

基于间隙波导的小型化可插拔式无法兰波导

陈翔^{1,2}, 孙冬全³, 王小丽², 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空间微波技术重点实验室, 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: 针对卫星工程中的无法兰波导应用需求, 基于间隙波导技术, 提出新型的小型化可插拔式无法兰波导连接结构及设计方法。在波导 A 末端的外壁四周构建周期性的金属钉床结构, 波导 B 末端设计相应的中空屏蔽腔, 将波导 A 插入波导 B 中, 以间隙配合形式构成插拔式连接结构。在特定的尺寸条件下, 插拔连接部位形成具有宽电磁禁带的电磁带隙结构, 阻止电磁场从插拔接触面间的微小空气间隙泄露, 保证了波导间正常的电磁传输性能。对两种 Ku 频段标准 WR75 波导的无法兰波导样件进行了验证, 分析了加工误差及装配误差容差特性。在 WR75 波导工作频率 9.84~15 GHz 范围内, 样件实测插入损耗小于 0.06 dB, 回波损耗分别优于 30 dB 和 20 dB。相比 WR75 标准法兰连接, 无法兰波导连接截面尺寸分别缩减 60% 和 70% 以上, 大幅降低了传统法兰连接的体积, 同时实现了波导间快速、灵活的插拔式连接, 且具有良好的制造装配容差性能, 可广泛应用于各种微波部件及系统中。

关键词: 无法兰; 波导; 间隙波导; 电磁带隙

中图分类号: TN814 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202101004 **文章编号:** 0253-987X(2021)01-0027-06



OSID 码

A Compact Pluggable Flangeless Waveguide Connection Using Gap Waveguide Technology

CHEN Xiang^{1,2}, SUN Dongquan³, WANG Xiaoli², CUI Wanzhao², HE Yongning¹

(1. School of Microelectronics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave, 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: To reduce the size of traditional waveguide flange in satellite systems, a novel solution to flangeless waveguide connection is proposed using gap waveguide technology. Bed of nails is arranged surrounding the outer surface of a waveguide, called part A. Part B is another waveguide with stepped transition to an enlarged end acting as the shielding cavity. Part A is inserted into part B, and a pluggable waveguide connection is constructed in the form of clearance fit. A contactless EBG structure is formed in the pluggable part under proper size conditions, and the EM wave leakage from the tiny air gap between contact surfaces is suppressed by EBG's stop band, achieving a good EM transmission performance between two waveguides. Two kinds of Ku band prototype of the flangeless waveguide are designed and measured. Over the frequency range from 9.84 GHz to 15 GHz, the measured insertion loss of the two prototypes is less than 0.06 dB, and the return loss is better than 30 dB and 20 dB respectively. Compared with traditional

WR75 waveguide flanges, the sectional size of the two prototypes decreases by more than 60% and 70%, respectively. The proposed flangeless waveguide has compact size and good error tolerance performance in manufacturing and assembling, and is easy to use, which is conducive to making fast and flexible waveguide connection without connecting screws and can be widely used in various kinds of microwave components and systems.

Keywords: flangeless; waveguide; gap waveguide; electromagnetic band gap

波导传输线由于具有低损耗、高功率容量等优势,是卫星有效载荷微波系统中最广泛应用的传输线形式之一。波导法兰是波导部件及系统中最常见的微波连接结构,在卫星有效载荷微波系统中大量应用。与此同时,大量的法兰连接势必造成体积和重量的额外大幅增加,不利于载荷系统的小型轻量化,且与波导本身相比,传统法兰需占用较大的空间,不利于系统的紧凑布局。针对此问题,当前在卫星工程应用中已逐渐开始采用无法兰波导连接,以减小传统波导法兰的体积和质量,例如,2020年7月9日成功发射的我国首个全球高通量宽带卫星系统首发星——亚太6D通信卫星中就大量采用了无法兰波导^[1]。图1所示为目前卫星工程应用中所采用的焊接式无法兰波导结构,主要包括套箍式焊接和直接对接焊接两种,均是通过焊接工艺实现波导的无法兰连接,其性能的好坏取决于焊接工艺的合格与否。如果焊接工艺的一致性难以保证,则焊接后的无法兰波导的电磁传输性能难以预估和保证。焊接为不可逆过程,一旦焊接完成,波导结构和位置则无法改变,不利于系统中各部件的灵活拆卸组装,不利于系统的整体设计和灵活布局。为获得满意可靠的性能,焊接式无法兰波导所需的焊接工艺及检验过程十分复杂,导致较高的成本。

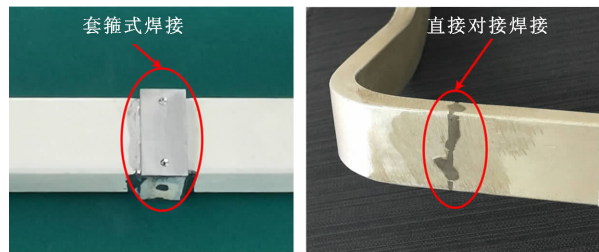


图1 焊接式无法兰波导

近年来,间隙波导(GW)理论及技术引起了国内外学者的广泛关注,成为重要的热点研究方向^[2-5]。GW的核心本质为非接触电磁带隙原理^[6-7]:当理想电导体(PEC)平面和理想磁导体(PMC)平面平行放置且不接触,在一定尺寸参数条件下,即可形成非接触电磁带隙(EBG)结构,其内部

不支持禁带范围内任何电磁场模式的传播。自然界中不存在PMC平面,可通过特定的周期性结构设计,构造人工磁导体(AMC)平面代替。GW技术围绕如何构建各类非接触电磁带隙结构实现无物理接触条件下的电磁场屏蔽所展开,其独有的非接触特性在很多领域显现出巨大的技术优势,为微波毫米波电路、天线及封装等应用提供了全新的方法和途径^[8-13]。新型波导连接是GW技术的重要应用之一,基于非接触EBG原理,可以实现传统方法很难或无法实现的新型波导连接结构。文献^[14]和^[15]中提出基于间隙波导技术的非接触法兰结构,用于实现太赫兹系统的快速测试。孙冬全等相继提出了基于圆柱面非接触EBG结构的可弯折软波导^[16]以及基于级联式空气间隙波导结构的可实时旋转扭波导^[17]。此外,陈翔等将间隙波导技术与金属接触导致的无源互调(PIM)问题相结合,提出非接触式低PIM设计技术,并研制了一种折叠结构的宽带小型化非接触式低PIM法兰作为验证^[18],获得了优秀的性能,此后,又基于间隙波导技术提出多种非接触式的低PIM波导法兰转换结构^[19-21]。

针对焊接式无法兰波导所存在的问题,如果采用普通波导的直接插拔式设计,则由于机械加工误差及粗糙度的存在,实际中不可能形成理想电接触,插拔接触表面间会存在空气间隙,造成电磁泄露,影响波导的电磁传输性能。针对此问题,将间隙波导的非接触电磁屏蔽特性与无法兰波导需求相结合,提出新型的快速可插拔式无法兰波导结构。通过构建电磁带隙结构实现插拔式连接部位的电磁场屏蔽,将电磁信号束缚在波导内部,保证了正常的电磁传输性能。基于此提出两种具体的无法兰波导技术方案并完成了实物验证,获得了良好的性能。本文所提无法兰波导可以大幅降低传统法兰连接的体积,同时可实现波导全带宽内快速、灵活的插拔式连接,此外还具有良好的制造装配容差性能,解决了已有焊接式无法兰波导工艺复杂、装配难度大、布局不灵活的问题,可广泛应用于各种微波部件与系统中。

1 无法兰波导技术方案

针对实际的无法兰波导应用需求,提出两种具体的无法兰波导技术方案。

1.1 标准尺寸无法兰波导

标准尺寸无法兰波导基于标准波导实现,包括结构 A 与结构 B 两部分,如图 2 所示。在一个标准波导末端的外壁四周设计周期性的钉床结构,构成人工磁导体(AMC)平面,作为结构 A。结构 B 为末端带有屏蔽腔的另一标准波导,屏蔽腔的内腔壁作为理想电导体(PEC)平面,与钉床构成 EBG 结构。屏蔽腔深度大于等于钉床结构沿波导传输方向的长度,不同于文献[18]中用于实现低 PIM 的非接触式结构,本文中无法兰波导为接触式结构,屏蔽腔的内腔宽高尺寸设计值等于钉床结构的外部轮廓尺寸 W_{outer} 和 H_{outer} ,即 AMC 平面和 PEC 平面间的空气间隙理论值为 0,根据非接触电磁带隙特性,此时可以大幅降低钉床尺寸,因而可以实现结构的小型化。实际加工制造时采取公差处理,当结构 A 插入结构 B 中时,AMC 面和 PEC 面形成间隙配合,进而构成波导间的插拔式紧连接。可根据需要灵活设计额外的机械连接结构,机械连接结构无固定形式。

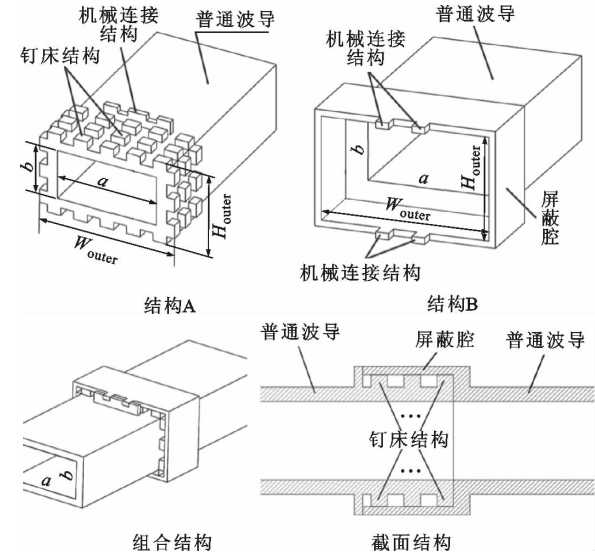


图 2 标准尺寸无法兰波导结构示意图

1.2 阻抗变换式紧凑型无法兰波导

上述标准尺寸无法兰波导需要在标准波导壁四周构建金属钉床结构,在另一波导末端设计相应的屏蔽腔以实现插拔式连接,该结构相比标准波导本身,在插拔连接部位仍然会带来体积的增大。为此,进一步提出一种紧凑型的无法兰波导连接结构,如图 3 所示,通过阻抗变换设计,将普通波导变换至减

尺寸的非标波导结构,在非标波导部分运用非接触电磁带隙原理实现无法兰的插拔式连接。

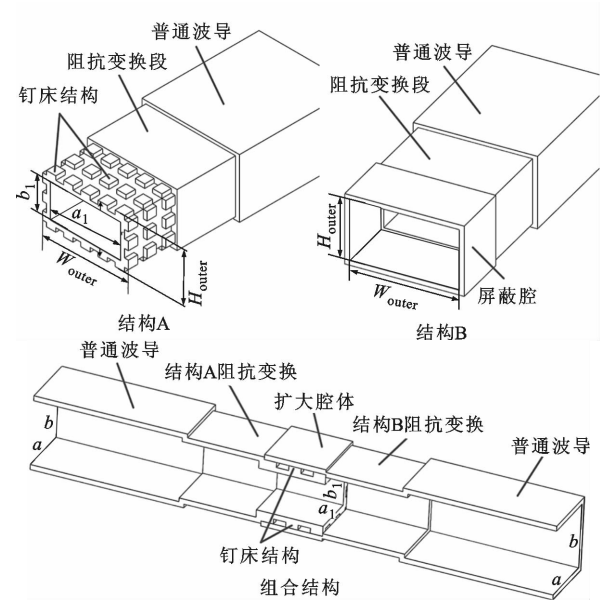


图 3 阻抗变换式紧凑型无法兰波导结构示意图

阻抗变换式无法兰波导通过增加阻抗变换结构,可以进一步减小连接部位尺寸,更加有利于小型化设计和灵活布局,但是阻抗变换的引入会造成一定的带宽和驻波性能损失,在实际应用中可以根据具体需求设计合适的阻抗变换结构。

2 无法兰波导设计方法

当结构 A 插入结构 B 中时,由于机械加工公差、误差、粗糙度的存在以及间隙配合的工艺需要,AMC 平面与 PEC 平面间存在微小的空气间隙。根据非接触电磁带隙原理,为了抑制电磁场从空气间隙中泄露,需对 AMC 结构及尺寸参数进行特定的设计和计算,使得 AMC 平面和 PEC 平面共同构成 EBG 结构,形成覆盖波导工作带宽的电磁禁带,将电磁场束缚在波导内部而不会从空气间隙中泄露,进而保证波导正常的电磁传输性能。

无法兰波导设计的关键在于确定其中所形成的 EBG 结构及相关尺寸参数,还需考虑实际中所存在的机械加工及装配误差,分析其主要的容差特性,以获得满足实际应用需求的性能。设计步骤如下。

(1)电磁禁带设计。在电磁仿真程序中建立非接触 EBG 结构的最小单元模型,在周期性边界条件下通过本征模式求解获得色散特性,根据色散特性确定电磁禁带,调整 EBG 结构的各参数值,获得满足需求的电磁禁带范围。

(2)机械加工容差分析。根据实际机械加工及

间隙配合工艺要求,设定 AMC 平面与 PEC 平面间的空气间隙取值范围,计算不同空气间隙下的电磁禁带。需保证在所设定的空气间隙范围内,电磁禁带均可以覆盖所需的波导工作带宽,从而保证足够的机械加工容差性能。

(3)电磁传输性能分析。根据获得的尺寸参数建立无法兰波导的整体电磁结构模型,将空气间隙设定为典型值,仿真分析无法兰波导的 S 参数特性,获得满足条件的电磁传输性能。

(4)装配误差容差分析。根据实际装配误差情况设定结构 A 与结构 B 波导端口间距的取值范围。在所设定的间距范围内分析无法兰波导连接的电磁传输特性,获得允许的装配容差范围。

(5)电磁屏蔽特性分析。将装配误差设定为所确定容差范围的最大值,根据实际工作环境设置波导传输功率,仿真分析电磁场分布特性,根据场强分布选定钉床结构中周期性金属单元的数量,以保证足够的电磁屏蔽性能。

(6)最终结构参数确定。根据实际结构及具体情况可微调尺寸参数,获得满足条件的 S 参数特性,加工实物样件,完成实验测试验证。

3 无法兰波导样件设计及实验验证

本文采用 Ku 频段 WR75(BJ120)标准波导对应的两种无法兰波导作为实物验证。选择标准尺寸无法兰波导样件为例做具体说明,阻抗变换式紧凑型无法兰波导除增加阻抗变换结构外,其他设计过程与标准尺寸结构相同。

如图 4 所示为无法兰波导的关键结构尺寸示意图,在波导末端的外壁四周设计钉床式 AMC 结构。钉床由相同尺寸的金属凸体以周期性排列方式组成,钉床高度为 h_p ,AMC 表面与 PEC 表面间实际的微小空气间隙为 h_a ,钉床单元的长宽尺寸为 w 、 t ,

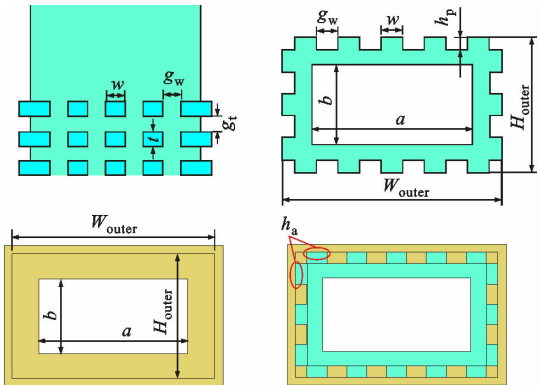


图 4 无法兰波导样件关键结构尺寸

横向和纵向的间距分别为 g_w 和 g_t 。WR75 波导的工作频段为 9.84~15 GHz,为实现 WR75 标准波导的无法兰连接,需要设计合适的 EBG 结构尺寸,保证电磁禁带覆盖 9.84~15 GHz 频段范围。

电磁禁带通过计算 EBG 结构的色散特性而获得。在电磁仿真工具 CST 中建立非接触 EBG 结构的最小单元仿真计算模型(如图 5 中插图所示),设置周期性边界条件,采用本征求解模式,求解色散特性。通常的机械加工误差约为 ± 0.02 mm,为衡量机加误差容差性能,在仿真模型中将空气间隙 h_a 设定为 0.01~0.04 mm,以 0.01 mm 为步进,计算获得的色散特性如图 5 所示,其他尺寸参数值如表 1 所示。当空气间隙为 0.04 mm 时,电磁禁带范围约为 9.7~45.3 GHz,可完全覆盖 WR75 波导的工作带宽,且空气间隙越小,电磁禁带范围越宽,可以实现尺寸小型化。在间隙配合工艺要求下,通常的机械加工误差要求小于 0.02 mm,因此尺寸参数设计合理,保证了较强的机械加工容差性能。

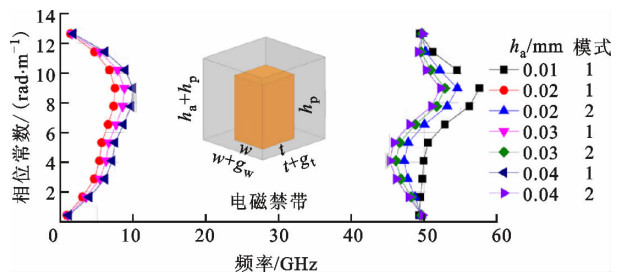


图 5 不同空气间隙下的色散特性仿真结果

表 1 无法兰波导样件主要尺寸参数值

尺寸参数	h_p	w	t	g_w	g_t
数值/mm	1.5	2.6	2.0	2.6	2.0

将空气间隙 h_a 设置为典型值 0.02 mm,在电磁仿真软件 HFSS 中建立无法兰波导连接的整体电磁仿真模型。当结构 A 插入结构 B 中时,装配误差会造成两部分波导输出端口间形成微小间隙 d 。图 6 所示为端口间距 d 在 0~0.5 mm 之间以 0.1 mm 步进变化时的 S 参数仿真结果,可以看出,当端口间距在一定范围变化时,传输性能均可满足需求,说明该无法兰波导具有较强的装配容差能力。

将端口间距 d 设定为所设定取值区间的最大值,即 0.5 mm,根据实际需求,设置波导输入端口激励功率为 100 W,仿真获得电场分布特性,如图 7 所示。可以看出,电磁场被有效地束缚于波导内部正常传输。即使在最大装配误差情况下,选择 3 排

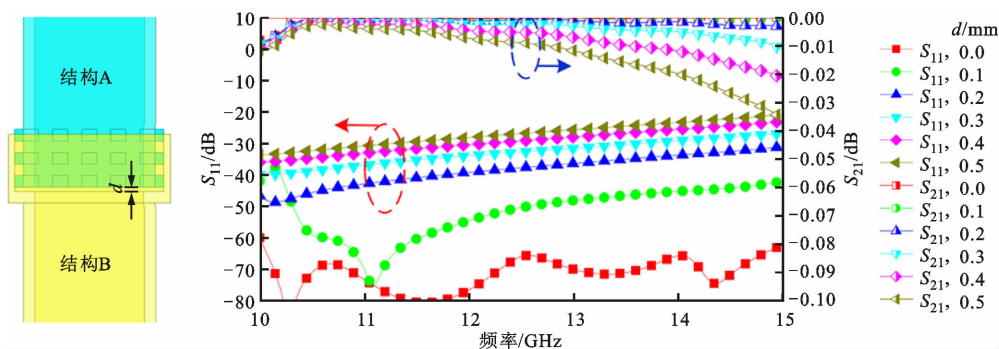
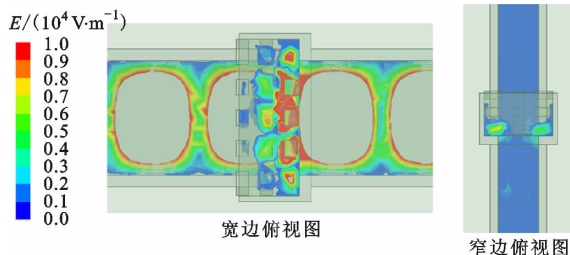


图 6 装配误差范围内的电磁传输特性仿真结果

金属凸体构成钉床结构即可保证足够的电磁屏蔽性能,实际中可根据具体需求增加或减少金属凸体数。

图 7 传输功率为 100 W 且 d 为 0.5 mm 时的电场分布

根据获得的尺寸参数,加工制作了 Ku 频段标准尺寸无法兰波导样件和阻抗变换式紧凑型无法兰波导样件,无法兰连接后,整体波导长度均为 100 mm。经测量,样件中 AMC 平面与 PEC 平面间的实际空气间隙约为 0.015 mm,接近典型机械加工误差 0.02 mm。

无法兰波导样件的实测 S 参数如图 8 和图 9 所示,样件性能符合预期设计。在 WR75 波导工作频率 9.84~15 GHz 范围内,标准尺寸无法兰波导样件实测插入损耗小于 0.05 dB,回波损耗优于 30 dB,阻抗变换式紧凑型无法兰波导样件实测插入损耗小于 0.06 dB,回波损耗优于 20 dB,获得了良好的电磁传输性能。

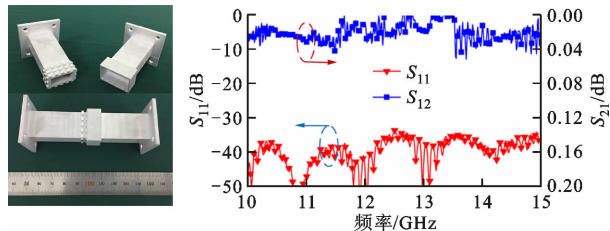
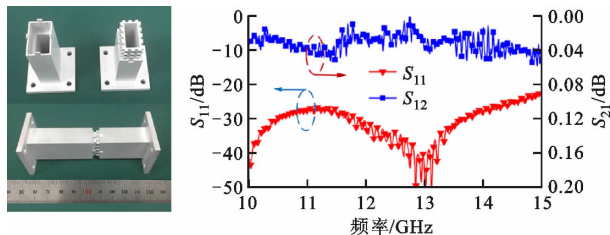
图 8 Ku 频段 WR75 标准尺寸无法兰波导样件及实测 S 参数

图 10 所示为传统 WR75 波导法兰与本文所实现的两种无法兰波导截面尺寸对比。采用无法兰波

图 9 Ku 频段 WR75 阻抗变换式紧凑型无法兰波导样件及实测 S 参数

导设计后,波导连接横截面尺寸大幅缩减,相比传统的 WR75 法兰连接,标准尺寸无法兰波导连接截面尺寸缩减 60% 以上,阻抗变换式紧凑型无法兰波导连接截面尺寸缩减 70% 以上,实现了波导连接的小型化设计,且插拔式设计可实现更加方便、快速的装配拆卸,更加有利于部件及系统的灵活布局。

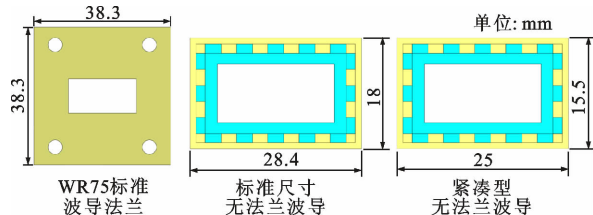


图 10 传统波导法兰与无法兰波导横截面尺寸对比

4 结 论

针对卫星工程应用中的无法兰波导技术需求,本文提出新型的小型化可插拔式无法兰波导技术方案,基于非接触电磁带隙原理实现宽带的电磁屏蔽,由此构建波导间快速、灵活的无法兰插拔式连接结构,大幅缩减了传统法兰连接的体积和质量,同时具有宽带工作特性和良好的容差性能。提出了两种具体的无法兰波导方案,完成了 Ku 频段实物样件验证,获得了预期性能。本文所提出的无法兰波导设计方法简单明确,对制造及装配工艺要求低,快速插拔式设计有利于灵活的拆卸、组装及结构布局,可广泛应用于各种微波部件及系统中。

参考文献:

- [1] 杨成, 高一鸣. 让用户随时随地享受卫星互联网! 亚太6D卫星如此强大 [EB/OL]. [2020-07-10]. <http://www.sastind.gov.cn/n6909/n6990/c6809837/content.html>.
- [2] KILDAL P S, ALFONSO E, VALERO-NOGUEIRA A, et al. Local metamaterial-based waveguides in gaps between parallel metal plates [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2009, 8(4): 84-87.
- [3] POLEMI A, MACI S, KILDAL P S. Dispersion characteristics of a metamaterial based parallel-plate ridge gap waveguide realized by bed of nails [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, 59(3): 904-913.
- [4] SORKHERIZI M S, DADGARPOUR A, KISHK A A. Planar high-efficiency antenna array using new printed ridge gap waveguide technology [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(7): 3772-3776.
- [5] 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.
- [6] KILDAL P S. Definition of artificially soft and hard surfaces for electromagnetic waves [J]. *Electronics Letters*, 1998, 24(3): 168-170.
- [7] KILDAL P S. Three metamaterial-based gap waveguides between parallel metal plates for mm/submm waves [C]// *Proceedings of the 3rd European Conference on Antennas and Propagation*. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2009: 28-32.
- [8] ZAMAN A U, ALEXANDERSON M, VUKUSIC T, et al. Gap waveguide PMC packaging for improved isolation of circuit components in high-frequency microwave modules [J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2014, 4(1): 16-25.
- [9] BRAZÁLEZ A A, RAJO-IGLESIAS E, KILDAL P S, et al. Design and validation of microstrip gap waveguides and their transitions to rectangular waveguide, for millimeter-wave applications [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2015, 63(12): 4035-4050.
- [10] 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.
- [11] SORKHERIZI M S, DADGARPOUR A, KISHK A A. Planar high-efficiency antenna array using new printed ridge gap waveguide technology [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(7): 3772-3776.
- [12] TAMAYO-DOMÍNGUEZ A, FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ J M, SIERRA-PÉREZ M. Groove gap waveguide in 3-D printed technology for low loss, weight, and cost distribution networks [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, 65(11): 4138-4147.
- [13] SUN Dongquan, CHEN Xiang, DENG jingya, 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.
- [14] PUCCI E, KILDAL P S. Contactless non-leaking waveguide flange realized by bed of nails for millimeter wave applications [C]// *Proceedings of the 6th European Conference on Antennas and Propagation*. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2012: 3533-3536.
- [15] RAHIMINEJAD S, PUCCI E, VASSILEV V, et al. Polymer gap adapter for contactless, robust, and fast measurements at 220-325 GHz [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2016, 25(1): 1-10.
- [16] SUN Dongquan, CHEN Zhenhua, XU Jinping. Flexible rectangular waveguide based on cylindrical contactless flange [J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(25): 2042-2044.
- [17] SUN Dongquan, XU Jinping. Real time rotatable waveguide twist using contactless stacked air-gapped waveguides [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2017, 27(3): 215-217.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.

(编辑 武红江)