

DOI: 10.7652/xjtuxb201809010

利用电热耦合效应的金属单点 接触结构无源互调研究

李军^{1,2}, 赵小龙¹, 高凡¹, 张松昌¹, 贺永宁¹, 崔万照², 徐卓¹

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安; 2. 西安空间无线电技术研究所, 710100, 西安)

摘要: 针对现有无源互调(PIM)模型不能准确解释互调机理并描述测试规律的问题,提出了一种基于电热耦合效应的PIM产生机理和模型,并利用金属单点接触结构进行了实验验证。首先,提出了一种基于缝隙波导近场耦合的PIM测试方法,该方法使待测结构与测试工装分离,克服了传统PIM实验研究针对整体微波部件进行测试分析的限制,能够实现单个点接触结构的PIM效应研究;然后,对铝接触在不同状态下的表面成分和电接触特性进行研究,结果表明,金属表面存在的氧化层和沾污物是引起其接触结PIM产生与劣化的根本原因,微波辐照时电热耦合效应影响接触结的阻抗;最后,通过实验获取了铝、紫铜和黄铜等材料组成的单点接触结构的PIM。实验和理论结果表明,相对于传统的数学经验模型或多项式数学拟合,结合电热耦合的接触非线性模型从物理底层出发,对PIM的产生根源和机理给出了明确解释,能够更加准确地计算和预测PIM。

关键词: 无源互调;近场耦合;电热耦合;缝隙波导;电接触

中图分类号: TN911.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)09-0076-06

Passive Intermodulation of Metal Point Contact Structure Based on Electrothermal Coupling Effect

LI Jun^{1,2}, ZHAO Xiaolong¹, GAO Fan¹, ZHANG Songchang¹, HE Yongning¹,
CUI Wanzhao², XU Zhuo¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract: A passive intermodulation (PIM) model based on electrothermal coupling effect is proposed to address the problem that current PIM model cannot explain the PIM mechanism and describe the experimental rules accurately. This model is further verified experimentally by using a metal point contact structure. First, a near-field coupling PIM measurement method based on waveguide slot is established, which makes the device under test (DUT) separate with the test equipment. This method overcomes the restriction in traditional PIM experimental research for measuring the whole microwave components, and realizes the research on the PIM effect of metal point contact structure. Then, the surface composition and the electrical contact characteristics of an aluminum metal point contact structure are investigated by EDX and I - V characteristics test, respectively. The results show that the oxidation and contamination existing on the metal surface dominates the PIM generation and degradation of metal contact. Moreover, the electrothermal

收稿日期: 2017-12-10。 作者简介: 李军(1969—),男,在职博士生;贺永宁(通信作者),女,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1537211)。

网络出版时间: 2018-06-19

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20180619.1535.002.html>

coupling effect in microwave stimulating is proved to have significant impact on the contact impedance. Finally, a PIM model based on electrothermal coupling effect is proposed and verified by the experimental tests on metal point contact structures made of aluminum, brass and copper. Theoretical and experimental results show that, compared with the traditional empirical model or polynomial model, the proposed nonlinear contact model based on electrothermal coupling effect can improve the PIM calculation and prediction dramatically by giving a clear explanation of PIM's origin and mechanism.

Keywords: passive intermodulation; near-field coupling; electrothermal coupling; slotted waveguide; electrical contact

两路或多路载波经过微波无源器件时,由于无源器件寄生的非线性效应,在系统中产生频率为载波频率线性叠加的微波信号,被称为无源互调(PIM)效应。无源互调问题的研究早在20世纪60年代就已经开始^[1-2]。随着近年来移动通讯的快速发展,通信卫星和移动基站硬件系统随着收发共用技术普遍应用及其通讯容量的不断增加,使得PIM问题更加突出^[3-5]。无线通讯硬件系统的高PIM指标要求使系统的制造和运营成本显著增加。

PIM主要由材料非线性和接触非线性引起^[6-7],由于接触结构在无线通信硬件系统中的存在使PIM难以避免。卫星网状天线由金属丝编织而成,不同丝之间存在多达百万个的接触点,这些接触节点的存在是网状天线产生PIM的主要原因。另外,天线馈电系统中腔体部件以及同轴连接装配结构中也存在金属接触连接结构,因此研究接触非线性引起的PIM产生机制、测试和抑制方法具有重要的实际意义。

通常,PIM测试是将整个被测器件接入互调测试系统中,PIM值用功率表示,所获得的互调结果不仅与接触界面状态有关,还与无源器件的接口结构及其连接压强等因素有关,这对互调产生原因的分析造成困难。目前,虽然人们通过大量工程实践已经获得了关键微波部件PIM发生的现象和规律,并获得了一些基于经验的PIM抑制手段和方法,但是由于影响微波部件PIM发生的多种因素交错在一起,PIM产生机理的准确描述和微波部件PIM模型的准确建立还相当困难,对微波部件及其子系统的PIM预测依然很困难^[7]。在目前微波通信系统和一些精密测试系统中,PIM引起的系统故障频繁发生。

本文采用近场耦合的测试方法,开展了金属单个接触点引起互调效应的实验研究,深入分析了同种金属不同表面状态和不同金属对PIM现象及规

律的影响机制。本文研究了单点接触结构的PIM效应,揭示了金属接触结PIM的产生根源,基于接触非线性和载波信号相互作用过程的理论研究,建立了PIM产生的机理和模型,并对PIM现象和规律进行了预测。

1 单点接触无源互调效应的实验方法

在测试微波辐照引起PIM时,天线产生的载波辐照在待测部件上,由待测部件产生的互调信号再被天线接收,从而获得待测部件反射回来的PIM值。对常规天线反射面,包括金属丝网编织的网状反射面的PIM测试通常都采用这种测试方法^[8-9],这种测试满足远场测试条件,即待测样和天线之间的距离远大于载波波长。本文采用了一种新的测试方法,即近场耦合测试。由于近场的场强较远场要强,因此近场PIM测试能够获得更高的灵敏度。应用这种新的近场耦合测试手段,将待测接触结构与PIM测试系统分离,从而能够实现对单个接触点的PIM测试。

图1给出了具体测试结构原理。激励辐射场由缝隙波导提供,在载波激励下电磁场通过缝隙波导耦合到波导外部,当耦合出来的电磁场辐照到接触结构,将在接触结构上产生感应电流。由于点接触结构的弱 $I-V$ 非线性特性,当该感应电流流过接触点时将产生互调频率成分,这部分互调电流作为辐射源向外辐射互调波信号^[10],互调波再通过缝隙波导耦合回波导中,从而产生正向传输互调和反向传输的反射互调,互调信号可被后端测试系统检测到。通过合理设计狭缝尺寸,可以调节辐射场的大小,并且能够抑制远场辐射,这种具有收发共用的缝隙波导PIM测试工装的具体方法可以参照文献^[11]。借鉴天线PIM测试过程,将测试结构分离出来,利用缝隙波导近场耦合原理测试PIM,其优势是方便开展针对专门设计待测接触结构的PIM实验研究,

控制接触状态和接触界面,从而获取单一或有限可控因素对PIM的影响,通过实验研究认识PIM产生的机理,揭示PIM产生的物理根源。

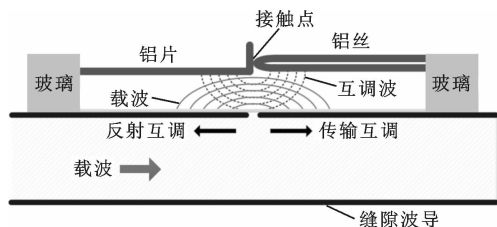


图1 测试结构原理图

采用PIM辐射源模型,接触结非线性响应产生的3阶和5阶互调功率,可表示为^[10]

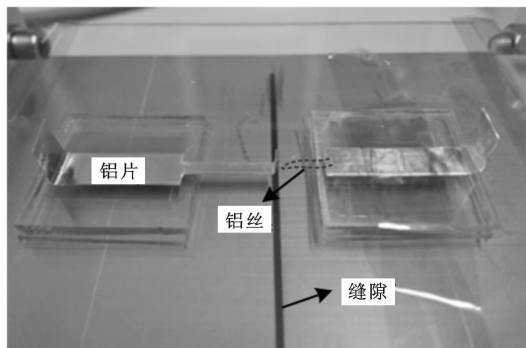
$$P_{IM3} = K_3 (\xi g_3)^2 (|Z| I_1)^6 \quad (1)$$

$$P_{IM5} = K_5 (\xi g_5)^2 (|Z| I_1)^{10} \quad (2)$$

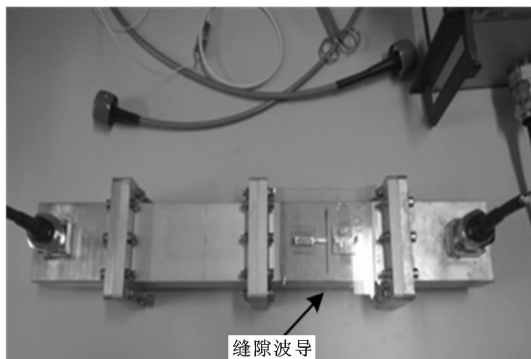
式中: ξ 为金属-半导体-金属(MOM)的接触面积比例; g_3 、 g_5 为非线性电流3次项、5次项系数; Z 为接触结的阻抗; K_3 、 K_5 为依赖于测试系统结构的常数; I_1 为感应电流。 I_1 是由缝隙波导辐射的电磁场在接触结构上产生的感应电流,其大小与载波功率相关,可表示为 $P_c = K_c I_1^2$,其中 P_c 为载波功率, K_c 为比例系数,代入式(1)(2),可进一步得到PIM和载波功率的关系。

本文针对由金属片和金属丝构成的单点接触结构展开研究,将金属丝弯成U字型,与金属片端部的折起部分形成接触,测试结构如图2所示。测试所用材料为铝、黄铜和紫铜,片厚度均为0.2 mm,金属丝直径分别为0.032、0.03和0.03 mm。3阶PIM测试时,两路载波分别为2.62和2.69 GHz,载波功率均为43 dBm,3阶PIM测试频率为2.55 GHz,测量获得反射互调。互调测试设备应用澳华测控技术有限公司的PIM2600S分析仪。

图3给出了3阶PIM功率随铝丝和铝片位移的变化关系。由图3可知,当铝片和铝丝未接触时,



(a)金属片和金属丝接触结构



(b)测试工装整体图

图2 缝隙波导近场耦合单点接触结构PIM测试结构

PIM功率在系统噪声为-121 dBm附近,当铝片和铝丝接触后,则产生功率约为-55 dBm的PIM值,图3提供了单点接触结构能够引起互调信号的实验证据。

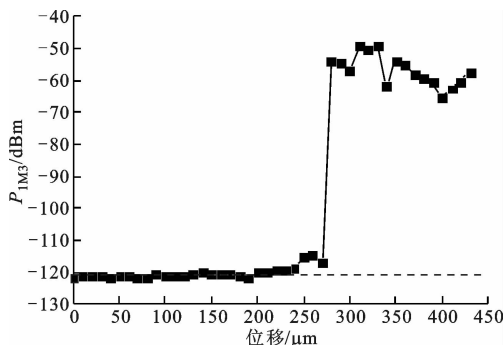


图3 3阶PIM功率随位移的变化关系

2 金属表面状态及其电接触特性测试分析

由图3可知,只有当铝丝和铝片接触时才会产生可测的PIM值,因此接触界面的电接触状态将直接影响PIM值。对于金属铝,通常在空气中会形成致密的表面氧化层,同时在空气中暴露较长时间或是在实验过程中触摸等过程很容易造成待测件表面有机物沾污。因此,当铝片和铝丝接触时,将形成金属-绝缘层-金属结构,从而可以产生非线性^[10,12]关系。

为了深入研究金属铝表面氧化物和沾污对PIM的影响,先对原始状态、超声清洗和氧化物刻蚀这3种不同状态金属铝的电接触特性进行系统研究。本文采用丙酮、乙醇和去离子水分别对铝丝和铝片进行超声清洗5 min,去除金属铝表面的沾污物;采用质量分数为0.15%的NaOH溶液对金属铝进行5 min的刻蚀,去除金属铝表面的氧化物,刻蚀完成后再用去离子水超声清洗5 min,以去除Na离

子沾污。原始状态、清洗后以及刻蚀后的铝片和铝丝表面显微形貌的扫描电子显微镜(SEM,S-4800,日本)图片如图 4 所示。由图 4 可知:铝丝和铝片原始表面均存在沾污;清洗后样片表面的沾污基本被去除;刻蚀过程中,NaOH 对铝表面进行腐蚀,因此刻蚀后样片表面出现了蚀坑,通过测量铝丝腐蚀前后直径的变化,得到腐蚀深度约为 0.5 μm 。

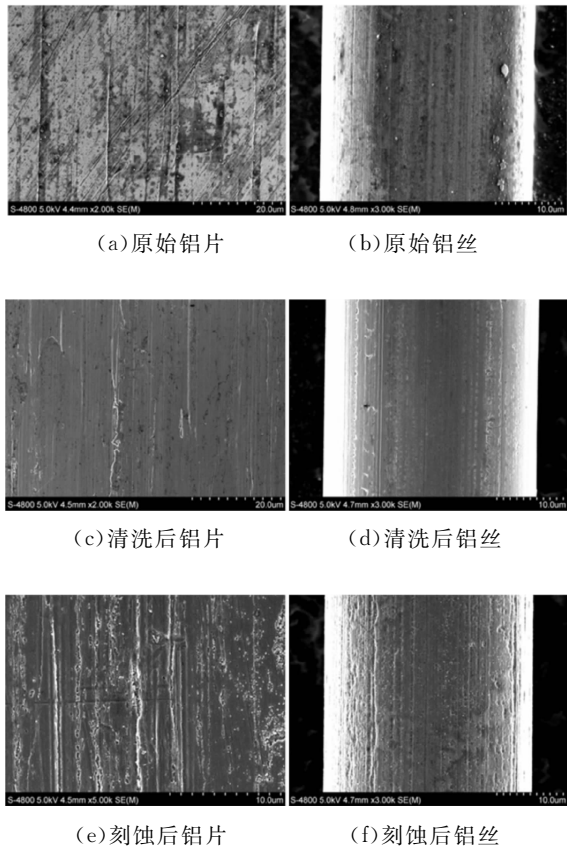


图 4 金属不同状态的表面形貌

对于表面有机沾污物,其主要成分为 C、H 和 O,对于表面氧化物,主要成分为 O、Al,对原始状态、清洗后和刻蚀后的铝丝、铝片表面的 C、O 成分含量采用扫描电镜中配置的 EDX 进行测试,结果如图 5 所示。由图 5 可知,原始状态的铝丝、铝片表面均含有较多的 C 元素,说明原始样片确实存在沾污,这与 SEM 得到的结果一致。清洗后,C 元素含量显著减少,表明清洗可以有效减少表面沾污,然而 O 元素没有明显减少,说明多数 O 元素以氧化物形式存在,且表面氧化物无法通过简单清洗去除。采用 NaOH 溶液刻蚀后,可以看到 O 元素有明显减少,说明 NaOH 溶液刻蚀去除了氧化物。

以上是通过材料的表征方法获取不同方法处理后样片表面形貌和成分的变化。对于电连接结构,测量其电接触特性是衡量接触状态的重要方法。对

不同方法处理后的铝丝和铝片的点接触 I - V 特性进行测试,测试结果如图 6 所示。对于原始状态和清洗后的接触结构,由于金属表面存在沾污或氧化层,在 1~100 mV 范围内,绝缘层的绝缘性能良好,接触结构几乎不导通。刻蚀后,由于氧化层基本被去除,接触结构的导电特性显著增强。

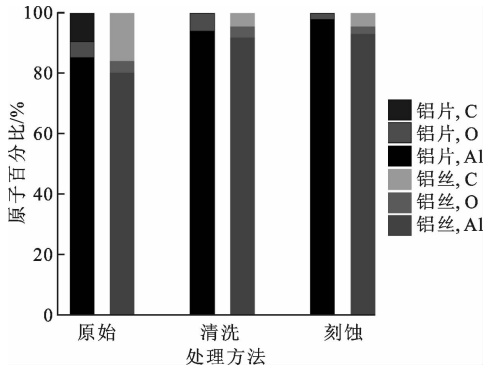


图 5 原始、清洗后和刻蚀后的铝片、铝丝表面 C、O 原子百分比

在测试过程中发现,除了表面处理影响接触状态,微波辐照对接触状态也会产生影响。由图 6 可知,采用 43 dBm 的两路载波辐照后,3 种接触结构的导电特性均增加了约 4 个数量级。微波辐照接触结构时,在金属表面产生感应电流,感应电流将流过接触结构,其导电性能增强,这是由感应电流的加热效应引起的。对于原始状态和清洗后的接触结构,微波辐照使得沾污层或氧化层溶解,从而增加了接触结构的导电性。文献[13]报道了在电接触领域氧化膜层的溶解现象,这表明在微波辐照过程中存在自热效应。

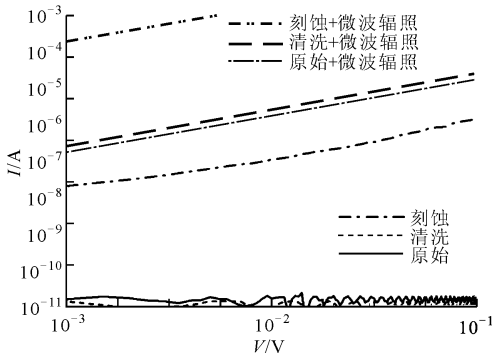


图 6 铝片和铝丝接触结构的 I - V 特性曲线

3 单点接触无源互调的产生机理及模型分析

为了进一步揭示无源互调的产生机理,对同种金属不同状态以及不同金属形成的单点接触结构的

3阶和5阶PIM进行了测试。测试3阶PIM时,两路载波分别为2.62和2.69 GHz,3阶PIM测试频率为2.55 GHz;测试5阶PIM时,两路载波分别为2.64和2.69 GHz,5阶PIM测试频率为2.54 GHz。

原始状态、清洗后和刻蚀后的铝金属单点接触结构的PIM值如图7所示。可知清洗后3阶和5阶PIM值均高于刻蚀后的,而原始状态下的接触PIM值又高于清洗后的,这说明金属表面氧化和沾污使得PIM值增加。通常氧化和沾污的存在显著增加了接触结的阻抗,根据式(1)(2),PIM值将显著增加。由图7可知,经过表面刻蚀后,铝片和铝丝的单点接触结构依然会产生PIM。由图5的EDX表面成分分析可知,刻蚀后的铝丝和铝片表面依然有氧化和沾污物残留,残留的氧化和沾污物是PIM的主要来源。因此,为了降低微波部件无源互调,应尽量避免部件连接面出现沾污,并且应尽量防止表面氧化。

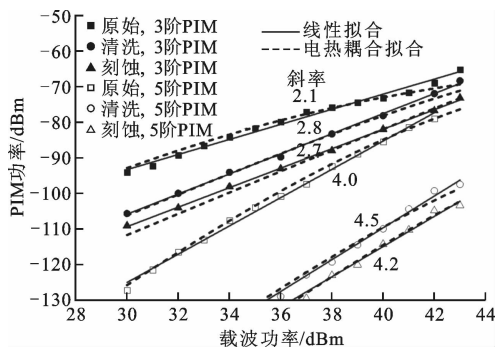


图7 原始、清洗后和刻蚀后的铝片和铝丝单点接触结构的PIM值随载波功率的变化

铝、黄铜、紫铜这3种材料的片和丝形成的单点接触结构在不同功率下的3阶PIM值如图8所示。由图8可知,相同载波功率下,单点结构的PIM值随铝、黄铜、紫铜依次降低。这是因为3种材料在空气中形成氧化膜的电阻率依次降低,其单点接触结构的接触电阻和非线性依次降低,根据式(1),其PIM值也依次降低。

对PIM值功率随载波功率的变化关系进行线性拟合,根据非线性函数的幂级数展开方法,3阶PIM值拟合线的斜率近似为3,5阶PIM值拟合线的斜率近似为5。但是,由图7、8中可知,3阶PIM值拟合线斜率小于3,而5阶PIM值拟合线斜率小于5。这种斜率偏离现象在同轴连接器和微带线PIM实验中也经常被观察到^[14-19],部分研究者提出了一些数学经验模型^[14-15]来描述这种偏离,但是目前还没有合理的理论模型来解释和验证。

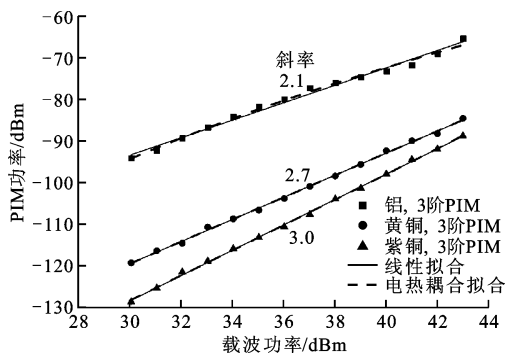


图8 铝、黄铜、紫铜材料的片和丝形成的单点接触结构的PIM值随载波功率的变化

由第2节的分析可知,载波和接触结构相互作用产生热效应,载波功率的变化将引起接触结温度的变化,而接触界面的温度变化进一步将会引起MOM非线性以及电阻率的变化,从而对PIM的变化规律产生影响,因此电热耦合效应可能是PIM值斜率偏离的主要原因。

根据固体物理理论,MOM接触结构的I-V非线性特性通常具有如下形式

$$I = AT^{\alpha} \exp(-qV/nk_0T) \quad (3)$$

式中: T 为温度; α 为指数因子; q 为单位电荷量; n 为理想因子; k_0 为波尔兹曼常数; A 为比例系数。根据式(3)可以得到3次项和5次项系数

$$g_3 = -\frac{1}{6}(q/nk_0)^3 AT^{\alpha-3} \quad (4)$$

$$g_5 = -\frac{1}{120}(q/nk_0)^5 AT^{\alpha-5} \quad (5)$$

对铝表面的状态分析可知,铝表面存在氧化物和沾污,接触结的接触电阻主要由MOM结构的膜层电阻决定,即由式(3)一阶近似,即

$$R = nk_0/qAT^{\alpha-1} \quad (6)$$

若接触结阻抗主要由接触电阻 R 决定,即 $|Z| \approx R$,结合式(1)(2)和(4)~(6),近似得到PIM值和温度的关系

$$P_{IM3} = (K_3 \xi^2 / 36 K_c^3 A^4) (P_c^3 / T^{4\alpha}) \quad (7)$$

$$P_{IM5} = (K_5 \xi^2 / 14 400 K_c^5 A^8) (P_c^5 / T^{8\alpha}) \quad (8)$$

由式(7)(8)可知,若 T 不随载波功率变化,则 $P_{IM3} \sim P_c$ 关系的斜率为理想值3, $P_{IM5} \sim P_c$ 关系的斜率为理想值5。若微波的电热耦合效应对接触结温度影响较大时,接触结温度随载波功率的大而升高,即

$$T = T_0 + \kappa P_c \quad (9)$$

式中: T_0 为环境温度; κ 为比例系数。互调功率随载波功率变化的关系为

$$P_{\text{IM3}} = B_3 P_c^3 / (T_0 + \kappa P_c)^{4\alpha} \quad (10)$$

$$P_{\text{IM5}} = B_5 P_c^5 / (T_0 + \kappa P_c)^{8\alpha} \quad (11)$$

$$B_3 = K_3 \xi^2 / 36 K_c^3 A^4$$

$$B_5 = K_5 \xi^2 / 14 400 K_c^5 A^8$$

由式(10)(11)可知,由于电热耦合效应的存在使得 PIM 随载波功率变化关系的斜率小于理想值。由图 7、8 中采用式(10)(11)得到的拟合曲线可知,拟合结果与实验数据吻合较好,表明基于电热耦合效应分析的互调-载波功率关系合理。

对于式(10)(11),如果 κ 越小,分母项越接近于常数,则 P_{IM3} 、 P_{IM5} 的斜率越接近于理想值 3、5。对于接触结来说, κ 随接触电阻的增大而增大,随材料热导率的增大而减小。图 8 中铝、黄铜和紫铜 3 种材料构成的单点接触结构的 PIM 值随功率变化曲线的斜率与预测的结果吻合。

以上实验规律和理论分析表明,对于图 2 所示的金属单点接触结构产生互调信号的根源主要是金属表面的氧化物和沾污物引起非线性接触。载波和接触结相互作用的电热耦合效应对互调信号具有显著影响,是 PIM 值的斜率偏离理想值的根源。

4 结 论

本文在接触界面成分分析和电接触特性测试研究的基础上,利用近场耦合 PIM 测试获取了 PIM 与载波功率的关系,提出了基于电热耦合效应的 PIM 产生机理和模型。实验研究表明,金属表面的氧化层和沾污层是 PIM 产生和劣化的根本原因。理论结果表明,电热耦合效应使 PIM 值关系斜率小于理想值,并且接触结的电阻越小,导热性越好,斜率越接近于理想值。该模型对 PIM 的产生根源和机理给出了明确解释,研究结果对于通信卫星网状天线 PIM 效应及相关大功率微波部件射频连接可靠性问题具有参考意义。

参考文献:

- [1] SEA R G. An algebraic formula for amplitudes of intermodulation products involving an arbitrary number of frequencies [J]. Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1968, 56(8): 1388-1389.
- [2] SEA R G, VACROUX A G. On the computation of intermodulation products for a power series nonlinearity [J]. Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1969, 57(3): 337-338.

- [3] SHAYEGANI A, SALMON J, SINGH R R. Multi-carrier PIM behavior and testing in communications satellites [C]//The 32nd AIAA International Communications Satellite Systems Conference. Reston, VA, USA: AIAA, 2014: 4249.
- [4] AL-MUDHAFAR A, HARTNAGEL H. Bit error probability in the presence of passive intermodulation [J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(8): 1145-1148.
- [5] CHOU S J, CHOU H T, KUO L R. Potential causes of PIM problems in the LTE outdoor base station multi-band antennas [C]//2016 International Symposium on Antennas and Propagation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 1080-1081.
- [6] LUI P L. Passive intermodulation interference in communication systems [J]. Electronics & Communication Engineering Journal, 1990, 2(3): 109-118.
- [7] 叶鸣, 贺永宁, 孙勤奮, 等. 大功率条件下的无源互调干扰问题综述 [J]. 空间电子技术, 2013(1): 75-83.
- YE Ming, HE Yongning, SUN Qinfen, et al. Review of passive intermodulation interference problem under high power signals [J]. Space Electronic Technology, 2013(1): 75-83.
- [8] LUBRANO V, MIZZONI R, SILVESTRUCCI F, et al. PIM characteristics of the large deployable reflector antenna mesh [C]//The 4th International Workshop on Multipactor, Corona and Passive Intermodulation in Space RF Hardware. Frascati, Italy: ESTEC, 2003: 1-8.
- [9] BOLLI P, SELLERI S, PELOSI G. Passive intermodulation on large reflector antennas [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2002, 44(5): 13-20.
- [10] ZHAO X, HE Y, YE M, et al. Analytic passive intermodulation model for flange connection based on metallic contact nonlinearity approximation [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017, 65(7): 2279-2287.
- [11] 高凡. 基于近场耦合的无源互调测试方法的研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2017: 20-30.
- [12] 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.
- [13] 程礼椿. 电接触理论及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1988: 35-39.

(下转第 117 页)