

文章编号: 2095-4980(2023)03-0291-10

基于接触非线性的无源互调抑制技术研究进展

鲍艳^{1a,1b}, 王露旋^{1a}, 刘超^{1c}, 胡天存², 蒋文³

(1. 陕西科技大学 a. 轻工科学与工程学院; b. 西安市绿色化学品与功能材料重点实验室; c. 前沿技术研究院, 陕西 西安 710021;
2. 西安空间无线电技术研究所, 陕西 西安 710100; 3. 泰州市旺灵绝缘材料厂, 江苏 泰州 225327)

摘要: 无线通信系统日益朝着高功率、高灵敏度的方向发展, 无源互调(PIM)对信号传输的干扰问题是通信系统发展中亟需攻克的难题之一。据此, 本文综述了无源互调产生的机理, 并从降低接触面粗糙度、应用涂层材料和优化器件结构 3 个方面重点总结了无源互调抑制技术的研究进展, 同时对不同抑制技术的优缺点进行了分析, 最后对无源互调抑制技术的发展趋势进行了展望, 以期为相关研究者提供借鉴和指导。

关键词: 无源互调; 无线通信; 接触非线性; 涂层材料; 抑制技术

中图分类号: TN911.4

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022143

Research progress of suppression technology of Passive Intermodulation based on contact nonlinearity

BAO Yan^{1a,1b}, WANG Luxuan^{1a}, LIU Chao^{1c}, HU Tiancun², JIANG Wen³

(1a.College of Light Industry Science and Engineering; 1b.Xi'an Key Laboratory of Green Chemicals and Functional Materials;
1c.Cutting Edge Technology Research Institute, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an Shaanxi 710021, China;
2.Institute of Space Radio Technology, Xi'an Shaanxi 710100, China;
3.Taizhou Wangling Insulation Material Factory, Taizhou Jiangsu 225327, China)

Abstract: Wireless communication systems are increasingly developing towards high power and high sensitivity. The interference of Passive Intermodulation(PIM) on signal transmission is one of the difficult problems to be solved in the development of communication systems. Based on this, the mechanism of passive intermodulation is summarized in this paper. The research progress of passive intermodulation suppression technology from three aspects, such as reducing contact surface roughness, applying coating materials and optimizing device structure, are mainly reviewed. Moreover, the advantages and disadvantages of different suppression technologies are analyzed. Finally, the development trends of passive intermodulation suppression technology are prospected. This work aims to provide reference and guidance for relevant researchers.

Keywords: passive intermodulation; wireless communication; contact nonlinearity; coating materials; suppression technology

当今时代背景下, 信息技术与电子通信领域成为全球竞争的核心, 无论是科技发展还是生活需要, 都对通信领域的要求日益提高^[1]。我国在通信技术领域投入了大量人力物力, 研究人员也致力于提高通信技术的掌控力, 我国已成为 5G 通信领域标准和技术的全球引领者之一^[2]。在通信技术蓬勃发展的过程中, 天线、电缆、同轴连接器等无源器件的使用越来越广泛, 多载波信号在这些无源器件中混合调制, 由于半导体效应、接触电流效应、非线性散射效应产生的接触非线性, 导致了通信系统中无源互调现象的出现^[3]。目前, 常出现无源互调的通信系统有军用通信工作站、蜂窝式移动通信基站、卫星地面接收站等^[4]。无源互调中生成的互调产物如果落入接收频带, 将会导致通信系统频谱资源的浪费, 严重干扰信号的传输, 对通信系统的性能造成极大影响^[5]。特别是在当今既需要大功率发射系统又要求高灵敏接收装置^[6]的通信系统中, 无源互调已成为不可忽视的问题^[7]。因此, 如何有效抑制无源互调的产生引起了新的关注^[8]。

收稿日期: 2022-07-20; 修回日期: 2023-01-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(22078188; 21878181)

基于此, 本文在查阅大量文献的基础上, 归纳了无源互调的产生机理, 并对抑制无源互调的相关技术进行了总结与分析, 最后展望了无源互调抑制技术的发展趋势, 以期为相关研究者在寻找无源互调抑制技术及促进此领域的发展提供借鉴及新思路。

1 无源互调的概念

无源互调(PIM)是由2个或2个以上的发射载波, 在无源器件中相遇时产生的基本信号频率的线性组合产物落入接收通带内形成的^[9]。如图1所示, 2个载波 f_1 、 f_2 分别通过2个靠得很近的信道传输, 传输前经过多工器并相加。假设一根天线不仅用于发射也用于接收, 双工器便用于分离发射信号和接收信号。在通信子系统中, 希望信号传输质量好, 则要求A、B点之前的设备是线性的^[10]。但实际工作环境中, 各种金属接头、双工器、天线、反射器表面都呈现出不同程度的非线性, 因此会生成幅度明显的PIM产物 f_3 ^[11]。PIM产物远低于热噪声电平, 在发射系统中不会被检测到, 发射信号的质量不受影响^[12]。但在收发共用的天线和双工器中, PIM产物会耦合进接收器中, 尽管不会影响发射信号的质量, 但会很大程度超过接收器的热噪声最低值, 且其幅度与接收机的灵敏度相似。如果PIM产物落入接收频带, 会降低接收器的灵敏度^[13], 危害到通信系统的正常工作, 如不加以抑制, 甚至会造成系统瘫痪^[14-16]。

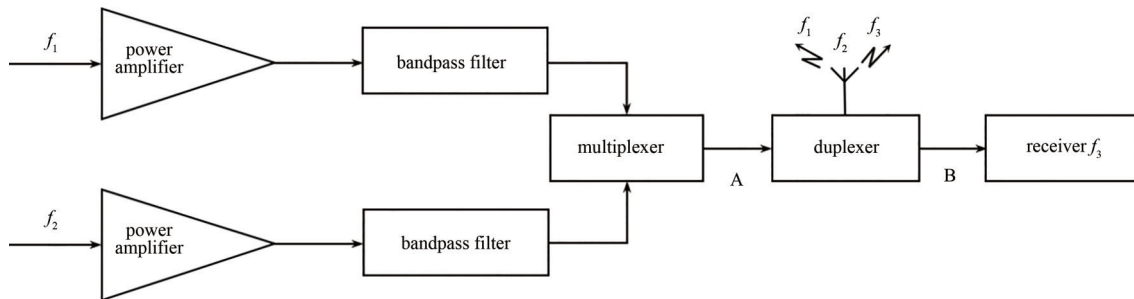


Fig.1 Simplified schematic diagram of passive intermodulation interference

图1 无源互调干扰的简化示意图

在多频环境下, 互调产物随系统载波数的增加而急剧增加, 三阶互调增加速度甚至高于指数上升。在载波较多时, 无源互调干扰就类似宽带噪声。互调产物和传输信道数目的关系如图2所示^[17]。

2 无源互调产生的机理

有关无源互调产生机理的文献较少, 但涉及的领域众多, 研究者可能提出的机理分析分属不同学科和领域, 尚未就PIM产生机理达成共识。依据现有文献, PIM的产生主要来源于无源器件自身的接触非线性特性。接触非线性是指具有非线性电流/电压特性的材料接触引起的非线性, 如有氧化层的金属接触表面^[18]。接触非线性的机理非常复杂, 但通信系统中各组件的金属接触不可避免^[19], 因此, 对接触非线性机理的研究也将直接决定PIM抑制技术的发展。本文主要从半导体效应、接触电流效应和非线性散射3个方面阐述接触非线性的机理。

2.1 半导体效应

如果使用的器件材质为金属, 接触面表面则有可能出现薄膜, 如暴露在空气中形成的氧化膜、物理吸附膜或化学吸附膜、表面的污染物等^[20]。薄膜的存在使原本接触良好的金属-金属(Metal-Metal, MM)接触转变为接触不良的金属-介质层-金属(Metal-Insulator-Metal, MIM)接触。当线性电流经过薄膜时, 有可能发生隧穿效应、热电子发射效应等非线性微观物理效应, 线性电流因此转化为非线性电流, 从而出现接触非线性。

在MIM接触中, 2个金属导体被绝缘层隔开, 通常情况下, 由于绝缘层的存在, 电子没有足够的能量克服金属之间的电势壁垒, 电流无法从一个金属导体传输到另一个金属导体^[21]。但根据量子理论, 电子越过电势壁垒到达另一个金属导体的可能性并不为零, 只要电子有足够的能量, 波函数幅度就能以指数形式衰减到电势壁垒的另一侧, 从而能以较小的幅度继续传播^[22]。

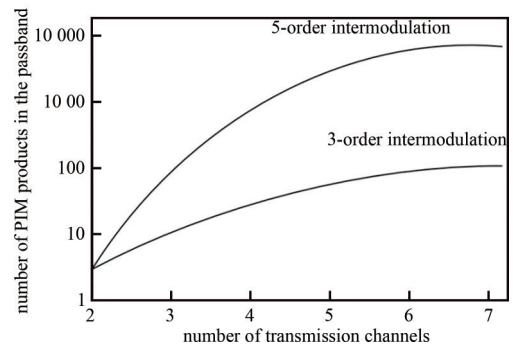


Fig.2 Relationship between PIM products and the number of transmission channels

图2 PIM产物和传输通道数的关系

Guenzer^[23]研究表明，电子隧穿效应受温度影响较小，当温度为 0 °C 时，电子隧穿效应的四阶电流密度泰勒展开式为：

$$J = \frac{me}{2\pi^2 H^3} \exp\left(-A \frac{-1/2}{\varphi}\right) \left[\left(\frac{2}{A} \frac{-1/2}{\varphi} + \frac{2}{A^2} \right) eU + \frac{A}{48} \frac{-1/2}{\varphi} (eU)^3 \right] \quad (1)$$

式中： e 为电子电荷； m 为电子质量； U 为 MIM 接触结两端电压； $H = h/2\pi$ (h 为普朗克常数)； φ 为金属的功函数。 A 的定义为：

$$A = \frac{4\pi s \sqrt{2m}}{H} \quad (2)$$

式中 s 为截止区的宽度。

此式为典型的非线性指数函数，因此电子隧穿效应会发生非线性现象，导致 PIM 的产生。

非铝制品金属中，当氧化层厚度达到 1~2 nm 时，会出现明显的隧道电流。如果采用涂覆工艺抑制 PIM，必须确保涂层不会因为过薄而出现明显的隧穿电流，否则可能会恶化无源互调现象。

热电子发射效应也是 MIM 接触中存在的非线性现象。外部环境的热能给予了一侧金属表面电子足够的动能，因此电子可以突破绝缘层的电势壁垒到达另一侧金属^[24]。

在 MIM 接触结施加电压，电流密度如式(3)所示：

$$J = aT^2 e^{-\frac{\varphi_1}{kT}} \left(1 - e^{-\frac{eV}{kT}} \right) \quad (3)$$

式中： $a = 4\pi me k^2 h^3$ ； φ_1 为金属与绝缘膜交界面的约束势垒； T 为温度； k 为玻兹曼常数。

根据式(3)可知，提高 MIM 接触结两端电压，热电子发射效应将加强，且外界温度越高，效应越明显。可以看出，此电流密度表达式为非线性指数函数，说明热电子发射效应会导致非线性物理现象，从而产生 PIM。

2.2 接触电流效应

接触电流效应实际上是指由于接触点(或区域)的高电流密度所导致的一类非线性物理现象的统称^[25]。从微观角度考虑，金属的表面不会像其内部结构一样稳定^[26]，金属的表面形貌呈现高低不一的复杂形态。当发生 MM 接触时，如图 3 所示^[27]，有部分区域并未发生接触，实际上电流只会通过部分接触的微凸体^[28-29]。由于实际接触面积变小，电流线经过接触点时会收缩，导致电流线路径变长且电流密度增大等情况。电流线路径变长会使接触电阻变大，增加的接触电阻和接触点升高的电流密度协同作用，加剧连接结的热损耗，导致接触点的非线性收缩或膨胀，严重时会产生非线性热调制电阻^[30]。在每个微凸体上，电流聚集通过时会产生非线性电流，接触面积的变化会影响非线性电流，从而导致 PIM 的产生^[31]。如果接触面粗糙度降低，金属表面形貌更为均匀，电流会得到分散，相应的接触电阻降低，非线性电流减少，PIM 电平减小，PIM 便可得到抑制^[32]。

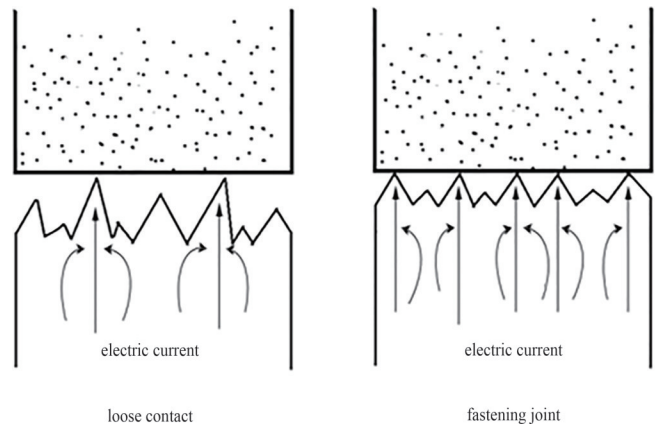


Fig.3 Metal contact model
图3 金属接触模型

2.3 非线性散射效应

电磁波在不同的媒介中传播会呈现出不同的特性^[33]。图 4 是由 2 种不同材质的介质拼接而成的平面散射体^[34]，可以看作是两边的线性区域和中间一小段接触的非线性区域组成。假设电磁波沿 y 方向传播，经过非线性区域时会出现非线性散射而产生 PIM，因此不同的非线性结构、非线性区域的数量、接触区域的宽度和距离以及入射功率电平等因素对 PIM 电平均有不同程度的影响。

3 无源互调抑制技术

在通信系统的各种器件中,无论是MM接触还是MIM接触都是难以避免的,处理方式多样且复杂,因此,如何抑制接触非线性引发的无源互调现象备受关注^[35]。目前,常见的无源互调抑制技术主要有降低接触面粗糙度、应用涂层材料和优化器件结构3种方式。

3.1 降低接触面粗糙度

金属表面的粗糙程度对电流的传输有很大影响,是产生无源互调的重要原因之一^[36]。印制电路板(Printed Circuit Board, PCB)是电子工业的重要部件之一^[37],几乎每种电子设备都使用印制板^[38]。以PCB板的生产过程为例,为提高铜箔和板材间的结合力,常需增加铜箔的粗糙度,即使用相对粗糙的毛面与基体树脂相结合^[39]。但高频下信号会有明显的趋肤效应,使通过的电流不均匀,会出现非线性电流,从而产生PIM^[40]。另外,随着频率的进一步加大,趋肤深度减小,如果铜箔表面粗糙度很大,会进一步加剧PIM现象^[41]。因此,降低金属接触面的粗糙度是抑制PIM的重要手段之一。

黄建国等^[42]选用高频微波材料及反转(Reverse Treated Foil, RTF)铜箔作为基板进行加工,不同于采用毛面与树脂结合的传统工艺,RTF铜箔光面与基材采用特殊方式进行结合。由图5可以看到,RTF铜箔的光面粗糙度约为 $1\ \mu\text{m}$,而传统铜箔,以高温高延伸(High Temperature and High Elongation Copper Foil, HTE)铜箔为例,其毛面与基材结合,毛面粗糙度为 $6\sim 8\ \mu\text{m}$ 。对比HTE铜箔,RTF铜箔在基材上留下的铜牙痕迹较小。铜箔粗糙度较小,对信号传播及PIM的影响也较小。在腐蚀过程中,腐蚀速度更快;同时因为铜牙痕迹较小,腐蚀得更加干净,从而减小材质的PIM影响。另外,他还研究了砂纸摩擦前后铜箔表面粗糙度变化对PIM的影响,发现砂纸摩擦后较摩擦前PIM增大了 $7\sim 11\ \text{dBm}$,再次表明了铜层表面粗糙度对PIM影响的重要性。

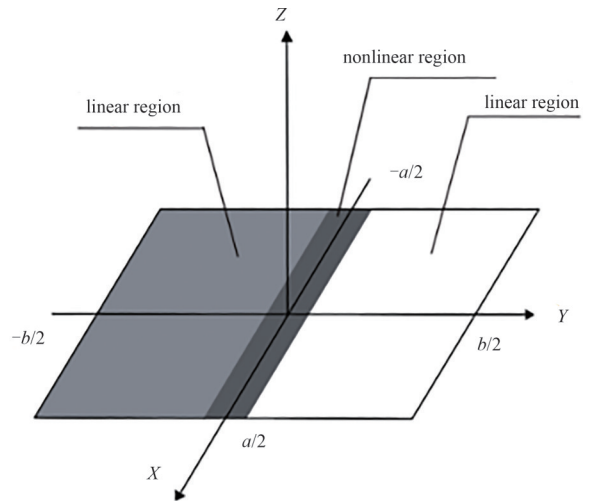


Fig.4 Rectangular plate made of two materials
图4 两种材质拼接而成的矩形平板

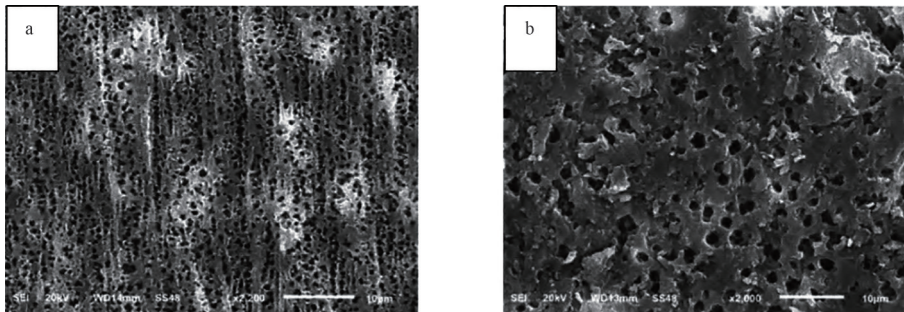


Fig.5 (a) indentation of RTF copper foil on the substrate; (b) indentation of HTE copper foil on the substrate
图5 (a) RTF铜箔在基材上的压痕;(b) HTE铜箔在基材上的压痕

针对PIM问题,Rogers公司采用超光滑电沉积铜箔开发了IM Series™高频层压板,该铜箔对基材具有良好的粘附性。超光滑铜箔的粗糙度为 $0.5\ \mu\text{m}$,而当前普遍使用的反向处理电沉积铜箔的粗糙度为 $1.0\ \mu\text{m}$ 。这种超低粗糙度的IM铜箔与所选层压板中的受控介电性能相组合,可实现超低PIM层压板,满足当今基站天线市场对信号传输的严苛需求。影响铜箔表面粗糙度的因素有很多,如电解液中铜离子浓度^[43]、电解工艺条件^[44]、添加剂^[45]等影响铜成核和生长的因素都会影响铜箔的表面状况^[46]。

Ansuinelli等^[47]研究了导体表面粗糙度对印刷电路PIM影响的物理机制,即携带高功率射频信号的不完全导体的表面粗糙度不仅增加了耗散损耗,还增加了由自加热产生的电热非线性引起的PIM。通过仿真实验可知,相比粗糙导体,光滑导体PIM降低了 $10\ \text{dBm}$,说明降低导体表面粗糙度可有效降低接触非线性和电热非线性引起的PIM现象。Duteil等^[48]通过研究发现,对于低粗糙度黄铜表面,氧化物薄膜破裂需要的轴向力比高粗糙度黄铜表面更低。因此,低粗糙度黄铜表面的金属-氧化物-金属面积低于高粗糙度黄铜表面,减少了隧道效应的非线性影响。因此,低粗糙度黄铜材料的PIM低于高粗糙度黄铜材料。

3.2 应用涂层材料

MM接触时,受金属表面粗糙度和金属硬度的影响,接触面易呈现出图3中的松散接触,出现非线性接触电阻,导致PIM产生。在金属表面涂敷涂层材料,可有效改善不良接触现象,起到抑制PIM的效果。特别是非金属涂层的应用,在抑制PIM的同时,能够有效隔绝金属接触面与空气的接触,避免因氧化物的生成而导致PIM加剧。

3.2.1 金属涂层

当金属-金属接触发生时,金属硬度不同,接触面的接触情况也不同。2种较硬的金属接触时,实际接触面积要比其中一方为较软金属的接触面积小,电流的聚集情况也会较明显。因此,可以在接触面涂敷硬度较低的金属涂层,增大实际接触面积,降低非线性电流的产生,抑制PIM现象。同时,在实际应用中尽量避免使用铁、镍等具有非线性的铁磁材料作为涂层^[49],而是使用金、银、铜和合金等材料,或将这些材料以足够的厚度镀覆到铁磁金属表面,从而抑制因材料非线性导致的PIM现象。欧空局研究了钢、镉、铋等涂层对PIM的影响^[50];Vicente等^[51]对比了纯铝法兰接触和镀银法兰接触,结果表明,在相同的扭矩下,镀银法兰的性能明显优于纯铝法兰。造成这一结果的原因可以理解为金属硬度不同,软金属在较低压力下呈现更好的电接触,硬材料则更容易渗入到软金属中,从而增大接触面积,在控制PIM上呈现出很好的效果。

同轴连接器广泛用于通信系统中,在不同的电路模块之间传输信号,其产生的PIM会对通信系统造成危害。Jin等^[52]研究了同轴连接器中涂层材料对PIM的影响,发现含镍连接器的三阶互调功率比不含镍的连接器高得多,且其功率取决于表面涂层材料的厚度和材料的电导率,较厚的表面涂层和较高的导电性可降低PIM,并据此提出一种有效的分析和预测涂层材料对PIM影响的方法。

3.2.2 非金属涂层

金属涂层虽然对无源互调有一定的抑制效果,但金属接触空气后易氧化,且涂层附着力不够强,耐磨性不够高,特别是器件多次插拔对涂层磨损较大,导致磨屑掉落,引起更严重的非线性问题。非金属材料,特别是有机材料,作为介质层对PIM有优异抑制效果的同时,还能有效抑制金属接触面氧化物的生成,附着力和耐磨性也相对较高,具有广阔的应用前景^[53]。

李韵等^[54]在同轴连接器的阴头内外导体和阳头内外导体间镀覆一层绝缘介质层,如硅、硅类化合物、聚碳酸酯类材料或聚合物材料,发明了一种PIM抑制同轴连接器。该同轴连接器稳定性高,对PIM现象有显著的抑制效果,可以满足航天器及地面通信系统的低PIM要求。该研究为绝缘介质层应用在通信设备中降低PIM带来了启发,Kozlov等^[55]研究发现微带线PIM水平与边缘周围的局部场强大小密切相关,而局部场强大小又取决于介电常数和涂层的厚度,减小局部场强的一个明显的方法是在微带边缘涂上高介电常数介质涂层,可以使用凝胶或液体电介质物质实现,以确保紧密的保形覆盖。通过在微带线表面固化一层五氧化二钽陶瓷涂层,可使PIM降低10 dBm,使用更厚的涂层(大于1 μm)和具有更高介电常数的材料,可以实现更好的PIM抑制效果^[56]。PIM与涂层介电常数、介电损耗、厚度等之间的定量趋势,还需进一步研究。

根据无源互调的定义,可以将其看作一种宽带噪声,既然在同轴连接器上涂敷绝缘介质层避免MM接触能够抑制PIM,则相同类型的材料都能起到同样的效果。对于使用非金属涂层抑制PIM的文献数量很少,但有关绝缘介质层的研究众多,可以通过借鉴绝缘介质层的制备,扩大非金属涂层的选择范围,为PIM抑制技术的发展拓宽道路。

由于数字系统中工作频率的稳步提高和电源电压的降低,同步开关噪声(Synchronous Switching Noise, SSN)会影响高速系统的性能^[57-58],因此成为目前一个较为严重的问题。在电路板内层嵌入电容是在不增加产品尺寸情况下有效降低SSN的首选方法^[59-60],周国云等^[61]通过叠层技术制备了以环氧树脂/钛酸钡/聚酰亚胺为绝缘介质的PCB埋嵌电容器,由于环氧树脂/钛酸钡具有陶瓷粉末的介电常数、与印刷电路板的良好相容性和聚合物的优异加工能力等优势,因此该电容器具有优异的环境稳定性。与SSN相类似,PIM也可以看作是一种噪声干扰,文献中提及的环氧树脂/钛酸钡/聚酰亚胺复合材料可以考虑作为非金属涂层应用在通信系统中^[62]。

射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)芯片伴随着半导体技术的发展得到了广泛的应用,但RFID芯片向深亚微米的发展使其关键部件MIM电容的制造工艺成为难点。张平等^[63]选择基于RFID芯片应用的0.13 μm 高密度MIM电容制造工艺为研究对象,以低介电材料SiN, SiO₂和高介电材料Al₂O₃, SiO₂,结合电容结构设计,制备了各项电性能参数满足需求的产品。通过添加绝缘介质层可有效抑制由于MM接触导致的PIM现象,文献中提及的介电材料均可考虑应用到绝缘介质层中。

由上可知,在器件中应用涂层材料时,金属涂层特别是金、银等贵金属在PIM抑制上有显著效果,但这类金属涂层造价昂贵,且涂层的附着力不佳,多次插拔会有磨屑产生,磨屑掉落可能会造成电路局部短路等情况,

影响信号的传输,造成新的PIM产物。非金属涂层具有广阔的应用前景,特别是有机涂层优异的附着力和耐磨性,能够有效抑制PIM的产生,降低涂层的制备成本。但目前有关非金属涂层的研究还不够深入,难以对PIM抑制技术的进一步开发产生有效的指导作用。

3.3 优化器件结构

除了降低接触面的粗糙度和使用涂层外,优化器件结构,如调整器件尺寸、增大接触压力或直接选择无接触结构也对PIM的抑制有着非常显著的效果^[64]。

Zelenchuk等^[65]发现微带线的导体和无源器件连接器中会形成高电流密度,产生大量热损失。当金属大幅升温时,电阻会随之增大。在多个载波作用下,电路功率周期性变化,电阻也会出现周期性变化,非线性电阻随之显现,从而产生PIM。因此,增加微带线或同轴连接器的几何尺寸来扩大接触面积,可以降低流入导体内部的电流密度和工作中产生的热量,使电阻相对稳定,抑制PIM的产生。Shitvov等^[66]发现PIM会随着微带线长度的增加而累计增加,但线宽与PIM的增长并无直接联系,因此在微带线的设计中可通过缩短长度、加大宽度来抑制PIM的产生(但要注意使用低磁导材料作为基底)。

在微波连接器或波导中,由于没有一个金属的表面可以完全光滑,因此实际接触并不是2个面的完全接触^[67]。金属表面不会保持像其内部一般的稳定结构^[26],材料表面常存在着悬挂键,其最小自由能导致金属表面产生不同的晶格结构,由于其中晶格缺陷的存在,会生成不同的小岛形状,这些小岛的生长速度以及高度均有不同,最终产生非常不规则的接触区域。如图3所示,这种表面之间的相互接触相比光滑表面,会多出很多毛刺^[25,27],即表面形貌将会限制实际的接触面积。为减小这种由于表面粗糙造成的接触损失,增加连接器的可靠程度,可避免接触或增大实际的接触面积,而增大实际接触面积可通过增加接触力实现^[25]。李瑜华等^[68]研究了扼流法兰结构对PIM的抑制,发现依据1/4波长线变换原理,使另外一端的开路线在波导接头这边实现短路,即利用空气实现射频的短路,通过抑制连接面处产生三阶互调频率的传导电流来抑制PIM产物,可降低PIM值40 dBm以上;对于其他非三阶频率点的互调性能的改善,则通过传统的增强法兰压强的方式,保证接触面压强大于69 MPa。Yang等^[69]在传统法兰安装表面的外导体上设计垫圈或改进环,改善了法兰电气连接的不完善,PIM值可降低9 dBm,采用贵金属(金)镀层的改进环可进一步降低PIM水平。

采用高压法兰实现接触面的紧密连接会使工艺及其装配复杂度大幅提升,且无法从根本上消除法兰连接的接触非线性。扼流法兰虽避免了一部分接触,但其工作带宽较窄,无法满足宽带系统需求,而非接触式法兰可有效避免由于接触非线性引起的PIM现象。非接触式法兰及其转换结构中,最广泛应用的是单面钉床人工磁导体(Artificial Magnetic Conductor, AMC)平面,钉床形式的人造磁性导体板围绕阳凸缘的外表面布置,而具有较宽中空端的波导管用作阴凸缘。与平面法兰相比,这种非接触式法兰的尺寸显著减小。与传统波导法兰相比,其PIM水平最大可提高30 dBm,几乎不受表面镀层材料和连接压力的影响,但这种方法需要改变原始部件的结构^[70]。对此,研究者提出了双面AMC结构,不需要调整原始部件结构就能实现双面非接触化^[71],且通用性更强,适用范围更广。Chen等^[72]通过构造双面周期性金属单元阵列,结合机械支撑结构,在普通波导法兰面之间形成具有双面空气间隙的非接触过渡连接(如图6所示)。通过特定设计步骤,保证电磁波沿波导正常传输而不泄露,降低了传统波导法兰的电接触面积,消除了金属接触非线性,有效抑制了PIM现象。这是基于间隙波导技术的非接触式法兰首次被用于解决波导连接引起的PIM问题的报道,采用这种方法得到的波导法兰对PIM的平均抑制度达到了25 dBm以上,最大抑制度超过50 dBm。与单面钉床AMC相比,构成双面结构时总的钉床高度增加一倍,且共用的金属支撑面也会占用一定的物理空间,带来尺寸及质量的增加,不利于小型轻量化。

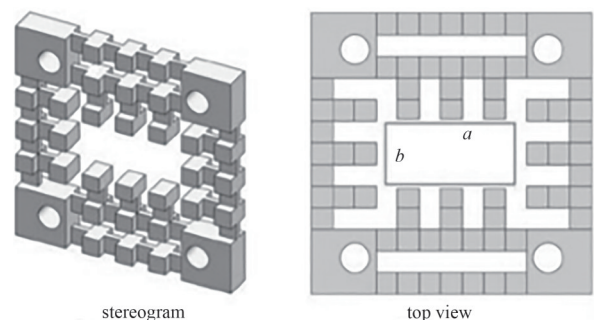


Fig.6 Non-contact low passive intermodulation waveguide flange conversion structure

图6 非接触式低无源互调波导法兰转换结构

4 结论

综上所述,由于半导体效应、接触电流效应、非线性散射效应等产生的接触非线性导致了无源互调现象的出现。随着通信系统向更大功率、更宽频带和更高接收灵敏度的方向发展,通信系统对PIM问题的敏感程度将越来越大,因此,PIM问题始终是通信系统设计和运行时需认真考虑的重要因素。目前,克服接触非线性抑制PIM的技术已逐步出现,但如前文所述,现有技术的成熟度还不高,且各有其优缺点,如表1所示。因此,今后

PIM抑制技术的发展还大有空间，笔者认为将主要朝着以下几个方向发展：

1) 进一步寻求可降低金属接触面粗糙度的方法。现有方法虽可在一定程度上降低金属接触面的粗糙度，但最大程度也只能降低至 $0.5\ \mu\text{m}$ ，且无法完全消除接触非线性，因此寻求更加有效的能够降低金属接触面粗糙度的方法，完全消除接触非线性将是今后的主要发展方向之一；

2) 研究更加丰富的能够抑制PIM的涂层材料。现有研究中已有采用涂层材料抑制PIM的报道，但相关研究较少，且一般采用软金属或有机涂层，其种类相对单一，研究深度不够。相较其他抑制技术，应用涂层材料具有操作简单、易于实现的优点，因此涂层技术将会成为今后PIM抑制技术发展的主流方向，研究丰富多样的涂层材料对PIM的影响对于本领域的发展具有重要意义；

3) 寻求小型轻量化的非接触式连接，优化器件结构，从根本上断绝接触非线性的产生，也将成为今后抑制PIM的主要手段；

4) 探究将多种PIM抑制技术集于一体的方法，从而更加有效地降低PIM，适合更加严苛条件下的使用；

5) 更加系统地研究PIM现象产生的原因，丰富该领域的理论基础，并为寻求更有效的PIM抑制技术产生指导作用。

表1 现有PIM抑制技术的优缺点

Table1 Advantages and disadvantages of existing PIM suppression technologies

inhibition technology	the advantages	the disadvantages
reduce contact surface roughness	effective in reducing skin effect; significant suppression of contact current effect	Many influencing factors are not easy to regulate; limited range of roughness improvement
apply coating technology	Metal coating can effectively increase the contact area; non-metal coating has strong adhesion and a wide range of material selection, resulting in lower costs	Metal coatings are easy to oxidize and not wear-resistant; less research related to non-metallic coatings, not enough research depth
optimize device structure	Non-contact structure reduces contact and effectively avoids PIM; increased contact pressure allows for tight connections	complex production process and assembly; narrow working bandwidth; not conducive to small and light weight

参考文献：

- [1] 刘洋,戴浩. 电子通信技术创新的重要性及优化策略研究[J]. 科技创新与应用, 2021,11(28):158-160. (LIU Yang,DAI Hao. Research on the importance of electronic communications technology innovation and its optimization strategy[J]. Technology Innovation and Application, 2021,11(28):158-160.)
- [2] 王斌. 微波频段无源互调干扰研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014. (WANG Bin. Research on passive intermodulation interference in microwave band[D]. Harbin,China:Harbin Institute of Technology, 2014.)
- [3] 刘彭坚. 浅析射频分布系统中无源互调的危害及预防[J]. 电子测试, 2021(15):86-88,121. (LIU Pengjian. The harm and prevention of passive intermodulation in RF distribution system[J]. Electronic Test, 2021(15):86-88,121.)
- [4] 王佩. 非线性结构无源互调分析的等效电路法[D]. 西安:西安电子科技大学, 2013. (WANG Pei. Equivalent circuit method for passive intermodulation analysis of nonlinear structures[D]. Xi'an:China:Xidian University, 2013.)
- [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] 张莉. 同轴编织电缆组件互调性能的改善与测量[D]. 苏州:苏州大学, 2014. (ZHANG Li. Improvement and measurement of intermodulation performance of coaxial braided cable assembly[D]. Suzhou,China:Suzhou University, 2014.)
- [7] 赵培. 无线通信UHF频段的无源互调干扰研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2015. (ZHAO Pei. Research on passive intermodulation interference in UHF band of wireless communication[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015.)
- [8] 叶鸣,贺永宁,孙勤奋,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, 2013,10(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, 2013,10(1):75-83.)
- [9] 张世全. 无源互调干扰导论[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2014. (ZHANG Shiquan. Introduction to passive intermodulation interference[M]. Xi'an,China:Xidian University Press, 2014.)
- [10] CHEN Xiong,WANG Ling,YU Ming. Directional passive intermodulation effect by distributed nonlinearities in two-port network[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2020,63(3):793-797.

- [11] 王小丽,陈翔,李军,等. 航天微波部件的无源互调抑制方法研究进展[J]. 中国空间科学技术, 2021,41(2):1-9. (WANG Xiaoli, CHEN Xiang, LI Jun, et al. Recent research advances of passive intermodulation suppression methods for aerospace microwave components[J]. Chinese Space Science and Technology, 2021,41(2):1-9.)
- [12] 刘强. 无源互调类型预测及接触非线性分析[D]. 西安:西安电子科技大学, 2014. (LIU Qiang. Passive intermodulation type prediction and contact nonlinearity analysis[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2014.)
- [13] 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, 2017,14(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.)
- [14] SHITVOV A, SCHUCHINSKY A G, STEER M B, et al. Characterisation of nonlinear distortion and intermodulation in passive devices and antennas[C]// 2014 European Conference on Antennas and Propagation. The Hague: IEEE, 2014:1454-1458.
- [15] BOLLI P, SELLERI S, PELOSI G. Passive intermodulation on large reflector antennas[J]. IEEE Antennas & Propagation Magazine, 2002,44(5):13-20.
- [16] LUI P L. Passive intermodulation interference in communication systems[J]. Electronics and Communication Engineering Journal, 1990,2(3):109-118.
- [17] 蔡鹏军. 通信卫星大功率射频组件无源互调的控制研究[D]. 成都:电子科技大学, 2020. (CAI Pengjun. Research on passive intermodulation control of high power RF components of communication satellite[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.)
- [18] 叶鸣,贺永宁,王新波,等. 金属波导连接的无源互调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. (YE Ming, HE Yongning, WANG Xinbo, et al. Nonlinear physical mechanism and calculation method of passive intermodulation at metal waveguide connection[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011,45(2):82-86.)
- [19] 乔志杰,谢义. 2.92 mm 射频同轴连接器及其绝缘支撑设计研究[J]. 新乡学院学报, 2021,38(9):36-38. (QIAO Zhijie, XIE Yi. Design of research on 2.92 mm RF coaxial connector and its insulation support[J]. Journal of Xinxiang University, 2021,38(9):36-38.)
- [20] LYU Le, LIU Wei. Organic-inorganic hybrid anticorrosion coatings with aniline substituted group[J]. Molecular Crystals and Liquid Crystals, 2020,710(1):103-109.
- [21] IVAR G, 邱经武, 须重明. 电子隧穿效应和超导性[J]. 物理, 1984,13(1):52. (IVAR G, QIU Jingwu, XU Chongming. Electron tunneling effect and superconductivity[J]. Physics, 1984,13(1):52.)
- [22] 杨会平. 微放电效应与松散连接对无源互调的影响机理研究[D]. 长沙:湖南大学, 2019. (YANG Huiping. Study on the influence mechanism of micro discharge effect and loose connection on passive intermodulation[D]. Changsha, Hunan, China: Hunan University, 2019.)
- [23] GUENZER C S. Comments on "Spurious signals generated by electron tunneling on large reflector antennas"[J]. Proceedings of the IEEE, 1976,64(2):283.
- [24] 陈舒. 金属热电子发射和光电效应逸出功微观机制的区别[J]. 科技视界, 2012(19):194,152. (CHEN Shu. Work function differences between thermo-electronic emission and photoelectric effects[J]. Science and Technology Vision, 2012(19):194,152.)
- [25] 张亚东,贾昆鹏,吴振华,等. 二硫化钼场效应晶体管金属接触的研究进展[J]. 微纳电子技术, 2020,57(2):109-118. (ZHANG Yadong, JIA Kunpeng, WU Zhenhua, et al. Research progress of metal contact of MoS₂ field effect transistor[J]. Micronanoelectronic Technology, 2020,57(2):109-118.)
- [26] IBACH H, LUTH H. Solid-state physics[M]. Berlin: Springer, 2009.
- [27] 易炎高. 基站电调天线无源互调研究[D]. 广州:华南理工大学, 2012. (YI Yangao. Research on passive intermodulation of base station electrically modulated antenna[D]. Guangzhou, China: South China University of Technology, 2012.)
- [28] VICENTE C, HARTNAGEL H L. Passive-intermodulation analysis between rough rectangular waveguide flanges[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2005,53(8):2515-2525.
- [29] RUSSER J, RAMACHANDRAN A, CANGELLARIS A, et al. Phenomenological modeling of Passive Intermodulation (PIM) due to electron tunneling at metallic contacts[C]// IEEE MTT-S International Conference on Microwave Symposium Digest. San Francisco, CA: IEEE, 2006:1129-1132.
- [30] WILKERSON J R. Passive Intermodulation distortion in radio frequency communication systems[D]. North Carolina: North Carolina State University, 2010.
- [31] 孙善球,肖飞,林学进. 移动通信天线无源互调产生机理与改善研究[J]. 通信技术, 2021,54(7):1755-1763. (SUN Shanqiu, XIAO Fei, LIN Xuejin. Research on mobile communication antenna passive intermodulation causes mechanism and improvement[J]. Communications Technology, 2021,54(7):1755-1763.)

- [32] YANG H,WEN H,QI Y,et al. An equivalent circuit model to analyze passive intermodulation of loose contact coaxial connectors[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018,60(5):1180–1189.
- [33] SHRAMKOVA O V,MAKRIS K G,CHRISTODOULIDES D N,et al. Nonlinear scattering by non-Hermitian multilayers with saturation effects[J]. Physical Review E, 2021,103(5):052205.
- [34] 刘艺彩. 散射体无源互调分析[D]. 西安:西安电子科技大学, 2012. (LIU Yicai. Passive intermodulation analysis of scatterers[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2012.)
- [35] ZHANG S,ZHAO X,CAO Z,et al. Experimental study of electrical contact nonlinearity and its passive intermodulation effect[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2019,10(3):424–434.
- [36] NETO I F F,SOARES H M V M. Simple and near-zero-waste processing for recycling gold at a high purity level from waste printed circuit boards[J]. Waste Management, 2021(135):90–97.
- [37] GU S E,XUE D Z,LIANG B,et al. PCB board heat transfer model based on heat transfer mechanism analysis[J]. Journal of Physics:Conference Series, 2021,2014(1):012013.
- [38] 李浩霖. 印制电路内层铜面低粗糙度锡/硅烷处理技术及其应用研究[D]. 成都:电子科技大学, 2021. (LI Haolin. Study on Tin/silane treatment technology with low roughness on inner copper surface of printed circuit and its application[D]. Chengdu, China:University of Electronic Science and Technology of China, 2021.)
- [39] 师慧娟,陆冰沪,樊小伟,等. 电解铜箔表面处理技术及添加剂研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2021,31(5):1270–1284. (SHI Huijuan,LYU Binghu,FAN Xiaowei,et al. Research progress of electrolytic copper foil surface treatment technology and additives[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021,31(5):1270–1284.)
- [40] 赵志刚,林琪铭,姬俊安,等. 考虑趋肤效应的铁磁材料宽频损耗分离模型[J]. 中国电机工程学报, 2022,42(14):5374–5382. (ZHAO Zhigang,LIN Qiming,JI Junan,et al. Wideband loss separation models of ferromagnetic materials considering skin effect[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2022,42(14):5374–5382.)
- [41] 李旋,吴传亮,王运玖,等. 天线基站中无源互调要求的移相器印制电路板制作工艺[J]. 印制电路信息, 2021,29(8):51–55. (LI Xuan,WU Chuanliang,WANG Yunjiu,et al. Fabrication process of phase shifter PCB with passive intermodulation in antenna base station[J]. Printed Circuit Information, 2021,29(8):51–55.)
- [42] 黄建国,陈世金,张长明,等. 浅谈PCB制程对无源互调的影响因素与管控[J]. 印制电路信息, 2018,26(z1):1–6. (HUANG Jianguo,CHEN Shijin,ZHANG Changming,et al. Discussion on the effect and control of PCB manufacturing on PIM[J]. Printed Circuit Information, 2018,26(z1):1–6.)
- [43] GETROUW M A,DUTRA A J B. The influence of some parameters on the surface roughness of thin copper foils using statistical analysis[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2001,31(12):1359–1366.
- [44] PROSINI P P,ANTONIA A,ADDONIZIO M L. Effect of substrate surface treatment on the nucleation and crystal growth of electrodeposited copper and copper-indium alloys[J]. Thin Solid Films, 1997,298(1–2):191–196.
- [45] YU NG K C,WANG J,YUE T M. Surface characterization of pre-treated copper foil used for PCB lamination[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2007,21(5–6):363–377.
- [46] WANG Z X,WANG S,YANG Z,et al. Influence of additives and pulse parameters on uniformity of through-hole copper plating[J]. Transactions of the IMF, 2010,88(5):272–276.
- [47] ANSUINELLI P,SCHUCHINSKY A G,FREZZA F,et al. Passive intermodulation due to conductor surface roughness[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018,66(2):688–699.
- [48] DUTEIL G,COLOMBEL F,AVRILLON S,et al. Experimental studies of passive intermodulation in metal-to-metal contacts[J]. Progress in Electromagnetics Research M, 2017(60):67–73.
- [49] 刘彭坚. 浅析射频分布系统中无源互调的危害及预防[J]. 电子测试, 2021(15):86–88,121. (LIU Pengjian. The harm and prevention of passive intermodulation in RF distribution system[J]. Electronic Test, 2021(15):86–88,121.)
- [50] PAN Y,JIANG D,GAO L. AO-4025 ITT ESA-surface treatments and coatings for reduction of multipactor and Passive Intermodulation(PIM) effect in RF components[J]. Fujian Medical Journal, 2003,17(8):601–607.
- [51] VICENTE C,WOLK D,HARTNAGEL H L,et al. Experimental analysis of passive intermodulation at waveguide flange bolted connections[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2007,55(5):1018–1028.
- [52] JIN Q,GAO J,FLOWERS G T,et al. The impact of coating materials in coaxial connectors on Passive Intermodulation[C]// IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Albuquerque,NM,USA:IEEE, 2018:9–16.
- [53] 汤朋,刘兰轩,曹东萍,等. 有机涂层附着机理及附着力提高方法综述[J]. 材料保护, 2020,53(2):126–135. (TANG Peng,LIU Lanxuan,CAO Dongping,et al. Review on adhesion mechanism and adhesion enhancement of organic coatings[J]. Materials Protection, 2020,53(2):126–135.)

- [54] 李韵,崔万照,王新波,等. 一种无源互调抑制同轴连接器:CN107104332A[P]. 2017-08-29. (LI Yun,CUI Wanzhao,WANG Xinbo,et al. Passive intermodulation suppression coaxial connector:CN107104332A[P]. 2017-08-29.)
- [55] KOZLOV D,SHITVOV A P,BULJA S,et al. Practical mitigation of passive intermodulation in microstrip circuits[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018,62(1):163-172.
- [56] KOZLOV D,BULJA S,LUNDY R,et al. Mitigation of passive intermodulation on planar microstrip circuits with distributed current-driven nonlinearities[C]// 2018 48th European Microwave Conference(EuMC). Madrid,Spain:IEEE, 2018:1029-1032.
- [57] ALAM M A,AZARIAN M H,PECHT M G. Embedded capacitors in printed wiring board:a technological review[J]. Journal of Electronic Materials, 2012,41(8):2286-2303.
- [58] LEE S,HYUN J G,PAK J S,et al. Fabrication and characterization of embedded capacitors in printed circuit boards using B-stage epoxy/BaTiO₃ composite embedded capacitor films(ECFs)[C]// The 58th Electronic Components and Technology Conference. Lake Buena Vista,FL:IEEE, 2008:742-746.
- [59] URICH R K,SCHAPER L W. Integrated passive component technology[M]. Hoboken:Wiley-IEEE Press, 2003.
- [60] WENG C,WEI P,WU C,et al. Embedded passives technology for bluetooth application in multi-layer Printed Wiring Board (PWB)[C]// The 54th Electronic Components and Technology Conference. La Vegas:IEEE, 2004:1124-1128.
- [61] 周国云,何为,王守绪,等. 基于环氧树脂/钛酸钡/聚酰亚胺绝缘介质的PCB埋嵌电容的制作及性能研究[J]. 集成技术, 2014, 3(6):14-22. (ZHOU Guoyun,HE Wei,WANG Shouxu,et al. Fabrication and characterization of embedded capacitors in PCB using epoxy/BaTiO₃/PI capacitor CCL[J]. Journal of Integration Technology, 2014,3(6):14-22.)
- [62] KUO D H,CHANG C C,SU T Y,et al. Dielectric behaviors of multi-doped BaTiO₃/epoxy composites[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2001,21(9):1171-1177.
- [63] 张平. 基于RFID芯片应用的0.13 μm 高密度MIM电容制造工艺研究[D]. 上海:上海交通大学, 2008. (ZHANG Ping. Study on 0.13 μm high density MIM capacitor manufactory process for RFID chip application[D]. Shanghai,China:Shanghai Jiaotong University, 2008.)
- [64] ZELENCHUK D E,SHITVOV A P,SCHUCHINSKY A G,et al. Passive intermodulation in finite lengths of printed microstrip lines[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2008,56(11):2426-2434.
- [65] ZELENCHUK D E,SHITVOV A P,SCHUCHINSKY A G,et al. Discrimination of passive intermodulation sources on microstrip lines[C]// Proceedings of the International Workshop in Multipactor,Corona and Passive Intermodulation. Valencia,Spain:[s.n.], 2008:1-4.
- [66] SHITVOV A P,ZELENCHUK D E,SCHUCHINSKY A G,et al. Passive intermodulation in printed lines: effects of trace dimensions and substrate[J]. IET Microwaves,Antennas & Propagation, 2009,3(2):260-268.
- [67] 杨会平,黄为,曾碧卿,等. 松散电接触对无源互调干扰的影响机理分析[J]. 中国科学:信息科学, 2021,51(8):1316-1330. (YANG Huiping,HUANG Wei,ZENG Biqing,et al. Analysis of passive intermodulation distortion caused by loose electrical contact[J]. Science in China(Information Sciences), 2021,51(8):1316-1330.)
- [68] 李瑜华,景莉莉,张明涛,等. 大功率馈源类产品低PIM结构设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(4):633-638. (LI Yuhua,JING Lili,ZHANG Mingtao,et al. Low PIM structure design of high power feed product[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(4):633-638.)
- [69] YANG H,HUANG W,WEN H,et al. Improved design of flange mount coaxial connector with low passive intermodulation distortion[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022,71:1-7.
- [70] 陈翔,孙冬全,崔万照,等. 一种低无源互调波导法兰转换装置:201910329798[P]. 2019-08-16. (CHEN Xiang,SUN Dongquan,CUI Wanzhao,et al. A low passive intermodulation waveguide flange conversion device:201910329798[P]. 2019-08-16.)
- [71] 陈翔,双龙龙,孙冬全,等. 悬置非接触式低无源互调波导法兰转换方法[J]. 西安交通大学学报, 2020,54(5):117-123. (CHEN Xiang,SHUANG Longlong,SUN Dongquan,et al. Suspended contactless low passive intermodulation transition of waveguide flange[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020,54(5):117-123.)
- [72] CHEN X,SUN D Q,CUI W Z,et al. A folded contactless waveguide flange for low passive intermodulation applications[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2018,28(10):864-866.