

空间大功率微波器件无源互调最新研究进展^①

王小丽,陈翔,崔万照*

(中国空间技术研究院西安分院 空间微波技术重点实验室,西安 710000)

摘要:针对目前限制大功率微波器件及系统性能的无源互调(Passive intermodulation, PIM)问题,系统梳理了近几年来国内外无源互调最新研究进展,介绍了无源互调产生机理的研究历史及现状,总结了无源互调分析预测方法及检测定位技术的最新研究进展,从三个方面论述了无源互调的抑制方法,在此基础上,分析讨论了无源互调研究重点及发展趋势,为无源互调研究的推进提供一定参考。

关键词:无源互调;大功率;接触非线性;无源互调抑制;非接触

中图分类号:TN753.91

文献标识码:A

文章编号:1674-7135(2020)04-0001-010

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2020.05.001

Recent Research Advances of Passive Intermodulation for High-power Microwave Components

WANG Xiaoli, CHEN Xiang, CUI Wanzhao *

(National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave,
China Academy of Space Technology, Xi'an 710000, China)

Abstract: Research progresses of passive intermodulation (PIM) that restrict the performance of high-power microwave components and systems are systematically reviewed. The research history and status of passive intermodulation generation are introduced, the latest research progresses of passive intermodulation analysis and prediction methods and detection and positioning technology are summarized, and passive intermodulation suppression methods from three aspects are discussed. On this basis, the key points and the future trend of passive intermodulation are analyzed to provide references for the promotion of passive intermodulation researches.

Key words: Passive intermodulation; High-power; Contact nonlinearity; Passive intermodulation suppression; Contactless

0 引言

无源互调(Passive intermodulation, PIM)是指在两个或多个大功率载波激励下,微波器件由于其弱非线性而产生的一种互调现象,其广泛存在于各种连接器、滤波器、双/多工器及天线系统中。不同于有源互调,PIM无法通过滤波消除,是大功率微波器件及系统性能退化或失效的一种重要机制^[1],已成

为大功率微波部件及系统研究中的关注焦点之一。

PIM问题严重威胁着通信系统的安全、正常工作,同时也制约着通信技术的进一步发展。微波器件大量应用于航天器及地面通信系统,其所产生的PIM产物一旦落入通信系统接收频段,则会形成干扰,轻者影响通信质量,严重时直接堵塞信道,造成

^① 收稿日期:2020-03-31;修回日期:2020-05-11。

基金项目:国家自然科学基金(NO.61901359),空间微波重点实验室稳定支持基金项目(NO.HTKJ2019KL504009)

作者简介:王小丽(1994—),硕士研究生,主要研究方向为空间大功率微波技术。E-mail:wxl8381@163.com

通讯作者*:崔万照(1975—),男,博士,研究员,博士研究生导师。研究方向为空间大功率微波技术。

E-mail:cuiwanzhao@126.com

系统瘫痪。伴随应用需求的不断增长,多通道、大容量、抗干扰、远距离通信等已成为卫星通信技术发展的重要趋势,足够的发射功率是支撑以上技术发展的必要条件。而 PIM 问题是阻碍微波系统功率容量提升的障碍之一,严重制约着卫星通信技术的发展。为节省体积空间,降低载荷重量,收发共用天线是当前及未来通信卫星所采用的一种重要体制。在收发共用体制下,大功率发射通道所产生的 PIM 产物很容易落入高灵敏度的接收通道,从而形成严重的干扰问题,不解决 PIM 问题,收发共用体制必定面临着很高的失效风险。另一方面,在地面移动通信应用中,多功能、多通道、高密度集成需求日渐凸显,电磁环境日趋复杂,PIM 问题随之必将愈加严重。

综上所述,PIM 已成为当前及未来通信系统所普遍面临的一种干扰问题,是工程应用中亟待解决的瓶颈问题。同时,PIM 也是一种基础性问题,其物理机理复杂多样,分析预测困难,现有抑制手段还存在着很大的提升空间。针对 PIM 问题的全面研究对于有效解决 PIM 问题有着重要的意义。本文在前人研究基础上,从 PIM 的产生机理、分析预测方法、检测定位方法及抑制方法等方面,分别梳理总结了近几年来最新的研究进展,在此基础上,分析讨论了其今后的研究重点及发展趋势,为无源互调问题的研究提供一定参考。

1 无源互调产生机理和分析预测

1.1 无源互调产生机理

大量研究表明,PIM 是由微波无源器件的弱非线性引起的,主要分为两个方面:材料非线性和接触非线性。

材料非线性主要是由具有非线性导电特性的材料媒质如铁磁材料(铁氧体、镍、钴)等引起,只要具有非线性导电特性的材料源暴露在电磁能量辐射的区域,其非线性辐射就会被激发,产生无源互调干扰。

接触非线性是由金属-金属(Metal-Metal, MM)接触不理想导致,MM 接触在微波器件中甚为普遍,但受金属表面氧化物、脏污程度、连接压力及表面粗糙度等影响,实际的 MM 接触并非理想的电接触状态。在微观结构中,由于金属自然加工在表面存在许多随机微凸体,看似紧密接触的金属连接结,实际

的金属接触只发生在这些随机微凸体上,形成接触区域和非接触区域,流经金属结的电流在向接触微凸体聚集时,因接触面积的突然变小形成收缩电阻,产生非线性,导致无源互调的产生。同时金属受表面氧化物的影响,表面会生成一层纳米级的氧化层,形成金属-氧化物-金属(Metal-Oxide-Metal, MOM)结构。微观接触金属连接结如图 1 所示。基于 MOM 结构,微凸体接触界面的氧化层会形成薄的电壁势垒,导致量子隧穿效应、热电子发射效应等多种非线性电流传输特性^[2]。

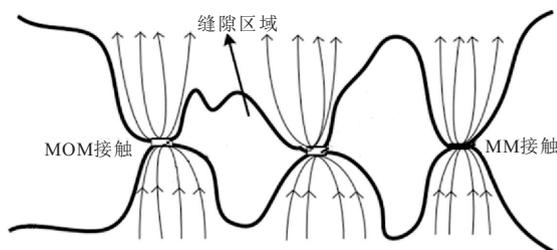


图 1 金属接触微观结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of metal contact microstructure

由于无源互调产生机理错综复杂,交叉融合了材料非线性、微观接触变形、氧化物非线性分析、射频信号分析处理等多个交叉研究方向,所以其研究进展相对比较缓慢。Krstansky 于 1966 年首次提出 PIM 的主要来源是铁磁材料^[3],同时提出在磁滞材料上镀一层足够厚的线性材料可以抑制 PIM,该方法至今仍然有效。1980 年, Lee 在冷轧钢材料上发现 PIM,至此以后更多磁滞特性材料被证明能产生 PIM。1976 年, Jaroslava Z. Wilcox 等人提出电热耦合理论^[4],利用热传导方程分析了同轴连接器的 PIM。2006 年, Wilkerson 等人继续从电热耦合效应的角度对 PIM 问题进行了研究^[5]。2013 年,西安交通大学叶鸣,贺永宁等人基于电热耦合效应,对微带线的 PIM 产生机理进行了研究^[6]。上述可以看出,学术研究领域针对基于电热耦合效应的 PIM 问题进行了大量研究,但电热耦合效应作为一种特殊的 PIM 产生机理,引发的 PIM 在载波间隔频率很窄(KHz 级别)的情况下才予以考虑,在实际工程应用中,系统载波间隔频率相对较宽,一般不考虑该效应的影响。

著名的 IEC62037 标准提出,对于互调敏感的场合,尽量避免使用磁滞材料及各种含镍合金。因此材料非线性可以通过使用合适的材料避免,但接触

非线性在微波器件金属连接结构中难以避免,成为人们的重点研究对象。针对接触非线性的研究,最早于1980年, Farrokh Arazm 等人通过测试不同金属间接触的电特性,得出金属接触中粗糙的表面形貌会产生非线性导电特性,从而产生无源互调^[7]。2005年, Vicente 等人对波导法兰接触面做了实验研究^{[8][9]},证明即使是在镀银界面上仍然会存在接触非线性并导致接触 PIM 产生,进一步证实了接触非线性的存在。2011年,西安交通大学叶鸣,贺永宁等人重点研究了波导连接中的非线性结构,针对微观金属接触的量子隧穿效应和热电子发射效应这两种非线性导电过程^[2],对波导连接的 PIM 功率受接触压力、载波功率等因素的影响规律进行了系统的理论分析。2017年,赵小龙等人针对由 MOM 接触非线性产生的 PIM 进行了分析建模和实验验证,提出了微观金属接触界面的单点接触模型^[10],推导得到金属波导边缘接触引起的 PIM 电平的计算公式,总结得出金属波导连接处的无源互调变化规律。

1.2 无源互调分析预测

非线性机理错综复杂,采用单一且精准的模型对无源互调进行分析预测难度极高,PIM 研究至今,提出了许多非线性数学模型对 PIM 产物功率进行计算,并基于无源互调的产生机理建立合理的物理模型和电路模型进行无源互调的分析预测。

1.2.1 数学模型

1968年,Sea 采用幂级数法表征器件的非线性特性^[11],推导了任意载波个数条件下的互调产物计算公式,并用幂级数系数和输入载波的幅度来表示互调产物的幅度。但此模型存在一定的局限性:采用该模型对互调产物进行拟合时,发现高阶互调产物在高功率范围内的拟合效果差,而且,在现阶段能够达到的计算精度的基础上,不能得到更多项准确的系数,在一定程度上舍弃了更高阶信息的影响,存在着不可避免的截断误差。2005年,西安电子科技大学张世全等人采用傅里叶级数法推导了双载波情况下互调产物的幅度及其随阶数变化的一般表达式^[12],分析和讨论了非线性器件互调产物的一般行为特性。相比于传统的幂级数方法,该方法能快速计算各阶 PIM 产物且无需进行参数拟合。M. T. Abuelma'atti 采用双指数模型来描述无源器件产生

的 PIM 干扰^[13],它描述产生 PIM 的非线性表达式为

$$V_{out}(t) = V_0 \{ \exp[V_{in}(t)/b_1] - \exp[V_{in}(t)/b_2] \} \quad (1)$$

将输入信号

$$V_{in}(t) = \sum_{i=1}^N V_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad (2)$$

代入上式,展开推导并化简,可得下边带中 PIM3 和 PIM5 产物的幅度为:

$$V_{PIM3} = 4V_0 I_2(bV_1) I_1(bV_2) \quad (3)$$

$$V_{PIM5} = 4V_0 I_3(bV_1) I_2(bV_2) \quad (4)$$

此模型优点是可以直接采用高阶来描述非线性特性,省去了测量众多数据的麻烦,节约了测量成本。但是,在一定程度上,双指数模型系数 V_0 过于简单,不足以准确表示非线性特性造成的 PIM 电平幅度变化。因此,考虑到无源互调的特征及双指数模型的缺点,2019年,西安交通大学王洪广教授团队^[14]结合双指数模型和多项式模型的优点,提出一种复合指数模型来描述非线性产生的无源互调干扰。提出的复合指数模型描述产生 PIM 干扰的非线性表示:

$$V_{out}(t) = [\alpha_1 + \alpha_2 V_{in}^2(t)] \cdot \{ \exp[V_{in}(t)/b_1] - \exp[-V_{in}(t)/b_2] \} \quad (5)$$

该模型将双指数模型中的系数 V_0 表示为关于输入信号的多项式 $\alpha_1 + \alpha_2 V_{in}^2(t)$,后面的双指数函数用贝塞尔级数展开,假定为双载波输入信号,代入化简即得三阶和五阶互调产物电平。

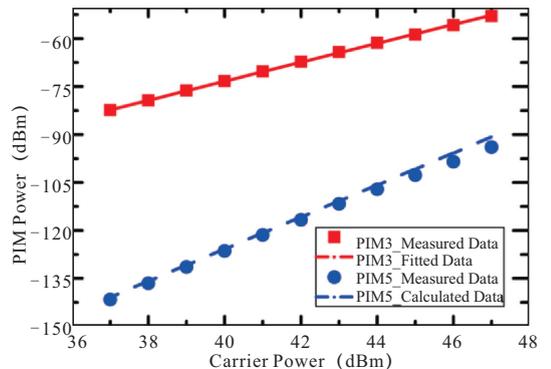


图2 复合指数模型计算的 PIM3 和 PIM5 产物的功率与微波滤波器的测量数据比较结果图

Fig. 2 Comparison of the powers of PIM3 and PIM5 products calculated by composite exponential model and the measured data of microwave filter

复合指数模型的系数为输入信号的多项式,弥补了双指数模型由于系数简单不足以准确描述 PIM 产物幅度变化的缺点,用该模型计算得出的三阶 PIM 产物和五阶 PIM 产物明显比双指数模型计算得到的结果更加精确,也更能准确的评估 PIM 电平幅度变化。图 2 是用复合指数模型计算的 PIM3 和 PIM5 产物的功率与微波滤波器的测量数据比较结果:

但是用该模型推导出的高阶互调功率表达式并非闭合形式,存在一定的截断误差,对于原本数值就很小的互调功率来说,会对计算产生一定的影响。而且对于多载波输入的情况来说,推导过程也会更加复杂。

1.2.2 物理模型

基于电接触理论, Vicente 和 Hartnagel 等人在文献[8]中提出了针对粗糙波导法兰面接触的物理模型,用高斯分布描述粗糙表面微凸体的高度分布,建立了外界压力与金属结表面接触面积之间的关系,利用该模型对三阶无源互调分量随表面粗糙度、膜层厚度、外部压力以及输入功率的变化规律进行了分析,并对 PIM 电平发展趋势进行预测,该文献作为近年来最早出现的器件级的 PIM 研究被作为典范参考。

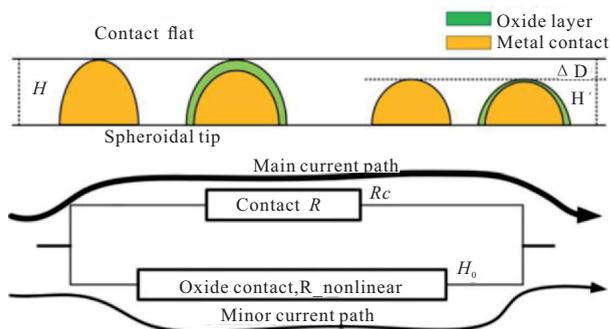


图3 微观层面单元面积接触模型

Fig.3 Contact equivalent model at a microcosmic level

2018年,西安交通大学陈雄等人提出了一种针对同轴连接器的PIM预测方法,该研究建立了同轴连接器微观层面接触单元的接触模型^[15],如图3所示,模型中包括MM接触和MOM接触,两者共同构成接触非线性源,导致PIM产生。基于此模型,使用蒙特卡洛逼近法和微观测量法,重建同轴连接器内部不同触点的随机分布样本,最终得到所有潜在PIM值的置信区间,而非单个PIM预测值。如图4

是利用蒙特卡洛法预测PIM电平与施加扭矩的关系和测量值的对比。该研究有助于分析同轴连接器上波动的PIM,并提供一种预测PIM的新方法。

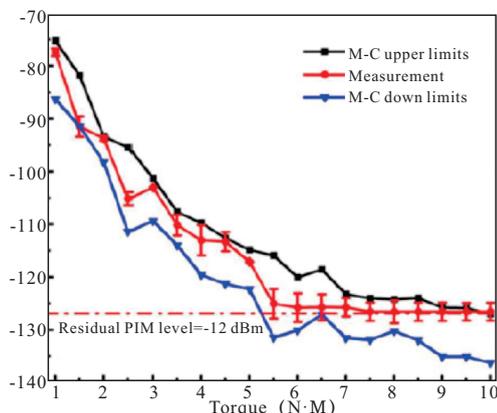


图4 PIM电平与施加扭矩之间的关系

Fig.4 PIM change versus applied torque

1.2.3 电路模型

一般情况下,在波导接触表面上同时存在缝隙区域(MVM)、MOM接触区域和MM接触区域,微观连接示意图1。由图1可知,MM接触微观模型比较复杂,为了进一步模拟粗糙表面金属接触,叶鸣等人在文献[2]中建立了粗糙表面接触的等效电路模型,如图5所示。MVM区域主要由真空(或空气)支配,会产生非接触电容,同时由于静电发射和气体击穿产生非接触电阻。而MOM和MM接触区域主要由天然金属氧化物、氧或碳的污染物形成的薄电介质层构成,该区域电流向微凸体附近聚集,接触面积突然变小,产生收缩电阻;同时产生了接触电容和隧穿电阻。该研究基于量子隧穿效应和热电子发射效应等非线性导电特性求出等效电路中的各个参量,从而利用等效电路对波导连接的PIM进行理论分析和数值计算,预测波导连接处粗糙金属表面的PIM电平发展趋势。

近年来,同轴连接器也逐渐成为人们新的PIM研究对象。与波导相比,同轴连接器结构复杂,包含不止两个接触结构,诸如内导体、外导体、附属机械紧固结构等,因此同轴的PIM分析存在大量的研究对象,这就导致同轴连接器PIM问题研究难度大,研究进度长期滞后。2018年,湖南大学温和教授团队^[16]研究了松动的同轴连接器,其认为松动的同轴连接器是大功率和高频通信系统中PIM的重要来源。因此,其基于紧密接触模型研究提出了松动的

接触面模型和相应的阻抗特性,并首次提出了一种电路模型来分析松动接触同轴连接器中的PIM干扰,如图6所示。通过电路可以计算松动接触条件下的PIM电平。

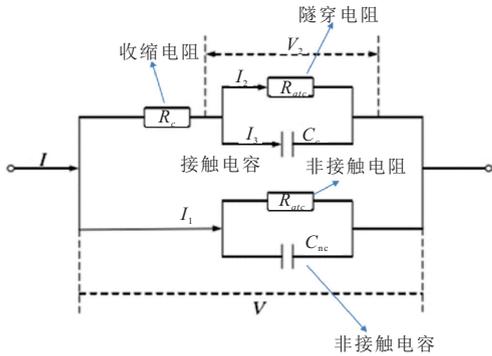


图5 粗糙表面金属接触等效电路模型

Fig. 5 Metal contact equivalent circuit model on rough surface

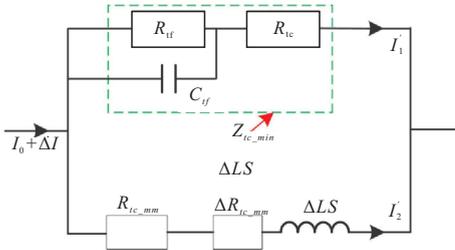


图6 单位面积内松动接触的等效电路

Fig. 6 Equivalent circuit of loose contact per unit area

图中,流过非线性电阻 R_{ij} 的非线性电流表达式为:

$$I'_1 = \left(\frac{R_{tc_mm} + \Delta R_{tc_mm} + j\omega\Delta LS}{R_{tc_mm} + \Delta R_{tc_mm} + j\omega\Delta LS + Z_{tc_min}} \right) \times (I_0 + \Delta I) \quad (6)$$

式中: R_{tc_mm} 和 ΔI 是单位接触面积中接触电阻和电流的增量, ΔLS 是单位接触面积中增加的电感。

式(6)表明,同轴连接器松动度的增加,附加阻 $\Delta Z = \Delta R_{tc_mm} + j\omega\Delta LS$ 随之增加,导致流过非线性电阻的电流增加,产生的PIM增加。从而导致松动同轴连接器的PIM干扰增加。

2 无源互调的检测定位技术

2.1 无源互调检测技术

由于无源互调产生机理错综复杂,PIM来源不一,为了快速高效解决工程应用中的PIM问题,最直接的方法就是通过实验测量对系统PIM进行评

估,以此来衡量系统或微波器件的PIM水平,这导致高性能的无源互调检测技术十分关键,成为国内外PIM问题研究的热点领域。

2007年,A. P. Shitvov等人基于探针近场耦合测试方法对微带线的PIM产物实现了在线测试^[17];2018年,西安交通大学高凡等人提出一种利用近场耦合原理的PIM测量方法^[18],该测量方法通过缝隙波导激励不同物理接触状态的非线性源,并对其产生的PIM产物进行测试分析,该测量方法具有较高的灵敏度。同年,中国空间技术研究院西安分院提出一种相位可调的多输入多输出无源互调测试系统^[19],该系统通过调节多个输入载波信号的相位,输出多个不同频率的载波信号,利用得到的多个多载波波束的信号,测量其在空间和反射面交叠产生的PIM信号。

由于无源互调自身的特殊性,其测量系统的结构复杂,要求高。一般地,无源互调测量系统应具有大功率信号源、高灵敏度接收机、低PIM组件等特点,此外,无源互调测量系统与频率和带宽的相关性都很强,系统难以通用,一般需要根据测试目的进行专门的制作。测量时不仅要测量无源部件的PIM产物,还要对整级系统进行测量,因此,如何设计一个低PIM的测量系统是进行无源互调测量首先必须解决的问题。为了改进PIM测试系统以实现低PIM,2018年, Davide Smacchia等人^[20]为无源互调测量开发了新型测试系统,与Vicente. C等提出的测试系统相比^[21],其提出的测试系统利用多工器实现滤波器和双工器一体化,减少级联结构,降低了系统自身产生的PIM干扰。以发射互调测试系统为例,如图7所示,传统测试系统中的输入输出滤波器(红色框中的部分)被集成到一个低PIM多工器,实现器件一体化,多工器的一个通道引导反射PIM信号到达信号接收端,剩下通道用于引入载波信号并在多工器中进行合成和滤波。该测试系统既避免了多个滤波器级联连接产生PIM干扰的问题,又实现了测试系统的紧凑性,在经典的正向互调和反射互调测试系统的基础上极大的提高了测量精度和效率。但该测试系统在实现一体化的同时,对系统所需的宽带多工器规格要求很高,在器件选择方面应多加注意。

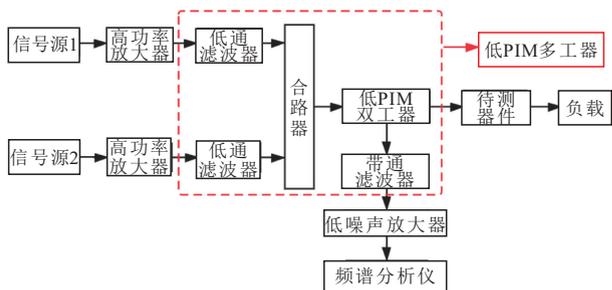


图7 一体化反射PIM测试系统

Fig.7 Conducted PIM test bed for collecting backward PIM

2019年, Davide Smacchia^[22]等人再次针对反射互调测试系统, 提出减小测试系统PIM的方法。该方法通过在测试系统终端负载之前插入专用低通滤波器, 该滤波器允许载波信号通过, 同时抑制来自波导终端的PIM干扰, 保护测试系统免受终端负载产生的PIM影响。提出的PIM测试系统如图8所示。而且, 为了验证该方法的实际应用, 用K波段的PIM测试系统进行了几组测量, 图9显示了在有和没有专用低通滤波器(LPF)的情况下进行的测量结果比较。

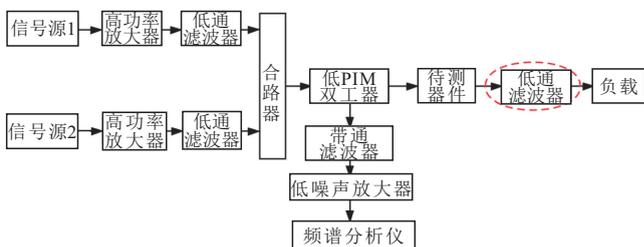


图8 反射互调的低PIM测试系统

Fig.8 Low PIM test bench with reflection intermodulation

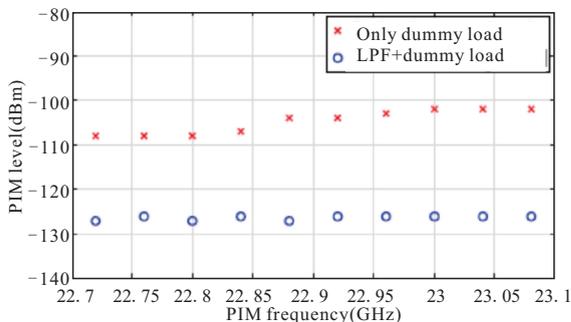


图9 有无低通滤波器(LPF)的情况下测量结果比较

Fig.9 Comparison of results with and without low-pass filter (LPF)

可以看出, 低通滤波器的插入大大减轻了测试

系统本身产生的PIM, 其性能大约提升20-25 dB左右。该研究利用低通滤波器大幅度改善了反射PIM测试系统的测试性能。

传统的PIM测试方法中, 系统自身的PIM除了来自于终端负载的PIM干扰之外, 用来分离载波信号和互调信号的收发双工器也是PIM的一个重要来源。针对收发双工器需要同时具有低PIM和高收发隔离的性能要求, 中国空间技术研究院西安分院提出一种采用90°相位3dB电桥结合低通滤波器实现宽带无源互调测量的方法^[23], 利用电桥的宽带特性, 实现宽频带内的互调信号接收, 同时利用低PIM的带通滤波器分离载波信号和互调信号, 实现了高隔离的目的。此方法通过将90°相位3dB电桥和低通滤波器灵活组合, 巧妙解决了传统测试方法中高收发隔离和宽频带的矛盾, 实现了宽带范围内的高灵敏度无源互调产物测试。

为了提升无源互调测试系统的精确度, 提升模块测试精度是常用的思路, 但构建成本高昂。近年来, 人们从PIM校准方法入手, 开发新的PIM测试标准校准方案, 实现多种可调的无源互调参考源, 以提升测试系统精准度, 这已成为PIM测试领域一个前沿的研究方向。2017年, 西安交通大学陈雄等人^[24]提出一种双端口可调无源互调源, 该可调PIM源基于电路方法实现, 利用一个偏置的二极管提供可变非线性源, 通过耦合网络和合适的功率分配最终实现双向的互调输出。该电路结构在PIM测试中可有效提供双端口动态互调校准的PIM参考。同年, 陈雄等人提出一种使用转盘式非线性实现的可调无源互调源^[25], 该PIM源通过控制电磁场辐射镀镍镀层材料位置面积实现可调节, 避免使用了非线性强度大的二极管, 不需要通过复杂的衰减网络即可得到合适的PIM强度值, 产生调制PIM波形以用于PIM测试仪器的校准, 提升PIM测试准确度。

2.2 无源互调定位技术

微波部件或子系统内部存在多个PIM故障源, 这些故障源在空间环境下会被放大从而产生严重的PIM干扰, 通常只能在多种组合测试条件和长时间观察下才有可能得到可靠的数据, 即使测得PIM分量, 也难以有效地定位其发生点, 如果可以确定PIM故障源及隐患位置, 则可以针对性地提出解决办法, 对于无源互调问题的解决是十分有效的方法之一。

早期关于 PIM 定位技术研究的公开文献相对较少,常见定位方法主要分为两种:微波全息成像法和外加激励法。微波全息成像法是由 Aspden 在 1989 年提出的一种确定反射面的无源互调产物产生位置的方法^[26],由两个独立的发射天线产生不同的载波信号,并打向待测反射面,在反射面的近场通过微波扫描设备扫描互调频率,以此实现对散射场的采样,这样可以测得二维平面上各点反射波的幅度与相位。通过分析数据,得出反射面上互调场的分布。此方法也可以用于估算反射面天线的性能。外加激励法^[27]的本质是:利用两个信号源产生两路载波信号,用载波信号激励待测器件产生 PIM,同时用聚焦的高功率声波波束激励待测器件,由于高功率的声波信号会使得待测器件产生振动,所以会影响器件的 PIM 特性,将高功率声波的频率调制到 PIM 产物的边带上,然后通过检测边带分量来实现对 PIM 的定位。

2016 年,Anristu 公司根据定向天线的原理设计出商用的 PIM 定位天线^[28],在使用时,仅需要在疑似的 PIM 产生位置扫描天线即可快速确定 PIM 发射位置,因此,近场天线可被作为 PIM 定位方法的辅助性工具。此外,2017 年密苏里科技大学 EMC 实验室的 Pomerence D 和 Yang S 报道了关于松动连接的 PIM 源定位研究^[29],该研究利用超声波振动方法,提出了一种用于天线 PIM 定位的振动调制系统,系统包括解调系统和声学振动系统,前者用于检测 PIM 信号,后者用于提供振动源,其 PIM 定位直接依赖于振动源的物理位置,因此,该方法极大地提高了 PIM 源的定位精度。

以上方法均是针对天线等开放结构的 PIM 定位,而关于封闭腔体结构的 PIM 定位研究相对较少。近年来,为了解决封闭腔体结构 PIM 定位的技术难题,浙江大学再立新团队在 IEEE Trans. MTT 上发表运用 k 变换的 PIM 定位方法^[30,31]。基于时域多载波概念,将 PIM 参考源引入标准 PIM 测试系统,如图 10 所示。两路可控相干激励信号源 1 和源 2 和无源互调参考信号源 3 共用同一信号源,无源互调参考信号源 3 产生“虚拟”的无源互调参考信号,频率为 $f_3 = \alpha f_1 + \beta f_2$,初始相位为 φ_3 , α, β 为第一、第二待测无源互调信号的阶数参数。在接收端通过相位比较器得到实际无源互调信号与“虚拟”无源互调参考信号之间相位差为 Φ ,并利用频谱仪测量

获得实际 PIM 信号的幅度值 A 。通过等间隔线性改变两路可控相干射频信号其中任一路的频率值,获得多组无源互调信号的幅度值 A_n 和相位差值 Φ_n ,得其矢量信号形式 $A_n e^{j\Phi_n}$ 。由矢量合成原理可得,测量得到的每个点的无源互调幅度值 A_n 和相位差值 Φ_n 合成的矢量信号形式等于所有无源互调发生位置点的矢量信号形式的叠加

$$F(k_{PIM}) = \sum_{i=1}^{i=N} A_i e^{j(m(\varphi_1 + \Delta\varphi_1) + n(\varphi_2 + \Delta\varphi_2) + 2k_{PIM}x_i + \Delta\varphi_{MIM})} \quad (7)$$

式中: $F(k_{PIM})$ 为在波矢 k 空间上的多载波信号。

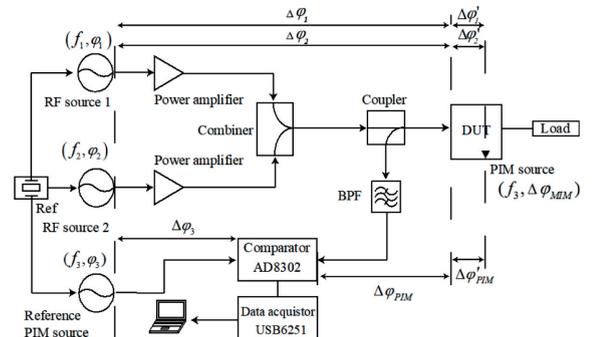


图 10 无源互调测试架构

Fig. 10 Passive Intermodulation Test bed

对函数 $F(k_{PIM})$ 在波矢 k 空间进行逆傅里叶变换,根据得到的横坐标值即可确定无源互调发生点的位置信息,从而在理论上实现任意多点的 PIM 发生点的定位。

上述逆傅里叶变换定位算法适用于宽带系统的无源互调多点定位,因受本身傅里叶变换精度制约,对于相近的无源互调点的分辨或小尺度微波器件下的无源互调发生点位置的定位受到带宽的限制,因此在窄带条件下,往往无法对无源互调发生点进行定位。为了实现窄带下无源互调的定位,该团队提出了基于 k 空间多载波逆问题优化定位算法的无源互调定位方法。该方法根据已知所有可疑的无源互调位置建立复数方程组,并对其构造优化目标函数,使用最速梯度法等优化寻找最优解参数,设定幅度阈值,寻找可能的 PIM 发生点,在窄带条件下实现无源互调定位,但是缺点是需要较强的先验条件,有一定局限性。基于此,该团队提出了一种基于矩阵束方法的定位算法^[32],该算法在不需要无源互调可能发生的位置或数量的先验条件下,可以准确判断无源互调发生点的位置信息和幅度,有效地解决多个无源互调点的定位问题,且对噪声具有鲁棒性。

以上三种定位算法可以实现封闭微波腔体内的多个无源互调点的同时定位,并且可以反映待测微波器件内部电磁波传播和反射情况,对促进封闭腔体结构 PIM 定位技术发展具有重要意义。

3 无源互调抑制技术

无源互调广泛存在于各种大功率微波器件及系统中,是限制器件及系统可靠性的技术难题,为了实现器件及系统的性能提升,在工程应用中,抑制无源互调干扰是人们研究无源互调的最终目的。

在频率预测方面,技术已经相对成熟。要合理选择发射频带和接收频带,尽量避免使发射频带的低阶互调产物落入接收频带,避免 PIM 干扰;在材料非线性方面,可以直接使用合适的材料来避免产生非线性,比如避免使用铁磁等具有磁滞性的材料即可消除材料非线性。

针对接触非线性,人们采用的思路主要有三种:一是保持接触面洁净,采用镀层工艺等方法减少污染。二是采用高压法兰或严格的连接力矩实现金属之间的连接,达到降低 PIM 的目的。三是避免金属接触,从根源上消除接触非线性。

近年来,人们研究设计出许多低 PIM 微波器件,如低 PIM 的双工器设计,低 PIM 大型可折叠反射面天线设计等。其中避免金属直接接触的思想是抑制 PIM 的一个新思路。有专利^[33]给出非接触式调谐螺钉,可以降低由调谐螺钉的金属接触产生的 PIM,同时可以避免电磁泄露,但缺点是结构复杂,不易加工^[34]。2017年,中国空间技术研究院西安分院针对同轴连接器提出抑制措施^[35],通过在连接器阳头内导体外侧和阴头内导体内侧上均匀覆盖内导体介质层,使两者不存在金属接触,实现无源互调抑制。2018年,中国空间技术研究院西安分院陈翔等人基于间隙波导理论,提出非接触电磁调控式宽带大功率无源互调抑制方法,并以波导法兰为例进行了初步验证^[36],通过在常规法兰面上增加周期性凸体结构形成人工磁导体(Artificial Magnetic Conductor, AMC)平面,和光滑金属平面所构成的理想导体(Perfect Electric Conductor, PEC)平面形成间隙,利用电磁禁带特性,抑制电磁波泄露,同时形成非接触结构,有效抑制了无源互调的产生。同年,该团队针对低频应用需求,提出了一种结构紧凑的折叠型非接触波导法兰(FCWF)结构^[37],该研究首次

将非接触电磁带隙结构应用于解决大功率微波器件的 PIM 问题。设计的折叠非接触波导法兰由两个部分组成,凸形部分在波导外壁以钉床形式构成 AMC 平面,凹形部分为空心阶梯状波导,其内壁作为 PEC 平面。将凸形部分插入到凹形部分中,使彼此之间具有空气间隙,如图 11 所示。

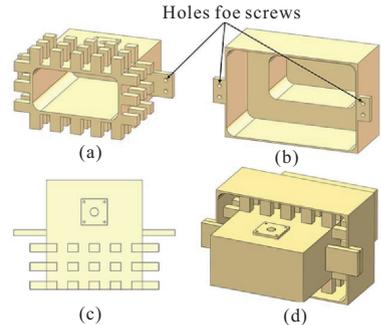


图 11 折叠无接触波导法兰 3D 图

Fig. 11 3-D sketch of the proposed FCWF

该研究基于间隙波导理论,构造非接触电磁带隙结构,使得电磁场在波导间正常传输,不会从法兰间隙中泄露。非接触电磁带隙结构避免了法兰面的物理接触,从根本上消除了接触非线性,实现对 PIM 的有效抑制。图 12 是使用不同界面材料时,标准法兰和非接触波导法兰的 PIM 测试结果。由图可知,非接触波导法兰的 PIM 性能接近于系统底噪水平且基本不受界面材料的影响,相比于标准波导法兰,获得了最大超过 30dB 的 PIM 抑制度。该结构可以大大简化表面处理和组装过程,减少了时间和制造成本,为低无源互调微波器件的设计提供了新的思路。

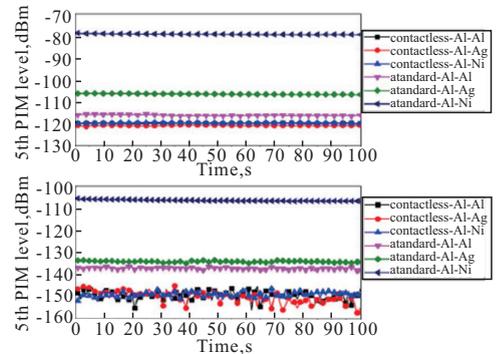


图 12 具有不同界面材料 Al-Al, Al-Ag 和 Al-Ni 的折叠无接触波导法兰和标准 WR430 法兰的三阶和五阶 PIM 测量结果

Fig. 12 Third and fifth PIM measurement results of FCWF and standard WR430 flange with different interface materials Al-Al, Al-Ag, and Al-Ni

2019年,中国空间技术研究院西安分院提出一种基片集成式低无源互调波导法兰垫片^[38]。该垫片通过介质基片集成,构造双面平面型人工磁导体结构,安装在普通波导法兰结构之间,使普通波导法兰面作为理想电导体平面,与垫片之间形成具有宽电磁禁带特性的双面无金属接触电磁带隙结构,该垫片既保证电磁波不会泄露,又实现了金属非接触,有效抑制了接触非线性,实现器件的低PIM性能。

4 结束语

本文从无源互调产生机理、分析预测方法、检测定位方法及抑制方法等方面综述了近几年来国内外在无源互调领域的研究进展,分析并总结了最新进展对无源互调领域应用的广阔前景。

有效抑制无源互调干扰是无源互调工程研究中的主要方向。常规的抑制方法既需要对接触面保证绝对的洁净度,又需要精确的力矩固定,对加工装配有很高的要求,而且也没有从根本上消除接触非线性,存在着长期可靠性问题。不同于传统的改善接触方式,非接触结构不仅可以降低器件在加工以及装配等方面的要求,而且稳定性高,抑制无源互调效应效果显著,具有广阔的工程应用前景。随着微波器件的结构不断优化以及新材料的开发使用,人们在抑制无源互调干扰研究不断有新的突破,相信未来人们会更好推动无源互调领域的快速发展,解决更多的无源互调干扰问题。

参考文献:

[1] Lui P L. Passive intermodulation interference in communication systems [J]. *Electronics & Communication Engineering Journal*, 1990, 2(3): 109-118.

[2] 叶鸣,贺永宁,王新波,崔万照. 金属波导连接的无源互调的非线性物理机制和计算方法[J]. *西安交通大学学报*. 2011, 45(2): 82 ~ 86.

[3] Krstansky JJ, Elsner RF, Environment-generated intermodulation in communication complexes [C]. *Proceedings 10th Tri-Service Conference on Electromagnetic Compatibility*, German, 1964: 21-25.

[4] Wilcox J, Molmud P. Thermal Heating Contribution to Intermodulation Fields in Coaxial Waveguides [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1976, 24(2): 238-243.

[5] Wilkerson J R, Gard K G, Steer M B. Electro-Thermal Passive Intermodulation Distortion in Microwave Attenua-

tors [C] // *Microwave Conference*, 2006. *European. IEEE*, 2006: 157-160.

- [6] 叶鸣,贺永宁,崔万照. 基于电热耦合效应的微带线无源互调机理研究. *电波科学学报*, 2013, 28(2): 220-225.
- YE Ming, HE Yongning, CUI Wanzhao. Passive Intermodulation Mechanism of Microstrip Lines Based on the Electro-thermal Coupling Effect. *Chinese Journal of Radio Science*, 2013, 28(2): 220-225.
- [7] Arazm F, Benson FA, Nonlinearities in metal contacts at microwave frequencies [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1980, 3(2): 142-149.
- [8] Vicente C and Hartnagel H. L. Passive-intermodulation analysis between rough rectangular waveguide flanges [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2005, 53(8): 2515-2525
- [9] Vicente C, Wolk D, Hartnagel HL, et al. An experimental investigation on passive intermodulation at rectangular waveguide interfaces [C]. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, San Francisco, CA, US, 2006: 242-245.
- [10] Xiaolong Zhao, Yongning He, Ming Ye, Fan Gao, et al. Analytic Passive Intermodulation Model for Flange Connection Based on Metallic Contact Nonlinearity Approximation [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017.
- [11] Sea RG. An Algebraic Formula for Amplitudes of Intermodulation Products Involving an Arbitrary Number of Frequencies [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1968: 1388-1389.
- [12] 张世全,葛德彪. 基于傅立叶级数法的互调产物一般特性分析[J]. *电波科学学报*, 2005(02): 129-132.
- [13] M T Abuelma'atti. Prediction of passive intermodulation arising from corrosion [J]. *IEE Proc. —Sci., Meas. Technol.*, vol. 150, pp. 30 - 34, 2003.
- [14] Lei Zhang, Hongguang Wang, Jialin Shen, et al, A Composite Exponential Model to Characterize Nonlinearity Causing Passive Intermodulation Interference. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 61, no. 2, April 2019
- [15] Chen, Xiong, et al. Analytic Passive Intermodulation Behavior on the Coaxial Connector Using Monte Carlo Approximation [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility (2018)*: 1-8.
- [16] Huiping Yang, He Wen, Member, IEEE, Yihong Qi, Senior Member, IEEE, and Jun Fan, Fellow, IEEE An Equiv-

- alent Circuit Model to Analyze Passive Intermodulation of Loose Contact Coaxial Connectors IEEE transactions on electromagnetic compatibility . Jan. 2018
- [17] Shitvov A P, Zelenchuk D D, Schuchinsky A G, et al. Mapping of passive intermodulation products on microstrip lines [C]//Microwave Symposium Digest, 2008 IEEE MTT-S International. IEEE, 2008: 1573-1576.
- [18] 高凡, 赵小龙, 叶鸣, 等. 一种基于偶极子近场耦合法测量无源互调的方法[J]. 空间电子技术, 2018, v. 15; No. 177(03): 15-21.
- [19] 李砚平, 王海林, 双龙龙等, 一种相位可调多载波无源互调测试系统: 201710694675. 4 [P]. 2018-01-30
- [20] Davide Smacchia, Pablo Soto, Vicente E. Boria, Marco Guglielmi, Carlos Carceller, Advanced Compact Setups for Passive Intermodulation Measurements of Satellite Hardware [J]. IEEE Transactions on microwave theory and techniques, vol. 66, no. 2, Feb. 2018
- [21] Vicente C, Wolk D, Hartnagel HL, Gimeno B, Boria V E, Raboso D. Experimental analysis of passive intermodulation at waveguide flange bolted connections [J]. IEEE Trans. Microw. Theory Techn. , vol. 55, no. 5, pp. 1018 - 1028, May 2007.
- [22] Davide Smacchia, Pablo Soto, Member, Vicente Boria, et al, Implementation of Waveguide Terminations with Low-Passive Intermodulation for Conducted Test Beds in Backward Configuration . IEEE Microwave and Wireless Components Letters. Feb. 2019
- [23] 陈翔, 崔万照, 王瑞, 等. 一种采用电桥结合滤波器实现宽带无源互调测量的装置及方法: 201710256836. 1 [P]. 2017-09-01.
- [24] Chen X, He Y, Cui W . Broadband Dual-Port Intermodulation Generator for Passive Intermodulation Measurements [J]. Microwave and Wireless Components Letters, IEEE, 2017, 27(5) : 518-520.
- [25] Chen X, He Y. Novel Programmable Passive Intermodulation Generator Using Nonlinear Rotating Disk [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2017, 27(10) : 945-947.
- [26] Aspden P L, Anderson A P, Bennett J C. Microwave holographic imaging of intermodulation product sources applied to reflector antennas [C]//International Conference on Antennas & Propagation, Icap. IET, 1989.
- [27] John C Mantovani, Hugh W Denny, Walter B Warren. Apparatus for locating passive intermodulation interference sources [D]. United States Patent. 1987.
- [28] Anristu, Anristu company introduces PIM hunter test probe for more efficient and effective location of external PIM sources [EB]. US: Anristu company, 2016
- [29] Yang S, Wu W, Xu S, et al. A passive intermodulation source identification measurement system using a vibration modulation method [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2017, 59(6) : 1677-1684.
- [30] Zhang M, Zheng C, Wang X, et al. Localization of passive intermodulation based on the concept of k-space multicarrier signal [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017, 65(12) : 4997-5008.
- [31] Chen Z, Zhang Y, Dong S, et al. Wideband architecture for passive intermodulation localization [C]. IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS), Chengdu, China, 2018: 1-6.
- [32] 张美. 基于矩阵束方法的无源互调定位 [D]. 杭州: 浙江大学.
- [33] RF cavity resonator with low passive intermodulation tuning elements [P]. USA, US 7078990 B1.
- [34] 李霄泉, 崔万照, 胡天存, 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(4).
- [35] 李韵, 崔万照, 王新波, 等. 一种无源互调抑制同轴连接器: 201710179476. X [P]. 2017-08-29
- [36] 陈翔; 孙冬全; 崔万照, 等, 一种低无源互调波导法兰及设计方法: 201810267061. 2 [P]. 2018-10-12.
- [37] Chen X, Sun D, Cui W, et al. A Folded Contactless Waveguide Flange for Low Passive-Intermodulation Applications [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2018: 1-3.
- [38] 陈翔, 孙冬全, 等, 一种基片集成式低无源互调波导法兰垫片: 201910329837. 3 [P]. 2019-08-02.