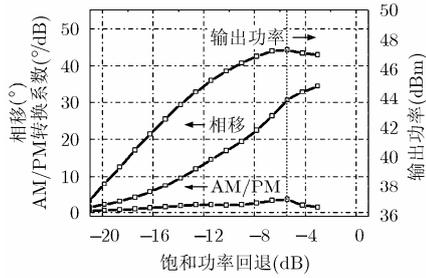


图 3 Ka 波段 50 W 空间行波管的 AM/AM, AM/PM 模拟结果

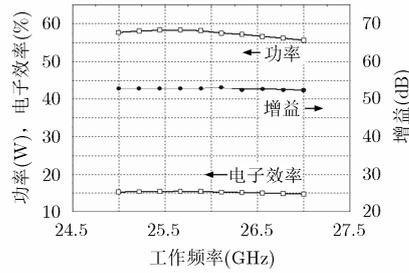


图 4 Ka 波段 50 W 空间行波管主要性能参数随频率的变化情况

GHz 频带范围内，输出功率  $\geq 53.8$  W、饱和增益  $\geq 50.8$  dB、电子效率  $\geq 14.1\%$ 、整管效率  $\geq 51.7\%$ 。该行波管在中心频点处的相移测试曲线如图 6 所示，从饱和点回退 0 dB, -3 dB, -6 dB, -9 dB, -15 dB 的相移值分别为  $30.45^\circ, 24.30^\circ, 16.98^\circ, 11.01^\circ, 2.92^\circ$ ；相应的 AM/PM 值分别为  $2.07^\circ/\text{dB}, 2.17^\circ/\text{dB}, 2.16^\circ/\text{dB}, 1.34^\circ/\text{dB}, 0.67^\circ/\text{dB}$ 。工作

带宽内主要频点 25 GHz, 26 GHz, 27 GHz 处的相移和 AM/PM 测试结果见表 1，工作频段内的相移值  $\leq 39.42^\circ$ , AM/PM  $\leq 2.86^\circ/\text{dB}$ 。表 2 给出了工作带宽内的三阶交调测试结果，三阶交调  $\geq 10.39$  dBc。法国 THALES 公司研制的 Ka 波段行波管 TH4626<sup>[11]</sup>工作带宽为 0.5~1.0 GHz，总效率  $\geq 50\%$ ，相移值  $\leq 50^\circ$ 。因此，本方案设计的行波管电

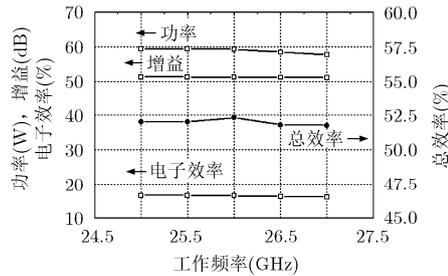


图 5 工作频带内，行波管主要性能参数的测试结果

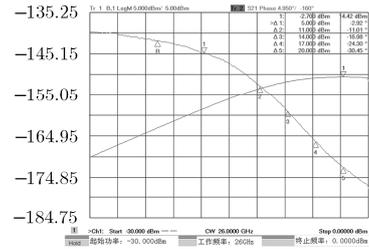


图 6 中心频率 26 GHz 处，相移测试结果图

表 1 相移及 AM/PM 测试值

饱和点回退(dB)	相移(°)				AM/PM(°/dB)			
	指标值	25 GHz	26 GHz	27 GHz	指标值	25 GHz	26 GHz	27 GHz
0	$\leq 48$	22.36	30.45	39.42	$\leq 4.0$	1.75	2.07	2.44
-3	$\leq 36$	17.12	24.30	32.10	$\leq 3.5$	1.61	2.17	2.86
-6	$\leq 26$	12.28	16.98	23.53	$\leq 3.0$	1.67	2.16	2.72
-9	$\leq 20$	7.26	11.01	15.37	$\leq 2.5$	0.95	1.34	1.69
-15	$\leq 5$	1.57	2.92	5.24	$\leq 1.5$	0.31	0.67	1.05
-20	$\leq 0$	0	0	0	-	-	-	-

表 2 三阶交调测试值

饱和点回退(dB)	三阶交调(dBc)			
	指标值	25 GHz	26 GHz	27 GHz
-3	$\geq 10.0$	10.39	10.63	10.39
-4	$\geq 10.5$	11.07	11.06	10.78
-5	$\geq 11.0$	11.68	11.50	11.14
-6	$\geq 11.5$	2.35	12.09	11.64
-9	$\geq 13.5$	14.88	14.35	13.90
-12	$\geq 17.0$	18.28	17.59	17.25

性能指标在带宽、总效率、线性度方面均优于 THALES 的产品。

此行波管与行波管电源集成行波管放大器后，用于卫星数传分系统的现场测试。数传应用分析系统测试框图如图 7 所示。直流电源为 Ka 行波管放大器提供  $29 \text{ V} \pm 1 \text{ V}$  电源；测控设备实时采集行波管电源入口处的电源、发送行波管开关指令，同时实时采集存储行波管的各遥测数据；Ka 数字调制器产生 Ka 频段的 8PSK 调制信号，输出功率能够激励行波管

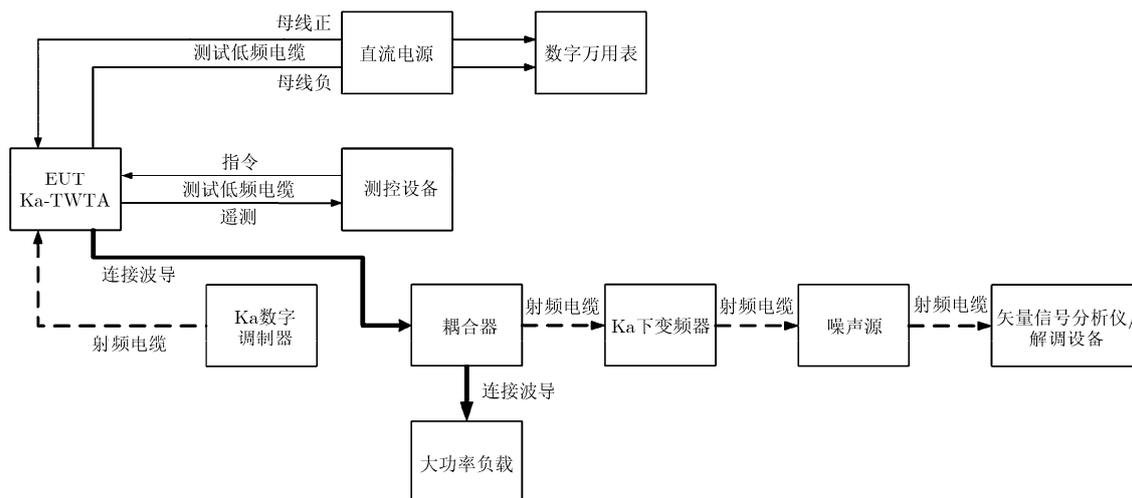


图 7 数传应用分析系统测试框图

饱和状态工作；Ka 下变频器将 Ka 频段的射频调制信号转换为频点 2.0 GHz 的中频调制信号；噪声源用于模拟信道传输中的噪声，将噪声叠加在中频调制信号上；解调设备将中频调制信号转变为基带信号，通过比对 Ka 数字调制器发出的原码信息给出信道传输误码率。

按图 7 连接 Ka 行放、Ka 数字调制器等其余设备并通电；关闭噪声源，用频谱仪测试系统固有噪声功率谱密度  $C$ ；设置噪声源输出噪声功率，用频谱仪测试系统增加额外噪声后的功率谱密度  $N_0$ ，满足  $C/N_0 = 101.4$  dB 后，切换到解调设备测试系统误码；增大噪声源输出噪声功率，当系统误码  $P_e = 6 \times 10^{-7}$  时，切换到频谱仪测试  $N_0$ ，计算出当前  $C/N_0$ 。经测试系统误码率满足应用要求，误码  $P_e$  优于  $10^{-6}$  的情况下  $C/N_0$  有 2.4 dB 裕度，见表 3。

## 4 结论

为满足卫星数传系统多通道并行传输的需求，本文结合螺旋线行波管工作频带宽的特点，采用动态速度渐变技术对相互作用效率和非线性失真进行综合设计。根据设计方案所研制的行波管在 25~27 GHz 频带范围内，输出功率  $\geq 53.8$  W，饱和增益  $\geq 50.8$  dB，电子效率  $\geq 14.1\%$ ，整管效率  $\geq 51.7\%$ 。该行波管具有良好的线性度：饱和点处的相移值  $\leq 39.42^\circ$ ，AM/PM  $\leq 2.86^\circ/\text{dB}$ ，三阶交调  $\geq 10.39$  dBc，优于法国 THALES 公司 Ka 波段行波管 TH4626。此行波管与行波管电源集成行波管放大器后，用于卫星数传分系统的现场测试，测试结果显示：系统误码率满足应用要求，误码  $P_e$  优于  $10^{-6}$  的情况下  $C/N_0$  有 2.4 dB 裕度。

表 3 系统误码率测试记录表

状态	要求	测试值	结论
系统级	优于 $10^{-6}$	误码 $P_e = 0$ ( $C/N_0 \leq 101.4$ dB)	符合
	( $C/N_0 \leq 101.4$ dB)	误码 $P_e = 6 \times 10^{-7}$ ( $C/N_0 \leq 99.0$ dB)	

注：误码率测试时，调制器采用发填充帧的模式

## 参考文献

- [1] GOEBEL D M and ADLER E A. Optimally designed traveling wave tube for operation backed off from saturation [P]. U.S. Patent 59329711999.
- [2] GOEBEL D M, ADLER E A, and MENNINGER W L. Efficient, highly linear traveling wave tube[P]. US. Patent 59428521999.
- [3] ABE D K, LEVUSH B, ANTONSEN T M, et al. Design of a linear C-band helix TWT for digital communications experiments using the CHRISTINE suite of large-signal codes[J]. *IEEE Transactions on Plasmas Science*, 2002, 30(3): 1053-1062. doi: 10.1109/TPS.2002.801635.
- [4] HU X, WANG G, and LUO J R. A type of TWTA predistortion linearizer for space telecommunication applications[C]. *IEEE International Conference on Wireless Communications, Networking and Information Security*, Washington, DC, USA, 2010: 77-79.
- [5] GARY H, NISHIMURA T B, and IWATA N. A highly efficient linearized wide-band CDMA handset power amplifier based on predistortion under various bias

- conditions[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2001, 49(6): 1194–1201. doi: 10.1109/22.925522.
- [6] WOLHLBIER J G, BOOSKE J H, and DOBSON I. Generation and growth rates of nonlinear distortions in a traveling wave tube[J]. *Physics Review E*, 2002, 66(5): 56504. doi: 10.1103/PhysRevE.66.056504.
- [7] WOLHLBIER J G, DOBSON I, and BOOSKE J H. The Multifrequency Spectral Eulerian (MUSE) model of a traveling-wave tube[J]. *IEEE Transactions on Plasmas Science*, 2002, 30(3): 1063–1075. doi: 10.1109/TPS.2002.801603.
- [8] JOO Y D, SINHA A K, and PARK G S. Helix traveling wave tube performance optimization through circuit tapering[C]. The 30th International Conference on Plasmas Science, 2003: 176. doi: 10.1109/PLASMA.2003.1228635.
- [9] LI Li, FENG Jinjun, and CAI Shaolun. Experiment on TWT 3IM suppression using harmonic and IM3 injection[C]. IEEE International Vacuum Electronics Conference, Monterey, CA, USA, 2008: 105–106. doi: 10.1109/IVELEC.2008.4556474.
- [10] TSUTAKI K, YUASA Y, and MORIZUMI Y. Numerical analysis and design for high performance helix traveling wave tubes[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1985, 32(9): 1842–1849. doi: 10.1109/T-ED.1985.22207.
- [11] VGENERON L. Ka band traveling wave tube[OL]. www.thalesgroup.com/components-subsystems, 2010.
- 黄明光: 男, 1965 年生, 研究员, 研究方向为毫米波空间行波管技术研究、小型化毫米波行波管技术研究、高频段新型慢波系统研究。
- 何俊: 男, 1983 年生, 副研究员, 研究方向为毫米波非线性失真理论、高效率行波管、E 波段高效率大功率行波管。