

文章编号: 2095-4980(2023)07-0850-07

## 高通量卫星多波束天线馈电系统 PIM 控制技术

张 蕾, 丁 伟, 吕庆立, 施锦文, 王海林, 周 强

(中国空间技术研究院西安分院, 陕西 西安 710000)

**摘 要:** 介绍了无源互调(PIM)产生的机理和控制方法, 重点研究了高通量卫星多波束天线馈电系统 PIM 控制技术, 通过采用馈电系统高隔离度优化设计、馈源单元法兰面扼流槽设计、馈源阵安装板 PIM 源控制设计、Ka 频段 PIM 试验系统低 PIM 设计等手段, 将某 Ka 频段多波束天线馈电单元的 7 阶 PIM 性能控制在高低温(-60~+100 °C)环境下 $\leq -135$  dBm, 馈源阵 7 阶 PIM 性能控制在常温状态下 $\leq -140$  dBm。产品的实际应用验证了所述 PIM 控制技术的有效性, 在工程问题中起到指导作用。

**关键词:** PIM 控制; 高通量卫星; Ka 频段多波束天线; 馈电系统

中图分类号: TN820.1<sup>+</sup>4; V474

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022206

## PIM control technology for feed chain of multibeam antenna in high throughput satellite

ZHANG Lei, DING Wei, LYU Qingli, SHI Jinwen, WANG Hailin, ZHOU Qiang

(China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an Shaanxi 710000, China)

**Abstract:** Principles of Passive Intermodulation(PIM) production and its control method are introduced. After mainly researching and applying the PIM control technologies for the feed chain of multibeam antenna in high throughput satellite, including optimal design of high isolation of feed system, flange face choke of feed unit, PIM source control of feed array mounting plate, low PIM design of Ka-band PIM test system, etc., a Ka-band multibeam antenna achieves the goals that the 7th order PIM performance of the feed unit is controlled to  $\leq -135$  dBm at temperatures between  $-60$  °C and  $+100$  °C, and the performance of the feed array is controlled to  $\leq -140$  dBm at normal temperature. The application of the product demonstrates the validity of the proposed technology for PIM control, which is of benefit to high performance antenna design.

**Keywords:** PIM control; high throughput satellite; Ka-band multibeam antenna; feed chain

随着通信卫星广域常态覆盖和大通信容量需求, 在宽带通信载荷研制方面, 需要采用多波束天线技术和频率复用技术提高天线扫描性能、馈源输出效率、交叉极化性能、同频波束隔离度和载波干扰比性能, 随之衍生的有效载荷系统的可靠性问题也明显增多, 相应增加了天线研制难度, 其中星载收发共用天线的无源互调(PIM)性能影响尤为突出。

PIM 产物是卫星通信系统中输入信号调谐产生的一种非线性信号分量, 通常由 2 个及以上发射频段载波信号调谐产生的接收频段交调信号, 即使很小功率的交调信号落入接收通道, 仍会对接收通道产生干扰, 造成卫星系统故障甚至失效。

随着我国新一代 Ka 频段高通量通信卫星多波束天线的大量研究和应用, 对馈电系统的超宽带收发共用、大功率容量和紧密布局的性能要求也相应带来了更高的 PIM 风险, 它影响卫星上行接收通信链路, 严重的 PIM 问题甚至会引起接收机损坏, 因此馈电系统 PIM 成为亟待解决的技术问题。本文在简要介绍 PIM 产生机理的基础上, 提出了针对 Ka 频段高通量卫星多波束天线馈电系统的 PIM 控制技术, 并通过试验验证了产品 PIM 控制技术的有效性。

### 1 PIM 产生机理和控制方法

微波和射频通信系统中 PIM 干扰主要来自 2 种无源非线性：接触非线性和材料非线性。接触非线性是指任何具有线性电流/电压行为的接触引起的非线性(松动、氧化和腐蚀金属连接等)；材料非线性是指具有固有非线性导电特性的材料引起的非线性(铁磁材料、碳纤维等)。

金属波导的接触非线性效应可由图 1 说明，图中描述了电流流动的模式和逐渐紧固的金属接合点。当 2 个金属表面松动接触时，接触发生在多个点上，因此具有较大的电流密度；当接触加紧时，出现越来越多的接触点，电流被分散，电流密度减小，因此，PIM 电平随接触面积的增加或输入功率的减小而减小。

材料非线性包括：电介质薄层的隧道贯穿、铁磁效应、接触电容、电场引起线度变化、微放电、电介质击穿、空间充电、离子导电、热离子发射效应等。

PIM 的产生机理十分复杂，单纯通过滤波器无法滤除，只有对工作频率进行合理规划，使落入接收频段的 PIM 阶数尽可能地高，才可以从源头预防 PIM 影响。

在多载波系统中， $N$  阶 PIM 出现的频率为<sup>[1]</sup>：

$$f_{PIM} = N_1 f_1 + N_2 f_2 + \dots + N_n f_n \tag{1}$$

式中： $f_1$  为最低工作频率； $f_n$  为最高工作频率； $N_1, N_2, \dots, N_n$  为互调阶数，为整数。

$$N = |N_1| + |N_2| + \dots + |N_n|$$

由式(1)可知，系统中有大量的互调产物存在，阶数越低，电平越高。经分析，奇次模 PIM 功率电平值通常比相邻偶次模高，因此分析时一般只考虑最低奇次模式。

最低奇次模式出现在 2 个信号频率相差最大的情况下，常采用最低工作频率和最高工作频率进行交调分析。

$$f_{PIM} = N_1 f_1 + N_n f_n \tag{2}$$

此时， $f_{PIM}$  就是落入接收系统的  $N$  阶交调频率。交调阶数为： $N = |N_1| + |N_n|$

由式(2)可以看出，频率规划决定了 PIM 的最低阶数和频率。一般情况下，偶数次交调分量低于临近奇数次交调分量约 20 dB，每提高一奇数阶，交调产物约降低 24 dB，本文关心的是最低奇数阶的交调产物量级。合理的频率规划可以避免低阶 PIM 落入接收频带内，阶数越高，交调信号电平越小。但随着通信卫星频谱资源日渐紧缺，频率规划的难度增大，已不能很好应用以上规则，且载波功率增加使得高阶 PIM 产物的危害增加，这给通信卫星载荷系统 PIM 预防带来障碍。因此，应在产品设计、生产过程中采取有效的 PIM 控制措施，尽可能地降低 PIM 影响。

因为收发信号共用波导通路，在大功率发射信号通过共用通路的情况下，极易产生 PIM 落入接收通道，影响正常工作。因此，需要分析影响波导馈源组件 PIM 性能的关键因素，采取有效控制措施，尽可能地降低 PIM 影响。收发共用波导馈源组件 PIM 控制常用方法有<sup>[2-5]</sup>：

1) 电气设计时避免调谐环节，提高收发信号隔离度和微放电余量

调谐螺钉会破坏波导壁电流分布，且固定时存在焊接或狭缝，会产生非线性，在抗 PIM 设计中避免使用；收发共用波导馈源组件发射通道对接收信号的高抑制能力可以滤除发射前端带来的交调信号，避免其混入接收通道；接收通道对发射信号的高抑制能力可以避免大功率发射信号耦合入接收通道，产生干扰，激发交调信号；微放电，即二次电子倍增放电，是 PIM 产生的机理之一，尤其在高空通信卫星中，若设计不当容易导致微放电发生，从而引起 PIM 危害。因此，在大功率波导馈源组件的电气设计中，应提高其功率耐受能力和微放电余量。

2) 在馈源组件各部件连接面设计扼流槽

在馈源组件各部分器件连接面处，设计扼流槽扼制和阻断 PIM 信号电流，避免 PIM 产物串扰到接收通道，影响转发器接收机的正常工作。

3) 法兰选取的位置尽可能避免割断电流

电子接触和局部大电流引起的热效应易产生 PIM，电流密度越大，PIM 电平越大，应避免在电流密度大的位置剖分波导，破坏电流分布产生非线性，激发 PIM。

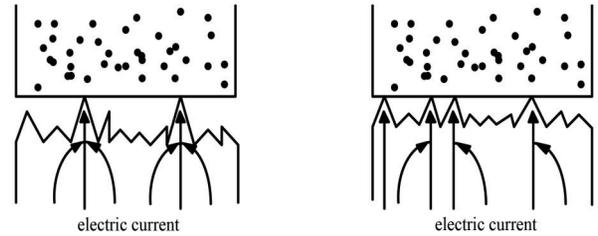


Fig.1 Nonlinear effect model of metal contact  
图 1 金属接触非线性效应模型

#### 4) 尽可能采用整体加工, 减小连接

波导法兰连接处存在金属接触, 要尽量减少法兰数量, 提供足够的电流通道, 保持所有的机械连接清洁、紧固。这需要结构设计对加工工艺有充分的考虑, 使用最少的剖分面和可行的工艺技术。

#### 5) 改进法兰设计, 增加连接压力

波导法兰连接引起 PIM 的原因主要有: 表面的不规则, 以及表面氧化、污染影响了电接触。只要法兰压力达到 69 MPa, 则其产生的 PIM 电平可以忽略。增加连接压力可以采用高压低 PIM 法兰以及设置螺钉密度和位置。

文献[1]通过对波导法兰的 PIM 测试, 证明法兰连接压力越大, PIM 量级越小; 采用桥式法兰, PIM 量级降低; 并认为法兰连接螺钉的间距应小于  $2r_c(r_c=B_T+L_p/2)$ ,  $B_T$  为螺钉半径,  $L_p$  为法兰厚度)。

法兰压力与螺钉参数及力矩的关系为:

$$F = N \times \frac{T_B}{KD_B} \quad (3)$$

式中:  $N$  为螺钉数目;  $K$  为螺母因子, 通常取 0.2;  $D_B$  为螺钉的直径;  $T_B$  为力矩。工程应用中常见的螺钉与力矩要求见表 1, 产品设计时可结合实际情况进行选择并做适度调整。

法兰压强计算公式如下:

$$P = F/A \quad (4)$$

式中  $A$  表示接触面积。

从上述可以看出, 增加法兰压强的方法有: 减小螺钉间隔、增加螺钉数目、增加力矩、减少接触面积。

#### 6) 选择 PIM 性能好的金属材料和表面处理工艺

由于波导馈源组件的法兰连接面存在金属接触, 因此在金属材料选取和表面处理时应遵循最小 PIM 原则。铜、铍铜合金、黄铜和无氧铜都具有低 PIM 特性, 金属表面进行电解抛光并进行镀银处理也可以提高 PIM 性能。

#### 7) 优化机械加工工艺

机械加工应避免焊接工艺, 对于复杂馈源, 可采用线切割和电火花方式加工, 或采用电铸技术进行一体化加工。如, 美国 CMI 公司采用的电铸技术加工精确度达到 0.005 1 mm, 在超宽温度范围实现波导馈源组件的低 PIM 性能<sup>[6]</sup>。

#### 8) 装配和存放要求

波导馈源组件装配时应避免松动、滑丝、错位、划伤内表面等。存放前要对所有波导口进行清洁密封, 避免波导内腔氧化、腐蚀和污染。

#### 9) PIM 试验系统要求

馈电产品通常需要在辐射状态下进行高低温 PIM 试验, 因此除了保证辐射箱体的抗 PIM 能力, 还需对馈电系统后端与试验系统的连接通道进行高低温影响下的抗 PIM 设计, 减少系统连接波导产生的 PIM 影响<sup>[7]</sup>。

## 2 Ka 高通量卫星多波束天线馈电系统 PIM 控制实例

在某 Ka 频段高通量多波束天线馈电系统的研制中, 由于天线超宽带收发共用, 按照 PIM 计算公式得到天线 PIM 产物最低阶数为 7 阶, 给系统 PIM 控制带来压力。天线馈电系统采用超宽带收发共用紧凑链路方案, 且馈源数量多, 间距小, 结构设计实现低 PIM 性能的难度很大。针对这些 PIM 控制难点, 除按照上述的常用 PIM 控制措施外, 还应采用以下 PIM 控制措施, 实现馈电系统的 PIM 性能。

#### 1) 收发共用超宽带馈电系统满足高隔离度大功率要求

首先, 对 Ka 频段超宽馈源单元进行仿真优化设计, 使其接收端口对发射信号的隔离度实测值  $\geq 70$  dB(如图 2 所示), 满足馈源单元自身接收发射通道隔离的要求, 充

表 1 常见螺钉与力矩要求

Table1 Common screw and torque requirements		
screw specifications	torque/(N·m)	recommended torque value/(N·m)
M2	0.15 ~ 0.20	0.15
M2.5	0.30 ~ 0.50	0.30
M3	1.00 ~ 2.00	1.50
M4	2.00 ~ 3.00	2.50

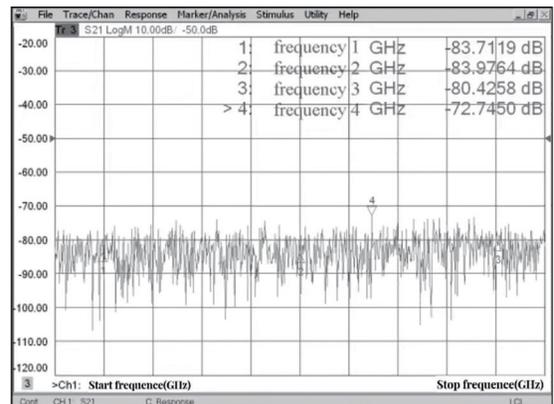


Fig.2 Test results of the isolation between transmit and receive ports of the feed

图 2 馈电单元隔离度测试结果

分抑制发射信号串扰到接收通道的能量。同时，馈源单元设计应满足输入功率 160 W 时微放电余量为 6 dB，有效保证馈电系统大功率工作时的安全裕度。

其次，除了馈电单元自身的低 PIM 设计外，由于多波束天线需要多个馈源组阵使用，馈源发射频段辐射方向图在空间组合，形成的接收频段 PIM 产物可能会落入到某个馈源组件的接收通道内。因此，通常将产生 PIM 风险较大的馈源单元之间通过调整其馈源指向和位置，电磁仿真分析其馈电单元之间的隔离特性，确保其空间隔离度最大，削弱某个单元的大功率发射信号空间串扰进入其他单元的能量。空间隔离度仿真模型如图 3 所示，馈源阵单元间实测空间隔离度  $\geq 60$  dB，如图 4 所示。

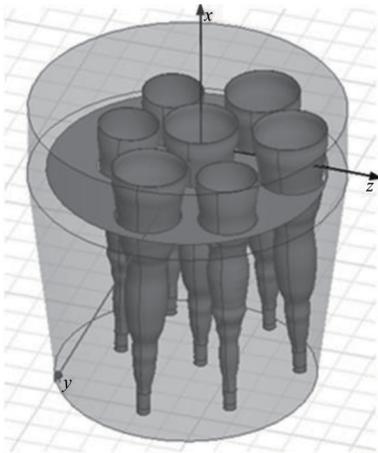


Fig.3 Simulation model of spatial isolation in array  
图 3 馈源阵空间隔离度仿真模型

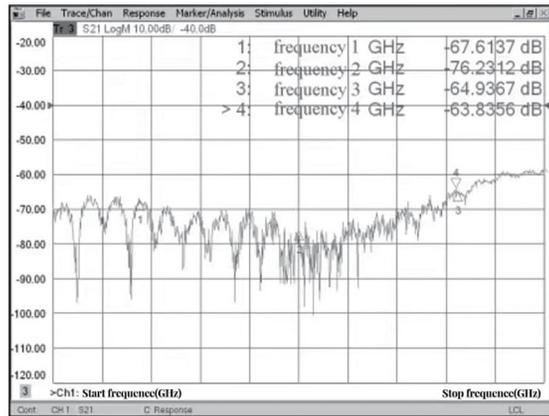


Fig.4 Test results of spatial isolation in array  
图 4 馈源阵空间隔离测试结果

2) 馈源单元收发共用通道连接面设计扼流槽,抑制发射信号串扰到接收通道

由于馈源阵布局紧密，馈电单元横向包络尺寸很小；且收发通道采用共法兰面，因此在共法兰面的发射和接收口之间设计扼流槽，从而减少接触面发射电流对接收通道的串扰影响。同时在馈电系统圆波导与辐射喇叭连接面设计扼流法兰，如图 5 所示，对法兰面连接处因大功率发射信号交叠产生的 PIM 信号进行电流扼制阻断，防止 PIM 信号经喇叭辐射放大，对整个载荷系统造成影响。

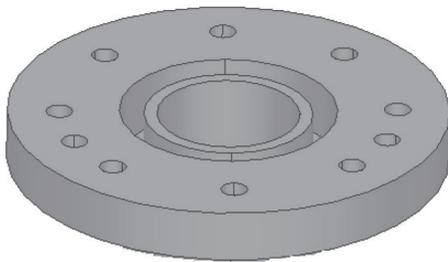


Fig.5 Design scheme of choke flange  
图 5 扼流法兰设计方案

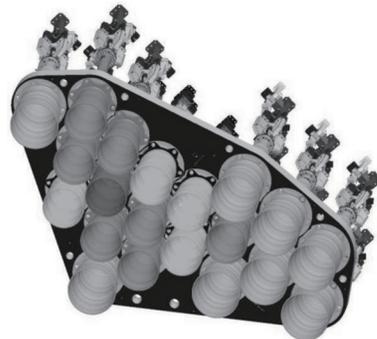


Fig.6 Schematic diagram of array mounting plate  
图 6 馈源阵安装板示意图

3) 馈源阵安装板 PIM 源控制

如图 6 所示，馈源阵安装板采用钛合金板一体化加工，利用下凹方式，采用 PIM 性能较好的钛螺钉和馈电系统外法兰进行连接。通过以上综合措施，避免连接处电流分布产生非线性，降低 PIM 电平。

4) Ka 频段 PIM 试验系统低 PIM 设计

如图 7 所示，测试系统采用低 PIM 发射信号双工器<sup>[8]</sup>，即可实现试验中的高纯度大功率发射信号合成，又可抑制双工器自身的 PIM 产物。在被测产品的发射通道口接入低 PIM 低通滤波器，可有效滤除试验系统发射通道自身的 PIM 信号；测试系统的发射信号传输通道波导采用低 PIM 设计，降低了试验过程温变环境下系统连接的不稳定性，确保验证产品 PIM 抑制能力。

馈源阵进行辐射状态 PIM 试验时，首先需要安排满足天线架设要求的试验场地，提供很好的方向图辐射环

境；其次，频率越高，馈源阵各阵元的输入输出接口布局越紧密，因此需要对连接输入输出接口和 PIM 试验系统的波导通路进行周密设计，既需满足紧凑空间走向布局要求，又需满足连接稳定低 PIM 要求；最后，考虑到测试系统自身底噪特性，为了准确测出 PIM 信号，需要降低馈源阵到测试系统连接通道的传输损耗。基于以上要求，Ka 频段 PIM 试验系统采用最短距离的波导连接、波导连接面高压法兰以及多路波导共用波导支撑等方法实现低 PIM 设计，设计模型和系统实物如图 8 所示。

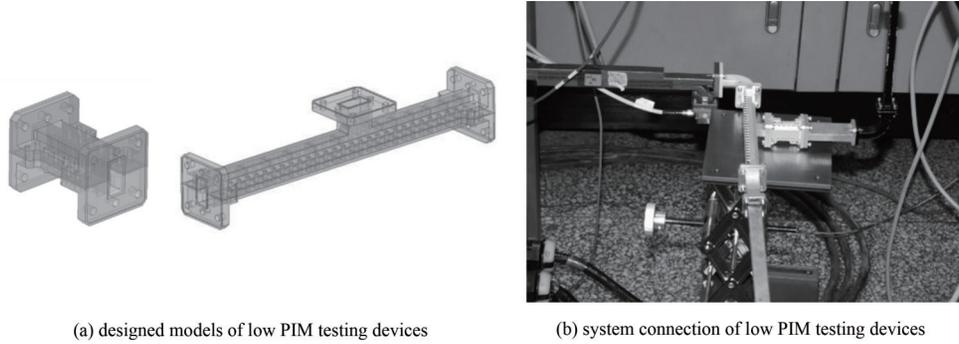


Fig.7 Low PIM test device of test system

图7 测试系统低PIM测试器件

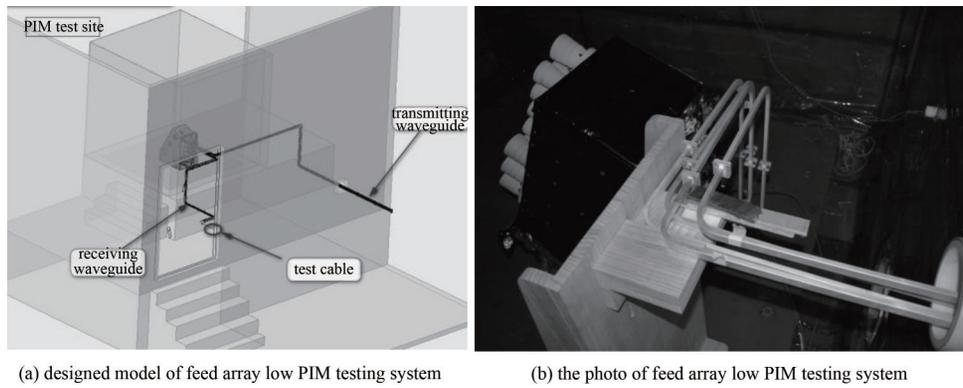


Fig.8 Schematic diagram of low PIM waveguide of feed array testing system

图8 馈源阵测试系统低PIM波导示意图

在某 Ka 频段高通量多波束天线馈电系统的研制中应用上述技术，对产品进行高低温循环状态 PIM 测试。图 9 为产品测试照片，图 10 为 PIM 测试数据，表 2 对 PIM 测试数据进行了总结。其中，馈电单元的 7 阶 PIM 性能控制在高低温(-60~+100 °C)环境下 $\leq -135$  dBm，馈源阵 7 阶 PIM 性能控制在常温状态下 $\leq -140$  dBm。

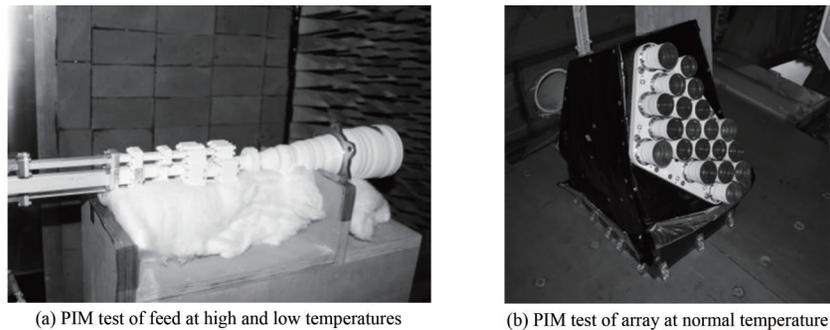


Fig.9 PIM test of Ka-band transceiver shared feed array

图9 Ka频段收发共用馈源阵PIM试验

表2 Ka频段收发共用馈电系统PIM测试数据

Table2 PIM test data of Ka-band transceiver shared feed array

test status	ambient temperature/°C	power	7th order PIM/dBm
feed unit radiation state	100	double carrier: $F_1=120$ W, $F_2=100$ W	$\leq -140$
	normal temperature		$\leq -145$
	-60		$\leq -135$
feed array radiation state	normal temperature	double carrier: $F_1=100$ W, $F_2=50$ W	$\leq -140$

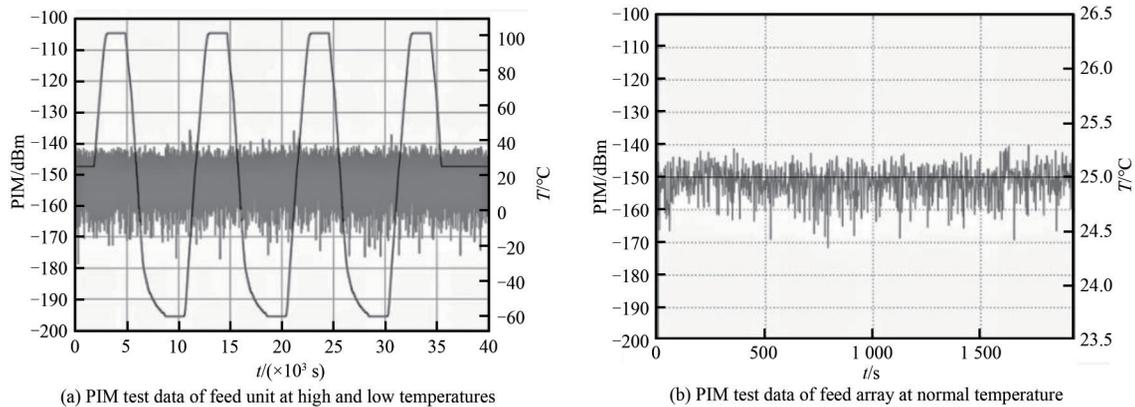


Fig.10 PIM test chart of Ka-band transceiver shared feed array  
图10 Ka频段高通量卫星多波束天线馈电系统PIM测试图

### 3 结论

本文对PIM产生机理以及影响星载天线馈电系统PIM性能的关键因素进行了分析和研究，提出了设计、加工环节的PIM控制技术。通过在Ka频段收发共用馈电系统中的应用，证明馈电单元的7阶PIM性能控制在高低温(-60~+100 °C)环境下 $\leq -135$  dBm，馈源阵7阶PIM性能控制在常温状态下 $\leq -140$  dBm，验证了PIM控制技术的有效性，能够满足长寿命、高可靠性的高通量通信卫星有效载荷应用要求，为解决星载天馈系统产品的PIM问题提供了很好的借鉴。

#### 参考文献：

- [1] QUILES C P V. Passive intermodulation and corona discharge for microwave structures in communications satellites[D]. Darmstadt,Germany:Technische Hochschule Darmstadt, 2005.
- [2] 李霄泉,崔万照,胡天寸,等. 无源互调抑制技术研究现状及发展趋势[J]. 空间电子技术, 2017,14(4):1-6. (LI Xiaoxiao,CUI Wanzhao, HU Tiancun, et al. Review of passive intermodulation techniques and development trend[J]. Space Electronic Technology, 2017,14(4):1-6.)
- [3] VICENTE C, HARTNAGEL H L. Passive intermodulation analysis between rough rectangular waveguide flanges[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005,53(8):2515-2525.
- [4] RUSSEY J, RAMACHANDRAN A, CANGELLARIS A, et al. Phenomenological modeling of Passive Intermodulation(PIM) due to electron tunneling at metallic contacts[C]// 2006 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. San Francisco, CA, USA:IEEE, 2006.
- [5] 王小丽,陈翔,崔万照. 空间大功率微波器件无源互调最新研究进展[J]. 空间电子技术, 2020,17(5):1-10. (WANG Xiaoli, CHEN Xiang, CUI Wanzhao. Recent research advances of passive intermodulation for high-power microwave components[J]. Space Electronic Technology, 2020,17(5):1-10.)
- [6] LEE-YOW C, SCUPIN J, VENEZIA P, et al. Compact high-performance reflector antenna feeds and feed networks for space applications[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2010,52(4):210-217.
- [7] 李砚平,柴继泽,杨晓敏,等. 高低温环境下测试卫星天线无源互调的系统[J]. 空间电子技术, 2022,19(1):19-23. (LI Yanping, CHAI Jize, YANG Xiaomin, et al. Systems to test the passive intermodulation of satellite antenna in high and low temperature environment[J]. Space Electronic Technology, 2022,19(1):19-23.)
- [8] 周游,李晨雨,霍新平,等. 具有寄生通带抑制的E波段双工器[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(5):825-828. (ZHOU You, LI Chenyu, HUO Xinping, et al. An E-band diplexer with harmonic suppression[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(5):825-828.)

(下转第881页)