

doi:10.3969/j.issn.1003-3106.2025.11.013

引用格式:王迎栋.基于脊间隙波导的宽带径向功率合成器[J].无线电工程,2025,55(11):2250-2255.[WANG Yingdong. Wideband Radial Power Combiner Based on Ridge Gap Waveguide[J]. Radio Engineering, 2025, 55(11): 2250-2255.]

基于脊间隙波导的宽带径向功率合成器

王迎栋^{1,2}

(1. 中国电子科技集团公司第五十四研究所,河北 石家庄 050081;

2. 西安电子科技大学 通信工程学院,陕西 西安 710071)

摘要:针对宽毫米波频段的高功率合成应用,设计了一种基于脊间隙波导(Ridge Gap Waveguide, RGW)的宽带径向功率合成器。该合成器由2层金属板组成,下层金属板中心处采用同轴线进行馈电,能量经由上方多个金属圆台反射进入到各个径向传输线实现功率等分。径向传输线采用RGW结构,即在金属脊两侧的金属底板上布有销钉型电磁带隙(Electromagnetic Band-Gap, EBG)结构,可以减小各通道间的相互耦合,且无需对上下金属板进行焊接。仿真结果表明,该合成器工作频率为14.7~37.5 GHz,反射系数小于-15 dB,传输系数约为-6.1 dB。测试结果与仿真结果吻合良好。

关键词:脊间隙波导;宽带;径向功率合成器

中图分类号:TN73

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号:1003-3106(2025)11-2250-06

Wideband Radial Power Combiner Based on Ridge Gap Waveguide

WANG Yingdong^{1,2}

(1. The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China;

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

Abstract: A wideband radial power combiner based on Ridge Gap Waveguide (RGW) is designed for high-power combining applications in the wide millimeter-wave frequency band. The combiner consists of two metallic plates, with the center of the lower plate fed by a coaxial line. The energy is reflected by multiple metallic conical structures positioned above the plate, and directed into the radial transmission lines, achieving equal power division. The radial transmission lines employ ridge gap waveguides, which is built up by placing pin-type Electromagnetic Band-Gap (EBG) structures on the metal bottom plates adjacent to the ridge, effectively reducing coupling among adjacent channels without the need for welding the upper and lower plates. Simulation results show that the combiner operates within the frequency range from 14.7 to 37.5 GHz, with a reflection coefficient of less than -15 dB and a transmission coefficient of approximately -6.1 dB. The measurement results show good agreement with the simulation results.

Keywords: RGW; wideband; radial power combiner

0 引言

宽带、高幅相一致性的功率合成器是射频功率合成系统中的关键组件,其性能直接影响系统技术指标。传统的功率合成器常采用平面功分结构^[1-3],譬如采用T型结多级级联,容易带来结构复杂、插入损耗大等问题。而基于径向传输结构的功率合成器结构更为简单^[4-5],尺寸更为紧凑,可以在较宽频带内实现较好性能,适用于毫米波频段的高功率合成应用。

同时,径向功率合成器往往受到所采用传输线带宽的限制,以传统矩形波导为例,其单模工作带宽

通常仅为66%,难以满足更高带宽的需求^[6-11]。例如,文献[9]基于圆波导与矩形波导设计了一款工作于26.5~40 GHz的径向功率合成器。文献[10]基于矩形波导设计了一款径向功率合成器,其工作于2.6~3.95 GHz,相对带宽为41%。文献[11]针对高频应用,基于圆波导与槽间隙波导设计了一款工作于200~260 GHz的径向功率合成器。为了进一步拓展径向功率合成器的工作带宽,采用脊波导作为径向传输线无疑是更为理想的选择。脊波导具备超宽的单模工作带宽和阻抗特性,结合径向功

收稿日期:2025-10-15

分结构有助于在更宽频率范围内实现低损耗的功率分配。此外,在毫米波频段,传统传输线普遍面临一系列问题。例如,微带线由于介质损耗和辐射损耗,导致传输损耗增大,从而降低了系统效率;虽然金属矩形波导和脊波导具有较低的损耗,但通常需要采用分层加工,并通过焊接工艺避免层间电磁能量泄露,不仅增加了加工成本,而且焊接过程中可能引起结构形变,影响性能。间隙波导的出现避免了上述问题,间隙波导最早由瑞典查尔姆斯理工大学的 Kildal 教授等提出^[12-13],其基本结构是在平行金属板的两侧加入高阻抗 EBG 结构,使得电磁能量能够在中心的空心通道中传输。该结构类似于传统金属波导,但由于高阻抗 EBG 的存在,即使上下金属板之间存在缝隙,也不会出现电磁能量泄露。可见,将 RGW 引入到宽带径向功率合成器的设计中可以简化加工工艺并降低插入损耗,提高传输效率^[14-19]。

针对于毫米波频段射频前端宽带功率合成应用场景,本文提出了一种基于 RGW 的宽带径向功率合成器,该合成器的工作频率为 14.7~37.5 GHz,采用一分四结构拓扑,实现了低损耗和简便的装配方式,且无需焊接,能够满足毫米波射频系统对带宽和功率合成的一体化需求。

1 传输线设计

RGW 是一种将传统脊波导与间隙波导相结合的新型传输结构,通常由上下 2 块金属板构成,中间留有空气间隙,脊结构位于下金属板中央。在脊的两侧布置 EBG 结构,以阻止电磁波在金属板之间横向传播,从而实现类似于传统波导的纵向电磁能量传输。EBG 结构的几何参数(如销钉高度、间距、直径等)需要根据工作频率进行优化,以确保在目标频段内形成有效的带隙,防止能量泄露。脊的高度、宽度和倾斜角度影响传输线的单模带宽和特性阻抗,需通过电磁仿真工具进行参数扫描和优化,以满足宽带匹配需求。RGW 的优势在于无需焊接,仅通过上下金属板的机械压合即可实现低损耗传输。

图 1(a) 所示为本文采用的销钉型 EBG 结构,其金属销钉的宽度和长度均为 1 mm,高度为 2.95 mm,排列周期为 2 mm,销钉顶部与其上方金属板之间的间距为 0.05 mm。通过使用全波电磁仿真软件 CST 本征模求解器对其进行仿真,仿真结果显示该结构的色散曲线如图 1(b) 所示。仿真结果表明,该结构的禁带覆盖 12.3~48.8 GHz,意味着在

此频段内没有可以传输的模式,确保了电磁能量的有效隔离。

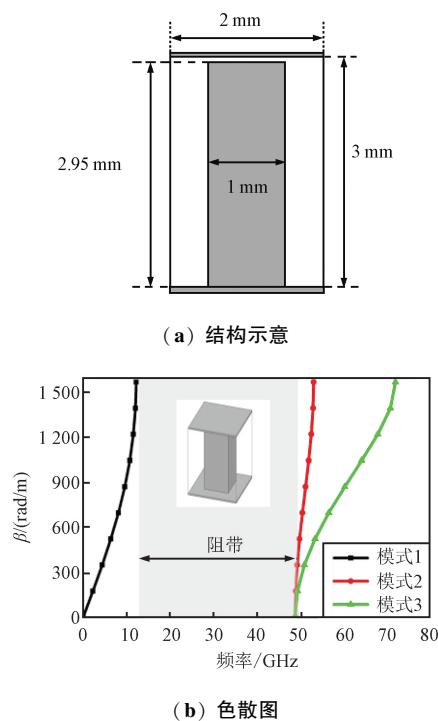
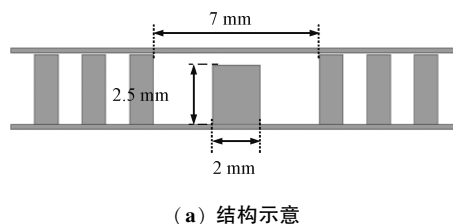


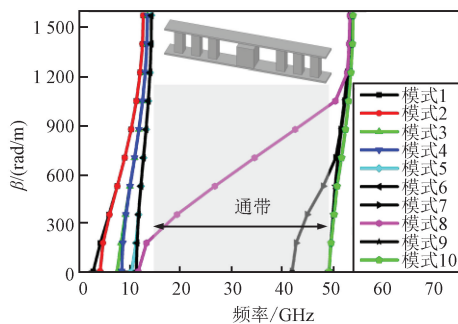
图 1 销钉型 EBG

Fig. 1 Pin-type EBG

基于上述销钉型 EBG 结构和金属脊,构建了全金属结构的 RGW。该波导结构如图 2(a) 所示,波导宽度为 7 mm,高度为 3 mm,金属脊的宽度为 2 mm,高度为 2.5 mm。使用全波电磁仿真软件 CST 本征模求解器对该脊金属波导进行仿真,其色散曲线如图 2(b) 所示。从图中可以看出,该 RGW 的单模工作频率为 14.25~42.05 GHz,覆盖了较宽的频段。为了验证 RGW 的低损耗传输特性,对长度为 100 mm 的脊波导及 RGW 进行传输特性仿真,设置金属材料为铝,表面粗糙度为 1.6 μm 。仿真结果如图 3 所示,从图中可以看出 RGW 损耗约为 0.4 dB,与传统金属脊波导相当,表明 RGW 具有良好的传输性能,并且能够有效减少电磁能量的泄露和损耗。



(a) 结构示意图



(b) 色散图

图2 RGW 传输线

Fig. 2 RGW transmission line

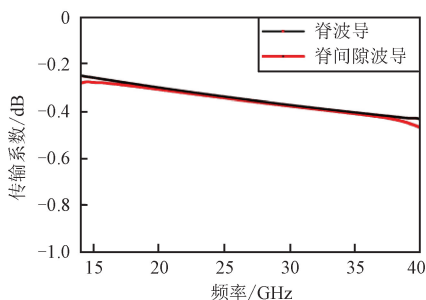


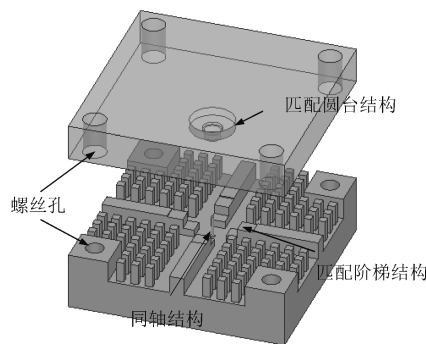
图3 100 mm 脊波导及 RGW 传输系数仿真结果

Fig. 3 Simulation results of transmission coefficients for 100 mm ridge waveguide and RGW

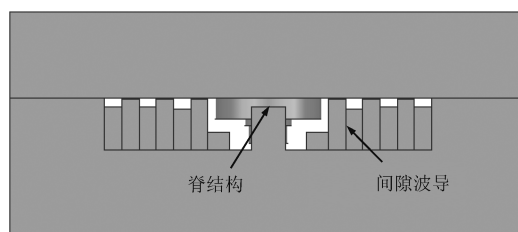
2 宽带径向功率合成器设计

径向功率合成器是一种基于径向波导结构的多端口功率合成器件,其核心原理是通过中心馈电结构将输入电磁能量均匀地分配到多个径向传输线中,从而实现功率的等幅同相合成或分配。该结构具有良好的对称性和宽带特性,适用于毫米波及高频段通信、雷达、功率放大器等系统。与传统的 T 形或 Y 形功分/合成结构相比,径向波导结构能够支持更宽的工作带宽,并具有良好的对称性和场分布均匀性,适合于毫米波频段的高功率合成应用。基于上述 RGW 传输线和径向功率拓扑结构,形成了宽带径向功率合成器,其结构如图 4 所示。该合成器由上下 2 层金属板组成,拓扑结构上包括同轴传输线、4 路 RGW 和匹配结构。其中,下层金属板中心为同轴传输线,射频信号从该端口输入后,进入上下 2 层金属板间的空间,经过上层金属板中央的多阶金属圆台反射,最终将电磁能量传输至 4 路 RGW 传输线。为了进一步改善阻抗匹配特性, RGW 末端设计有两级金属台阶。多阶金属圆台是改善阻抗匹配特性的关键,为了平衡带宽性能和加

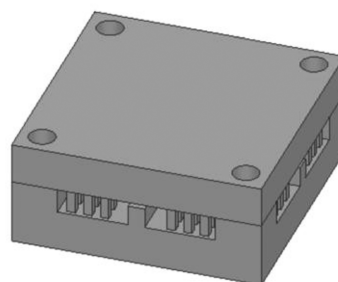
工复杂度,多阶金属圆台在本设计中采用了三阶金属台阶结构。



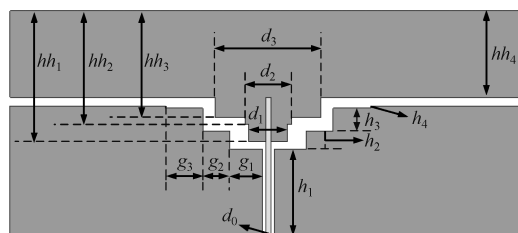
(a) 爆炸视图



(b) 侧视图



(c) 三维视图



(d) 切平面截面

图4 径向功率合成器结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of radial power combiner structure

图 5 进一步展示了宽带径向功率合成器结构的工作原理,电磁波从同轴端口输入后,经多阶金属圆台反射,分别进入 4 路 RGW,并通过多段脊波导的阻抗变换实现宽带匹配。其设计思路类似于传统波

导功分器,即总端口为同轴传输线端口,特性阻抗为 Z_0 ,通常选为 $50\ \Omega$,输出脊波导端口特性阻抗为 Z_0' ,4个脊波导分支为并联工作,利用特性阻抗分别为 Z_{01} 、 Z_{02} 、 Z_{03} 的三段脊波导实现阻抗变换作用。利用电磁仿真软件可以方便计算输出脊波导端口的特性阻抗,在本设计中工作频率为 $30\ \text{GHz}$ 时其为 $54\ \Omega$,其余参数通过优化后确定,具体尺寸如表 1 所示。

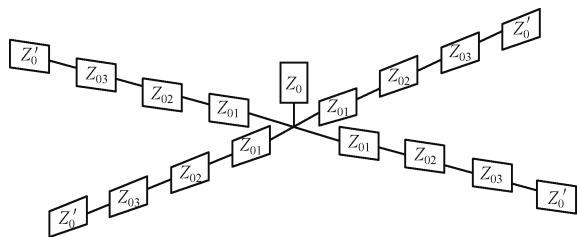


图 5 径向功率合成器原理

Fig. 5 Schematic diagram of radial power combiner

表 1 径向功率合成器结构尺寸

Tab. 1 Structural dimensions of radial power combiner

单位:mm

参数	数值	参数	数值	参数	数值
d_0	0.3	h_2	1.04	hh_3	6.19
d_1	2.24	h_3	1.32	hh_4	5
d_2	2.7	h_4	0.14	g_1	1.87
d_3	6.13	hh_1	7.59	g_2	1.57
h_1	5	hh_2	6.56	g_3	2.17

通过 HFSS 对径向功率合成器进行全波仿真。图 6 展示了功率合成器同轴线端口反射系数的仿真结果。仿真数据显示,该合成器在 $14.7\sim 37.5\ \text{GHz}$ 具有良好的阻抗匹配特性,反射系数优于 $-15\ \text{dB}$,满足高性能功率合成器对宽频带匹配的基本要求,表明其具备较宽的工作带宽和较高的功率传输效率。此外,仿真中未考虑加工误差、材料损耗及表面粗糙度等实际因素。

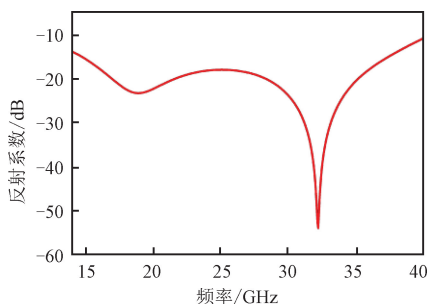
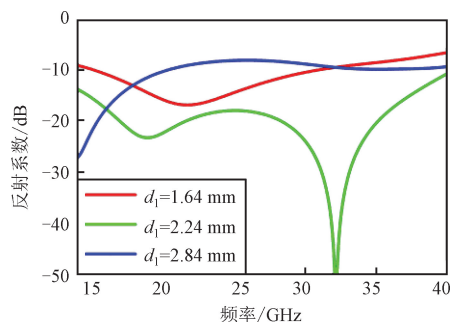


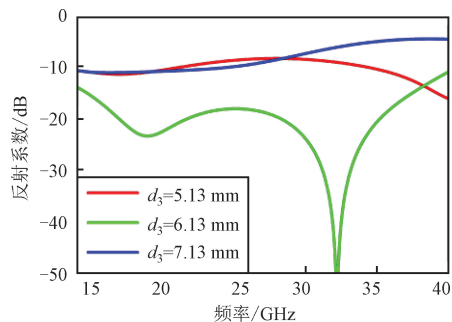
图 6 反射系数仿真结果

Fig. 6 Simulation results of reflection coefficient

金属圆台作为功率合成器中关键的反射与过渡结构,其直径决定了电磁波在径向方向上的传播路径与模式转换特性。直径过大可能导致局部阻抗突变,引起反射增强;而直径过小则可能影响能量的均匀分布,降低合成效率。因此,合理设计金属圆台的直径与阶数,能够实现多段渐进式阻抗变换,有效提升宽带匹配性能。图 7 给出了金属圆台结构参数 d_1 和 d_3 对反射系数的影响,随着直径偏离优化值,反射系数显著升高,表明该参数对阻抗匹配性能具有高度敏感性。



(a) d_1 变化



(b) d_3 变化

图 7 反射系数随结构参数变化情况

Fig. 7 Variation of reflection coefficient with structural parameters

传输系数的幅度一致性与相位平衡性是衡量功率合成器性能的重要指标。图 8 展示了从同轴线端口到 4 个 RGW 输出端口之间的传输系数幅度响应及其相位不平衡度的仿真结果。仿真结果表明,在 $14.7\sim 37.5\ \text{GHz}$ 工作频带内,各输出端口的传输系数幅值保持在约 $-6.1\ \text{dB}$,相位不平衡度优于 $\pm 0.15^\circ$,显示出该功率合成器在宽带范围内具有优异的幅相一致性。各输出端口的传输系数曲线高度重合,表明合成器在宽频带内实现了良好的功率等分特性;4 个输出端口间的最大相位差小于 0.15° ,说明该结构具有高度对称性和良好的电磁场分布均匀性。这一特性对于多通道通信系统、相控阵雷达和高精度功率合成应用具有重要意义。

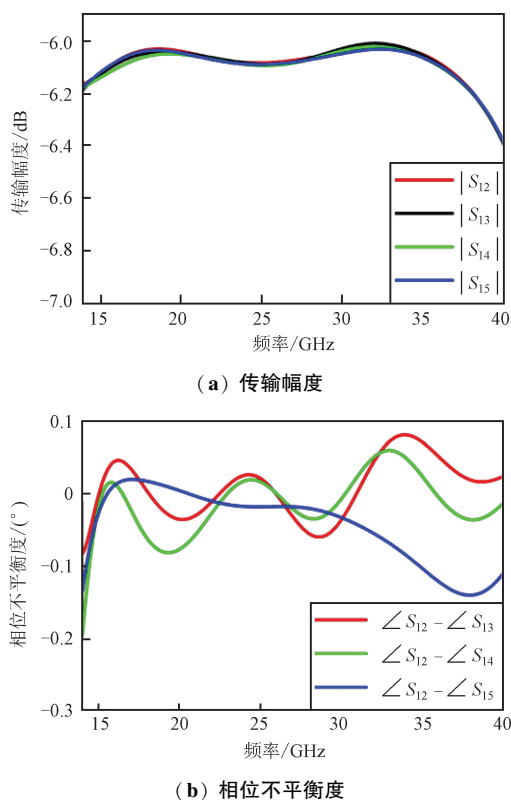


图 8 宽带径向功率合成器仿真结果
Fig. 8 Simulation results of wideband radial power combiner

为满足毫米波频段高性能传输的需求,宽带径向功率合成器的材料与表面处理工艺对电性能具有重要影响。结构主体选用铝材料,不仅具备良好的机械强度和加工性能,还能在兼顾轻量化的同时满足高频器件对结构稳定性的要求。此外,考虑到高频下趋肤效应的影响,内导体表面镀银处理能够显著降低导体损耗,提升传输效率。合成器实物如图 9 右侧所示,图中所示合成器采用防锈铝材料精密加工而成,内导体表面经过镀银处理,以提升导电性能并降低高频插入损耗。

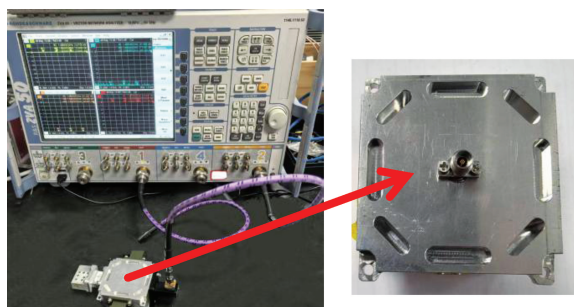


图 9 宽带径向功率合成器测试环境及实物
Fig. 9 Test environment and prototype of wideband radial power combiner

采用矢量网络分析仪对实物进行测试,图 10 给出了宽带径向功率合成器测试结果及仿真结果的比较。经实测,14.7~37.5 GHz 工作频带内总端口反射系数小于 -11 dB,到各端口的传输系数约为 (-6.4 ± 0.3) dB。与仿真结果对比可以看出,反射系数实测和仿真有些许差别,主要受加工误差影响以及测试时采用的脊波导—同轴转换影响。传输系数的实测值略高于仿真结果 $(-6.4$ dB vs. -6.1 dB),主要归因于测试过程中连接器的插入损耗以及器件表面粗糙度引起的额外衰减。此外,各端口传输系数的波动控制在 ± 0.3 dB 以内,说明合成器在宽频带内保持了良好的幅值一致性,有利于满足多通道系统中对功率均衡分配的高要求。

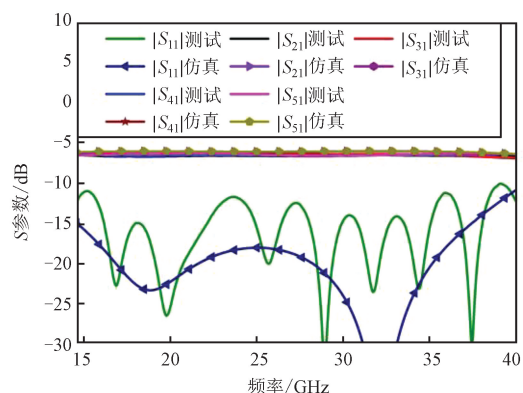


图 10 宽带径向功率合成器测试及仿真结果
Fig. 10 Measured and simulated results of wideband radial power combiner

3 结束语

本文提出了一种基于 RGW 的宽带径向功率合成器结构,采用 2 层金属板与三阶金属圆台相结合的设计方案。该合成器在 14.7~37.5 GHz 频段内表现出良好的宽带性能。通过引入 RGW 结构,有效解决了传统金属脊波导在加工中面临的焊接复杂、结构易变形等问题,显著简化了制造工艺,降低了生产成本。该功率合成器不仅在毫米波频段射频系统中展现出高效、稳定的性能,同时具备良好的可制造性和工程应用潜力,具有广阔的应用前景。

参考文献

[1] 何建平. 基于切比雪夫变换的超宽带功分器设计[J]. 雷达科学与技术, 2019, 17(5): 575-578.

- [2] ZHAO Y X, WANG E L, HE D D, et al. Design of Wide-band Dual-circularly Polarized Endfire Antenna Array on Gap Waveguide [C] // 2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Krakow: IEEE, 2019: 1-3.
- [3] JIANG K, ZHOU J W, SUN B, et al. Design of A Compact Planar Eight-way Hybrid Power Divider with Ultra-wide Bandwidth [C] // 2021 13th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). Zhuhai: IEEE, 2021: 1-3.
- [4] HARO-BAEZ R V, MASA-CAMPOS J L, CRUZ J A R, et al. Development of Radial Waveguide Dividers with Large Number of Ports [C] // 2015 Asia-Pacific Conference on Computer Aided System Engineering. Quito: IEEE, 2015: 58-62.
- [5] 杨作成, 任文成, 吴丹, 等. 一种 C 波段宽带高功率径向波导合路器 [C] // 2024 年全国微波毫米波会议 (中国微波年会). 北京: [出版者不详], 2024: 284-286.
- [6] FAHMIM M, RUAIZ-CRUZ J A, MANSOUR R R. Design of Ridge Waveguide Radial Combiners [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology, 2021, 70(1): 895-906.
- [7] 刘涓, 吕善伟. 一种实现宽频带功分器的新方法 [J]. 电子学报, 2004, 32(9): 1527-1529.
- [8] 杨迎, 谢小强. 基于脊波导输出的 6-18GHz 径向功率合成器 [C] // 2017 年全国微波毫米波会议. 杭州: [出版者不详], 2017: 973-976.
- [9] PARK S, KANG B, JEONG J. A Broadband Radial Power Combiner Using a Dipole Antenna-based TM Mode Transducer [J]. IEEE Access, 2022, 10: 111901-111908.
- [10] ALI M M M, SIFAT S M, ELSAADANY M, et al. Innovative Development Approach for a High-power 8-way Coaxial Radial Combiner [C] // 2024 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium-IMS 2024. Washington D. C.: IEEE, 2024: 788-791.
- [11] ZHANG B, ZHANG Y, DANG Z, et al. A Compact and High-efficiency 220-GHz Power Amplifier Module Based on TE₁₁-Mode Radial Power Combiner [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2024, 72(5): 3118-3129.
- [12] KILDAL P S, ALFONSO E, VALERO-NOGUEIRA A, et al. Local Metamaterial-based Waveguides in Gaps between Parallel Metal Plates [J]. IEEE Antennas Wireless Propagation Letters, 2008, 8: 84-87.
- [13] KILDAL P S, RAJO-IGLESIAS E, ALFONSO E, et al. Wideband, Low-loss, Quasi-TEM Metamaterial-based Local Waveguides in Air Gaps between Parallel Metal Plates [C] // 2009 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications. Turin: IEEE, 2009: 588-591.
- [14] KILDAL P S, ZAMAN A U, RAJO-IGLESIAS E, et al. Design and Experimental Verification of Ridge Gap Waveguide in Bed of Nails for Parallel-plate Mode Suppression [J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2011, 5(3): 262-270.
- [15] 叶龙芳, 王正一, 陈仲凯, 等. 人工表面等离激元波导及天线若干进展 [J]. 无线电工程, 2022, 52(2): 200-208.
- [16] 孙海. 变形对双侧鳍线传输特性影响的数值计算 [J]. 无线电工程, 2022, 52(6): 1044-1049.
- [17] ZHANG T L, TANG R, CHEN L, et al. Ultra-wideband Full-metal Planar Array Antenna with a Combination of Ridge Gap Waveguide and E-plane Groove Gap Waveguide [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(9): 8051-8058.
- [18] 安进朝, 张松轶, 康志杰. 一种高效率波导缝隙阵列天线设计 [J]. 无线电工程, 2023, 53(3): 721-726.
- [19] 刘桂凤, 杜彪, 何应然. 基于超表面的超宽带低剖面双极化天线 [J]. 无线电工程, 2022, 52(2): 268-273.

作者简介

王迎栋 男, (1981—), 硕士, 高级工程师。