

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2023.01.005

非接触式低无源互调波导滤波器

陈翔¹, 胡少光¹, 孙冬全², 王小丽¹, 崔万照¹

(1. 中国空间技术研究院西安分院, 西安 710000;

2. 西安电子科技大学 物理学院, 西安 710071)

摘要: 无源互调 (passive intermodulation, PIM) 是微波部件及系统中一种常见的非线性干扰, 对卫星及地面通信均有着普遍影响。不良金属电接触所导致的接触非线性是 PIM 的主要根源。将间隙波导技术原理与 PIM 问题相结合, 提出通过非接触电磁屏蔽消除微波部件中的金属接触, 实现了稳定高效的 PIM 抑制效果。首先以槽间隙波导为例, 开展了非接触式波导传输线的 PIM 实验研究, 进一步采用串联短路枝节结构, 设计研制了一种 Ku 频段非接触式波导低通滤波器。实测结果显示, 非接触式滤波器在具有优秀电磁传输性能的同时, 其 PIM 电平基本保持在测试系统残余 PIM 电平附近, 且不受表面处理及连接扭矩影响, 获得了稳定的低 PIM 特性。该工作可为低 PIM 微波毫米波部件及系统设计实现提供一种新的思路。

关键词: 无源互调; 非接触; 间隙波导; 滤波器

中图分类号: V443; TN61

文献标志码: A

文章编号: 1674-7135(2023)01-0028-07

Contactless low passive intermodulation waveguide filter

CHEN Xiang¹, HU Shaoguang¹, SUN Dongquan², WANG Xiaoli¹, CUI Wanzhao¹

(1. China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 71000, China;

2. School of Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Passive intermodulation (PIM) is a kind of interference generated in microwave components and systems, which has harmful impact on satellite and ground communication. Contact nonlinearity caused by non-ideal metallic contact is the main source of PIM. In this work, gap waveguide technology is adopted to solve the PIM problem, and the metal contact in microwave components is eliminated by contactless electromagnetic shielding, thus achieving a stable and efficient PIM suppression. The PIM performance of contactless waveguide is first experimentally studied with groove gap waveguide as an example, and a Ku band contactless waveguide low pass filter with series short-circuited stubs is successfully designed and fabricated. The measurement results shows that the contactless filter obtains excellent electromagnetic transmission performance, while its PIM level maintains near to the residual PIM level of the test system, and is not affected by surface treatment or connection torque, achieving a stable low PIM performance. This work provides a new idea and reference for low PIM design of microwave and millimeter-wave components and systems.

Key words: passive intermodulation; contactless; gap waveguide; filter

收稿日期: 2022-04-21; 修回日期: 2022-05-29

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (编号: 61901359)

引用格式: 陈翔, 胡少光, 孙冬全, 等. 非接触式低无源互调波导滤波器[J]. 空间电子技术, 2023, 20(1): 28-34. CHEN X, HU S G, SUN D Q, et al. Contactless low passive intermodulation waveguide filter[J]. Space Electronic Technology, 2023, 20(1): 28-34.

0 引言

微波毫米波部件及系统中,由于表面粗糙度、氧化及杂质等因素,金属接触结构无法达到理想接触状态,接触界面在微观视角下通常呈现为金属-绝缘体-金属(metal insulator metal, MIM)形式的电接触状态。在大功率载波激励下,强传导电流通过 MIM 结构时,其内部会产生隧穿、热电子发射等载流子输运效应,导致非线性的 I-V 关系,即为金属接触非线性^[1-3]。当有多个大功率载波通过时,这种接触非线性会导致互调现象,即为无源互调(passive intermodulation, PIM)。在收发共用通信体制下,发射通道的 PIM 产物如果落入接收通道则会形成干扰效应。PIM 干扰是航天器及地面通信中时常面临的一个现实问题,尤其对于有着较高发射/接收功率比的航天器收发共用通信系统,PIM 干扰普遍存在,影响严重且深远^[4]。PIM 干扰控制成为工程研制中至关重要的方面。

微波毫米波部件的稳定低 PIM 设计是实现应用系统 PIM 干扰控制的前提。一体化加工制造是实现低 PIM 的最直接手段^[5],但对于内部结构较为复杂的微波毫米波部件,目前的一体化加工技术应用范围十分有限,分体加工再组装仍然是当前的主流方式,因此实际中金属接触结构不可避免。改善接触状态是当前实现低 PIM 设计的最常用方法^[6],主要途径包括对部件金属接触面进行一定的表面处理,使之尽量保持光滑、清洁,并施加足够的连接力矩,使得接触面保持相对稳定的接触状态,以此削弱接触非线性,实现 PIM 抑制。上述方法对于加工制造、装配调试及测试等多个环节均有着严格要求,且金属接触的存在始终无法避免接触非线性,部件的 PIM 性能受表面状态和连接力矩影响十分敏感。在剧烈振动、拆卸调试、二次装配等情况下,原有电接触状态一旦被破坏,PIM 性能则会严重恶化。相比于改善接触,非接触化是实现 PIM 抑制的更高效途径,但传统技术中大多依赖金属接触实现电磁屏蔽,通常难以实现非接触设计。扼流式非接触结构主要应用在法兰端口^[7],且其工作带宽很窄,应用范围十分有限。间隙波导(gap waveguide, GW)是近年来兴起并发展的一种新型电磁传输及屏蔽技术^[8-11],其独有的宽带、非接触电磁屏蔽特性与 PIM 抑制需求不谋而合。GW 的非接触结构可从根源上避免不良电接触所导致的接触非线性,且

其宽带电磁屏蔽特性也可确保部件及系统在宽带范围内获得优良的电性能,为微波毫米波部件的稳定低 PIM 设计实现提供了一种全新途径^[12-13]。文章首先以槽间隙波导(groove gap waveguide, GGW)为例,对比传统波导,开展了非接触式波导传输线的 PIM 实验研究,为非接触式低 PIM 部件设计提供了充分依据。进一步,采用串联短路枝节结构设计并研制了一种 Ku 频段非接触式波导低通滤波器。实测结果显示,该非接触式滤波器的电性能完全优于预定指标,同时具有稳定的低 PIM 性能,几乎与测试系统残余 PIM 电平重合,且不受金属表面状态和连接力矩影响。文章工作可为微波毫米波部件及系统的低 PIM 设计及应用提供一定的借鉴和参考。

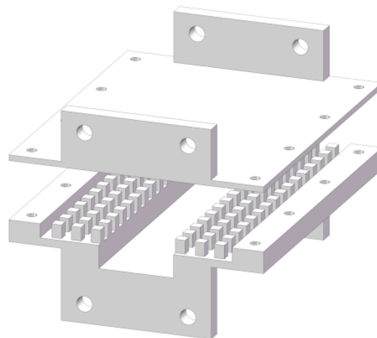
1 GGW 传输线的 PIM 实验研究

传输线是实现微波毫米波部件的基础。为实现非接触式低 PIM 部件应用,首先以 GGW 为例,开展非接触式传输线的 PIM 性能实验验证。

1.1 实验样件设计

基于现有的 PIM 实验测试条件,文章设计匹配 WR75 标准波导端口的垂直极化 GGW 样件进行 PIM 实验研究。GGW 通过在波导槽两侧构建非接触电磁带隙(electromagnetic band gap, EBG)结构实现^[11],如图 1(a)所示,波导槽传输电磁信号,两侧的 EBG 代替传统波导金属壁实现电磁屏蔽。GGW 中的电磁场传输主模与同规格矩形波导主模相似,因此可代替同规格矩形波导应用。

GGW 样件设计的关键在于计算合适的非接触 EBG 结构尺寸,形成覆盖波导主模带宽的电磁禁带,实现宽带电磁屏蔽,保证波导正常的电磁传输性能。采用经典的钉床式非接触 EBG 结构,其尺寸参数及相应的电磁禁带特性如图 1(b)所示。



(a) 槽间隙波导 (GGW) 结构示意图

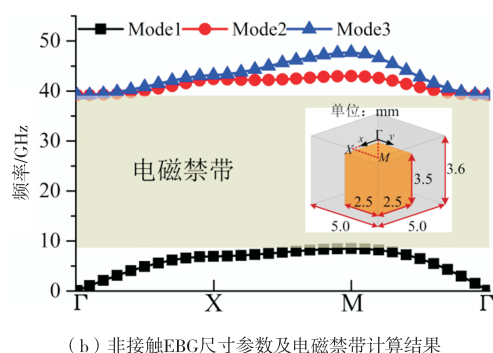
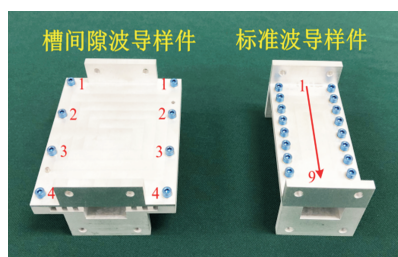


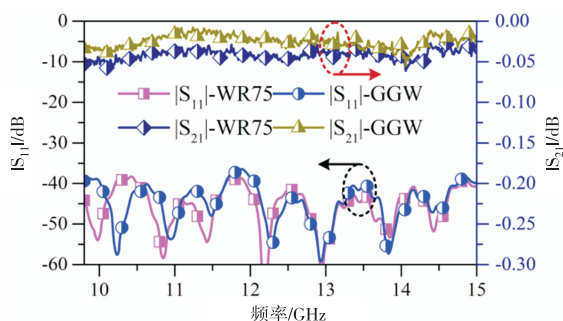
图 1 GGW 传输线实验样件设计

Fig. 1 Design of the experimental prototype of GGW transmission line

采用铝合金加工制作了 GGW 实验样件, 长度为 80 mm, 表面做本色导电氧化处理。为进行有效的对比研究, 同时加工制作了长度相同、采用 E 面切割的 WR75 标准波导。标准波导的材料及表面处理方式与 GGW 完全相同, 如图 2(a) 所示, 标准波导样件中设置 9 组紧固螺钉, GGW 样件中设置 4 组紧固螺钉, 螺钉材质和规格均相同。两种样件的实测 S 参数如图 2(b) 所示, 在 WR75 波导的主模工作带宽内均具有良好的插入损耗及驻波性能。



(a) 对比实验样件实物



(b) GGW 样件实测 S 参数结果

图 2 实验样件及实测 S 参数

Fig. 2 The manufactured experimental prototype and the measured S-parameters

1.2 PIM 实验测试及对比分析

采用图 3 所示的 Ku 频段 PIM 测试系统开展对比实验研究, 分别对 WR75 标准波导和 GGW 样件

进行 3 阶及 5 阶反射式 PIM 测试。实验测试条件如表 1 所列。为准确衡量传输线的 PIM 特性, 通过非接触式低 PIM 法兰适配器^[13]进行待测件的法兰端口连接, 从而最大限度消除法兰端口的 PIM 影响, 测试连接方式如图 4 所示。

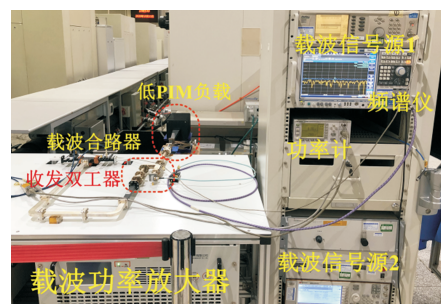


图 3 Ku 频段 PIM 测试系统

Fig. 3 The Ku-band PIM measurement system

表 1 PIM 实验测试条件

Tab. 1 Test conditions of the PIM experiment

测量阶数	测试载波 1 /GHz	测试载波 2 /GHz	PIM 信号频率 /GHz
3 阶反射	11.4	12.6	13.8
5 阶反射	12.0	12.6	13.8



图 4 待测件连接方式

Fig. 4 The connection method of the device under test

GGW 为非电接触式结构, 而标准波导为电接触式结构。GGW 样件中仅设置 4 组用于结构固定的连接螺钉, 由于其非接触特性, 连接螺钉的连接力矩理论上不会影响其 PIM 性能。而标准波导由于采用了 E 面切割且未做特殊的表面处理, 窄边面电流通过切割接触面时必然引发明显的接触非线性而产生 PIM, 且该非线性效应对螺钉连接力矩十分敏感。因此该实验测试重点研究螺钉连接力矩对于两种波导传输线样件的 PIM 影响。测试载波功率选择单路 20 W、40 W、60 W 及 80 W 4 组功率输入, 在该 4 组载波功率下测试系统的实测残余 PIM 电平(当次测试结果)如表 2 所列。

表 2 PIM 测试系统残余 PIM 电平

Tab. 2 The residual PIM level of the measurement system

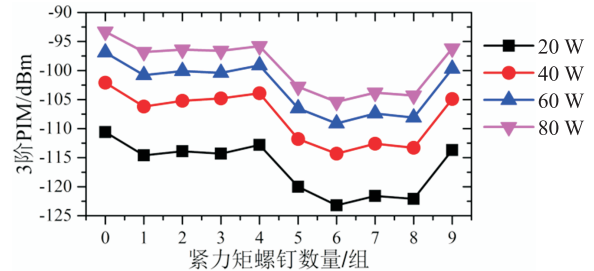
载波功率/W	20	40	60	80
3 阶残余 PIM/dBm	-138.96	-134.5	-131.0	-129.2
5 阶残余 PIM/dBm	-142.1	-142.1	-140.8	-140.8

采用数字力矩扳手对两种波导中连接螺钉的紧固力矩进行量化。为简化实验测试,达到对比目的,结合实际工况,此处规定 $20 \text{ mN} \cdot \text{m}$ 为松力矩, $50 \text{ mN} \cdot \text{m}$ 为紧力矩,通过数字力矩扳手进行设置。测试过程中,首先对 WR75 标准波导和 GGW 实验样件的所有连接螺钉组均施加松力矩,然后依次将每个螺钉组施加紧力矩,直至所有螺钉组均为紧力矩。每次改变力矩后,记录 PIM 电平稳定后的最大值作为相应的测试结果。

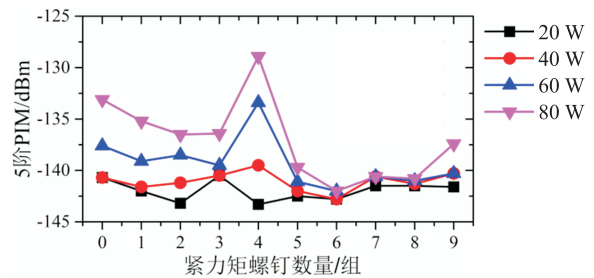
图 5 给出了 WR75 标准波导和 GGW 样件在改变连接螺钉力矩时的 PIM 实测结果。其中,图 5(a) 和图 5(b) 为标准波导的 3 阶及 5 阶 PIM 实测结果。初始时,标准波导的 9 组连接螺钉均设定为松力矩,然后依次对 9 组连接螺钉施加紧力矩。很明显,随着螺钉连接力矩的变化,标准波导样件的 PIM 电平变化剧烈,且随着紧力矩螺钉组数量的增加,PIM 电平呈现无规律的变化。这是因为改变每组螺钉的连接力矩时,波导的切割接触面由于接触力不均匀和应力偏差,其接触状态在微观上表现为无规律变化状态。因此,对于非一体化加工的传统波导类结构,装配过程也是影响最终 PIM 性能的重要因素,在装配过程中不但要对电接触面施加足够连接力矩,还需要保证接触面受力均匀。

图 5(c) 为 GGW 样件随着连接螺钉施加紧力矩时的 PIM 测试结果,由于 GGW 的 5 阶 PIM 实测值均处于系统残余 PIM 电平之下,因此仅给出 3 阶 PIM 测试结果。图 5(d) 为保持所有螺钉组连接力矩相同,连接力矩整体变化时 GGW 样件的 PIM 实测结果。可以看出,当改变螺钉力矩时,GGW 样件的 PIM 电平均维持在稳定水平,其变化均在测试误差之内,螺钉连接力矩对其 PIM 性能的影响可以忽略,这也完全符合理论预期。此外,文中普通波导和 GGW 试验样件的金属表面未采取任何低 PIM 的表面处理,同等测试条件下,GGW 样件的 PIM 电平明显低于标准波导,接近测试系统残余 PIM 水平,这充分体现了非接触波导的稳定低 PIM 特性。非接触式波导只需很少数量的螺钉维持结构稳固即可,其 PIM 性能与连接力矩及表面处理状态基本无

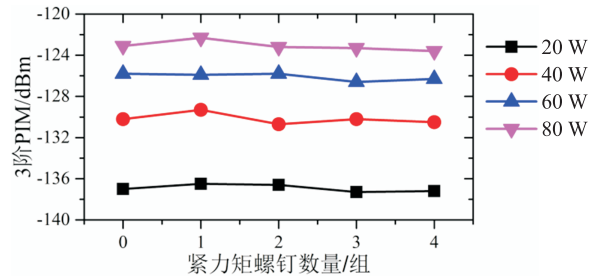
关,而普通波导不但需要大量紧固螺钉,同时施加严格的连接力矩和低 PIM 表面处理工艺后,方可实现低 PIM 性能。



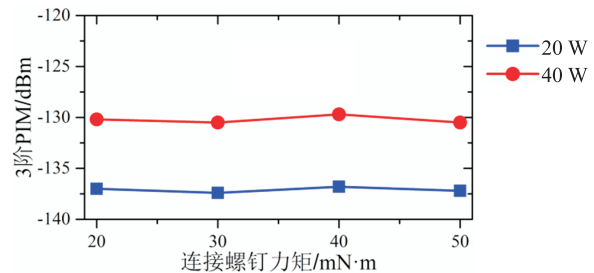
(a) 标准波导样件 3 阶 PIM 结果



(b) 标准波导样件 5 阶 PIM 结果



(c) GGW 样件 3 阶 PIM 结果



(d) 连接力矩整体变化时 GGW 样件的 3 阶 PIM

图 5 WR75 标准波导和 GGW 实验样件的 PIM 测试结果

Fig. 5 PIM measurement results of the experimental prototype of WR75 waveguide and GGW

2 非接触式低 PIM 波导滤波器

在具有低 PIM 要求的微波系统中,大功率通道上的滤波器十分关键,在实现频率选择和杂波抑制的同时,其自身必须具备低 PIM 性能,以保证不能引入额外的干扰信号。例如,在 PIM 测试系统中,发射滤波器、负载滤波器等的 PIM 性能对于测试系

统的检测灵敏度有着决定性的影响。前文的实验结果充分显示出非接触式传输线的稳定低 PIM 技术优势,从而为实现高性能的低 PIM 滤波器提供了新途径。本节针对某 Ku 频段滤波器需求,基于非接触式传输线实现一种非接触式波导低通滤波器,并完成 PIM 实验验证。

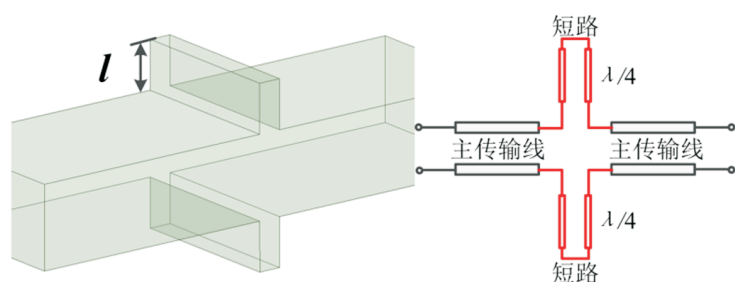
2.1 非接触式滤波器设计与实现

表 3 所列为某 Ku 频段测试系统中的低 PIM 滤波器的电性能指标要求。滤波器带外抑制要求较高,带外 1.2 GHz 带宽内抑制度要求达 80 dB 以上,具有非常陡峭的滤波特性,所需滤波器阶数较高,如果采用耦合谐振带通滤波结构,则会导致滤波器尺寸较大。

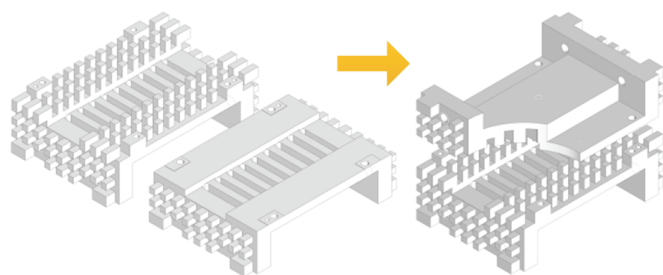
表 3 某 Ku 频段滤波器电性能技术指标要求

Tab.3 The main technical index requirement of a Ku band filter

通带 /GHz	带内驻波	带内插损 /dB	带外抑制
10.5 ~ 12.8	≤ 1.25	≤ 0.5	13.5 GHz 处 ≥ 35 dB; 13.7 GHz 处 ≥ 50 dB; 13.8 GHz 处 ≥ 60 dB; 14 ~ 15 GHz ≥ 80 dB



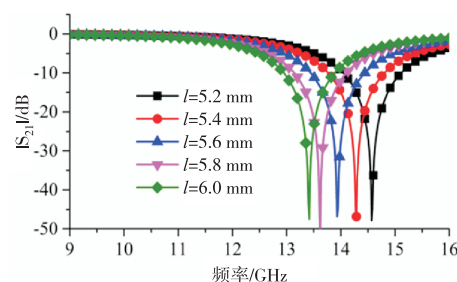
(a) 矩形波导的单枝节加载带阻结构及其等效电路



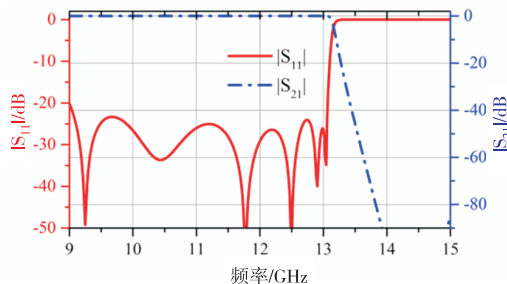
(c) 非接触式串联短路枝节波导滤波器结构

为实现结构小型化并简化非接触设计验证过程,本文采用串联短路枝节加载式带阻滤波器方案,图 6(a)所示为矩形波导的单枝节加载带阻结构及其等效电路,当枝节线长度为四分之一波长时,枝节线末端短路等效为枝节线接入点处的开路,导致接入点处特性阻抗无穷大,因此阻止电磁波继续沿波导传输,进而形成阻带效应。图 6(b)所示为单枝节加载结构的频率响应特性,随着枝节线长度的增加,阻带频率往低频方向移动。为实现更宽的阻带,可将多个单枝节加载结构进行串联形成多枝节的高阶带阻滤波器,利用其宽带阻特性实现滤波器所需的带外抑制性能,等效实现低通滤波功能,且这种串联短路枝节加载形式的波导滤波器具有结构小型紧凑的优点。

采用 GGW 作为主传输线,同时配合非接触式法兰端口,则可实现上述串联短路枝节加载滤波器的整体非接触化,其结构如图 6(c)所示。该非接触式滤波器消除了所有的电接触点,从而可以大幅消除金属接触非线性。其中,必要的机械连接仅用于结构固定,连接点部位的场强已被衰减至极低的水平,不会产生接触非线性。因此,该滤波器理论上可获得十分稳定的低 PIM 性能。图 6(d)为该非接触式滤波器的 S 参数仿真结果,完全优于表 3 的指标要求。



(b) 单枝节加载结构的频率响应特性



(d) 非接触式串联短路枝节滤波器 S 参数仿真结果

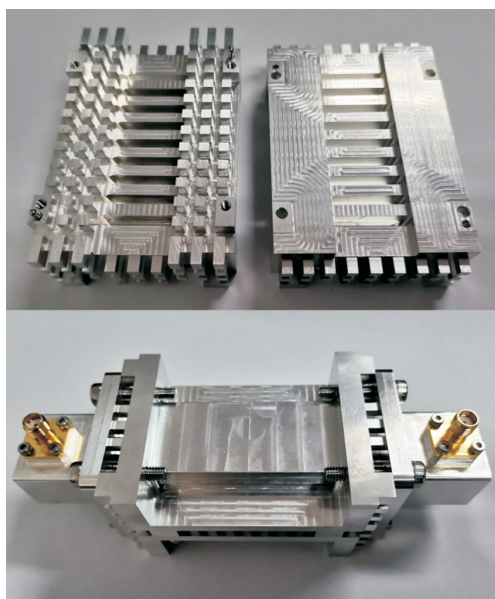
图 6 非接触式波导滤波器的仿真设计

Fig.6 Simulation design of the contactless waveguide filter

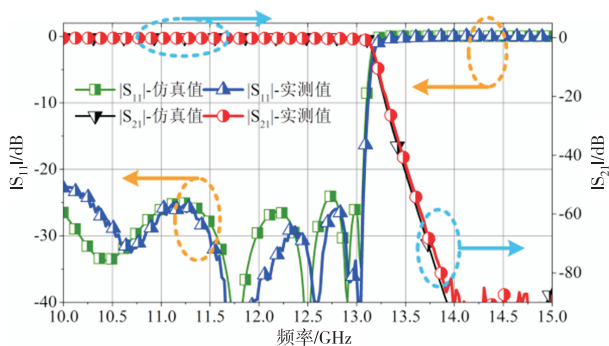
采用铝合金加工制作了上述非接触式低通滤波器,如图 7(a)所示,滤波器表面做本色导电氧化处理,除此之外未施加任何低 PIM 表面处理工艺,

也无特殊的表面清洁度及粗糙度要求。滤波器上下两部分仅通过 4 个连接螺钉组装,连接力矩无特殊要求,实现结构固定即可。滤波器长宽高尺寸为

70.7 mm × 48 mm × 38.3 mm, 整体尺寸较为紧凑。采用安捷伦矢量网络分析仪 E8363C 及波同转换测试非接触式滤波器的 S 参数特性, 测试前通过 TRL 校准将矢量网络分析仪校准至波导端口。非接触式滤波器样机的 S 参数结果如图 7(b) 所示, 实测结果与仿真结果吻合良好。在 10.5 GHz 至 12.8 GHz 频率范围内, 滤波器样机的实测插入损耗小于 0.3 dB, 实测回波损耗优于 23 dB (驻波比优于 1.15), 带外 13.5 GHz 处抑制度超过 40 dB, 13.7 GHz 处超过 60 dB, 13.8 GHz 处超过 70 dB, 14 GHz ~ 15 GHz 范围内抑制度超过 80 dB, 各项指标实测结果优于表 3 所需的技术指标。



(a) 非接触式串联短路枝节波导滤波器实物



(b) 非接触式波导滤波器的 S 参数结果

图 7 非接触式波导滤波器实物及其 S 参数结果

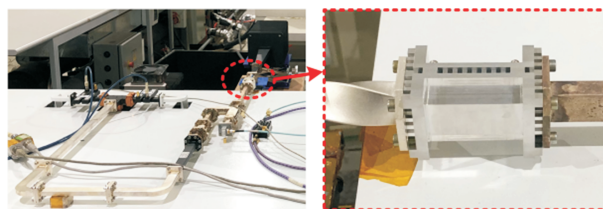
Fig. 7 The manufactured contactless waveguide filter and its S-parameter results

2.2 非接触式滤波器的 PIM 实验验证

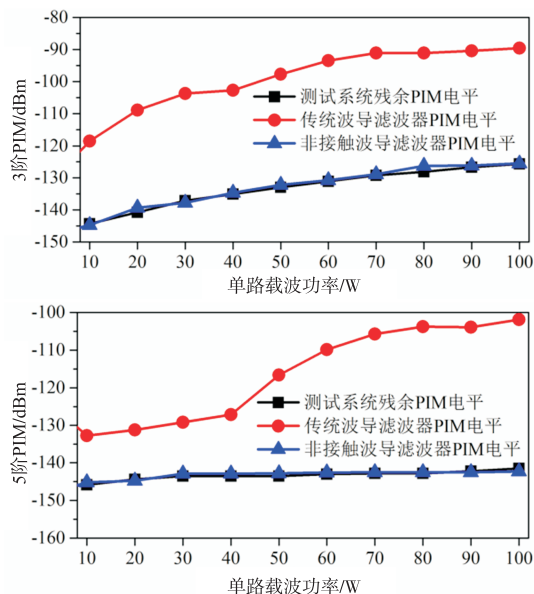
采用图 3 所示的 Ku 频段 PIM 测试系统对所研制的非接触式波导滤波器进行 PIM 实验验证, 实验

测试条件与表 1 中相同。测试前首先对测试系统进行校准, 使其保持在低残余 PIM 水平。由于采用了非接触式的法兰端口, 测试过程中对于滤波器的连接无特殊要求, 仅通过连接螺钉保持固定即可, 如图 8(a) 所示。在每次测试中, 单路载波功率从 10 W 至 100 W 以 10 W 为步进增加, 记录 PIM 电平稳定后的最大值作为测试数据。此外, 在相同的测试条件下, 选择同类滤波结构及同等电性能指标的传统波导低通滤波器进行对比测试。

图 8(b) 给出了文章非接触式串联短路枝节波导滤波器的 PIM 实测结果。很明显, 非接触式滤波器获得了稳定的低 PIM 性能, 几乎与测试系统的残余 PIM 电平相重合, 即其实际的 PIM 电平位于检测系统的 PIM 底噪之下。而用作对比验证的传统滤波器由于经过了拆卸及再次组装, 其连接面状态无法恢复至原有状态, 因此其 PIM 性能出现了明显的恶化。



(a) PIM 实验测试场景



(b) 3阶及5阶PIM实验测试结果

图 8 非接触式波导滤波器的 PIM 测试结果

Fig. 8 PIM measurement results of the manufactured contactless waveguide filter

以上实验测试结果完全符合 PIM 的物理机理。在上述滤波器结构中, 材料非线性基本可以忽略,

产生 PIM 的主要根源即为金属接触非线性。传统接触式滤波器的 PIM 性能对于电接触状态十分敏感,任何电接触状态的改变均会引起 PIM 性能的恶化。而通过对滤波器的整体非电接触化设计,大幅消除了金属接触非线性,近乎可以实现无 PIM 性能,因此实测结果仅体现为测试系统自身的 PIM 噪声,且在加工制造、装配测试等过程中对于表面处理及连接力矩无特殊要求,获得了显著且高效的 PIM 抑制性能。

3 结论

文章基于间隙波导技术原理,成功研制实现了一种非接触式低 PIM 波导滤波器,实测获得了与金属面表面状态及连接力矩基本无关的稳定低 PIM 性能。研究结果充分体现出非接触式低 PIM 部件应用的可行性及其技术优势,为实现高效的 PIM 抑制提供了一种全新途径。此外,采用非接触式设计实现低 PIM 的同时,会导致部件尺寸在一定程度上的额外增加,如何进一步实现小型化也是后续的重要关注点。文章工作可为低 PIM 微波毫米波部件、系统的设计及应用提供一定参考。

参考文献:

- [1] 崔万照,李军,魏焕. 航天器微波部件无源互调机理分析与检测技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2020:17-27.
- [2] CUI W Z, LI J, WEI H, et al. Passive Intermodulation [M]. Boca Raton: CRC Press, 2022.
- [3] ZHAO X L, HE Y N, 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.
- [4] 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.
- [5] SMACCHIA D, SOTO P, BORJA V E, et al. Advanced compact setups for passive intermodulation measurements of satellite hardware[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(2): 700-710.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 孙冬全. 毫米波间隙波导技术及 FMCW 反射功率对消系统应用研究[D]. 南京:东南大学, 2017: 1-5.
- [9] SUN D Q, CHEN X, DENG J Y, et al. Gap waveguide with interdigital-pin bed of nails for high-frequency applications [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(7): 2640-2648.
- [10] SUN D Q, CHEN X, GUO L X, et al. Hard - soft groove gap waveguide based on perpendicularly stacked corrugated metal plates [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021, 69(8): 3684-3692.
- [11] BERENGUER A, FUSCO V, ZELENCHUK D E, et al. Propagation characteristics of groove gap waveguide below and above cutoff [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64(1): 27-36.
- [12] 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.
- [13] CHEN X, CUI W Z, HE Y N, et al. Low passive intermodulation contactless waveguide adapter based on gap waveguide technology[C]//IEEE. 13th European Conference on Antennas and Propagation, 2019: 1-3.

作者简介:陈翔(1989—),宁夏吴忠人,博士,高工。主要研究方向为空间微波毫米波技术。E-mail: chx_cast504@126.com

通讯作者:崔万照(1975—),山东高密人,博士,研究员。中国空间技术研究院首席研究员、航天科技集团公司卫星通信方向学术技术带头人、陕西省高层次人才特殊支持计划专家、入选国防高层次人才、国务院政府特殊津贴获得者、南京航空航天大学兼职博导、西安交通大学、天津大学、四川大学、浙江大学兼职教授,发表学术论文 200 余篇,出版专著/译著多部。主要研究方向为空间微波技术。E-mail: cuiwanzhao@126.com