



一种双频高增益共口径天线设计

高 帅, 黄 衡

A design of dual-band high-gain shared-aperture antenna

GAO Shuai and WONG Hang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.cjors.2023286>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高增益高效率的Fabry-Perot谐振腔天线研究

High-gain and high-aperture-efficiency Fabry-Perot cavity antenna

电波科学学报. 2021, 36(5): 721-729

高增益宽带透射阵天线

Design of high gain and wideband transmitarray

电波科学学报. 2020, 35(5): 745-749

加载对拓结构介质的高增益Vivaldi天线

A design of high-gain Vivaldi antenna based on antipodal structural dielectric loading

电波科学学报. 2018, 33(2): 202-207

基于超表面的低剖面高增益圆极化天线

A low profile high gain circularly polarized antenna based on metasurface

电波科学学报. 2021, 36(1): 96-100

面向5G微基站的双频双极化电磁偶极子天线设计

Design of dual-band dual-polarized magneto-electric dipole antenna for 5G microcell base station

电波科学学报. 2020, 35(5): 769-775

一款面向5G微基站的双频双极化电磁偶极子天线的设计与分析

A dual-band dual-polarized magneto-electric dipole antenna for 5G micro base station

电波科学学报. 2021, 36(5): 715-720, 729



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

高帅, 黄衡. 一种双频高增益共口径天线设计[J]. 电波科学学报, 2024, 39(6): 1051-1057. DOI: 10.12265/j.cjors.2023286

GAO S, WONG H. A design of dual-band high-gain shared-aperture antenna[J]. Chinese journal of radio science, 2024, 39(6): 1051-1057. (in Chinese). DOI: 10.12265/j.cjors.2023286

一种双频高增益共口径天线设计

高帅 黄衡*

(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, 香港 999077)

摘 要 为满足无线系统对双频高增益天线的需求, 本文提出了一种双频高增益共口径天线的设计方法。通过将工作于 X 波段的法布里-佩罗天线和工作于 Ka 波段的折叠透射阵天线融合于同一结构中, 在两个频段都产生高定向波束的同时也实现了 100% 的口径复用效率; 设计了两种单元用于组成天线的口径层和地板层, 并且这两种单元在 X 波段和 Ka 波段下对电磁波有着不同的特性, 以满足法布里-佩罗天线和折叠透射阵天线的需求。为了对所提出的方法进行验证, 进行了加工实验, 实验显示实测结果和仿真结果有着较好的吻合性。所提出的共口径天线在低频段和高频段分别实现了 8.62~9.35 GHz 和 24~34 GHz 的有效带宽 (反射系数 ≤ -10 dB, 增益变化 ≤ 3 dB), 且都有着良好的定向辐射特性, 峰值增益分别为 15.5 dBi 和 23.1 dBi。由于宽带高增益的优点以及 100% 的口径复用效率, 本文所提出的天线在未来的无线系统中有着很好的应用前景。

关键词 双频; 共口径; 法布里-佩罗天线; 折叠透射阵天线; 高增益

中图分类号 TN821.8

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2024)06-1051-07

DOI 10.12265/j.cjors.2023286

A design of dual-band high-gain shared-aperture antenna

GAO Shuai WONG Hang*

(The State Key Laboratory of Terahertz and Millimeter Waves, Department of Electrical Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

Abstract To satisfy the requirement for dual-band high-gain antennas of wireless systems, the design of a dual-band high-gain shared-aperture antenna is presented in this paper. The proposed work hybridizes an X-band Fabry-Perot cavity antenna and a Ka-band folded transmitarray, realizing high-directivity beams at two bands and a aperture reuse efficiency of 100%. Two kinds of unit cells are designed to constitute the aperture layer and the ground layer of the antenna, and they have distinct functions at X- and Ka-bands for the incident electromagnetic wave to satisfy the requirements of the Fabry-Perot cavity antenna and the folded transmitarray. To validate the methodology, an experiment is carried out. A good agreement is observed between the simulated and measured results. The proposed antenna realizes an effective bandwidth (for reflection coefficient ≤ -10 dB and gain variation ≤ 3 dB) from 8.62 to 9.35 GHz at the lower band, and from 24 to 34 GHz at the upper band. Broadside radiation patterns are observed at both bands. The peak gain at two bands is 15.5 dBi and 23.1 dBi, respectively. Due to the merits of wide bandwidths, high gain and 100% aperture reuse efficiency, the proposed design is promising for future wireless communication systems.

Keywords dual band; shared aperture; Fabry-Perot cavity antenna; folded transmitarray; high gain

0 引 言

随着通信技术的飞速发展, 无线通信系统变得

越来越复杂, 这对天线这一通信系统的重要组成部分也提出了更高的要求。例如, 在未来的移动通信中, 为了实现超高速率的信息传输以及保证信号的

收稿日期: 2023-09-30

资助项目: 国家自然科学基金 (62071408)

通信作者: 黄衡 E-mail: hang.wong@cityu.edu.hk

有效覆盖,部署于通信系统中的天线需要能够同时支持微波和毫米波频段。满足这一要求的最简单的方法是在不同位置分别部署独立的工作于不同频段的天线,然而这种方式会占用很大的空间,有悖于空间日益紧凑的系统。为了在紧凑空间内实现天线的部署,研究人员提出了共口径天线的设计理念。共口径天线是将工作在不同频段的天线集成在一起,这些天线具有相同的辐射口径,通过口径复用的理念,在不增加额外空间的基础上实现了多个频段的覆盖。

近些年,共口径天线得到了工业界和学术界的广泛关注,许多基于不同设计理念的双频共口径天线被研究人员提出^[1-5]。例如,在文献[1]中,来自电子科技大学的学者提出了一种新颖的有着大频率比特性的双频共口径天线设计方法,其将工作于3.5 GHz的贴片天线和工作于60 GHz的波导缝隙阵列集成到同一结构中。众所周知,为了实现远距离通信,无线通信系统的发射端和接收端都需要配备高增益的天线。将天线单元组成阵列是一种常用的实现高增益天线的办法,所实现的增益由阵列的大小决定。为了实现对每个天线单元的激励,复杂的馈电网络是阵列天线设计中不可或缺的一部分。因此,在传统双频高增益共口径天线的设计中,需要两个单独的馈电网络分别对高低频的天线阵列进行馈电,这使得天线设计以及整体结构变得十分复杂^[6-7]。

除了天线阵列,法布里-佩罗天线、透射阵天线和反射阵天线也是实现高增益天线设计的有效手段^[8-10]。与天线阵列相比,这些类型的天线基于空间相位补偿的理念,利用空馈的方法,在无需馈电网络的情况下就能够实现高增益的特性。因此,使用上述天线类型实现双频高增益共口径天线的设计是一个很好的方案,避免了复杂馈电网络的使用。然而,目前发表的相关工作具有窄带的劣势^[11-13],限制了其应用前景。

基于上述理念,本文提出了一种新型双频高增益共口径天线。该天线将X波段的法布里-佩罗天线和Ka波段的折叠透射阵天线整合于同一复合结构中,实现了100%的口径复用效率。测试结果表明天线在低频的有效工作频带为8.62~9.35 GHz,在高频的有效工作频带为24~34 GHz。同时,天线在低频段和高频段都有着高增益的特性,实测最高增益分别为15.5 dBi和23.1 dBi。

1 天线设计

1.1 工作原理

如图1(a)所示,对于法布里-佩罗天线,口径层需要充当部分反射表面,而地板层的作用等同金属反

射板,馈源所发射的电磁波会在口径层和地板层之间多次反射和透射。当口径层和地板层之间的距离满足一定条件时,透射的电磁波可以实现同向叠加,从而实现增益的提升。如图1(b)所示,在折叠透射阵中,口径层需要具有极化选择的特性。对于y极化的馈源,口径层需要阻挡馈源所发射的y极化波并将其反射到地板层,地板层在反射电磁波的同时需要对入射波进行极化扭转,因此地板层形成的反射波为x极化。经过地板层反射的x极化波经过口径层之后,口径层会对入射的x极化波进行相位补偿和极化转换,从而形成x极化的透射平面波,实现增益的提高。因此为了将工作于X波段的法布里-佩罗天线和工作于Ka波段的折叠透射阵天线融合在一起,天线的口径层和地板层需要能够同时满足两种天线的功能要求。在这种情况下,如何设计不同频段下有着不同功能的口径层和地板层就成了一个关键性问题。

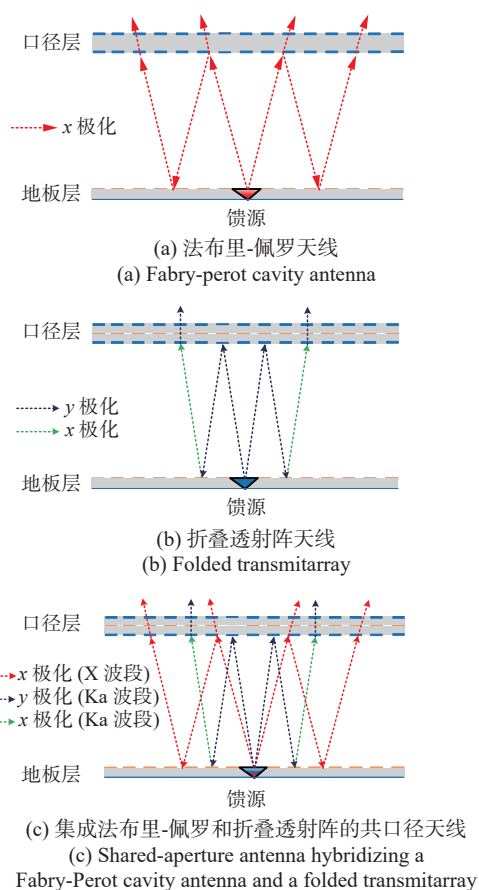


图1 不同天线工作机理

Fig. 1 Operating principle of different antennas

1.2 单元设计

图2给出了用于构成口径层的单元,该单元包括两块 Rogers RT/duroid 4003C 介质板、矩形金属条带、I字形的金属条带以及极化栅格。单元的大小为3.5 mm,介质板1的厚度为0.305 mm,介质板2的

厚度为 0.508 mm。为了将两块介质板紧密地固定在一起, 这里使用了厚度为 0.202 mm 的 Rogers RT/duroid 4450F 来粘合两块介质板。对于该结构, 下层的极化栅格能够起到极化选择的作用, x 极化的入射波可以通过栅格而 y 极化的入射波则被阻挡。上层的矩形金属条带, 通过调整其长度, x 极化的入射波可以激发矩形金属条带在高频段的谐振, 其作用类似于带阻滤波器。这意味着在高频段, 矩形金属条带可以阻挡 x 极化的入射波, 而 y 极化的入射波则可以通过金属条带。中间层的 I 字形的金属条带属于一种各向异性材料, 当其谐振时, 对于 x 极化的入射波、透射波和反射波既会包含 x 极化分量同时也会包含 y 极化分量。因此, 该单元在高频段的功能类似于传统的透射型法布里-佩罗极化器, 能够高效率地将 x 极化的入射波转换成 y 极化的透射波。并且, 通过改变 I 字形金属条带的展开角度, 透射波的相位也能够得到有效的调节。

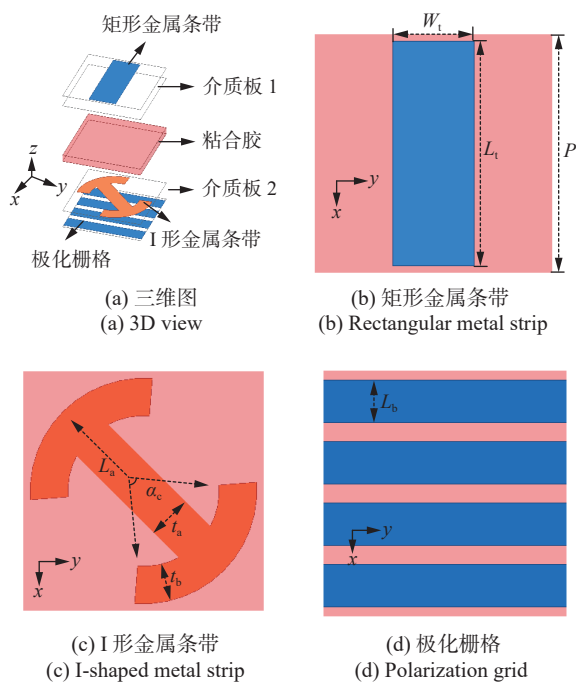


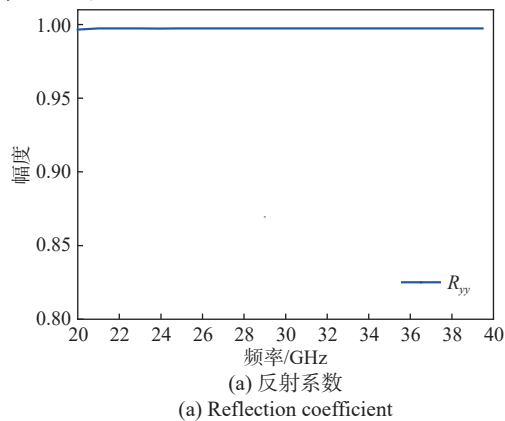
图 2 用于构成口径层的单元

Fig. 2 Unit cell constituting the aperture layer

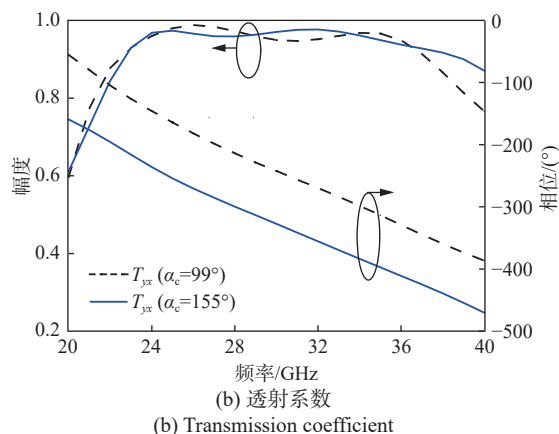
图 3(a) 和 (b) 给出了该单元在高频段的反射系数和透射系数。通过仿真结果可以看出, 该单元在 20~40 GHz 的频段内都能够阻挡 y 极化的入射波, 将其反射回来。对于 x 极化的入射波, 该单元能够高效率地将 x 极化的入射波转换成 y 极化的透射波, 且在 24~40 GHz 频段内 T_{yx} 的幅值大于 0.9。并且, 如图 3(b) 所示, 通过调整金属条带的展开角度 ($\alpha_c=99^\circ$ 和 $\alpha_c=155^\circ$), 透射的 y 极化能够具有 2 种相差 90° 的相位状态。通过进一步将单元旋转 90° , 就可以实现 4 种相位状态 ($0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$)。在低频

段, 该单元的电尺寸变得很小, 在 9 GHz 时的大小接近十分之一波长。因此, I 字形的金属条带和矩形金属条带在低频段远远偏离了其谐振频率。在这种情况下, 当 x 极化的入射波通过该单元时, 其极化不再发生扭转, 并且一部分能量会被金属条带反射回来。因此, 该单元在低频段可以被用作部分反射表面。图 4 给出了该单元在低频段的反射系数。通过仿真结果可以看出, $\alpha_c=155^\circ$, x 极化入射波的反射幅度在 9 GHz 时为 0.82, 并且当金属条带的展开角度改变时, 该单元在低频段对电磁波的响应能够保持稳定。综上所述, 该单元适合用于构成法布里-佩罗天线和折叠透射阵共口径天线的口径层。

如前所述, 在本设计中, 地板层在低波段需要能够实现入射波的全反射; 在高波段, 下表面在反射入射波的同时也需要将波的极化进行 90° 扭转。为了满足上述要求, 我们在本设计中使用反射型极化器作为用于构建地板层的单元。图 5 给出了用于构成地板层的单元结构, 其由金属条带、介质板以及反射板组成。其中金属条带位于介质基板的上表面, 而反射板位于介质基板的下表面。介质基板选用的是厚度为 1.524 mm 的 Rogers RT/duroid 4003C, 长宽均为 4 mm。



(a) 反射系数
(a) Reflection coefficient



(b) 透射系数
(b) Transmission coefficient

图 3 构成口径层的单元在高频段的仿真结果

Fig. 3 Simulated results of the unit cell constituting the aperture layer at the upper band

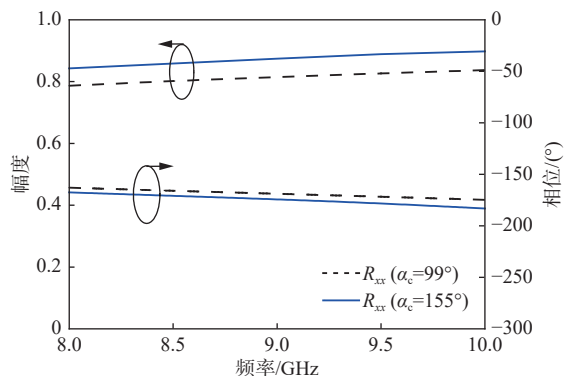


图4 构成口径层的单元在低频段的仿真结果

Fig. 4 Simulated results of the unit cell constituting the aperture layer at the lower band

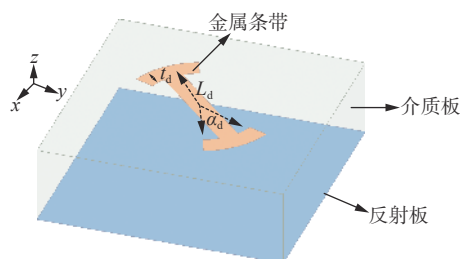


图5 用于构成地板层的单元

Fig. 5 Unit cell constituting the ground layer

图6和图7分别给出了该单元在高频段和低频段的反射系数。通过仿真结果可以看出:在高频段,在很宽的频带范围内, y 极化的入射波都能够被有效地转化为 x 极化的反射波;在低频段, x 极化的入射波能够以相同的极化被反射回来,有着接近1的反射幅度,9 GHz时的反射相位约为 138° 。因此,该单元能够满足地板层的设计要求,可以用于构建该共口径天线的地板层。

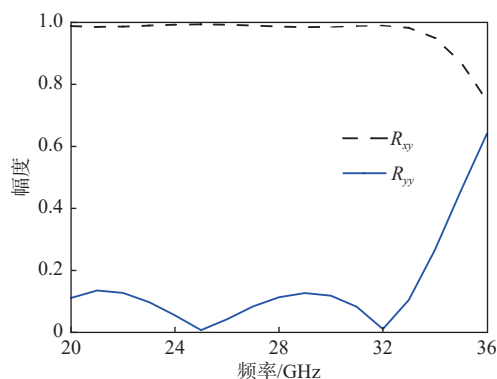


图6 构成地板层的单元在高频段的仿真结果

Fig. 6 Simulated result of the unit cell constituting the ground layer at the upper band

这里值得指出的是,用于构建口径层的单元的极化转换效率低于地板层的单元。主要原因如下:

对于口径层单元, x 极化入射波会形成4种形式的散射波,包括 T_{yx} , T_{xx} , R_{yx} 以及 R_{xx} ;而地板层单元由于反射板的存在, y 极化入射波只会存在2种形式的散射波,包括 R_{yy} 以及 R_{yy} 。因此反射型极化器的极化转换效率通常高于透射型极化器。

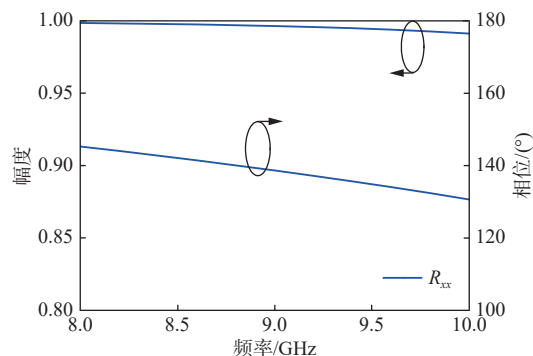


图7 构成地板层的单元在低频段的仿真结果

Fig. 7 Simulated result of the unit cell constituting the ground layer at the lower band

1.3 共口径天线设计

在完成用于口径层和地板层的单元设计后,需要进行共口径天线的设计。图8给出了共口径天线的结构示意图,天线的口径大小为84 mm。为了满足法布里-佩罗天线的谐振条件,根据口径层和地板层的仿真相位结果,口径层和地板层之间的距离被确定为16.1 mm。为了完成对共口径天线的馈电,我们使用了两个贴片天线来激励法布里-佩罗天线和一个3D打印的喇叭天线来激励折叠透射阵天线,贴片天线和喇叭天线被集成于地板层。贴片天线的长度和宽度分别为8 mm和8.5 mm,馈电点与贴片中心的距离为2 mm,两个贴片天线之间的距离为48 mm。喇叭天线的口径大小为10.9 mm×5.5 mm,馈电端口的尺寸为8.64 mm×4.32 mm。根据空间相位补偿激励,我们计算了折叠透射阵天线所需的补偿相位,然后再将其集散到2 bit状态,最终得到口径层的补偿相位如图9所示。

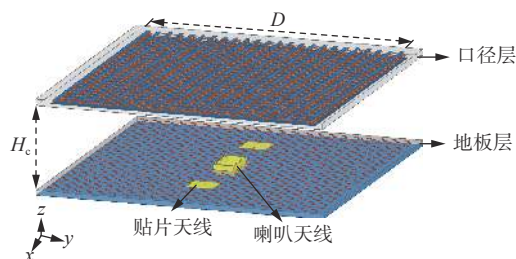


图8 共口径天线结构图

Fig. 8 Configuration of the shared-aperture antenna

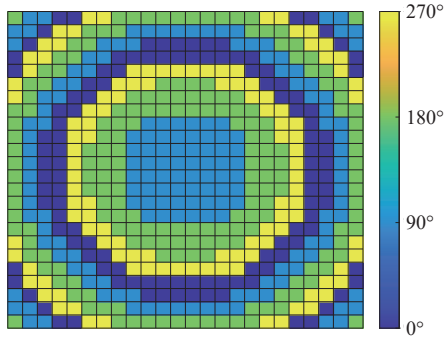


图 9 口径层的相位分布

Fig. 9 Phase distribution on the aperture layer

2 仿真与测试结果分析

为了验证天线的性能,我们对天线进行了仿真与实验测试,天线的实物图如图 10 所示。天线的具体尺寸为 $L_t = 3.3$ mm, $W_t = 1.2$ mm, $L_a = 1.65$ mm, $t_a = 0.65$ mm, $t_b = 0.55$ mm, $L_b = 0.6$ mm, $L_d = 1.6$ mm, $t_d = 0.4$ mm, $\alpha_d = 50^\circ$, $D = 84$ mm, $H_c = 16.1$ mm, $\alpha_c = 99^\circ/155^\circ$ 。

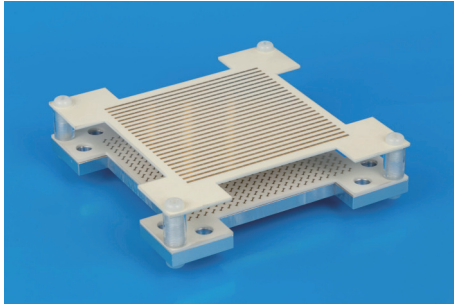
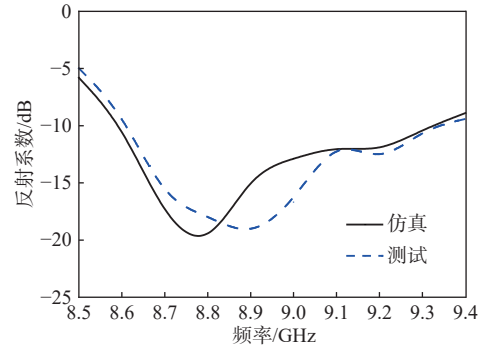


图 10 天线加工实物图

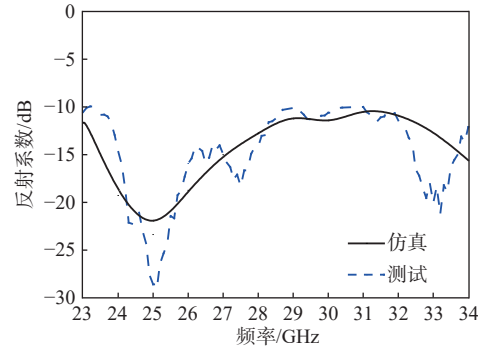
Fig. 10 Photograph of the antenna prototype

天线的反射系数通过德科技矢量网络分析仪进行测试,天线在低频段的增益和方向图采用 SATIMO 测试系统进行测试,在高频段的增益和方向图采用紧缩场进行测试。图 11、图 12 和图 13 分别给出了天线仿真和测试的反射系数、增益和方向图。可以看出,天线在两个频段的实测阻抗带宽(反射系数 ≤ -10 dB)分别为 8.62~9.35 GHz 和 23~34 GHz,仿真结果与实测结果的吻合度良好。天线在低频段的实测最大增益为 15.5 dBi,在高频段的实测最大增益为 23.1 dBi,两个频段的 3-dB 增益带宽分别为 8.55~9.35 GHz 和 24~34 GHz。因此,天线在低频段和高频段分别实现了 8.62~9.35 GHz 和 24~34 GHz 的有效带宽(反射系数 ≤ -10 dB,增益变化 ≤ 3 dB)。如图 13 所示,该共口径天线在两个频段都能够实现高定向性波束,且低频段的实测旁瓣水平低于 -15 dB,高频段的实测旁瓣水平低于 -12 dB。



(a) 低频段

(a) Lower band

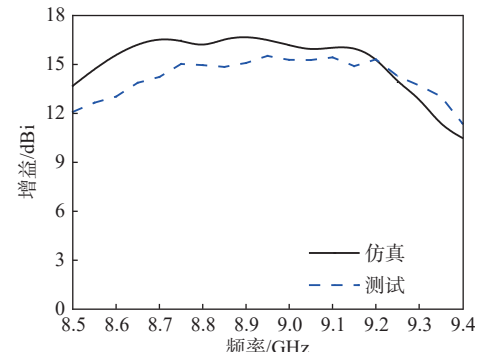


(b) 高频段

(b) Upper band

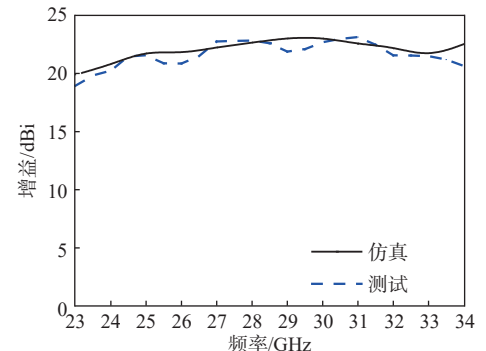
图 11 仿真和实测的天线反射系数

Fig. 11 Simulated and measured reflection coefficients of the proposed antenna



(a) 低频段

(a) Lower band



(b) 高频段

(b) Upper band

图 12 仿真和实测的天线增益

Fig. 12 Simulated and measured gains of the proposed antenna

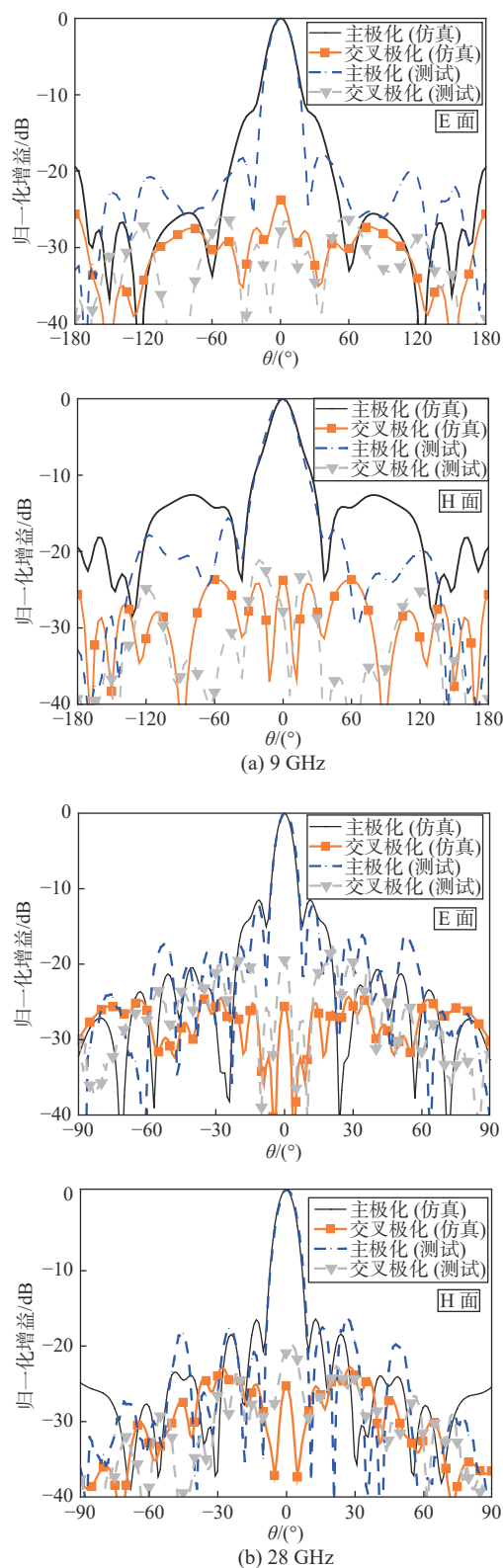


图 13 在 9 GHz 和 28 GHz 仿真和实测的天线方向图
Fig. 13 Simulated and measured radiation patterns of the proposed antenna at 9 GHz and 28 GHz

表 1 给出了本文天线与其他文献天线的对比,可以看出本工作在带宽方面有着明显优势。

表 1 本文天线与其他文献天线性能对比

Tab. 1 Comparison among the proposed and other reported works			
文献	频率比	带宽/%	增益/dBi
[11]	1:9.3	3.3	15.0
		7.1	20.4
[12]	1:1.5	3.0	13.7
		4.0	16.8
本文	1:3.2	8.1	15.5
		34.5	23.1

3 结 论

本文提出了一种双频高增益共口径天线,通过将工作于 X 波段的法布里-佩罗天线和工作于 Ka 波段的折叠透射阵天线融合于同一结构中,实现了 100% 的口径复用效率。对天线进行了加工测试,测试结果表明天线可以工作于 8.62~9.35 GHz 和 24~34 GHz 这两个频段,两个频段的峰值增益分别为 15.5 dBi 和 23.1 dBi。由于宽带高增益的优点以及 100% 的口径复用效率,本文所提出的天线在未来的无线系统中有着很好的应用前景。

参考文献

[1] ZHANG J F, CHENG Y J, DING Y R, et al. 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*, 2018, 67(2): 853-860.

[2] 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.

[3] TONG C, YANG B, HUANG X, et al. Compact shared-aperture slot/DR antenna with large frequency ratio[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2023, 22(5): 1119-1123.

[4] DENG Q J, PAN Y M, LIU X Y, et al. 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.

[5] CHENG Y, DONG Y. Dual-broadband dual-polarized shared-aperture magnetoelectric dipole antenna for 5G applications[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2021, 69(11): 7918-7923.

[6] MAO C X, GAO S, WANG Y, et al. Dual-band circularly polarized shared-aperture array for C-/ X-band satellite communications[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2017, 65(10): 5171-5178.

- [7] ZHANG J D, WU W, FANG D G. Dual-band and dual-circularly polarized shared-aperture array antennas with single-layer substrate[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2015, 64(1): 109-116.
- [8] LIU Z. Fabry-Perot resonator antenna[J]. *Journal of infrared, millimeter, and Terahertz waves*, 2010, 31: 391-403.
- [9] ABDELRAHMAN A H, YANG F, ELSHERBENI A Z, et al. Analysis and design of transmitarray antennas[M]. San Francisco: Morgan & Claypool, 2017.
- [10] NAYERI P, YANG F, ELSHERBENI A Z. Reflectarray antennas: theory, designs, and applications[M]. John Wiley & Sons, 2018.
- [11] ZHU J, YANG Y, LIAO S, et al. 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.
- [12] LIU Z G, YIN R J, YING Z N, et al. Dual-band and shared-aperture Fabry-Pérot cavity antenna[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2021, 20(9): 1686-1690.
- [13] ZHU J, YANG Y, LI M, et al. Additively manufactured millimeter-wave dual-band single-polarization shared aperture Fresnel zone plate metalens antenna[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2021, 69(10): 6261-6272.

作者简介

高帅 (1994—), 男, 香港城市大学在读博士研究生, 研究方向为共口径天线、透射阵、反射阵。E-mail: shuaigao2-c@my.cityu.edu.hk

黄衡 (1976—), 男, 香港城市大学电机工程系教授, 太赫兹及毫米波国家重点实验室副主任, 应用电磁学实验室主任, 美国斯坦福大学/英国伦敦大学学院/加拿大滑铁卢大学和法国里昂大学访问学者, 在国际期刊和会议发表学术论文 200 多篇, 2 本天线专著的合著作者, 已获 20 项中国和美国天线专利。研究方向为可重构天线, 卫星天线, 毫米波太赫兹技术, 3D 打印天线, 功能性材料在天线设计中的应用等。E-mail: hang.wong@cityu.edu.hk