

面向通感一体化应用的多通带大频比微波/毫米波传输线、天线与无源元件

雷博杰^{1,2,3,4}, 李津^{1,2,3,4*}, 陈思丞^{2,3,5}, 严淑尧^{1,2,3,4}, 袁涛^{1,2,3,4*}

- 深圳大学 电子与信息工程学院 广东省移动终端微波毫米波天线工程技术研究中心, 广东 深圳 518060;
- 粤港大数据图像和通信应用联合实验室, 广东 深圳 518048;
- 毫米波全国重点实验室, 江苏 南京 210096;
- 射频异质异构集成全国重点实验室(深圳大学), 广东 深圳 518060;
- 香港城市大学 电机工程系 太赫兹及毫米波国家重点实验室)

摘要: 介绍了通感一体化(Integrated sensing and communication, ISAC)的基本概念、原理和发展现状, 综述了现阶段适用于 ISAC 应用场景的多通带大频比微波/毫米波传输线、天线和无源元件(主要包括滤波器和耦合器), 对比分析了这些多通带大频比结构的不同实现方式和制造工艺, 总结了不同设计方案的技术特征、射频性能及优缺点, 本综述为进一步研究面向 ISAC 应用的高性能微波/毫米波前端组件提供了丰富多样的参考。

关键词: 天线; 滤波器; 通感一体化; 大频率比; 微波/毫米波无源元件; 传输线

中图分类号: TN61; TN713; TN82

文献标识码: A

Microwave/millimeter-wave multiband transmission lines, antennas, and passive components with large frequency ratios for integrated sensing and communication applications

LEI Bo-Jie^{1,2,3,4}, LI Jin^{1,2,3,4*}, CHEN Si-Cheng^{2,3,5}, YAN Shu-Yao^{1,2,3,4}, YUAN Tao^{1,2,3,4*}

- Guangdong Provincial Mobile Terminal Microwave and Millimeter-Wave Antenna Engineering Research Center, College of Electronics and Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;
- Guangdong-Hong Kong Joint Laboratory for Big Data Imaging and Communication, Shenzhen, Guangdong 518048, China;
- State Key Laboratory of Millimeter Waves, Nanjing, Jiangsu 210096, China;
- State Key Laboratory of Radio Frequency Heterogeneous Integration (Shenzhen University), Shenzhen, Guangdong 518060, China;
- State Key Laboratory of Terahertz and Millimeter Waves, Department of Electrical Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong)

Abstract: The fundamental concepts, operating principles, and recent advancements in integrated sensing and communication (ISAC) are presented. A comprehensive review of multiband and large-frequency-ratio microwave/millimeter-wave transmission lines, antennas, and passive components—primarily filters and couplers—that are currently suitable

收稿日期: 2025-04-29, Received date: 2025-04-29,

基金项目: 国家重点研发计划项目课题(2023YFB4403804, 2021YFA0715301); 毫米波全国重点实验室开放课题(K202422); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2022B1515130011); 深圳市科技计划项目(CJGJZD20220517142404011); 物联网标准与应用工业和信息化部重点实验室开放课题(202310)

Foundation items: National Key Research and Development Program, China (2023YFB4403804, 2021YFA0715301); State Key Laboratory of Millimeter Waves, China (K202422); Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation, China (2022B1515130011); Shenzhen Science and Technology Program, China (CJGJZD20220517142404011); IoT Standards and Application Key Laboratory of the Ministry of Industry and Information Technology, China (202310)

作者简介(Biography): 雷博杰(2001-), 男, 贵州贵阳人, 硕士研究生, 主要研究领域为新型微波无源器件设计与制造技术。E-mail: 2410044001@mails.szu.edu.cn

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: jinli.cie@szu.edu.cn, yuantao@szu.edu.cn

for ISAC application scenarios is provided. Various implementation strategies and fabrication techniques for these multi-band and high-frequency-ratio structures are comparatively analyzed. The technical characteristics, RF performance, and respective advantages and limitations of different design approaches are systematically summarized. This review offers a diverse and in-depth reference for the continued development of high-performance microwave/millimeter-wave front-end components tailored for ISAC applications.

Key words: antennas, filters, integrated sensing and communication, large frequency ratio, microwave/millimeter-wave passive components, transmission lines

PACS:

引言

随着现代通信网络的逐步发展和迭代,无线传感、物联网、人工智能和大数据等技术不断革新并深度融合,催生出了无人驾驶、全息通信和数字孪生等一系列新业务,这些应用场景不仅需要高速、高质量的无线通信连接和高精确度的传感定位系统,也需要大量的通信设备作为支撑^[1],这无疑对网络和硬件资源提出了巨大挑战。例如,在无人驾驶应用场景中,无人驾驶汽车需要从网络中获取包括高精度地图和实时信息等大量数据来帮助分析复杂的交通情况^[2],并且车载传感雷达也需具备高分辨率以帮助车辆识别障碍从而进行规避^[3]。这些通信和传感系统的基本组成电路往往是独立设计的,且工作在两个不同的频带,这些电路的传统设计方案频率比低,难以同时实现广域信号覆盖和高速率传输、高精度传感,无法满足新兴应用场景对设备性能和集成度的需求^[4]。

通感一体化(Integrated sensing and communication, ISAC)作为一种新兴技术,其目标是在一个集成系统内同时实现通信与传感功能,提升系统频谱效率、硬件效率以及信息处理效率,以达到缓解频谱资源紧张及提高硬件集成度的目的^{[5]-[10]}。目前,ISAC的实现方式可分为两大类:一类是利用单频电路,在同一频段内通过信号处理算法实现通信和传感功能的一体化;另一类是利用特殊设计的多频电路,在不同频段内分别实现通信和传感功能。

第一类实现方式意味着需要通过特定的信号调制、波形优化及信号处理算法将通信信号和传感信号调制到同一载波上,使他们能够在同一频段共存,并相应地在接收端进行解码来实现两种信号的分离。这一类实现方式的早期研究是将雷达用于通信^[11]。研究发现,雷达不仅可以用于目标检测,其发出的脉冲波也能够传递信息,并在有源相控阵雷达上实现了通信功能。随着研究的深入,联合通

信雷达引起了学术界的关注^[12],成为了ISAC领域较长一段时间的研究主题。后来,多输入多输出技术为ISAC的实现提供了一种新思路^[13]。如今,正交频分复用技术是一种被广泛提及的实现方式,它是一种多载波调制技术,通过将高速数据流分割为多个低速子载波并行传输,能够有效提升频谱利用率和抗干扰能力。基于正交频分复用技术的系统分别在4 GHz^[14]和28 GHz^{[15],[16]}的载波频率上同时实现了通信与传感功能。此外,传统的Wi-Fi只具备数据传输功能,而近期出现的利用Wi-Fi来进行无线定位的算法^{[17],[18]}也为ISAC的实现提供了新思路。这种基于算法的ISAC的优势在于实现了频谱资源的高效利用,减少了硬件成本,但其算法较为复杂,对系统的信号处理能力提出了较高要求。

第二类实现方式通过合理划分频段,将通信和传感功能分别部署在不同的频段上,利用单个多频电路实现对不同频段信号的共同传输和分别处理,在提高了系统集成度的同时让两个频段的信号保留了一定的独立性。在该方式下,多频电路及其组件的频率比是十分关键的性能指标。近年来,随着频谱资源被不断开发,高速5G通信和高精度传感功能的频谱部署从微波频段逐渐拓展至毫米波频段,其中,应用最为广泛的sub-6-GHz频段和28-GHz频段之间的频率比已超过1:4.5,这意味着适用于ISAC的多频电路需要具备大频率比的技术特征。“频率比”是指多频电路不同频带的中心频率之比,而“大频比”则意味着不同频带间具有较大的频率跨度。在ISAC系统中,“大频比”不仅是一种频谱覆盖特征,更是一种支撑异构感知与通信功能融合的关键能力。首先,“大频比”设计让系统支持跨场景、多目标通感融合,例如,在sub-6-GHz低频频段适合非视距通信、广覆盖感知等应用,而在毫米波/太赫兹高频频段则适用于高精度成像、微动作识别、毫米级定位等;第二,“大频比”设计可使系统多频协同,增强系统在复杂环境下的稳健性;第三,“大频比”配置下系统支持通感功能的解耦与耦合

切换,频谱灵活性强。

传统的微波/毫米波电路多采用基模和相邻的若干个高次模(含简并模)实现多通带频率响应。这些电路往往仅具备一条信号传输路径^{[19]~[22]},且不同工作频段间的频率比低,不同工作模式易相互影响制约电路的射频性能,不符合 ISAC 的应用需求。为了满足多频响应、大频率比等技术特征和性能需求,如表 1 所示,面向 ISAC 应用的微波/毫米波电路需要采取截然不同的多频/多模设计方案。图 1 展示了 ISAC 系统的部分潜在应用场景、多通道射频前端架构及其对射频性能的宏观需求。可见,这样的系统要求电路中的传输线、滤波器、放大器、开关、天线等均具备多频、大频比等关键属性。近年来,模式复合、结构共享、结构复用、缝隙耦合等多种多通带大频比微波/毫米波传输线、天线和无源元件的设计方案被广泛报道,为面向 ISAC 应用的高性能微波/毫米波前端组件提供了丰富多样的参考。这些方案结合多种传输线架构、多种电磁模式、多种制造工艺,让不同频段、不同模式的电磁波传输在同一电路的不同路径或结构中,共享或复用不同的电磁结构,满足 ISAC 电路功能一体化、结构高度集成的需求。本文将这些方案分为传输线、天线和无源元件三类,在以下章节分别进行了详细介绍,并对其技术特征和射频性能进行了全面的分析和对比。

1 大频比微波/毫米波传输线

当前,大频比微波/毫米波传输线可分为结构复用和结构共享两种设计方案,其中,结构复用方案通过挖掘两种不同传输线的结构共性,构造复用的传输线结构,使其同时作为这两种传输线的组成部分,从而得到具备双通带、大频比及高集成度特征的新型传输线,结构共享基于不同类型的传输线的

电磁模式分布规律,在不显著影响射频性能的前提下,实现两种相对独立的传输线的结构(或传输路径)交叠。大频比微波/毫米波传输线的代表性案例如图 2 所示。

文献[23]和[24]中的基于结构复用方案的模式复合波导分别集成了基片集成同轴线(Substrate integrated coaxial line, SICL)和基片集成波导(Substrate integrated waveguide, SIW),以及准共面波导(Quasi-coplanar waveguide, QCPW)和 SIW,构造出的两种新型模式复合波导分别工作在 7.5 - 10.5 GHz/25 - 39 GHz 以及 dc - 5.2 GHz/25 - 40 GHz,其通带中心频率(f_0)比分别达到了 1:3.56 和 1:12.5。文献[25]在文献[23]的基础上,进一步优化了传输线结构,提出了半模复合波导,实现了 4.4 - 11.2 GHz/18.6 - 32.6 GHz 的双通带响应,并显著减小了传输线占据的面积。

基于人工表面等离激元(Spoof surface plasmon polariton, SSPP)的结构复用微波传输线在文献[26]和[27]中进行了报道。文献[26]中的传输线由微带 SSPP 结构和半模基片集成波导(Half-mode SIW, HMSIW)组成,在 3 - 6-GHz 和 24 - 30-GHz 频段实现了双通带传输性能,两个通带的中心频率比达到了 1:6。文献[27]中的传输线集成了 SICL SSPP 结构和 SIW,实现了 dc - 30 GHz/42 - 60 GHz 的双通带宽带性能。

文献[28]提出的新型带隙波导采用结构共享的方案实现。该带隙波导将槽隙波导(Groove gap waveguide, GGW)内嵌于矩形波导中,利用 GGW 的电磁带隙(Electromagnetic bandgap, EBG)结构的色散特性,将矩形波导的通带设置在 EBG 结构的通带范围内,并将 GGW 的通带设置在 EBG 结构的阻带范围内,使矩形波导工作在低频段,GGW 工作在高频段,从而使带隙波导的两条传输路径相互隔离,

表 1 面向 ISAC 应用的微波/毫米波电路及其组件的共性技术特征和性能需求

Table 1 Common technical features and performance requirement of microwave/millimeter-wave circuits and their components for ISAC applications

序号	技术特征和性能需求	特征和需求的解释
1	多频段协同	满足通信和感知的多功能应用需求
2	覆盖微波、毫米波段	通信和感知应用的主流频段为 sub-6-GHz 和毫米波频段,取决于频谱分配和市场需求,决定了工作频段的大跨度特性
3	大频率比	
4	高带外抑制度	抑制通信和传感信号间的串扰和带外噪声的干扰
5	小体积、轻质量	适应高集成度、轻量化和多样化的应用场景
6	高可靠性	满足复杂应用场景(如车载、无人机)的需求

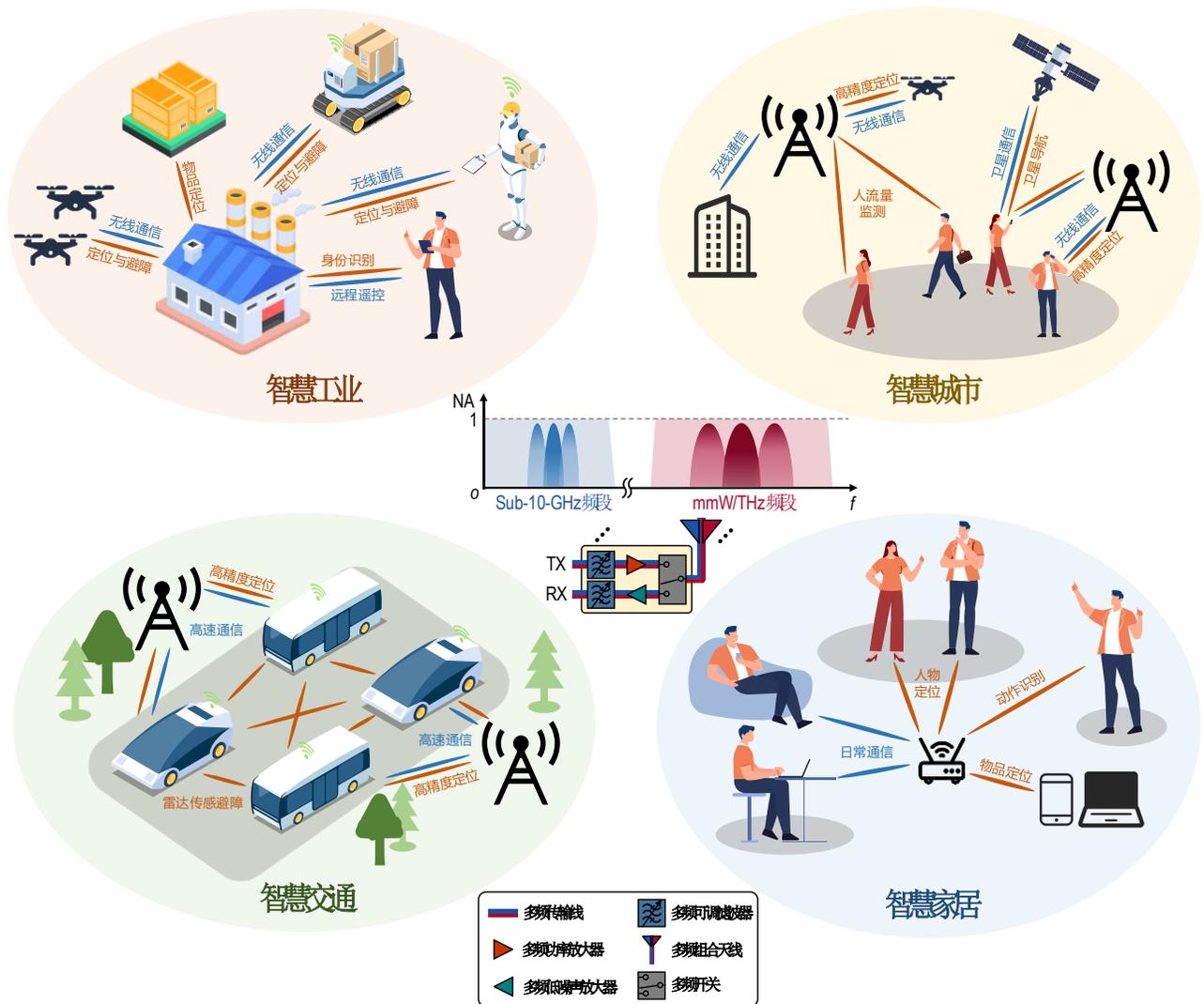


图1 ISAC系统的概念图;应用场景、多通道射频前端架构及其对射频性能的需求;中央位置的插图展示了所述多通道射频前端的其中一个通道及其部署在sub-10-GHz频段和毫米波/太赫兹频段的宽带/窄带(可调)幅频响应(NA:归一化幅度)

Fig. 1 A conceptual diagram of the ISAC systems: Application scenarios, the multi-channel RF front-end architecture, and its RF-performance requirement, where the central inset illustrates one of the RF front-end channels, showing its broadband/narrow-band (tunable) amplitude-frequency responses deployed in the sub-10-GHz and millimeter-wave/terahertz bands (NA: normalized amplitude)

实现大频比的双通带传输性能。实验表明,该带隙波导能够实现6.9 - 8 GHz的低频通带以及71 - 86 GHz的高频通带,频率比高达1:10.5。

上述大频比微波/毫米波传输线的技术特征和主要射频性能在表2中进行了总结和对比。这些双通带传输线在低频和高频通带均具备宽带性能,中心频率比实现了1:3至1:12.5的范围。基于结构复用方案的双通带传输线采用(准)平面传输线架构和印制电路板(Printed circuit board, PCB)工艺实现,可以实现TEM模、准TEM模、SP模和TE模两两之间的组合传输。特别地,SIW因其结构独特性成为结构复用方案的主要选择。为了馈电至不同频

带的传输线,往往需要巧妙地设计射频端口的过渡结构,从而实现传输线之间不同电磁模式的宽带、低损耗转换。基于结构共享方案的带隙波导采用计算机数控(Computer numerically controlled, CNC)铣工艺制作的金属波导实现。金属波导以 TE_{10} 模传输,这意味着全金属波导结构的大频比传输线在两个频段的结构尺寸将存在较大差异。采用PCB(准)平面传输线有助于集成和实现低剖面、小体积,覆盖的传输模式类型较多,但其射频性能不及金属腔体结构,尤其是在高频通带存在较大的插入损耗。因此,减小射频损耗,更好地平衡两个通带的传输性能,并兼顾小尺寸、高集成度的设计需求是大频

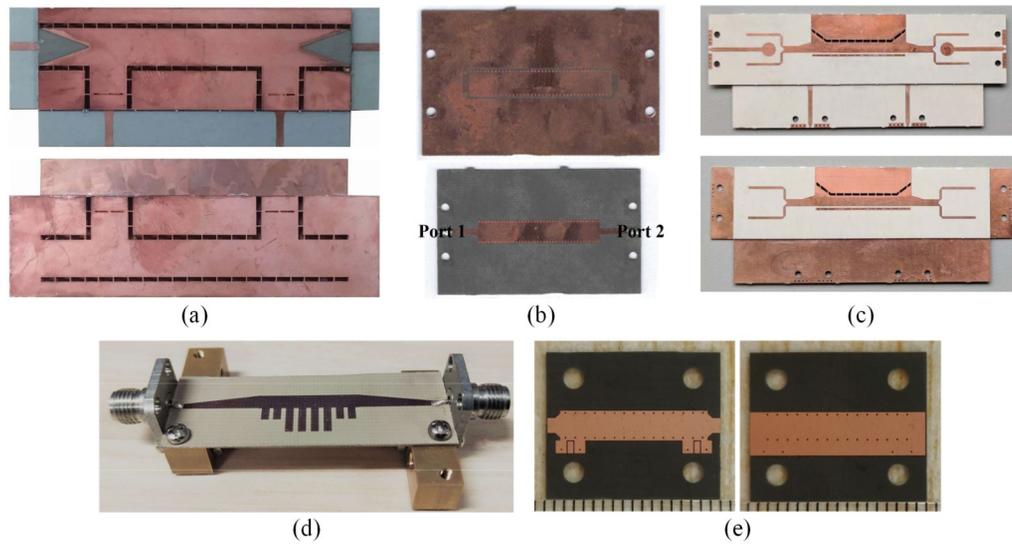


图2 双通带大频比微波/毫米波传输线的代表性案例:(a)模式复合波导^[23];(b)模式复合CPW^[24];(c)半模复合波导^[25];(d)基于微带SSPP结构和HMSIW的模式复合传输线^[26];(e)基于SICL SSPP结构和SIW的模式复合传输线^[27]

Fig. 2 Representative demonstrations of dual-band large-frequency-ratio microwave/millimeter-wave transmission lines: (a) The mode composite waveguide^[23]; (b) The mode composite CPW^[24]; (c) The half-mode composite waveguide^[25]; (d) The mode composite transmission line based on microstrip SSPP and HMSIW^[26]; (e) The mode composite transmission line based on SICL SSPP and SIW^[27]

比微波/毫米波传输线的重要研究方向之一,也是其它多通带大频比微波/毫米波电路的设计基础。

2 大频比微波/毫米波天线

2.1 基于结构复用方案的大频比天线

首先,大频比天线可以采用结构复用方案,基于结构复用的新型传输线实现。文献[29]中利用双SIW构成夹层式新型槽线,实现了SIW和槽线两种传输线架构的结构复用,并分别设计了基于新型槽线的Vivaldi天线和SIW缝隙阵列天线,实现了3 - 19.5 GHz/27.08 - 28.99 GHz的双频带辐射性能,如图3(a)所示。该天线低频和高频频带的峰值增益分别为10 dBi和15.85 dBi,频率比为1:2.49。文献[30]中基于模式复合CPW^[24]的共口径天线将

贴片天线和SIW缝隙阵列天线组合,能够实现中心频率3.5 GHz/28 GHz、频率比1:8的大频比双频带辐射性能,该天线在低频和高频频带的峰值增益分别为2.1 dBi和8.8 dBi。文献[31]中的漏波天线将微带的导带替换为SIW,形成模式复合微带,同样实现了贴片天线与SIW缝隙阵列天线的组合,如图3(b)所示。该天线采用双层PCB工艺,实现了5.8 - 8.5 GHz/35 - 41.5 GHz、频率比1:5.3的双频带辐射性能。

2.2 基于结构共享方案的大频比天线

大频比天线也可以基于结构共享方案设计。该方案通过分析不同频段的辐射单元的电磁场分布,对其进行合理设计和部署,使不同频段的

表2 双通带大频比微波/毫米波传输线技术对比

Table 2 Technical comparison of dual-band large-frequency-ratio microwave/millimeter-wave transmission lines

参考文献	设计方案	低频带结构 [模式]	高频带结构 [模式]	f_0 (GHz)	频率比	IL(dB)	制造工艺
[23]		SICL [TEM]	SIW [TE ₁₀]	9 & 32	1:3.56	<2.5 & <5	三层PCB
[25]				7.8 & 25.6	1:3.28	<2.3 & <2.6	三层PCB
[24]	结构复用	QCPW [准TEM]	SIW [TE ₁₀]	2.6 & 32.5	1:12.5	<1 & <6	单层PCB
[26]		微带(SSPP) [SP]	HMSIW [TE _{0.5,0}]	4.5 & 27	1:6	<0.5 & <2	单层PCB
[27]		SICL(SSPP) [准TEM]	SIW [TE ₁₀]	15 & 51	1:3.4	<2.2 & <2.8	双层PCB
[28]	结构共享	矩形波导 [TE ₁₀]	GGW [类TE ₁₀]	7.45 & 78.5	1:10.5	<0.67 & <0.8	金属CNC

*IL:插入损耗

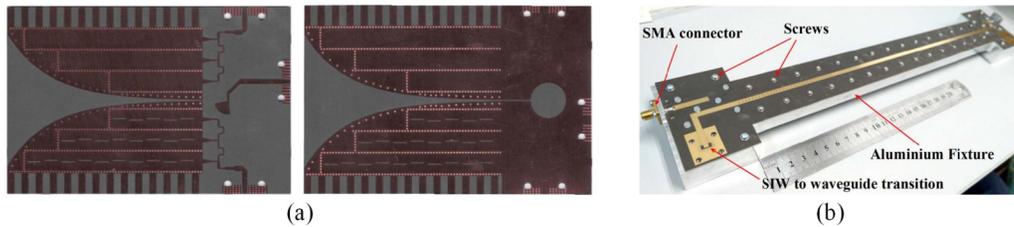


图3 基于结构复用方案的双频带大频比微波/毫米波天线的代表性案例:(a)基于模式复合夹层槽线的组合天线^[29];(b)基于模式复合微带的漏波天线^[31]

Fig. 3 Representative demonstrations of dual-band large-frequency-ratio microwave/millimeter-wave antennas based on structure reuse schemes: (a) The composite antenna based on mode-composite sandwiched slot line^[29]; (b) The leaky-wave antenna based on mode composite microstrip^[31]

天线结构或辐射区域共享,且其辐射性能互不影响,从而有效提高天线整体的空间利用率和集成度。

一种基于加载 SIW 腔体的大频比磁电偶极子天线^[32]如图 4(a)所示。该天线利用加载 SIW 腔体和其中的子腔体构造出了两条工作在不同频段的信号传输路径,该天线采用 PCB 工艺制成,实现了 10.3 - 11.7 GHz/31.9 - 38.1 GHz 的双频带辐射性能,频率比达 1:3.2,对应频段的峰值增益为 6.8 dBi 和 11.1 dBi。文献[33]中提出的双频天线用 Y 形设置的两条 SIW 和一条微带馈线,构成了低频段的偶极子天线和高频段的 SIW 缝隙阵列天线,且仅用单层 PCB 就实现了这两种天线的集成。该天线实现了 3.02 - 5.03 GHz/27.3 - 28.8 GHz、带内峰值增益 2.55 dBi/9.6 dBi、频率比 1:8 的双频辐射。

介质谐振器天线(DRA)也可以实现大频比辐射性能。文献[34]中的天线通过挖空部分介质,将介质的空心部分和未挖空部分分别设计为空心 DRA 和 Fabry - Péroet 谐振腔天线,实现了频率比高

达 1:10 的双频带辐射性能。实验表明,该天线在 2.31 - 3.15 GHz 和 23.82 - 24.96 GHz 两个频带分别实现了 6.81 dBi 和 18.2 dBi 的峰值增益。一种将高频圆柱形 DRA 置于低频矩形 DRA 之间实现空间共享的大频比天线^[35]如图 4(b)所示,两种 DRA 分别工作在 4.3 - 5.85 GHz 和 24 - 29.8 GHz,频率比超过 1:5.7,对应频段的峰值增益分别为 6.6 dBi 和 12 dBi。

一种基于背靠背结构的大频比双频天线^[36]如图 4(c)所示。该天线利用两块折叠平行板构造了谐振腔天线,实现了 2.35 - 2.59 GHz 的低频辐射,而平行板背面折叠构成的 Fabry - Péroet 谐振腔天线能够工作在 23.91 - 24.42 GHz,天线在这两个频带内的峰值增益分别为 7.23 dBi 和 11.26 dBi。该团队还用结构共享方案在介质谐振器中构造了 Fabry - Péroet 谐振腔,研制了工作在 2.20 - 3.24 GHz 和 23.23 - 27.32 GHz 的大频比双频天线^[37],如图 4(d)所示,其中,Fabry - Péroet 谐振腔通过对介质挖空部分的表面选择性金属化(粘贴铜箔)实现。

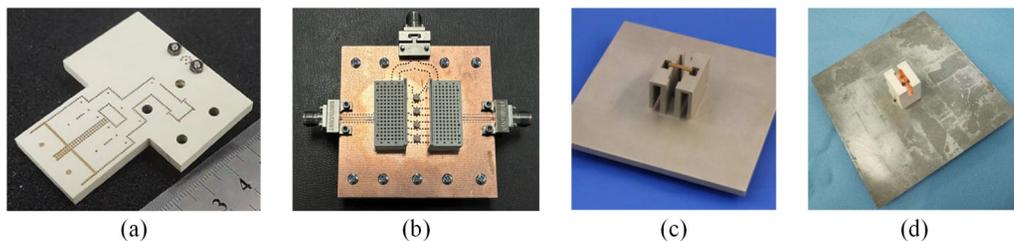


图4 基于结构共享方案的双频带大频比微波/毫米波天线的代表性案例:(a)基于加载 SIW 腔体的磁电偶极子天线^[32];(b)圆柱形/矩形介质谐振器空间共享的组合 DRA^[35];(c)基于折叠平行板的天线^[36];(d)基于介质谐振器和 Fabry - Péroet 谐振腔的天线^[37]

Fig. 4 Representative demonstrations of dual-band large-frequency-ratio microwave/millimeter-wave antennas based on structural sharing schemes: (a) The magnetoelectric dipole antenna utilizing loaded SIW cavities^[32]; (b) The hybrid DRA with spatially shared cylindrical/rectangular dielectric resonators^[35]; (c) The antenna based on folded parallel plates^[36]; (d) The antenna integrating a dielectric resonator and a Fabry - Péroet resonator^[37]

2.3 基于共享口径方案的大频比天线

大频比天线还可以采用共享口径的方案实现。该方案通过设计结构不同且工作在不同频段的天线辐射单元,并巧妙组合/排布天线辐射单元的结构,使天线在两个频段的辐射共享同一物理口径(或辐射体结构),获得较高的集成度。根据结构特征,该方案下的大频比天线可分为双功能结构、嵌入式结构、层叠结构和排列结构四类。

2.3.1 双功能结构

双功能结构能在不同频段实现不同功能,对于共享口径、减小天线体积至关重要。首先,将高频部分反射面通过特殊图案设计集成到低频金属贴片能够实现双功能结构。这种双功能双频天线主要采用周期性开槽的金属贴片^[38]或网格状图案的金属贴片^[39],实现了低频金属贴片天线与高频部分反射面天线的有效集成,如图5(a)和图5(b)所示,这两款天线分别实现了中心频率3.2 GHz/28 GHz以及3.5 GHz/28 GHz的双频辐射。类似地,文献[40]中的双频天线采用了由四层 PCB 构成的双功能金属贴片,该贴片既可作为微波频段的辐射结构又可作为毫米波频段的透射阵天线,如图5(c)所示。该天线实现了2.05 - 2.67 GHz/52 - 68 GHz、频率比高达1:25的大频比辐射性能,是目前频率跨度最大的大频比天线之一。此外,文献[41]中进一步利用具有周期性缝隙的金属贴片作为高频段 Fabry - Pérot 谐振腔天线的部分反射面,同时使其自身兼作低频段的辐射器,实现了天线的口径共享。该天线由两层 PCB 制成,成功实现了2.4 - 2.47 GHz/27.7 - 28.3 GHz 的双频辐射,带内峰值增益分别为7.4 dBi 和15 dBi。文献[42]中提出了一种复合双功能超表面(如图5(d)所示):低频段采

用单层周期性网格贴片作为部分反射面构建 Fabry - Pérot 谐振腔天线,高频段则通过周期性双频偶极子构造菲涅尔区板透镜天线。二者的层叠集成实现了2.97 - 3.13 GHz/27 - 28.6 GHz 的双频响应(频率比1:9.3),带内峰值增益分别高达15 dBi 和20.4 dBi。

此外,一些立体结构同样可用于设计双功能磁电偶极子天线。文献[43]中提出的双频双极化天线(如图5(e)所示)采用高介电常数双功能介质,该介质既充当高频 Fabry - Pérot 谐振腔天线的部分反射面,又作为低频贴片天线的辐射器。该天线在3.2 - 3.9-GHz 和24 - 30-GHz 频段(频率比超过1:7.7)分别实现了峰值增益高达8 dBi 和19.9 dBi 的辐射性能。文献[44]中提出的基于立体金属结构的双频天线采用金属斜面结构,该结构既作为低频磁偶极子,又充当高频喇叭天线的反射面。该天线实现了中心频率2.1 GHz/28 GHz、频率比1:13.3、峰值增益10.2 dBi/17.4 dBi 的双频带辐射。一种双宽带双圆极化口径共享天线^[45]如图5(f)所示。该天线由两种类型的磁电偶极子组成。在毫米波频段,磁电偶极子用 SIW 馈电激励四个具有倾斜内壁的喇叭天线,可实现高增益、双极化的二维波束切换;在低频段,这四个喇叭天线组合形成一个双极化磁电偶极子天线。该天线实现了2.35 - 3.93 GHz/24 - 33.91 GHz 的大频比辐射性能,带内峰值增益分别为10.67 dBi 和14.85 dBi。在文献[46]的天线设计中,垂直金属板既充当平行板谐振腔,又为偶极子天线提供了磁性环境,从而实现磁电偶极子天线与平行板谐振腔天线的集成。该天线采用三层 PCB 实现,在5.30 - 8.08 GHz 和27.15 - 29.02 GHz 频带内峰值增益分别达到5.8 dBi 和8.46 dBi。

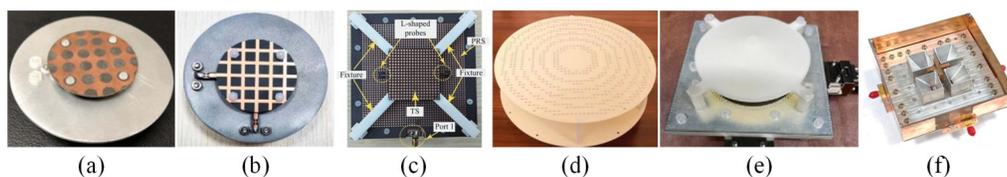


图5 基于双功能结构共享口径方案的双频带大频比微波/毫米波天线的代表性案例:(a)基于周期性圆孔的圆形贴片天线^[38];(b)基于金属网格的圆形贴片天线^[39];(c)基于多层 PCB 的贴片天线^[40];(d)集成 Fabry - Pérot 谐振腔和菲涅尔区板的超表面^[42];(e)基于双功能介质的双极化天线^[43];(f)基于双功能喇叭的天线^[45]

Fig. 5 Representative demonstrations of dual-band large-frequency-ratio microwave/millimeter-wave antennas based on dual-functional, aperture-sharing structural schemes: (a) The circular patch antenna based on periodic circular apertures^[38]; (b) The circular patch antenna based on metallic grids^[39]; (c) The patch antenna based on multilayer PCBs^[40]; (d) The metasurface integrating a Fabry - Pérot resonator and a Fresnel zone plate^[42]; (e) The dual-polarized antenna based on dual-functional dielectric materials^[43]; (f) The antenna based on a dual-functional horn structure^[45]

2.3.2 嵌入式结构

基于嵌入式结构的共享口径天线通常采用平面PCB结构,通过合理的嵌套设计可在小尺寸下实现大频比响应。文献[47]中提出了一种创新天线设计,如图6(a)所示,该天线将毫米波高频段的贴片阵列嵌于微波低频段的贴片天线内,减小了天线占据的面积,实现了在3.38 - 3.64 GHz和26.4 - 29.8 GHz两个频段工作,频率比高达1:8,其带内峰值增益分别达到6.9 dBi和14.6 dBi。文献[48]中的天线组合2×4和8×16两种规格的贴片阵列,在低频段阵列中嵌套高频段阵列实现了口径共享。文献[49]中提出了一种三频嵌套天线,该天线由低频穿孔贴片天线、中频交叉贴片天线以及高频堆叠贴片天线相互嵌套组成,工作于以9.6 GHz、14.8 GHz和34.5 GHz为中心频率的三个频带(频率比1:1.54:2.33),其带内峰值增益分别为13.8 dBi、18.1 dBi和19.2 dBi。类似地,文献[50]中的三频天线采用L形贴片和堆叠贴片构造出高频段天线,并将其嵌入低频段的中空贴片天线内,实现了中心频率在5.9 GHz、28 GHz和39 GHz的三频响应(频率比1:4.75:6.61)。此外,文献[51]中提出了一种共享口径的贴片反射阵列天线,该天线将交叉杆结构嵌入金属贴片内,并在贴片外围设置环形交叉杆结构,实现了C/Ka频段双频响应。

利用SIW的结构特点设计嵌入式结构也是实现口径共享的重要途径。文献[52]中提出的双频天线(如图6(b)所示)采用了这种方法,它将高频段的SIW缝隙阵列天线嵌入低频段的环形贴片内以实现口径共享,同时,SIW缝隙阵列天线的辐射结构还作为贴片天线的场调制器,有效抑制了高次模,

从而优化了低频天线的辐射性能。该天线实现了中心频率3.5 GHz/28 GHz的双频辐射(频率比1:8),带内峰值增益分别为10.65 dBi和18.5 dBi。类似地,还可以将高频段的SIW缝隙阵列嵌入低频段的贴片,并成为贴片结构的一部分,如图6(c)所示。文献[53] - [55]中的三款双频天线均采用了这种设计思路,将毫米波SIW缝隙阵列分别嵌入低频段的矩形贴片天线和螺旋天线中。该方案融合了两类平面天线的结构和工艺特点,使得SIW辐射缝隙不影响低频天线的整体结构和射频性能,有助于在紧凑的天线尺寸下实现较大的频率比(1:15 - 1:25)。

2.3.3 层叠结构

层叠结构通过在竖直方向上堆叠不同频段不同功能的天线来实现多频和多种极化的融合。这类层叠天线多采用低剖面的平面或准平面结构,例如,堆叠双层不同模式的SIW谐振腔/缝隙阵列天线^[56],堆叠贴片和SIW谐振腔/缝隙阵列天线^{[57]、[58]},堆叠金属平板和磁电偶极子天线^[59]等。因每一层天线本身在工作频段和极化类型方面具有较高的设计自由度,层叠天线可以实现多样化性能/功能的融合。图7(a)展示了一种堆叠贴片和SIW缝隙阵列的双频层叠天线,工作在5.69 - 5.89 GHz和28.47 - 29.82 GHz(频率比1:5.03),分别实现了10.9 dBi和18.7 dBi的带内峰值增益。图7(b)中的三频层叠天线通过在铝板制成的低频天线上堆叠双层PCB高频磁电偶极子天线制成,其工作频率覆盖2.38 - 2.52 GHz、4.7 - 5.95 GHz和55 - 69 GHz(频率比1:2.08:25)。特别地,层叠天线还可以融合超表面及相控阵技术^{[60] - [62]},在保持口径共享的

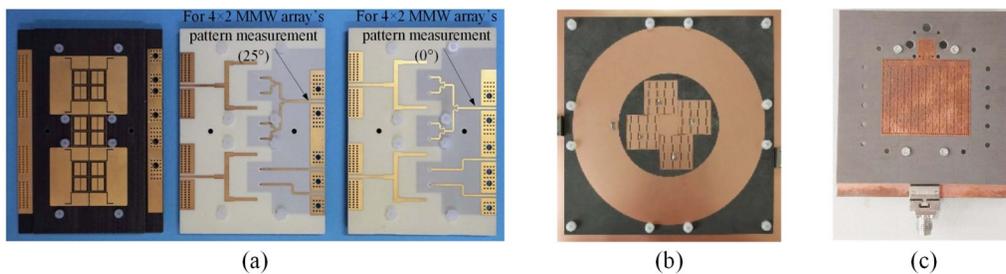


图6 基于嵌入式结构共享口径方案的双频带大频比微波/毫米波天线的代表性案例:(a)高频贴片阵列嵌入低频贴片的贴片^[47];(b)SIW缝隙阵列嵌入环形贴片的贴片^[52];(c)SIW缝隙阵列嵌入矩形贴片的双圆极化贴片^[54]

Fig. 6 Representative demonstrations of dual-band large-frequency-ratio microwave/millimeter-wave antennas based on embedded, aperture-sharing structural schemes: (a) The antenna with a high-frequency patch array embedded within a low-frequency patch^[47]; (b) The antenna with an SIW slot array embedded within a ring-shaped patch^[52]; (c) The dual circularly polarized antenna with an SIW slot array embedded within a rectangular patch^[54]

前提下获得更多优异的多频辐射及波束扫描性能。图 7(c)展示了一种在两极化器之间嵌入超表面的天线设计,该天线在 6.7 - 7.5 GHz 和 26 - 33 GHz 两个频段实现了高增益圆极化辐射,其轴比带宽内的峰值增益分别达到 17.3 dBic 和 20.5 dBic。

2.3.4 排列结构

文献[63] - [68]中的设计方案根据仿真的电磁场分布,将不同类型的平面或准平面天线单元按电磁互扰最小的方式排列,实现了天线辐射口径的共享。首先,该方案可以在一个平面上排列具有特定功能的贴片^[63],这些贴片既作为低频段(4.31 - 5.05 GHz)贴片天线的寄生单元,又作为高频段(26.2 - 29.6 GHz)的辐射结构,如图 8(a)所示。文献[66]中面向 5G 移动终端的应用需求,将毫米波段(26.4 - 29.8 GHz)DRA 排列在微波频段(1.78 - 2.62 GHz)平面倒 F 形天线旁,形成的 PCB/DRA 混合集成天线实现了 LTE 和 5G n257 两个频段的覆盖以及在毫米波频段的波束扫描。文献[67]中类似

的波束扫描阵列天线集成了 K 频段 SICL 缝隙阵列和 Ka 频段贴片阵列,二者交替排列,如图 8(b)所示,在两个频段内分别实现了 60° 和 35° 的波束扫描角。文献[68]中研制的三频天线集成了低频段(3.34 - 4.04 GHz/4.78 - 4.94 GHz)的一对对称排布的共口径倒 F 形天线和高频段(24.32 - 29.76 GHz)的五个双层裂环谐振器天线,如图 8(c)所示,为 5G 移动终端天线的多频、大频比性能需求提供了有效解决方案。

2.4 基于其它设计方案的大频比天线

文献[69]中提出的高增益双频双极化馈源采用了嵌套的锥形喇叭天线结构,如图 9(a)所示,其高频(65 - 90 GHz)喇叭嵌套于低频(11.5 - 18.7 GHz)喇叭的辐射口径内,并在两个频段集成了不同结构类型的波导正交模式变换器实现双极化馈电。该结构实现了喇叭天线和馈电网络的紧凑设计,并采用金属 3-D 打印工艺实现了一体化增材制造。此外,大频比天线还可以采用缝隙耦合结构^{[70]-[72]}

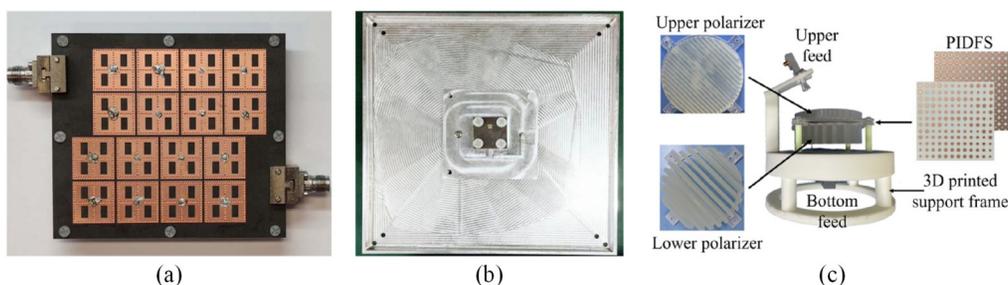


图 7 基于层叠结构共享口径方案的多频带大频比微波/毫米波天线的代表性案例:(a)在贴片天线上方堆叠 SIW 缝隙阵列天线构成的双频天线^[57];(b)在铝平板天线上堆叠 PCB 磁电偶极子天线构成的三频天线^[59];(c)集成 Fabry - Pérot 谐振腔和圆极化反射阵列的双频超表面天线^[62]

Fig. 7 Representative demonstrations of multiband large-frequency-ratio microwave/millimeter-wave antennas based on shared-aperture stacked structures: (a) The dual-band antenna formed by stacking an SIW slot array above a patch antenna^[57]; (b) The tri-band antenna formed by stacking a PCB magnetoelectric dipole antenna above an aluminum plate antenna^[59]; (c) The dual-band metasurface antenna integrating a Fabry - Pérot resonator and a circularly polarized reflectarray^[62]

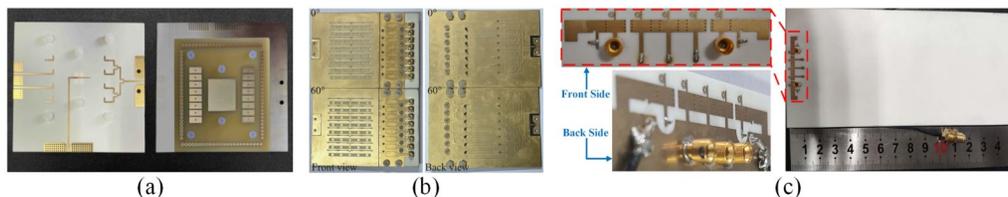


图 8 基于排列结构共享口径方案的多频带大频比微波/毫米波天线的代表性案例:(a)基于排列贴片的三频天线^[63];(b)基于排列缝隙/贴片阵列的双频波束扫描天线^[67];(c)集成对称倒 F 形天线对和双层裂环谐振器天线的三频天线^[68]

Fig. 8 Representative demonstrations of multiband large-frequency-ratio microwave/millimeter-wave antennas based on shared-aperture arrayed structures: (a) The dual-band antenna based on an arrayed patch structure^[63]; (b) The dual-band beam-scanning antenna based on an arrayed slot/patch structure^[67]; (c) The tri-band antenna integrating paired symmetric inverted-F antennas and dual-layer split-ring resonator antennas.

和集成集总开关元件^[73]等方案实现,如图9(b)至图9(d)所示。前者在天线馈电网络中引入耦合缝隙,使不同频段的天线结构经由不同的路径馈电。在该方案下,不同频段的天线结构相对独立,具有较高的设计灵活性,且往往仅需单个馈电端口,结构简单。后者在天线结构中引入PIN二极管等集总开关元件并控制其通断来选择不同频段的天线,实现天线工作频段的切换。

2.5 大频比微波/毫米波天线技术对比

表3总结比较了代表性的多频带大频比微波/毫米波天线的主要技术特征和射频性能。由表可见,该类天线的主流设计方向是采用低剖面、轻量

化的PCB结构实现低频段辐射,并结合CNC、3-D打印等精密、先进制造工艺,构建非平面金属/介质结构以实现高频段辐射。这些设计方案结合不同电磁结构的模式分布规律,充分利用不同加工工艺的特点,实现了天线多个频带的高性能辐射,显著提升了天线功能密度,在有限空间内实现了结构效率的最大化。这些天线典型的工作频段覆盖微波至毫米波,频率比多在1:8以上,且各频段的辐射性能保持了良好的兼容性。其中,多项设计为5G移动终端覆盖sub-6-GHz和毫米波频段的应用场景提供了高性能的解决方案。

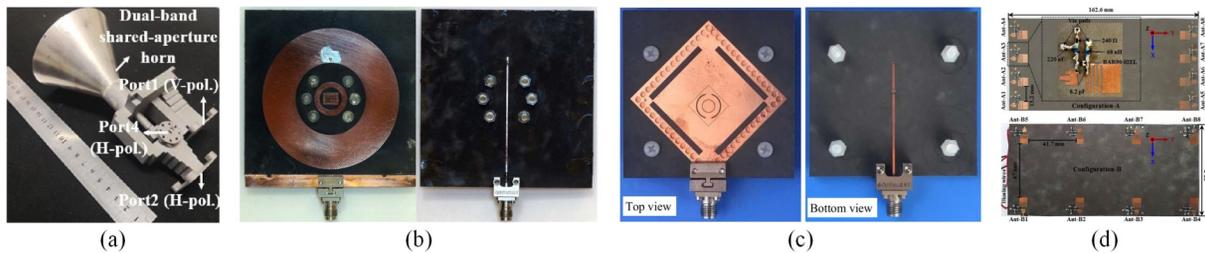


图9 基于其它设计方案的多频带大频比微波/毫米波天线的代表性案例:(a)内外层锥形喇叭天线嵌套的高增益双频双极化馈源^[69]; (b)采用缝隙耦合馈电的双频圆环贴片/SIW缝隙天线^[71]; (c)采用缝隙耦合馈电的双频SIW背腔缝隙天线^[72]; (d) PCB/PIN二极管混合集成的双频8×8 MIMO天线^[73]

Fig. 9 Representative demonstrations of multiband large-frequency-ratio microwave/millimeter-wave antennas based on other design schemes: (a) The high-gain, dual-band, and dual-polarized feed composed of nested inner and outer conical horn antennas^[69]; (b) The dual-band antenna combining a ring patch and an SIW slot structure using slot-coupled feeding^[71]; (c) The dual-band SIW cavity-backed slot antenna using slot-coupled feeding^[72]; (d) The dual-band 8×8 MIMO antenna with hybrid PCB/PIN diode integration^[73].

表3 多频带大频比微波/毫米波天线(代表性案例)技术对比

Table 3 Technical comparison of multiband large-frequency-ratio microwave/millimeter-wave antennas (representative examples)

参考文献	设计方案	低频带结构	高频带结构	f_0 (GHz)	频率比	峰值增益(dBi/dBic)	制造工艺
[29]	结构复用	Vivaldi 天线	SIW 缝隙阵列天线	11.25 & 28.04	1:2.49	10 & 15.85	单层PCB
[31]		贴片天线	SIW 缝隙阵列天线	7.15 & 38.25	1:5.3	16 & 15	双层PCB
[32]	结构共享	磁电单极子天线	磁电单极子天线	11 & 35	1:5.3	6.8 & 11.1	五层PCB
[37]		DRA	Fabry-Pérot 谐振腔天线	2.72 & 25.275	1:9.3	7.1 & 11.30	金属/介质CNC
[39]	双功能结构共享口	贴片天线	部分反射面天线	3.5 & 28	1:8	8.75 & 12.79	单层PCB + 金属3-D打印

续表

参考文献	设计方案	低频带结构	高频带结构	f_0 (GHz)	频率比	峰值增益(dBi/dBic)	制造工艺
[40]		贴片天线	透射阵天线	2.4 & 60	1:25	8.84 & 24.9	四层PCB
[42]		Fabry - Pérot 谐振腔天线	菲涅尔区板 透镜天线	3 & 28	1:9.3	15 & 20.4	两层PCB
[43]		介质贴片天 线	Fabry - Pérot 谐振腔天线	3.5 & 27	1:7.71	8 & 19.9	四层PCB
[45]		磁电偶极子 天线	磁电偶极子 天线	3.5 & 28	1:8	10.67 & 14.85	两层PCB +金属CNC
[47]		贴片天线	贴片阵列天 线	3.5 & 28	1:8	6.9 & 14.6	四层PCB
[48]		贴片阵列天 线	贴片阵列天 线	28 & 84	1:3	15.5 & 24.7	三层PCB
[51]	嵌入式 结构	贴片天线	反射阵列 SIW	4.4 & 30	1:6.8	12 & 31.2	两层PCB
[52]	共享口 径	贴片天线	缝隙阵列天 线 SIW	3.5 & 28	1:8	10.65 & 18.5	单层PCB
[54]		贴片天线	缝隙阵列天 线	3.5 & 60	1:17	7.3 & 24	三层PCB
[57]		贴片天线	SIW 缝隙阵列天 线	5.8 & 29.2	1:5	10.9 & 18.7	三层PCB
[59]	层叠结 构	贴片天线	磁电偶极子 天线	2.4 & 5 & 60	1:2.08:25	9.85 & 7.95 & 8.3	两层PCB +金属CNC
[62]	共享口 径	Fabry - Pérot 谐振腔天线	反射阵列	7 & 30	1:4.3	17.3 & 20.5	两层PCB+金 属CNC +介质3-D打 印
[63]	排列结 构	贴片阵列天 线	贴片阵列天 线	4.7 & 28	1:5.96	5.64 & 11.33	三层PCB
[67]	共享口 径	SICL 缝隙阵列天 线	贴片阵列天 线	18.5 & 29.15	1:1.5	16.6 & 17.6	四层PCB
[69]		喇叭天线	喇叭天线	15 & 77.5	1:5.17	17.5 & 19.2	金属3-D打印
[71]		贴片天线	SIW 缝隙天 线	5.8 & 30	1:5.2	10.4 & 8.51	两层PCB
[72]	其它	SIW 背腔缝隙天 线	SIW 背腔缝隙天 线	5.2 & 40	1:7.69	5.2 & 40	两层PCB

3 大频比微波/毫米波无源元件

文献中已报道的多通带大频比微波/毫米波无源元件主要包括滤波器、滤波交叉器、双工器和耦合器。类似地,这些无源元件可采用结构共享、结构复用和缝隙耦合三种典型设计方案实现。

基于结构共享方案的大频比无源元件均使用

了EBG结构,这些元件利用EBG结构的色散特性构造出多条工作在不同频段且互不干扰的信号传输路径,这是实现结构共享的核心思路。文献[74]和[75]报道的两种基于CNC工艺的多通道带通滤波器均采用了由EBG单元组成的双模模式复合谐振腔。这些滤波器在低频通带采用内嵌EBG结构的

矩形波导谐振腔设计,在高频通带由这些内嵌的EBG结构组成间隙波导谐振腔,这些EBG结构在低频段表现为通带,在高频段表现为阻带。这些滤波器实现了中心频率5.8 GHz/27 GHz、频率比1:4.66的双通带滤波响应。文献[76]中的带隙波导双通带滤波器采取类似文献[28]中的模式复合传输线设计方案,将高频段的槽隙波导滤波器内嵌于低频段的减高矩形波导滤波器中,并优化EBG结构及嵌入位置,使两个滤波器传输路径之间的影响最小化。该滤波器实现了5.9 - 6.06 GHz/80.6 - 86.2 GHz的双通带响应(频率比达1:13.9),带内回波损耗分别优于14 dB和15 dB,带内插入损耗分别低于1.3 dB和1.77 dB。

基于结构复用方案的大频比无源元件均采用模式复合传输线。基于模式复合CPW的双通带大频比滤波器^[77]和耦合器^[78]分别如图10(a)和图10(b)所示,它们采用阻抗匹配结构对低频和高温通带的电磁模式进行选择,使不同模式沿不同路径独

立传输。文献[77]中,滤波器的低频通带基于QCPW,由阶梯阻抗微带低通和带通滤波器级联而成,滤波器的高频通带则基于SIW谐振腔。该滤波器的通带中心频率为1.65 GHz和35 GHz,频率比达到了1:21.2,带内插入损耗为0.6 dB和1.8 dB,通带间的阻带抑制度超过了28 dB。文献[78]中,模式复合CPW耦合器首次实现将两个通带分别部署在sub-10-GHz和太赫兹频段,其低频(6 - 8 GHz)和低频(144 - 156 GHz)通带同样实现了超过1:21的频率比。文献[79]中,将微带的导带替换为SICL的金属板,提出了集成微带和SICL结构的新型模式复合传输线,并基于该传输线架构研制了sub-6-GHz/Ka频段双通带五阶滤波器,如图10(c)所示。该滤波器的通带为3.2 - 5.8 GHz和26.7 - 29.4 GHz(频率比1:6.67),带内回波损耗优于13 dB,带内插入损耗低于0.6 dB和2.7 dB,两条通带路径之间的隔离度大于54 dB。

基于缝隙耦合方案的双通带大频比无源元件

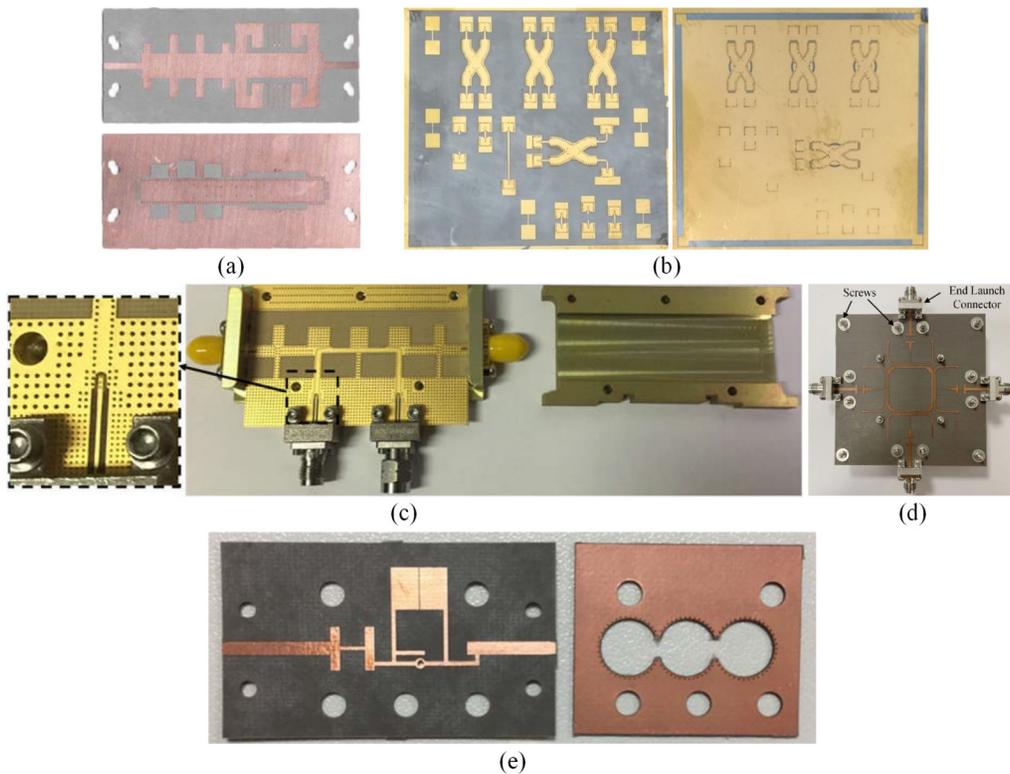


图10 多通带大频比微波/毫米波无源元件的代表性案例:(a)基于模式复合CPW的滤波器^[77];(b)基于模式复合CPW的耦合器^[78];(c)基于微带/SICL模式复合传输线的滤波器^[79];(d)基于缝隙耦合方案的滤波交叉器^[80];(e)基于缝隙耦合方案的滤波器^[81]

Fig. 10 Representative demonstrations of multiband large-frequency-ratio microwave/millimeter-wave passive components: (a) The filter based on mode composite CPW^[77]; (b) The coupler based on mode composite CPW^[78]; (c) The filter based on microstrip/SICL mode composite transmission line^[79]; (d) The filtering crossover based on the slot-coupling scheme^[80]; (e) The filter based on the slot-coupling scheme^[81]

通过在金属地板上开设耦合缝隙,实现对不同频段信号路径的耦合,因此,两个频段的结构可以共用同一组射频端口。该方案通常采用源和负载共用的两条独立的耦合路径。文献[80]中的滤波交叉器将微带滤波器和 SIW 滤波器集成在了双层 PCB 结构中,如图 10(d)所示,实现了中心频率 2.39 GHz/28.01 GHz、3-dB 分数带宽 9.2%/2.14% 的双通带响应(频率比 1:11.72),带内回波损耗优于 11.5 dB 和 10.6 dB,插入损耗低于 1.43 dB 和 3.6 dB,隔离度优于 25 dB 和 33 dB。文献[81]中的滤波器采用多层 PCB 结构集成了微带和空气填充 SIW 谐振器,如图 10(e)所示,实现了中心频率 2.37 GHz/29.84 GHz(频率比 1:12.59)、3-dB 分数带宽 19.41%/6.5%、插入损耗 0.75 dB/1.74 dB 的双通带响应,通带间的阻带抑制制度优于 23 dB。在低频通带设计中,该滤波器采用“低通+带通”级联的结构抑制寄生通带;在高频通带设计中,它采用了空气填充 SIW 谐振腔以减小射频损耗。该文献还报道了类似设计原理的大频比双工器,进一步佐证了缝隙耦合方案的普适性。

同时,缝隙耦合方案充分赋予了低频和低频传输路径的设计自由度,因此,可应用于大频比可调滤波器件,实现低频和低频通带的独立调控。文献[82]和[83]对这方面的相关案例进行了报道。文献[82]中,滤波器结合了微带和矩形波导谐振器,在低频(f_0 : 1.35 - 1.61 GHz)和低频(f_0 : 29.5 - 32.45 GHz)通带分别采用变容二极管和调谐螺丝进行独立的频率调谐,两个通带的频率比最高达到了 1:24。文献[83]中,滤波器的低频(f_0 : 3.22 - 3.52 GHz)和低频(f_0 : 25 - 27.06 GHz)通带分别由变容二极管加载的微带谐振器和机械可调的介质谐振器进行调控,两个通带的频率比最大可达 1:8.3,通带间的阻带抑制制度优于 20 dB。

表 4 对现阶段代表性的多通带大频比微波/毫米波无源元件的技术特征和射频性能进行了总结比较。由表可见,PCB 和 CNC 为这些元件的主流制造工艺,有利于减小加工误差和实现高性能的多通带滤波响应。结构共享方案均采用金属波导谐振腔,工作在 TE 谐振模;其它设计方案的低频/高频通带则主要选择了准 TEM 模/TE 模的组合。特别地,文献[76]、[78]、[82]和[83]分别在元件的最高工作频段、频率跨度、通带可调功能方面实现了突破。

4 技术对比与讨论

图 11 总结了文献中已报道的多频带大频比微波/毫米波传输线、天线及无源元件的频谱分布和制造工艺技术。由图可见,首先,绝大多数设计的低频和高频频带分别覆盖 sub-6-GHz 和毫米波频段,且高频频带的带宽相对较大,其中,以 3.5 GHz 和 28 GHz 为中心频率设计两个频带是一大主流选择;第二,部分设计将高频和低频频带整体部署到了相对更高的频率,如文献[27]和[48]中的模式复合 SI-CL 和双频贴片天线,以及文献[67]和[69]中的波束扫描阵列和双频双极化馈源,或仅将高频频带部署到了更高的毫米波/太赫兹频段^{[28], [40], [53], [54], [59], [76], [78]},以获得更大的频率比;第三,PCB 和 CNC 是这类元件的主流制造工艺,少数设计结合了 3-D 打印和低温共烧陶瓷(Low temperature co-fired ceramic, LTCC)工艺实现;第四,多频带大频比天线的研究非常热门,其设计案例也相当丰富,相比之下,传输线和无源元件的研究案例数量远少于天线。因此,结合不同的微波传输线架构、电磁模式分布特征以及制造工艺,研制多功能、大带宽、大频比的多频传输线和无源元件将是本领域未来的重要研究方向。

图 12 总结了上述案例的数量及工艺分布。PCB 是当前大频比微波/毫米波元件的主流制造工艺之一。因 PCB 工艺成熟,制成的元件具有性能可靠、成本低、剖面低、集成度高的优势。采用 CNC 工艺加工的金属腔体具有较低的射频损耗和较高的功率容量,有利于大频比元件实现高频频带的低损耗性能和高功率处理能力。此外,结合 3-D 打印、LTCC 和微加工等工艺,可以实现具有特殊射频功能的复杂电磁结构的一体化紧凑集成,显著提升大频比元件功能、性能和结构的设计灵活性。例如,对于文献[61]中的多层结构,采用 LTCC 工艺制造会呈现更好的高频性能及结构稳定性,而对于文献[69]中的复杂波导结构,采用 3-D 打印工艺制造能实现结构的低成本、轻量化、免装配。

表 5 对上述案例中的设计方案进行了总结和评估。结构复用方案需要巧妙的设计将两种不同类型的传输线架构结合复用,复用后结构较为复杂,设计难度较高,且对于特定的传输线结构该方案的设计思路较为单一,结构普适性较弱,但该方案下大频比元件在性能、体积及制造成本方面具有较大优势。采用结构共享方案实现大频比性能虽对元

表4 多通带大频比微波/毫米波无源元件技术对比

Table 4 Technical comparison of dual-band large-frequency-ratio microwave/millimeter-wave passive components

参考文献	设计方案	元件类别	低频带结构 [模式]	高频带结构 [模式]	f_0 (GHz)	FBW _{3-dB}	频率比	RL (dB)	IL (dB)	制造工艺
[74]			矩形波导	间隙波导	5.8 & 27	1.9% & 2.3%	1:4.66	>10 & >11	<0.9 & <0.7	金属 CNC
[75]	结构共享	滤波器	[类TE ₁₀₁]	[类TE ₁₀₁]	5.8 & 27	2.1% & 3.7%	1:4.66	>15 & >24	<0.59 & <0.46	金属 CNC
[76]			矩形波导 [TE ₂₀₁]	GGW [TE ₁₀₁]	6 & 83.5	1.9% & 6.7%	1:13.9	>14 & >15	<1.3 & <1.77	金属 CNC
[77]		滤波器	QCPW [准TEM]	SIW [TE ₁₀]	1.65 & 35	N/A & 5.71%	1:21.2	>15 & >20	<1 & <2	单层 PCB
[78]	结构复用	耦合器	TEM		7 & 150	28.6% & 8%	1:21.4	>12 & >10	N/A	微加工
[79]		滤波器	微带 [准TEM]	SICL [准TEM]	4.2 & 28	58% & 10.7%	1:6.67	>13 & >13	<0.6 & <2.7	四层 PCB
[80]		交叉器	微带 [准TEM]	SIW [TE ₁₀₁]	2.39 & 28.01	9.2% & 2.14%	1:11.72	>11.5 & 10.6	<1.43 & <3.6	双层 PCB
[81]			微带 [准TEM]	SIW [TM ₀₁₀]	2.37 & 29.84 2.33 & 5.08 & 29.6	19.41% & 6.5% 17.6% & 11.81% & 7.7%	1:12.59 1:2.18:12.7	>12 & >13 >13 & >12 & >10	<0.75 & <1.74 <0.75 & <0.89 & <2.8	三层 PCB
[82]	缝隙耦合	滤波器	微带 [准TEM]	矩形波导 [类TE ₁₀₁]	1.35 - 1.61 & 29.5 - 32.45	4.44 - 7.45% & 4.31 - 6.35%	*1:24	>11 & >9	<1.7 - 6.2 & < 2.75 - 6	单层 PCB +金属 CNC
[83]			微带 [准TEM]	介质谐振器 [TE ₁₀₁ / TE ₀₁₁]	3.22 - 3.52 & 25 - 27.06	8.9% - 10.7% & 2.3% - 3.3%	*1:8.3	>10 & >10	<2.6 - 3.5 & <3 - 3.6	单层 PCB +介质/ 金属 CNC

*FBW_{3-dB}:3-dB分数带宽;RL:回波损耗;IL:插入损耗;N/A:不详*最大频率比

件的电磁场分布较为考究,但其结构与前者相比更为简单,设计理念也具有较好的适用性,所设计元件的体积和射频性能也能得到较好的平衡。当前,基于结构共享方案的大频比元件多采用金属CNC工艺加工,制造成本相对较高。基于缝隙耦合方案的大频比元件设计原理简单,易融合不同类型的传输线结构,但缝隙耦合结构一定程度上限制了大频比元件在高频频带的射频性能,通常只能用于窄带设计,且结构利用率较低。

共享口径方案被广泛应用于设计多频带大频比天线,其中,基于双功能结构的共享口径方案与

结构复用方案的理念类似,需要充分结合不同结构的电磁特性,该方案下的大频比天线通常工作原理较为复杂,设计难度较高,其结构利用率及性能表现略逊色于基于结构复用方案的元件,设计适用性适中。以嵌入式结构实现共享口径的大频比天线以贴片天线为主,制造成本低,通过嵌套工作于不同频段的贴片结构使天线能够以小体积、低剖面获得良好的辐射性能和较高的口径复用率,贴片的结构设计方案也较为灵活。采用层叠结构实现共享口径的大频比天线的部分实施例是较为复杂的超表面,设计难度较高,部分天线采用CNC和LTCC工

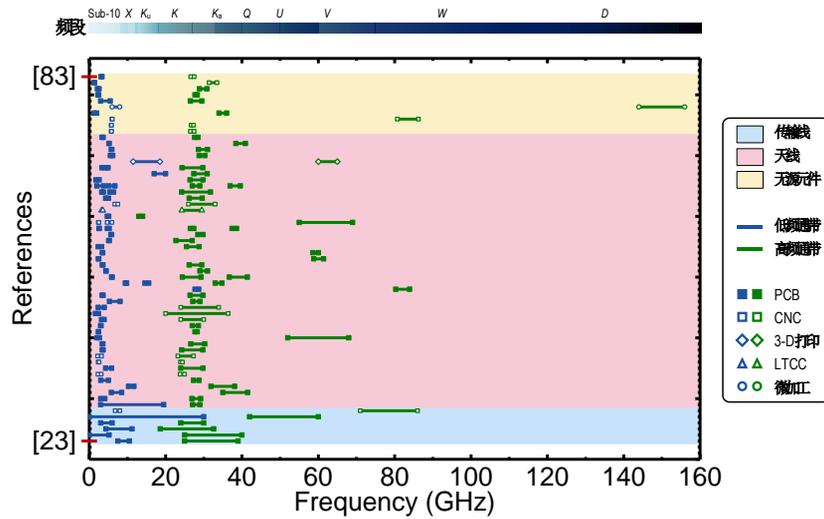


图 11 文献中已报道的多频带大频比微波/毫米波传输线、天线及无源元件的工作频段分布

Fig. 11 Frequency band distribution of the literature-reported multiband large-frequency-ratio microwave/millimeter-wave transmission lines, antennas, and passive components

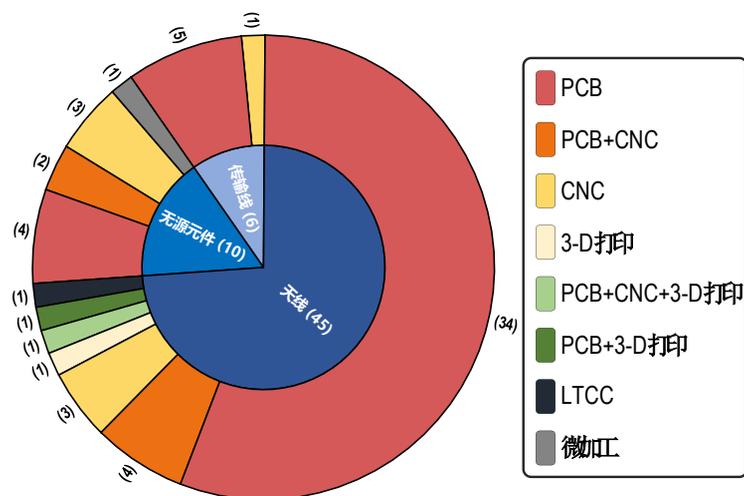


图 12 文献中已报道的多频带大频比微波/毫米波传输线、天线及无源元件的加工工艺及案例数量

Fig. 12 Fabrication processes and the number of the literature-reported multiband large-frequency-ratio microwave/millimeter-wave transmission lines, antennas, and passive components

艺制成,制造成本也相对较高,但这些实施例可在适中的尺寸下实现优良的射频性能。排列结构相对简单,体积较大,结构利用率低,但在该方案下大频比天线在不同频带的结构设计相对独立,不同结构间的相关性低,通常具有较好的性能表现。

表6总结了上述案例中微波传输线架构的组合方案。由表可见,现有技术方案多采用微带和SIW分别作为低频和高频频带的传输线,复合传输线的结构选择和设计整体呈现小型化、高集成度的趋势。采用结构复用或共享方案实现大频比响应往往需要采用结构相近的两类传输线,以保证复用或

共享部分对两种结构的负面影响最小。采用缝隙耦合方案实现大频比响应均以微带作为低频频带传输线。

综上所述,本文通过总结分析现有的多频带大频比微波/毫米波传输线、天线及无源元件,揭示出该领域具有进一步创新价值的研究方向。第一,多通带大频比传输线及无源元件的研究还相对较少。诸多基于结构复用方案的新型复合传输线及其应用还值得进一步研究,例如,基于新型夹层槽线的多通带大频比滤波器、基于模式复合微带的多通带大频比滤波器等;基于结构共享方案的设计较少,

表5 多频带大频比微波/毫米波传输线、天线及无源元件设计方案的评估和对比

Table 5 Evaluation and comparison of design schemes for multiband large-frequency-ratio microwave/millimeter-wave transmission lines, antennas, and passive components

技术特征	结构复用	结构共享	共享口径 (双功能结构)	共享口径 (嵌入式结构)	共享口径 (层叠结构)	共享口径 (排列结构)	缝隙耦合
创新难度	高	中高	高	中	中高	低	低
性能表现	好	良	良好	良好	好	良好	差
结构复杂度	高	中高	高	中	中高	中低	低
元件体积	小	中	中	小	中	大	大
制造成本	低	高	中低	低	中高	中	中高
设计适用性	低	中高	中	中高	中	高	高

表6 文献中已报道的可用于多频带大频比微波/毫米波传输线、天线及无源元件设计的传输线架构及组合

Table 6 The literature-reported transmission line architectures and combinations for the design of multiband large-frequency-ratio microwave/millimeter-wave transmission lines, antennas, and passive components

参考文献	设计方案	低频带结构	高频带结构
[23], [25]		SIWL	SIW
[24], [30], [77], [78]		QCPW	SIW
[26]		微带(SSPP)	HMSIW
[27]	结构复用	SIWL(SSPP)	SIW
[29]		准槽线	SIW
[31]		微带	SIW
[79]		微带	SIWL
[28], [76]		矩形波导	GGW
[74], [75]	结构共享	矩形波导	间隙波导
[80], [81]		微带	SIW
[82]	缝隙耦合	微带	矩形波导
[83]		微带	介质谐振器

面向平面传输线的结构共享方案暂无;更多的传输线结构组合方案尚待挖掘,现阶段结构复用的设计方案多采用(准)平面传输线和PCB工艺实现,结合金属波导或腔体的结构复用方案尚待开发。第二,深度融合多种先进设计技术和工艺制程,是实现新一代ISAC多频带大频比电路的必由之路。其中,特别值得一提的是,当前智能超表面的研究主要聚焦于实现频率可重构^{[84], [85]}、极化可重构^[86]或方向图可重构^[87]等智能调控能力,而鲜有文献专注于实现大频比辐射能力。因此,面向5G/6G ISAC应用发展兼具智能调控功能与大频比辐射能力的超表面将成为一个重要研究方向。另外,在智能集成方面,在多频带大频比功能和结构设计中融合3-D打印、LTCC、微加工等先进工艺,也是在该领域突破创新

的重要途径。第三,多频带、大频比性能的实现需要系统全链路的协同配合,这有助于实现软件、硬件多频协同设计与优化,推动“多频段共平台”技术发展,降低系统总体成本与复杂度。

5 结论

本文综述了ISAC的基本概念、实现方向和技术需求,并重点介绍了适用于ISAC应用的多频带大频比微波/毫米波传输线、天线和无源元件,具体而言,结合近年来文献中的典型案例系统地分析比较了这些多频带大频比结构的设计方案(主要包括结构复用、结构共享、共享口径和缝隙耦合)及其制造工艺(主要包括PCB和CNC)。研究表明,第一,sub-6-GHz和毫米波频段为这些大频比设计的主流覆盖频段,满足现阶段ISAC应用的频段需求,并且将高频频带部署到太赫兹频段以实现更大的频率比是新兴趋势;第二,采用结构复用方案得到的元件通常具有较好的综合表现,但设计创新难度较高,需要较多研发投入,而天线的共享口径方案中使用层叠结构往往可获得较好的辐射性能;第三,大频比传输线和无源元件的研究相对较少,更多不同传输线架构的组合方案尚待开发;第四,融合特殊功能(如频率调谐功能)和先进工艺(如3-D打印、LTCC、微加工)的大频比元件设计是具有创新价值的研究方向。

References

- [1] FARHAN L, SHUKUR S T, ALISSA A E, ALRWEG M, RAZA U, KHAREL R. A survey on the challenges and opportunities of the Internet of Things (IoT): Proceedings of International Conference on Sensing Technology, 2017[C]. Sydney, NSW, Australia: IEEE, 2017: 1 - 5.
- [2] ZHENG K, ZHENG Q, YANG H, ZHAO L, HOU L, CHATZIMISIOS P. Reliable and efficient autonomous driving: the need for heterogeneous vehicular networks [J].

- IEEE Communications Magazine, 2015, 53(12): 72 - 79.
- [3] BILIK I, LONGMAN O, VILLEVAL S, TABRIKIAN J. The rise of radar for autonomous vehicles: Signal processing solutions and future research directions [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2019, 36(5): 20 - 31.
- [4] SAHIN M M, ARSLAN H. Multi-functional coexistence of radar-sensing and communication waveforms: Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference, 2020 [C]. Victoria, BC, Canada: IEEE, 2020: 1 - 5.
- [5] GU Y, XU T, FENG K, OUYANG Y, DU W, TIAN X, LEI T. ISAC towards 6G satellite - terrestrial communications: Principles, status, and prospects [J]. Electronics, 2024, 13(7): 1369.
- [6] WEI Z, QU H, WANG Y, YUAN X, WU H, DU Y, HAN K, ZANG N, FENG Z. Integrated sensing and communication signals towards 5G-A and 6G: A survey [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(13): 11068 - 11092.
- [7] LIU F, CUI Y, MASOUIROS C, XU J, HAN T X, ELДАР Y C, BUZZI S. Integrated sensing and communications: Toward dual-functional wireless networks for 6G and beyond [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022, 40(6): 1728 - 1767.
- [8] LIU A, HUANG Z, LI M, WAN Y, LI W, HAN T X, LIU C, DU R, TAN D K P, LU J, SHEN Y, COLONE F, CHETTY K. A survey on fundamental limits of integrated sensing and communication [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(2): 994 - 1034.
- [9] PAUL B, CHIRIYATH A R, BLISS D W. Survey of RF communications and sensing convergence research [J]. IEEE Access, 2017, 5: 252 - 270.
- [10] LU S, LIU F, LI Y, ZHANG K, HUANG H, ZOU J, LI X, DONG Y, DONG F, ZHU J, XIONG Y, YUAN W, CUI Y, HANZO L. Integrated sensing and communications: Recent advances and ten open challenges [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(11): 19094 - 19120.
- [11] QUAN S, QIAN W, GUO J, ZHANG Y. Radar-communication integration: An overview: Proceedings of IEEE/International Conference on Advanced Infocomm Technology, 2014 [C]. Fuzhou, China: IEEE, 2014: 98 - 103.
- [12] SCHARRENBROICH M, ZATMAN M. Joint radar-communications resource management: Proceedings of IEEE Radar Conference, 2016 [C]. Philadelphia, PA, USA: IEEE, 2016: 1 - 6.
- [13] HAIMOVICH A M, BLUM R S, CIMINI L J. MIMO radar with widely separated antennas [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(1): 116 - 129.
- [14] DING S, CHEN B, LI J, YAO J, YUAN Y, JIANG D, QIN F. Integrated sensing and communication: Prototype and key processing algorithms: Proceedings of IEEE International Conference on Communications Workshops, 2023 [C]. Rome, Italy: IEEE, 2023: 225 - 230.
- [15] ZHANG C, ZHOU Z, WANG H, ZENG Y. Integrated super-resolution sensing and communication with 5G NR waveform: Signal processing with uneven CPs and experiments: Proceedings of International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks, 2023 [C]. Singapore: IEEE, 2023: 681 - 688.
- [16] ZHANG Q, LI Z, GAO X, FENG Z. Performance evaluation of radar and communication integrated system for autonomous driving vehicles: Proceedings of IEEE Conference on Computer Communications Workshops, 2021 [C]. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2021: 1 - 2.
- [17] PAJOVIC M, WANG P, KOIKE-AKINO T, SUN H, ORLIK P V. Fingerprinting-based indoor localization with commercial mmWave WiFi - Part I: RSS and beam indices: Proceedings of IEEE Global Communications Conference, 2019 [C]. Waikoloa, HI, USA: IEEE, 2019: 1 - 6.
- [18] YU J, WANG P, KOIKE-AKINO T, WANG Y, ORLIK P V, BUEHRER R M. Multi-band Wi-Fi sensing with matched feature granularity [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(23): 23810 - 23825.
- [19] XIE Y, CHEN F-C, CHU Q-X. Triple-band bandpass filter and triplexer using quad-ridge cavity resonators [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021, 69(8): 3832 - 3841.
- [20] LI S, YAN Y-T, YANG S-C, ZHU Z-B, LI X-J, WANG C-X, SHAO W, DING J-Q. 220 GHz dual-mode dual-band waveguide filter in stackable multilayer MEMS technology [J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2023, 44: 659 - 672.
- [21] ZHOU K, ZHOU C-X, XIE H-W, WU W. Synthesis design of SIW multiband bandpass filters based on dual-mode resonances and split-type dual- and triple-band responses [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(1): 151 - 161.
- [22] DUAN J-P, SHEN X-X, XIAO H, ZHANG B-Z, BAI Q. Micromachined W-band dual-band quasi-elliptic waveguide filter [J]. Microelectronics Journal, 2021, 115: 105200.
- [23] GUO J, DJERAFI T, WU K. Mode composite waveguide [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64(10): 3187 - 3197.
- [24] SU Y, LIN X Q, YU J W, FAN Y. Mode composite coplanar waveguide [J]. IEEE Access, 2019, 7: 109278 - 109288.
- [25] GUO J, WU K. Half-mode composite waveguide [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(6): 2920 - 2927.
- [26] ZHOU Y, SONG K, LI Q, CHENG Y, FAN Y. A novel mode composite transmission line based on SSPPs and HMCSIW: Proceedings of UK-Europe-China Workshop on Millimetre-Waves and Terahertz Technologies, 2021 [C]. Lancaster, United Kingdom: IEEE, 2021: 1 - 3.
- [27] ZHU Y, LI X-C, MAO J-F. Mode composite substrate integrated coaxial line based on substrate integrated coaxial line and periodic L-shaped SSPP structure [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2023, 13(4): 528 - 536.
- [28] CHENG X, LIU Z, YAO Y, YU T, YU J, CHEN X. Novel band gap waveguide for low-loss and dual band applications [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2022, 70(5): 2610 - 2621.
- [29] SU Y, LIN X Q, FAN Y, WU K. Mode composite sandwich slot line and its applications in antenna development [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,

- 2020, 68(6): 4250 - 4258.
- [30] SU Y, LIN X Q, FAN Y. Dual-band coaperture antenna based on a single-layer mode composite transmission line [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(7): 4825 - 4829.
- [31] LI Y, WANG J. Dual-band leaky-wave antenna based on dual-mode composite microstrip line for microwave and millimeter-wave applications [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(4): 1660 - 1668.
- [32] LI Y, WANG L, GE L, WANG J. A dual-band magneto-electric monopole antenna array using mode-composite waveguides [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023, 71(7): 6208 - 6213.
- [33] XIAO F, LIN X, SU Y. Dual-band structure-shared antenna with large frequency ratio for 5G communication applications [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, 19(12): 2339 - 2343.
- [34] FENG L Y, LEUNG K W. Dual-fed hollow dielectric antenna for dual-frequency operation with large frequency ratio [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(6): 3308 - 3313.
- [35] MUHAMMAD A, KHAN M U, SHAMSAEE MALFAJANI R, SHARAWI M S, ALATHBAH M. An integrated DRA-based large frequency ratio antenna system consisting of a MM-wave array and a MIMO antenna for 5G applications [J]. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, 2024, 5(2): 368 - 378.
- [36] FENG L Y, LEUNG K W. Dual-frequency folded-parallel-plate antenna with large frequency ratio [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(1): 340 - 345.
- [37] FENG L Y, LEUNG K W. Wideband dual-frequency antenna with large frequency ratio [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(3): 1981 - 1986.
- [38] SUN Y-X. Large frequency ratio antennas based on dual-function periodic slotted patch and its quasi-complementary structure for vehicular 5G communications [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(7): 8303 - 8312.
- [39] ZOU J, ZHAO Y, YANG X, GE L, SUN Y-X. Dual-band dual-polarized shared-aperture grid antenna with large frequency ratio [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2023, 22(7): 1513 - 1517.
- [40] MA Z L, TANG Y, XUE Q, CHE W, WANG K X. Dual-band shared-aperture antenna hybridizing patch and transmitarray with large frequency ratio and wideband characteristics [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2025, 73(4): 2485 - 2496.
- [41] ZHU J, YANG Y, LIAO S, LI S, XUE Q. Dual-band aperture-shared Fabry - Perot cavity-integrated patch antenna for millimeter-wave/sub-6 GHz communication applications [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2022, 21(5): 868 - 872.
- [42] ZHU J, YANG Y, LIAO S, XUE Q. Aperture-shared millimeter-wave/sub-6 GHz dual-band antenna hybridizing Fabry - Pérot cavity and Fresnel zone plate [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(12): 8170 - 8181.
- [43] ZHAO Y, GE L, GU H, CHEN S C, CHUNG M-A. A dual-band dual-polarized antenna with high aperture reuse efficiency and large frequency ratio for modern wireless communications [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2024, 23(1): 14 - 18.
- [44] HAO J N, FENG L Y, JI W S, LIU Y. Dual-wideband dual-frequency antenna with large frequency ratio for 5G applications [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2024, 72(2): 1887 - 1892.
- [45] CHENG Y, DONG Y. Dual-broadband dual-polarized shared-aperture magnetolectric dipole antenna for 5G applications [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(11): 7918 - 7923.
- [46] SUN Y X, LEUNG K W, LU K. Compact dual microwave/millimeter-wave planar shared-aperture antenna for vehicle-to-vehicle/5G communications [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(5): 5071 - 5076.
- [47] DING X-H, YANG W-W, TANG H, GUO L, CHEN J-X. A dual-band shared-aperture antenna for microwave and millimeter-wave applications in 5G wireless communication [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(12): 12299 - 12304.
- [48] WANG Z, HUANG Z. A microwave/millimeter wave dual-band shared aperture patch antenna array [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 218585 - 218591.
- [49] MAO C-X, GAO S, LUO Q, ROMMEL T, CHU Q-X. Low-cost X/Ku/Ka-band dual-polarized array with shared aperture [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(7): 3520 - 3527.
- [50] ZHANG J-E, LIU G, YANG W-W, CHEN J-X. A tri-frequency shared-aperture antenna for cooperative work of V2X and millimeter-wave bands [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2025, 24(3): 776 - 780.
- [51] ZHU J, LIAO S, ZHU X, YANG Y, XUE Q. C-/Ka-band aperture-shared dual circularly polarized heterogeneous reflectarray for vehicular communications [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(6): 8671 - 8680.
- [52] WANG C, CAO W, MA W, LI C, JING J. Dual-band structure reused aperture-sharing antenna with low side-lobe and high gain for 5G communication [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2024, 23(4): 1386 - 1390.
- [53] ZHANG J F, CHENG Y J, DING Y R. An S- and V-band dual-polarized antenna based on dual-degenerate-mode feeder for large frequency ratio shared-aperture wireless applications [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(12): 8127 - 8132.
- [54] ZHANG J F, CHENG Y J, DING Y R, BAI C X. A dual-band shared-aperture antenna with large frequency ratio, high aperture reuse efficiency, and high channel isolation [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(2): 853 - 860.
- [55] WEI X, CHENG Y J. A S/Ka dual-band shared-aperture circularly polarized antenna combining spiral antenna and substrate integrated waveguide slot antenna: Proceedings of IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, 2023 [C]. Portland, OR, USA: IEEE, 2023: 371 - 372.

- [56] TU Z-H, HE M-M. Dual frequency dual circular polarization fusion antenna for microwave and millimeter wave applications: Proceedings of IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, 2024[C]. Nanjing, China: IEEE, 2024: 1 - 2.
- [57] XIA Z-X, LEUNG K W, YANG N, LU K. Compact dual-frequency antenna array with large frequency ratio [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(4): 2031 - 2040.
- [58] NI S, LI X, YIN J, WANG Q, ZHANG J. A compact quad-band shared-aperture antenna based on electromagnetic transparent structure [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024, 23(3): 1020 - 1024.
- [59] YANG X, GE L, JI Y, ZENG X, LI Y, DING C, SUN J, LUK K-M. An integrated tri-band antenna system with large frequency ratio for WLAN and WiGig applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(5): 4529 - 4540.
- [60] CHEN Q, CHENG Y-F, SHAO C-H, FENG J, LIAO C, DING X. A high-gain dual-band shared-aperture array integrating zero-order-resonance patch and higher-order metasurface antenna [J]. Scientific Reports, 2023, 13: 11647.
- [61] WEI L, YANG W, XUE Q, CHE W. Aperture-shared design of millimeter-wave phased array and sub-6 GHz antenna using diversified metasurface structures [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2024, 72(8): 6362 - 6373.
- [62] GUO Q-Y, CHEN P, LIANG M, SUN G-H, WU G-B. A high-gain aperture-shared dual-band circularly polarized antenna using polarizer integrated dual-functional surface [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2024, 72(9): 6886 - 6896.
- [63] YANG W-W, ZHANG Q-H, FAN X, GENG X, QIN W, CHEN J-X. A sub-6 GHz/millimeter-wave dual-wideband shared-aperture antenna by reusing the mushroom structure [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2024, 72(10): 8010 - 8015.
- [64] JABEEN S, KHAN Q U, SHEIKH S A. A single-layer S/C/K/Ka bands shared aperture antenna with novel feed structure for K/Ka bands [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(8): 6965 - 6970.
- [65] LIU Y, LI Y, GE L, WANG J, AI B. A compact hepta-band mode-composite antenna for sub (6, 28, and 38) GHz applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(4): 2593 - 2602.
- [66] DING X-H, ZHANG Q-H, YANG W-W, QIN W, GUO L, CHEN J-X. A dual-band antenna for LTE/mmWave mobile terminal applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(3): 2826 - 2831.
- [67] GUO Z-J, HAO Z-C, MIAO Z-W, YIN H-Y, DING C-Y, GANG H-J. A K-/Ka-band planar shared-aperture beam-scanning array with a high-isolation for the emerging mm-Wave shared-aperture terminals [J]. Science China Information Sciences, 2023, 66: 152305.
- [68] HU M, ZHAO X, ZHU X, YING H, LI B, HUANG Q. Compact tri-band shared-aperture antenna with large frequency ratio for 5G mobile terminals [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024, 23(9): 2613 - 2617.
- [69] TAN J, LI Y, GE L, WANG J. A 3-D printed lightweight miniaturized dual-band dual-polarized feed module for advanced millimeter-wave and microwave shared-aperture wireless backhaul system applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(4): 3050 - 3060.
- [70] ZHENG S Y. A dual-band circularly polarized antenna with large frequency ratio for 5G applications: Proceedings of International Symposium on Antennas and Propagation, 2018 [C]. Busan, Korea (South): IEEE, 2018: 1 - 2.
- [71] XIANG B J, ZHENG S Y, WONG H, PAN Y M, WANG K X, XIA M H. A flexible dual-band antenna with large frequency ratio and different radiation properties over the two bands [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(2): 657 - 667.
- [72] DENG Q J, PAN Y M, LIU X Y, LEUNG K W. A singly-fed dual-band aperture-sharing SIW cavity-backed slot antenna with large frequency ratio [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(2): 1971 - 1976.
- [73] ZADA M, SHAH I A, YOO H. Integration of sub-6-GHz and mm-wave bands with a large frequency ratio for future 5G MIMO applications [J]. IEEE Access, 2021, 9: 11241 - 11251.
- [74] HU C, LI Y, WANG J. A large-frequency-ratio multi-channel bandpass filter based on structure-shared mode-composite air-filled cavity resonators [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2024, 72(6): 3650 - 3661.
- [75] HU C, LI Y, WANG J. A dual-band bandpass mode-composite cavity filter with large frequency ratio: Proceedings of Global Symposium on Millimeter-Waves & Terahertz, 2024 [C]. Hong Kong: IEEE, 2024: 246 - 248.
- [76] LI S, YAO Y, CHENG X, YU J. Design of a dual-band filter based on the band gap waveguide [J]. Electronics, 2024, 13(20): 3982.
- [77] SU Y, FAN Y, LIN X Q, WU K. Single-layer mode composite coplanar waveguide dual-band filter with large frequency ratio [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020, 68(6): 2320 - 2330.
- [78] DENG J, BURASA P, WU K. Unified microwave terahertz waveguide coupler for multiband wireless applications [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2025, 15(5): 1032 - 1043.
- [79] YANG S, XU J, YU Z, ZHOU J, HONG W. A structure reuse method for realizing large frequency ratio dual-band multi-channel integrated filters [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2022, 69(4): 2101 - 2105.
- [80] WEI H, ZHU F. A dual-band filtering crossover with large frequency ratio for microwave and millimeter-wave applications [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2023, 65: 2890 - 2896.
- [81] ZHENG S Y, SU Z L, PAN Y M, QAMAR Z, HO D. New dual-/tri-band bandpass filters and diplexer with large frequency ratio [J]. IEEE Transactions on Microwave

- Theory and Techniques, 2018, 66(6): 2978 - 2992.
- [82] TANG W S, SU Z L, ZHENG S Y. Dual-band bandpass filter with large frequency ratio and independently tunable center frequencies: Proceedings of IEEE MTT-S International Wireless Symposium, 2019 [C]. Guangzhou, China: IEEE, 2019: 1 - 3.
- [83] TANG W S, ZHENG S Y, PAN Y M, LIU H W. A frequency independently tunable dual-band bandpass filter with large frequency ratio and ultra-wide stopband [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(2): 1894 - 1904.
- [84] SHI X, SHEN C-W, KE Y-H, CHEN J-X. A frequency-tunable dielectric resonator antenna with rotatable anisotropic metasurface [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024, 23(1): 429 - 433.
- [85] JI L-Y, HAN Y, HONG X. Low RCS frequency reconfigurable Fabry-Perot antenna based on liquid metal metasurface [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2025 (Early Access).
- [86] GUO Q, HAO F, QU M, SU J, LI Z. Multiband multifunctional polarization converter based on reconfigurable metasurface [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024, 23(4): 1241 - 1245.
- [87] Yin S-Y, Li J-L. Reconfigurable antenna with uni- and bidirectional radiation patterns based on metasurface and Fresnel zone plate lens [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024, 23(8): 2291 - 2295.