

悬置非接触式低无源互调波导法兰转换方法

陈翔^{1,2}, 双龙龙², 孙冬全³, 崔万照², 贺永宁¹

(1. 西安交通大学微电子学院, 710049, 西安; 2. 中国空间技术研究院西安分院, 710100, 西安;

3. 西安电子科技大学物理与光电工程学院, 710071, 西安)

摘要: 针对卫星大功率微波通信系统中,波导法兰连接器由于金属接触非线性而导致的无源互调(PIM)干扰问题,提出新型悬置非接触式低无源互调波导法兰转换方法。通过悬置式周期性钉床结构,在波导法兰面之间构造双面非接触的转换连接结构,通过合理的尺寸参数设计,转换连接时在法兰面间形成电磁带隙结构,利用电磁禁带特性实现电磁场屏蔽,保证波导间正常电磁传输,同时实现了结构紧凑且内部非接触的法兰连接。该方法可以从根本上消除传统波导法兰由于不良金属电接触所导致的接触非线性,实现高效 PIM 抑制。设计了 Ku 频段非接触式低 PIM 波导法兰转换器样件,在工作频段 10~15 GHz 内,样件实测插入损耗小于 0.08 dB,回波损耗优于 20 dB。PIM 实测结果表明:应用该转换器样件后,对传统波导法兰连接的最大 PIM 抑制度超过 50 dB,平均值优于 25 dB,获得了稳定的低 PIM 性能,为解决传统波导法兰连接器的 PIM 问题提供了一种新的思路。

关键词: 无源互调;波导法兰;非接触;电磁带隙

中图分类号: TN61 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202005016 **文章编号:** 0253-987X(2020)05-0117-07



OSID 码

Suspended Contactless Low Passive Intermodulation Transition of Waveguide Flange

CHEN Xiang^{1,2}, SHUANG Longlong², SUN Dongquan³, CUI Wanzhao², HE Yongning¹

(1. School of Microelectronics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100, China; 3. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: In high power satellite microwave systems, waveguide flange has serious passive intermodulation (PIM) problem because of metallic contact nonlinearity. To solve this problem, a novel method of suspended contactless low PIM transition is proposed. Double-sided contactless transition structure is constructed between traditional waveguide flanges using suspended periodic bed of nails. Contactless electromagnetic band gap (EBG) can be formed between waveguide flanges under proper size condition, and the electromagnetic field is confined to the waveguide by stop band of the EBG structure and propagates normally along the waveguide; meanwhile, a kind of contactless and compact connection is formed between waveguide flanges. By using this method, the metallic contact nonlinearity of waveguide flange can be completely eliminated, PIM is therefore significantly suppressed. A Ku band flange prototype is designed for verification. Over the operating frequency range from 10 to 15 GHz, the measured insertion loss is less than

0.08 dB, the return loss is better than 20 dB. When connected by the flange prototype, the PIM level of traditional waveguide flange connection is significantly reduced, with a maximum suppression beyond 50 dB and an average suppression better than 25 dB, indicating stable low PIM performance is achieved.

Keywords: passive intermodulation; waveguide flange; contactless; electromagnetic band gap

无源互调(PIM)是指两个或两个以上的载波信号通过微波无源部件时所产生的非线性互调干扰,广泛存在于各种大功率微波无源部件及系统中,严重干扰卫星及地面通信系统的正常工作,已成为很多实际工程应用中的重要瓶颈问题^[1-3]。相比常规成熟的电性能指标,低无源互调已逐渐成为通信系统微波器件的关键指标。PIM的产生机理主要包括接触非线性和材料非线性^[4-5],材料非线性可以通过选择合适的材料以避免,而接触非线性在微波系统中很难避免。微波器件中存在大量的金属电接触结构,受表面处理工艺、连接压力、粗糙度及脏污等因素影响,实际的金属接触面为非理想电接触状态,很容易形成金属-金属(MM)及金属-绝缘体-金属(MIM)等类型的微观电接触结构^[6-7],在大功率微波激励下,强传导电流通过这些电接触结构时会激发多种载流子输运效应,导致非线性的电流-电压关系,即金属接触非线性,进而产生无源互调失真^[8-9]。波导是各种大功率微波系统中最广泛应用的传输线结构之一,法兰连接作为最常见的波导连接结构,是金属接触非线性产生PIM干扰的最典型代表性结构^[7-9],成为大功率微波系统中的重要PIM来源,严重制约各类微波器件及系统的PIM性能。当前,常规的PIM抑制方法大多以改善接触为主要途径^[10],例如通过复杂的表面处理工艺保证接触面的光滑平整、采用高压法兰以及严格的连接力矩实现接触面的紧连接等,这些方法会带来工艺及装配的复杂度大幅增加,且无法从根本上消除法兰连接的接触非线性。扼流式法兰虽然避免了一部分接触,但是其工作带宽较窄,无法满足宽带系统需求。

针对金属接触非线性所导致的无源互调问题,陈翔等于2018年首次提出了非接触电磁调控式宽带大功率无源互调抑制方法^[11],基于间隙波导理论,通过构造宽带非接触电磁带隙(EBG)结构代替传统的金属接触结构,实现无金属电接触条件下的电磁场屏蔽,消除不良电接触的同时不影响正常电磁传输,从物理根源上规避金属接触非线性,实现稳定高效的PIM抑制。相比传统改善接触的正向思维式PIM抑制方法,非接触电磁调控式PIM抑制

开辟了全新的逆向思维方法。基于该方法,提出了非接触式低PIM微波器件设计技术,并针对波导法兰由于接触非线性导致的PIM问题,相继提出了多种新型非接触式低PIM法兰及转换结构^[12-15]。

已有非接触式低PIM法兰及转换结构中,广泛采用了由周期性金属凸体构成的钉床结构,用于构建人工磁导体(AMC)平面,与光滑的理想电导体(PEC)平面共同构成非接触EBG结构。最广泛应用的为单面钉床AMC平面,在非接触式低PIM设计中,如果采用单面钉床AMC结构,则需以原始结构表面为支撑构建钉床单元,需要改变原始部件的结构^[11-13],且单面AMC结构只能实现单面非接触,不利于构建复杂的功能结构。针对此,进一步提出了双面AMC结构,无需改变原始部件结构即可实现双面非接触化设计,十分有利于实现非接触过渡^[14,16],通用性更强。已有的双面钉床结构本质上是共用同一支撑面的两个单面钉床AMC结构的简单叠加,正反面AMC结构相互独立,分别与邻近的PEC平面构成非接触EBG结构。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,带来额外的尺寸重量增加,不利于小型轻量化。

针对上述问题,本文提出一种新型悬置钉床式双面非接触EBG结构,通过悬置设计的周期性钉床结构,在两个PEC金属面间形成电磁禁带,实现对两个PEC金属面之间平行板波导模式的抑制。在对悬置钉床式非接触EBG禁带特性的参数化研究基础上,提出了一种非接触式低PIM波导法兰转换方法,利用悬置钉床的双面非接触结构特性,实现传统波导法兰连接的非接触化过渡,进而实现低PIM连接。与已有低PIM转换结构^[14,16]相比,悬置非接触式低PIM法兰转换更加有利于小型轻量化。本文所提出的低PIM转换方法可以应用于各类大功率微波波导部件及系统中,也可为实现各类非接触式低PIM部件提供一定的参考。

1 悬置钉床双面非接触电磁带隙结构

普通双面钉床式非接触EBG结构如图1a所

示,基于间隙波导原理^[17-18],在支撑面的正反面分别构造钉床结构,形成双面 AMC 平面,分别与同一侧的 PEC 平面平行排列且不接触,当空气间隙小于一定值时,AMC 平面与 PEC 平面共同形成电磁带隙结构,不支持电磁禁带频率范围内任何电磁场模式的传播,其正反面结构相互独立。悬置钉床双面非接触 EBG 结构如图 1b 所示,周期性金属钉床结构以悬置的方式设置于两个金属平面之间,与上下金属平面均无物理接触,在特定尺寸条件下即可形成电磁带隙,其与普通双面钉床式非接触 EBG 结构有本质区别。

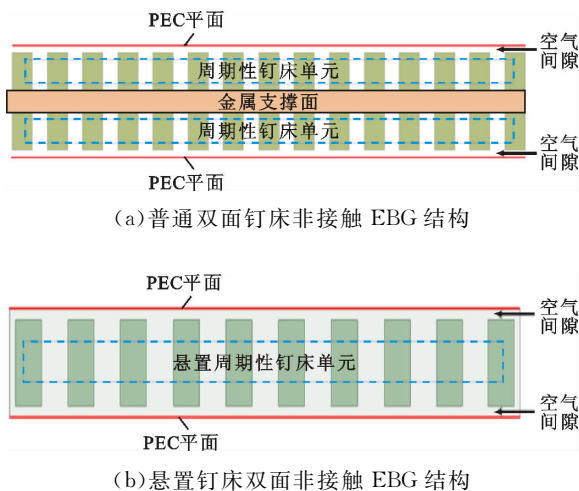


图 1 两种非接触 EBG 结构对比

悬置钉床双面非接触 EBG 结构中,悬置的周期性结构同时与两侧的 PEC 平面相互作用,无法用传统的间隙波导理论解释,可以看作是通过悬置周期性结构实现了对两个平行金属 PEC 平面间的平行板波导模式的抑制,从而形成了等效电磁带隙。双侧 PEC 平面与悬置周期性钉床共同构成 EBG 结构,在进行电磁特性分析时需要以整体结构建模。

悬置钉床的单元结构形式不固定,可以采用不同的三维结构实现。分别针对长方体、圆柱体及球体 3 种规则单元结构,在电磁仿真程序中建立 EBG 结构的最小单元模型,设置周期性边界条件,通过本征值求解获得色散特性结果,研究其电磁禁带特性。图 2 给出了在某个相同的钉床高度和空气间隙厚度下,长方体、圆柱体及球体单元结构所构成的悬置钉床 EBG 结构的色散特性对比。长方体长宽相等,球体的直径和长方体、圆柱体的高度相同,圆柱体的直径与长方体的长宽相同,其他参数设置完全相同。可以看出,在同样的钉床高度和空气间隙下,长方体的禁带范围最宽,而球体无法实现电磁禁带特性,因

此在构建悬置钉床非接触电磁带隙结构时,采用长方体单元结构是最好的选择。

实际中悬置钉床不可能独立存在,需要通过一定的连接方式支撑排列,不同的连接方式其电磁禁带特性不同,需针对具体问题具体分析。

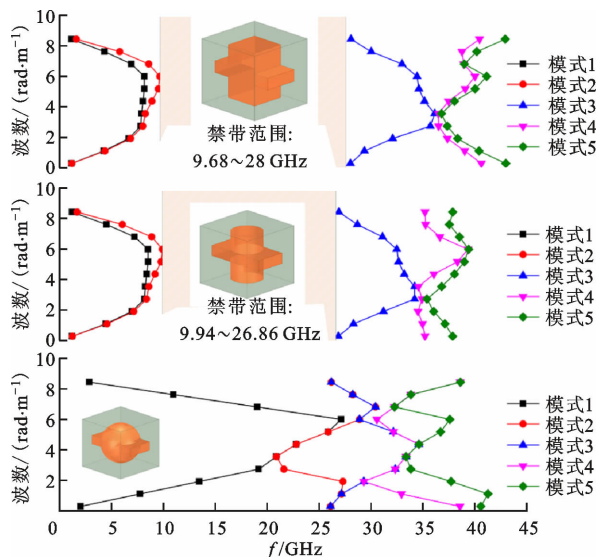


图 2 不同单元结构下悬置钉床 EBG 结构的色散特性对比

2 悬置非接触式低 PIM 法兰转换方法

2.1 基本结构设计

基于悬置钉床双面非接触式电磁带隙结构,提出一种悬置非接触式低无源互调波导法兰转换结构,如图 3 所示。基于标准的波导法兰面尺寸,转换结构中心为电磁传输端口,四周采用长宽相等的长方体单元以周期性方式排列,通过合理的结构布局 and 参数设计,构造匹配标准波导法兰面的悬置钉床结构。周期性单元之间采用一维连接方式,为方便机械加工,连接臂的宽度设计为与周期性单元宽度相同。

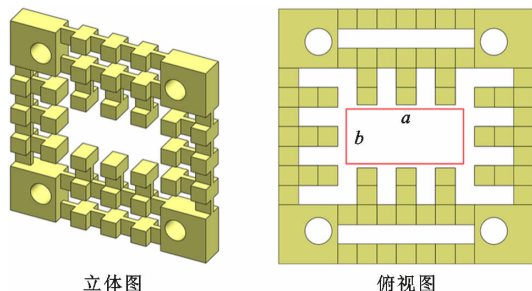


图 3 悬置非接触式低无源互调波导法兰转换结构

非接触式法兰转换的外围为机械连接结构,如图 4 所示,机械连接结构的正反面分别高于悬置钉床单元的正反两面,高度差为空气间隙 h_a 。将悬置

非接触式法兰转换结构置于普通波导法兰之间,通过机械连接结构固定后,在法兰连接内部即形成双面无接触的过渡结构。悬置钉床与两侧的普通波导法兰面形成双面非接触电磁带隙结构。针对具体的波导工作频段,通过对悬置钉床结构尺寸的合理设计,形成覆盖所需波导工作带宽的电磁禁带,实现对电磁场的束缚,保证电磁场沿波导正常传输且无法从空气间隙中泄露,从而实现法兰连接内部的非接触化设计,从根本上消除法兰连接的金属接触非线性,实现无源互调抑制。机械连接部位仅完成结构固定,不属于电接触部分,即使有少量电磁场泄露至机械连接部位,经过电磁禁带的衰减作用后,电磁场泄露强度也不足以激励起无源非线性,因此对无源互调性能基本没有影响。

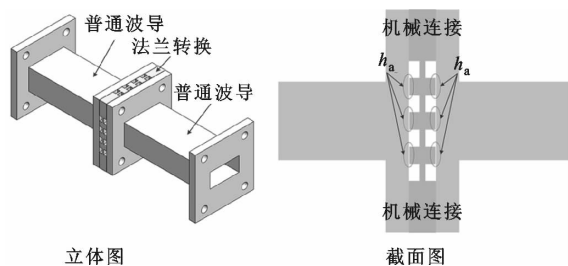


图4 悬置非接触式低 PIM 波导法兰转换连接示意图

需要特别说明的是,虽然电磁禁带可以实现电磁场屏蔽,但禁带内的电磁场以截止模式衰减,在功率较大的情况下,开放式结构存在电磁泄露风险,为避免电磁泄露,实际中可根据需要将外围机械连接结构设计为全封闭式。

2.2 样件仿真设计

设计匹配 WR75 标准波导的悬置非接触低 PIM 法兰转换结构样件验证本文方法。WR75 波导的主模工作频段为 9.84~15 GHz,针对具体应用需求,选择设计工作频段为 10~15 GHz。该非接触式波导法兰转换结构设计的关键在于确定合适的悬置钉床单元尺寸,使之形成的双面非接触 EBG 结构的电磁禁带覆盖 10~15 GHz 范围。对于周期性电磁带隙结构,通常需要在电磁仿真软件中建立单个单元的电磁结构模型,设置周期性边界条件,通过本征求解模式获得色散特性曲线,根据色散特性获得电磁禁带范围。

在 CST 三维电磁场仿真软件中建立悬置钉床单个最小单元电磁结构模型,钉床单元的高度为 h_p ,宽度为 w ,钉床单元二维间距均为 g ,与两侧 PEC 平面间的空气间隙厚度均为 h_a ,周期性钉床单元之间采用一维连接方式,连接臂宽度为 w_b ,厚度

为 t ,为降低机械加工难度,连接臂宽度 w_b 设计为与周期性单元宽度 w 相同。各尺寸参数没有唯一值,需要根据实际标准波导法兰面的尺寸进行灵活选择,要求在满足电磁禁带特性的同时,所形成的中心电磁传输端口尺寸接近或等于相应的标准波导端口,如图 3 所示,从而保证良好的阻抗匹配特性。经过尺寸优化后获得的悬置钉床双面非接触 EBG 结构的色散特性仿真结果如图 5 所示,相应的尺寸参数为 $h_p=4.5$ mm, $h_a=0.1$ mm, $w=3$ mm, $g=2.9$ mm, $w_b=w$,此时的电磁禁带范围约为 9.82~28 GHz,覆盖所需的工作频段。在构建法兰转换结构时由于具体的连接排列形式,其电磁禁带特性实际上会稍有差异,可根据电磁传输特性进行适度的尺寸微调。

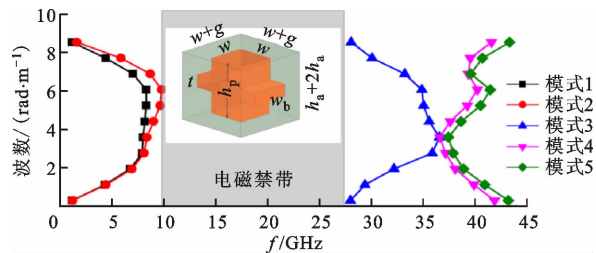


图5 悬置钉床双面非接触 EBG 结构的色散特性仿真结果

基于以上获得的尺寸参数,在 HFSS 电磁场仿真软件中建立该法兰转换结构与 WR75 标准波导连接的整体仿真模型,获得其 S 参数仿真结果如图 6 所示。设置波导输入端口功率为 100 W 时,获得电场分布特性仿真结果如图 7 所示。

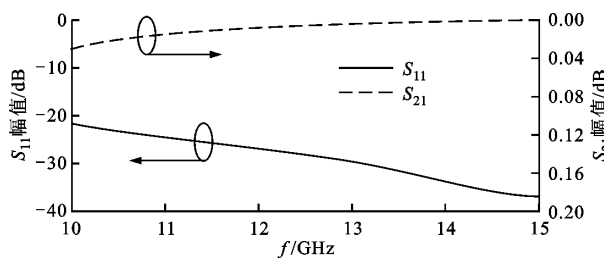


图6 悬置非接触法兰转换结构的 S 参数仿真结果

根据仿真结果,悬置钉床的尺寸参数设计合理,宽带电磁禁带特性保证了非接触间隙内部的强电磁场束缚。由图 7 可以看出,非接触间隙内场强迅速衰减,每经过一排钉床结构,电场强度衰减约 1 个数级,功率衰减约 20 dB,经过一定数量的钉床单元后,功率大幅衰减。在此条件下,电磁功率被约束集中于波导间正常传输,因此在实现内部无金属接触的波导法兰连接的同时,获得了宽带范围内良好的电磁传输性能。

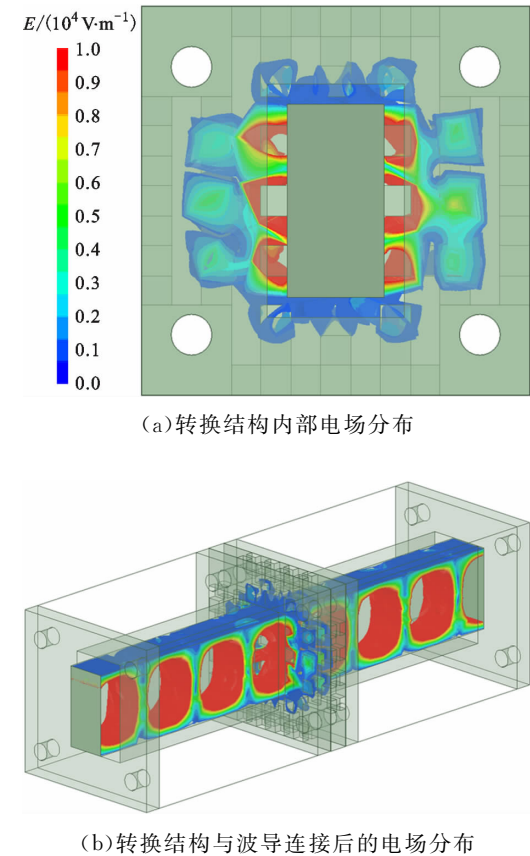


图 7 悬置非接触法兰转换结构的电场分布仿真结果

3 实物加工及无源互调实验验证

设计制作了匹配 Ku 频段 WR75 标准波导的悬置钉床非接触式波导法兰转换样件,如图 8a 所示,采用金属铝加工制作,表面做导电氧化处理,除此之外无其他表面处理措施。采用相同的材料及工艺,加工制作一对 WR75 标准波导作为实验对比。

将悬置钉床非接触式波导法兰转换样件安装于标准 WR75 波导之间,测试获得其 S 参数结果,如图 8b 所示,S 参数实测和仿真结果吻合较好,验证了设计过程的正确性。在整个设计工作频段 10~15 GHz 范围内,回波损耗优于 20 dB,在 10~11 GHz 内,样件实测插入损耗小于 0.08 dB,在 11~15 GHz 内,样件实测插入损耗小于 0.02 dB,导致低频端插损增大的可能原因主要包括加工误差及具体的钉床连接形式所导致的电磁禁带偏移。总体上,该法兰转换的工作带宽可完全覆盖所需的工作频段,对波导的正常电磁传输性能影响较小。

采用 Ku 频段高灵敏度无源互调测试系统,如图 9a 所示,测试该法兰转换样件的 PIM 特性,开展 3 阶、5 阶反射式无源互调实验研究,主要实验测试条件见表 1。

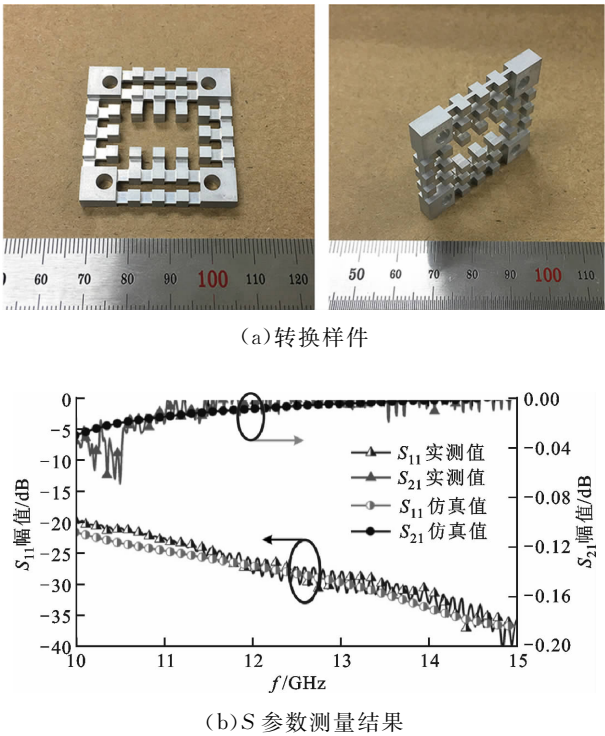


图 8 悬置非接触式法兰转换样件及 S 参数测量结果

表 1 无源互调实验测试条件

测试阶数	载波 1 频率/GHz	载波 2 频率/GHz	PIM 产物 频率/GHz	单路载波 功率/W
3 阶	11.4	12.75	14.10	10~100
5 阶	12.0	12.75	14.25	10~100

将测试系统的两个低 PIM 端口直接对接,测试获得系统自身的 3 阶、5 阶残余互调电平。为确保测试结果的有效性,测试系统自身的残余互调电平需低于待测件相应的 PIM 电平量级。将两个 WR75 标准波导通过其传统法兰连接,测量其 3 阶、5 阶反射 PIM 电平。将本文所设计的悬置非接触式法兰转换样件安装于两个 WR75 标准波导法兰之间,如图 9b 所示,再次测量 3 阶、5 阶 PIM 产物。为准确对比,在整个实验测试过程中,采用数字力矩扳手保持所有连接螺钉的连接力矩相同。在每次测

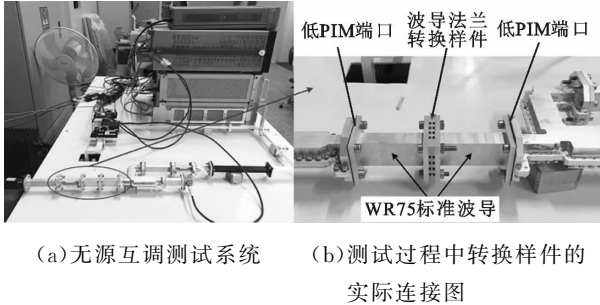
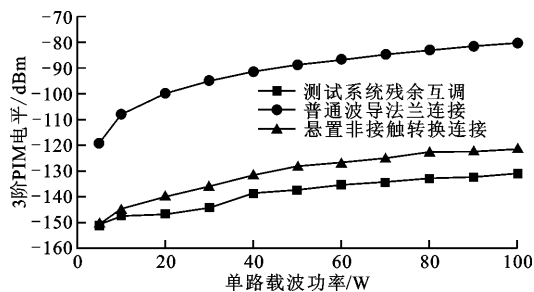


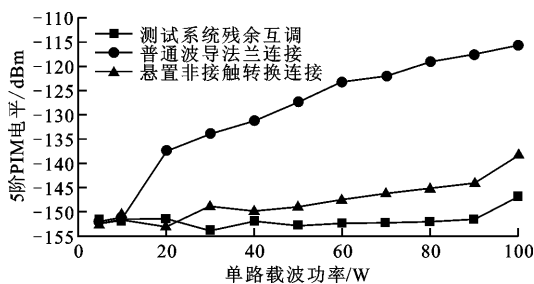
图 9 法兰转换样件的无源互调测试实验验证

试中,均以 10 W 为步进,同时调整两路测试载波功率在 10~100 W 范围内变化,分别记录各个功率点下稳定后的最大 PIM 电平作为测试结果。

图 10 给出了 3 阶、5 阶 PIM 测试结果对比。由图 10 可以看出,由于未采用低 PIM 表面处理工艺和高压连接力矩,标准 WR75 波导通过普通法兰连接后,其 PIM 性能明显较差。当采用本文所提出的悬置非接触式法兰转换样件后,传统波导法兰连接的 PIM 性能得到了大幅改善,最大 PIM 抑制度超过 50 dB,平均 PIM 抑制度超过 25 dB。且采用悬置非接触式法兰转换后,传统法兰连接的 PIM 性能十分稳定,接近测试系统的残余互调底噪,这也与 PIM 的物理机理及非接触的结构特性相符。由于消除了金属接触,非接触的连接方式很自然地使 PIM 性能对各类物理接触因素(如接触面表面粗糙度、清洁度、连接力矩等)变得不再敏感,在实现高效 PIM 抑制的同时,可以大幅降低传统 PIM 抑制方法中所需的复杂工艺、制造及装配要求。



(a) 3 阶



(b) 5 阶

图 10 3 阶、5 阶无源互调测试结果对比

4 结 论

针对波导法兰由于接触非线性所导致的无源互调干扰问题,本文提出新型悬置钉床式双面非接触电磁带隙结构,基于此提出悬置非接触式低无源互调波导法兰转换方法,研制了 Ku 频段非接触式法兰转换样件并进行了测试验证,实测结果表明,采用该转换结构后波导法兰的 PIM 性能得到显著的改

善。通过悬置转换结构实现了小型轻量化设计,具有较强的通用性,无需改变传统波导法兰结构,即可大幅消除法兰连接中的金属接触非线性,实现稳定低 PIM 连接,同时该转换结构具备宽带特性,几乎不影响正常的电磁传输性能。本文所提方法及结构可实际应用于各类具有低 PIM 需求的大功率微波部件及测试系统中。

参考文献:

- [1] LUI P L. Passive intermodulation interference in communication systems [J]. Electronics and Communication Engineering Journal, 1990, 2(3): 109-118.
- [2] BOLLI P, SELLERI S, PELOSI G. Passive intermodulation on large reflector antennas [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2002, 44(5): 13-20.
- [3] 吴佳奕, 胡天存, 梁弼政, 等. 无源器件无源互调干扰行为建模 [J]. 中国空间科学技术, 2019, 39(2): 31-37.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] YE Ming, HE Yongning, WANG Xinbo, et al. Non-linear physical mechanism and calculation method of passive intermodulation at metal waveguide connection [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(2): 82-86.
- [8] 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.
- [9] ZHAO Xiaolong, HE Yongning, YE Ming, 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.
- [10] VICENTE C, HARTNAGEL H L. Passive-intermod-

ulation 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 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.

[10] 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.

[11] CHEN Xiang, SUN Dongquan, CUI Wanzhao, et al. A folded contactless waveguide flange for low passive-intermodulation applications [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2018, 28(10): 864-866.

[12] 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.

[13] 陈翔, 孙冬全, 崔万照, 等. 一种非接触型低无源互调波导连接结构及设计方法: 201810267070.1 [P]. 2018-10-16.

[14] 陈翔, 孙冬全, 崔万照, 等. 一种低无源互调波导法兰转换装置: 201910329798.7 [P]. 2019-08-16.

[15] 陈翔, 孙冬全, 崔万照, 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.

[16] CHEN Xiang, SUN Dongquan, CUI Wanzhao, et al. Low passive-intermodulation contactless waveguide adapter based on gap waveguide technology [C]//Proceedings of the 13th European Conference on Antennas and Propagation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019: 1-3.

[17] PUCCI E, KILDAL P S. Contactless non-leaking waveguide flange realized by bed of nails for millimeter wave applications [C]//Proceedings of the European Conference on Antennas and Propagation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 3533-3536.

[18] SUN Dongquan, XU Jinping. A novel iris waveguide band-pass filter using air gapped waveguide technology [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2016, 26(7): 475-477.

(编辑 武红江)

(上接第 108 页)

[18] SANTOS L, BERROJO L, MORENO J, et al. Multi-spectral and hyperspectral lossless compressor for space applications (HyLoC): a low-complexity FPGA implementation of the CCSDS 123 standard [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9(2): 757-770.

[19] BASCONES D, GONZALEZ C, MOZOS D. FPGA implementation of the CCSDS 123 standard for real-time hyperspectral lossless compression [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018, 11(4): 1158-1165.

[20] FJELDTVEDT J, ORLANDIC M, JOHANSEN T A. An efficient real-time FPGA implementation of the CCSDS-123 compression standard for hyperspectral images [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018, 11(10): 3841-3852.

[21] WEI W, LEI J, LI Y S. Onboard optimized hardware implementation of JPEG-LS encoder based on FPGA [M]//Proceedings of the SPIE: vol. 8514. Bellingham, WA, USA: SPIE, 2012: 851406.

[22] 聂永康, 雷杰, 李云松, 等. JPEG-LS 近无损图像编码器 VLSI 结构设计 [J]. 西安电子科技大学学报, 2016, 43(4): 75-80.

NIE Yongkang, LEI Jie, LI Yunsong, et al. VLSI design of the JPEG-LS near-lossless image encoder [J]. Journal of Xidian University, 2016, 43(4): 75-80.

(编辑 武红江)