



基于波导结构的紧凑型电介质加载双极化天线研究

摘要

本文提出了一款基于波导结构的紧凑型电介质加载双极化天线.通过采用在传统波导内加载电介质材料的方法,可以有效减小波导尺寸,从而达到天线小型化的目的.针对波导结构口径天线高后瓣辐射的问题,本文提出了一种在波导金属壁上添加矩形槽孔的方法,该方法的原理不同于扼流环结构.相比之下,矩形槽孔具有结构简单、尺寸小、加工方便等优点.通过电磁场全波仿真分析,可以发现所提出的天线具有阻抗带宽宽(大于40%)、增益高(8.6 ± 0.6 dBi)、辐射性能稳定等优点,有很大的潜力,可以应用在如卫星通信等X波段的各种应用场景中.

关键词

小型化天线;波导结构;电介质加载;双极化;低后瓣辐射

中图分类号 TN823

文献标志码 A

收稿日期 2018-11-29

资助项目 华南理工大学人才队伍建设经费(2018)

作者简介

马自龙,男,博士,副教授,研究方向为天线理论与设计.mazilong@scut.edu.cn

¹ 华南理工大学 电子与信息学院,广州,510641

0 引言

波导结构以其优良、稳定的电气性能,在微波、毫米波甚至太赫兹频段都有着非常广泛的应用.传统的波导结构通常为空气填充的电磁波传输结构,虽然有诸如电磁损耗小、功率密度高等很多优点,但是其往往具有较大的尺寸.当波导结构应用于天线设计时,较大物理尺寸的弊端尤为明显.因此,波导结构天线的小型化问题一直以来都是各国学者研究的热点.基于波导结构的天线种类有很多,其中一种广泛应用的结构是利用开口波导做成的端射型口径天线,它们通常是以行波的形式向外辐射电磁能量.针对不同的应用场景,有线极化、圆极化等不同功能的设计^[1-2].

在对各种电路组件集成度要求越来越高的今天,通过利用基片集成波导技术,我们可以实现波导结构的平面化.基于开口波导的口径天线也同样可以通过印刷电路板的形式设计在不同的PCB板材上.文献[3-6]提出了几款H面平面喇叭天线的设计,它们具有尺寸小、剖面低、带宽宽、增益高等特点,可以很好地集成于PCB板上.虽然具备高集成度的平面结构具有很大的优势,但是对于端射型平面口径天线,狭窄的设计空间同时也限制了其实现双极化、圆极化等功能.与此同时,波导结构的口径天线往往存在高后瓣辐射的问题,在已发表的文献中,大部分天线都采用了扼流环结构来压制天线的后向辐射^[7-11].

本文提出了一款基于波导结构的紧凑型电介质加载双极化天线.该天线通过加载电介质材料来实现天线结构的小型化^[12].通过采用正方形截面的波导结构以及两对差分输入端来激励两个正交的波导基模(TE_{10} 和 TE_{01} 模),以此实现天线的双极化功能.对于端射型口径天线普遍存在的高后瓣辐射问题,本文提出了在波导四壁分别添加四个矩形槽孔的解决方法.通过全波仿真软件Ansys HFSS分析发现,该方法可以在不影响天线性能的前提下,有效地减少天线的后向辐射.该天线具有阻抗带宽宽、增益高、辐射性能稳定等优点.两对差分端口之间具有很高的隔离度,相较于业内领先水平^[13]具有不俗的表现.该天线有很大的潜力可以应用在如卫星通信等X波段的各种应用场景中.

1 天线结构及工作原理

1.1 天线结构

本文所提出的基于波导结构的电介质加载双极化天线结构如图

1 所示.图 1 中,灰色的部分为所加载的电介质材料 Teflon,其介电常数为 2.1,电介质损耗正切为 0.001.如我们所知,通过加载电介质材料可以使电磁波的导波波长变小,进而减小天线的物理尺寸,而电介质材料的介电常数越高,导波波长越短.本文以 Teflon 材料为例来证明实验构想的可行性.在具体的使用场景中,可按需更改电介质材料以满足设计需求.图 1 中黄色的部分为波导结构,其材质为金属铜.由图 1 可以看出,所提出的天线由一段填充了电介质材料的正方形截面矩形波导和顶部的锥形电介质结构组成.在矩形波导四壁靠近开口处的地方有四个矩形槽孔,这些槽孔可用来减小天线的后瓣辐射.在波导四壁靠下的位置,有四个开孔用来放置馈电探针.该天线由两对差分端口进行馈电,按逆时针方向,四个天线端口分别标注为 Port1⁺, Port2⁺, Port1⁻, Port2⁻.

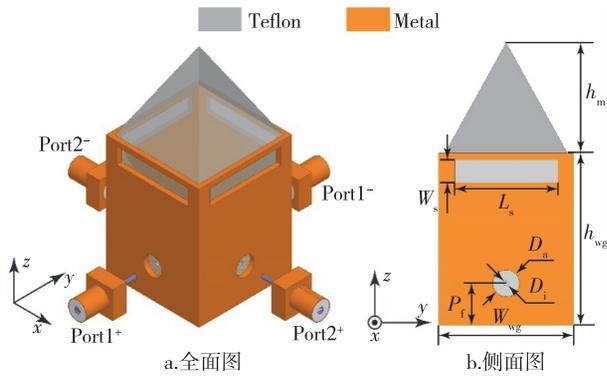


图 1 基于波导结构的电介质加载双极化天线结构示意图
Fig. 1 Antenna configuration of the proposed dielectric loaded dual-polarized waveguide antenna

1.2 馈电网络

如图 2 所示,首先可以去掉天线的上半部分,将馈电网络单独拿出来设计.在波导的开口处,可以人为地添加一个波端口 Port3,以假设波导内所激励起

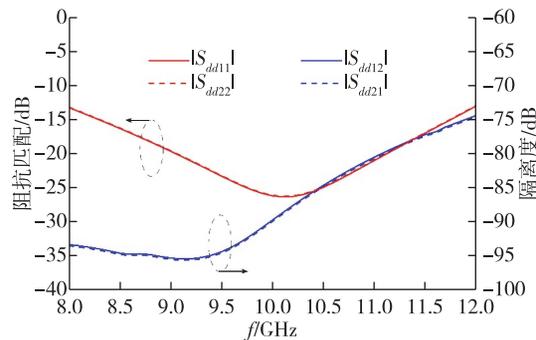
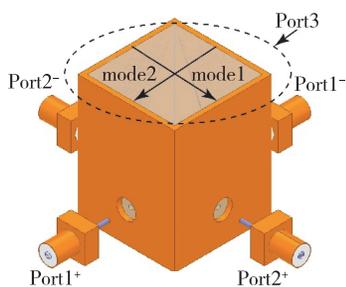


图 2 天线馈电网络的 S 参数

Fig. 2 The S-parameters of the feeding network of the proposed antenna

来的电磁波都由天线完全辐射至外界.为了适应两种不同的极化方式,Port3 需设有两个正交的线极化模式 mode1 和 mode2.Port3 可以完全吸收波导内激励起来的电磁波.通过不断调整馈电点的位置以及探针的尺寸,最终可以使馈电网络完全匹配至 -10 dB 以下.优化好的馈电网络的 S 参数如图 2 所示.可以看出两个差分端口具有相同的阻抗匹配特性,同时,两个端口之间具有很高的隔离度.差分端口的 S 参数可由如下公式计算:

$$S_{dd11} = \frac{1}{2}(S_{11} - S_{12} - S_{21} + S_{22}), \quad (1)$$

$$S_{dd22} = \frac{1}{2}(S_{33} - S_{34} - S_{43} + S_{44}), \quad (2)$$

$$S_{dd21} = \frac{1}{2}(S_{31} - S_{41} - S_{32} + S_{42}), \quad (3)$$

$$S_{dd12} = \frac{1}{2}(S_{13} - S_{14} - S_{23} + S_{24}). \quad (4)$$

1.3 顶端锥形电介质

天线顶端的锥形电介质结构主要是用来调整天线的阻抗匹配.由图 3 可以看出:当没有锥形电介质结构时,天线的阻抗匹配情况很差,在工作频段内 $|S_{dd11}|$ 大部分集中在 -6 dB 左右.随着锥形结构高度的不断增加,阻抗匹配情况越来越好,最终可以实现 8~12 GHz 频段内 $|S_{dd11}| < -10$ dB.

1.4 金属壁上的矩形槽孔

波导四个金属壁上的矩形槽孔主要用来减小天线的后瓣辐射.研究表明,此类天线的后向辐射主要是由于表面波沿波导外壁传播并辐射导致的.前文中所提到的扼流环结构是一种具有类似陷波功能的结构,它可以有效地阻止表面波的传播,从而减少后向的辐射.与此原理不同,本文中提出的矩形槽孔其工作原理类似于磁偶极子.当幅度和相位合适时,其

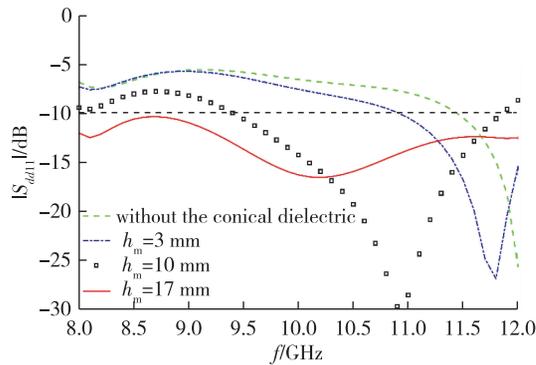


图3 不同锥形电介质高度 h_m 下的 $|S_{dd11}|$

Fig. 3 $|S_{dd11}|$ with various conical dielectric heights h_m

辐射的电磁波可与天线后向辐射的电磁波互相抵消,进而减小方向图后瓣.图4给出了当 Port1 激励时波导壁上的表面电流分布.可以看出垂直于 y 轴的两个波导壁上电流方向垂直于槽孔,形成磁偶极子.与此同时,在平行于 y 轴的两个壁上电流方向与

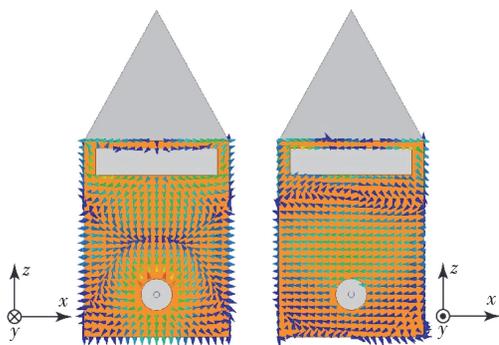


图4 Port1 激励时波导壁上的表面电流分布

Fig. 4 Surface current distributions on the waveguide walls when Port1 is excited

槽孔方向平行,因此这两个槽孔并不影响天线的辐射特性.当固定的某一极化模式工作时,四个槽孔中仅有两个形成磁偶极子来抵消方向图后瓣.

图5给出了天线辐射性能在有矩形槽孔的情况下的对比.可以看出,没有槽孔时天线方向图有很大的后瓣.当添加了四个槽孔后,方向图后瓣有很大的改善,同时,前后比数值在中心频率附近也有很大的提升.在 10 GHz 左右,方向图的前后比可以达到 38 dB 左右.

2 天线性能

通过上述分析以及仿真优化,可以得到优化后的天线的最终尺寸参数,如表1所示.

表1 天线尺寸参数

Table 1 Antenna parameters							mm
h_m	W_s	L_s	h_{wg}	W_{wg}	D_o	D_i	P_f
17	3.5	16	25.5	19	4.2	0.8	5.5

由于本文所提出的天线设计具有完全对称的结构,因此在进行全波仿真分析时,可以适当应用对称边界条件以减少计算量和提高仿真速度.在仿真中应用了对称边界条件之后,仅需求解完整结构的 1/4 即可.

2.1 阻抗匹配以及端口隔离度

如图6所示,所提出的天线具有很好的阻抗匹配特性.在整个 X 频段, $|S_{dd11}|$ 和 $|S_{dd22}|$ 基本相同且均小于 -10 dB.与此同时,两个端口之间的隔离度情况也非常良好, $|S_{dd12}|$ 和 $|S_{dd21}|$ 基本相同且均小于 -75 dB.

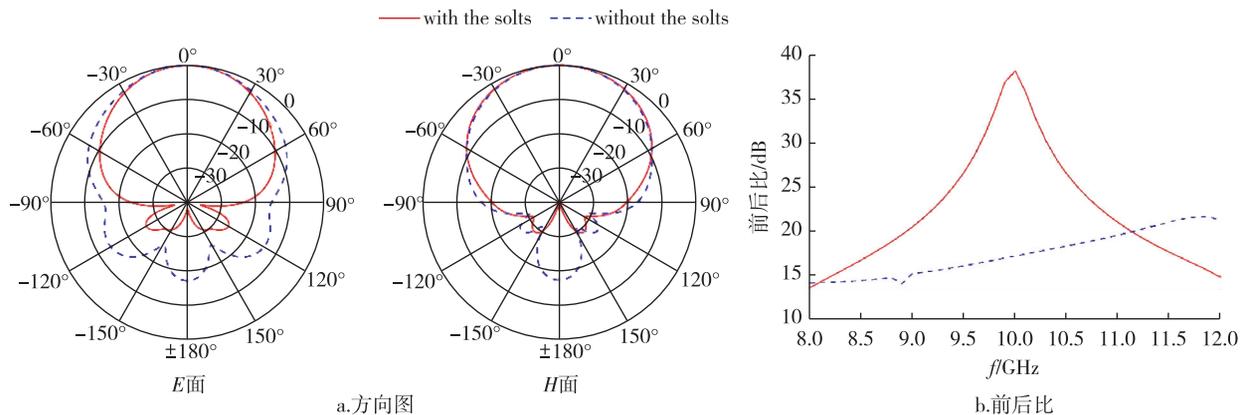


图5 有无矩形槽孔时的天线辐射性能对比

Fig. 5 Comparisons of radiation performance with or without the rectangular slots

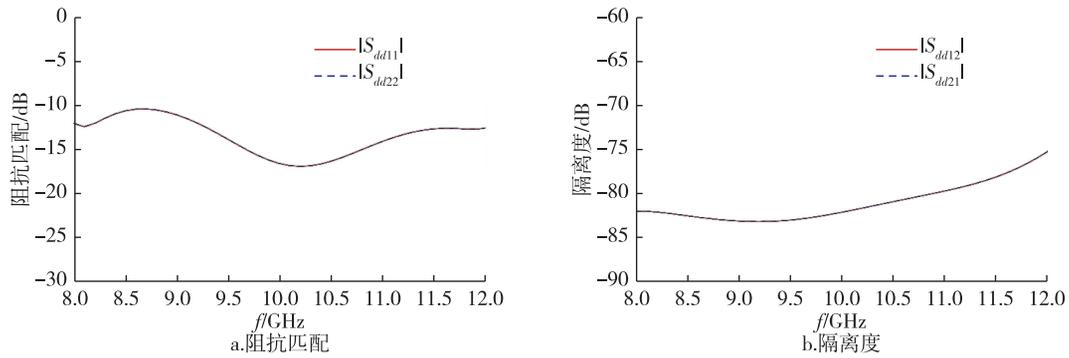


图6 天线的S参数

Fig. 6 The S-parameters of the proposed antenna

2.2 天线方向图

由于该天线的结构完全对称,所以在方向图分析中仅需考虑一种极化方式的辐射特性即可,即当Port1激励时的方向图特性,另外一种与其正交的极化方式应具有完全相同的结果.图7给出了天线在Port1激励时在9、10以及11 GHz时的方向图特性.可以看出,该天线具有相对稳定的方向图,同时具有较小的后瓣辐射.

2.3 天线增益

天线的增益特性在图8中给出.可以看出该天线在工作频段内具有非常稳定的增益曲线.其增益

最高值为9.2 dBi,最低值为8.0 dBi,在整个X波段,增益波动仅为1.2 dBi.

3 天线设计步骤

经过以上的分析讨论,该天线的设计步骤可以总结如下:

- 1) 确定天线工作频段以及电介质材料特性.
- 2) 根据波导结构的截止频率确定其物理尺寸,确保天线工作在基础模式(TE_{10} 和 TE_{01} 模).
- 3) 根据波导尺寸设计双极化馈电网络.
- 4) 根据阻抗匹配情况确定锥形电介质结构的

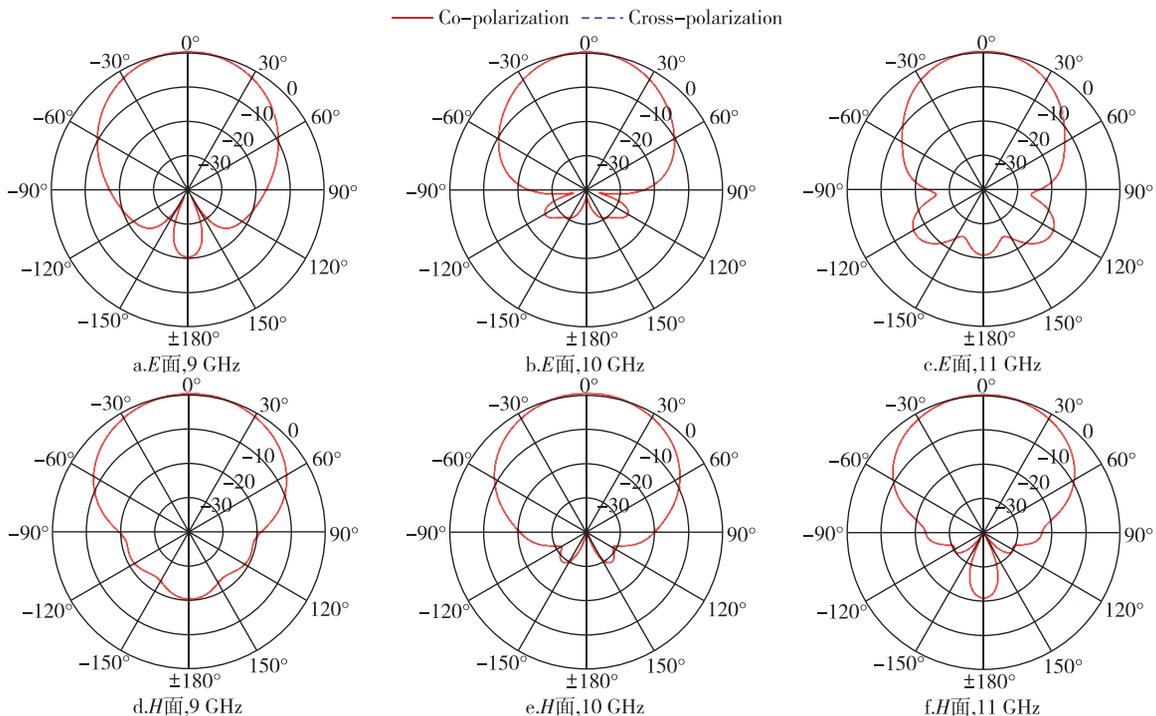


图7 当Port1激励时天线在9、10以及11 GHz时的方向图

Fig. 7 Radiation patterns at 9, 10 and 11 GHz, when Port1 is excited

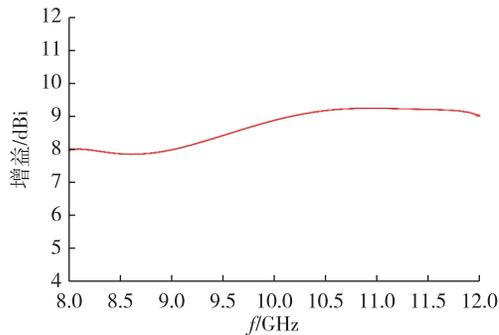
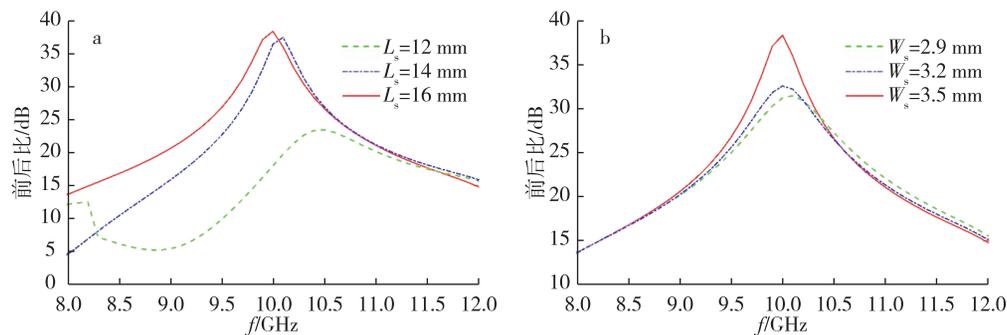


图8 天线增益

Fig. 8 Antenna gain

图9 方向图前后比随槽孔(a)长 L_s 、(b)宽 W_s 变化的情况Fig. 9 Front to back ratios with various (a) L_s and (b) W_s

尺寸。

5)通过调整四个槽孔的长宽尺寸来达到最优的前后比结果.这一步可以根据图9所示的曲线变化规律进行微调。

4 结束语

本文提出并讨论了一款结构紧凑的基于波导结构的电介质加载双极化天线.该天线具有较小的物理尺寸以及低后瓣辐射特性.与此同时,该天线还具有阻抗带宽宽、增益高、方向图稳定等优良的电气性能,可以将它应用于X波段的各种应用场景中。

参考文献

References

- [1] Balanis C A. Antenna theory: analysis and design [M]. 2nd ed. New York: Wiley, 1996
- [2] Gao S, Luo Q, Zhu F. Circularly polarized antennas [M]. Hoboken-Piscataway, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2013
- [3] Esquis-Morote M, Fuchs B, Zurcher J F, et al. A printed transition for matching improvement of SIW horn antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(4): 1923-1930
- [4] Wang L, Yin X X, Li S L, et al. Phase corrected substrate integrated waveguide H -plane horn antenna with embedded metal-via arrays [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(4): 1854-1861
- [5] Bayat-Makou N, Kishk A A. Cavity matching of high dielectric constant SIW H -Plane horn antenna [C] // IEEE International Symposium on Antennas & Propagation & Usnc/ursi National Radio Science Meeting. IEEE, 2015: 850-851
- [6] Esquis-Morote M, Fuchs B, Zurcher J F, et al. Novel thin and compact H -plane SIW horn antenna [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(6): 2911-2920
- [7] Qudrat-E-maula M, Shafai L, Pour Z A. Investigation of circular waveguide reflector feeds loaded with shaped dielectric rods [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2015, 57(7): 1568-1573
- [8] Steshenko S, Kirilenko A A, Boriskin A, et al. Advanced modeling of shaped-beam choke ring antennas for mm-wave applications [C] // European Conference on Antennas & Propagation. IEEE, 2012: 650-654
- [9] Galvan J, Colantonio D. Low back radiation compact antenna for data downlink in LEO satellites [C] // Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2009 SBMO/IEEE MTT-S International. IEEE, 2009: 816-820
- [10] Pour A Z, Shafai L. A ring choke excited compact dual-mode circular waveguide feed for offset reflector antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(6): 3011-3015
- [11] Steshenko S, Kirilenko A A, Boriskin A V, et al. H -plane radiation patterns of rectangular waveguide aperture with a corrugated flange [C] // International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, 2013: 476-479
- [12] Olver A D, Clarricoats P J B, Raghavan K. Dielectric cone loaded horn antennas [J]. IEE Proceedings H-Microwaves, Antennas and Propagation, 1988, 135(3): 158-162
- [13] 赵宇, 冯文杰, 车文荃. 基于耦合线的高隔离度三频分支线耦合器 [J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2017, 9(1): 97-100

ZHAO Yu, FENG Wenjie, CHE Wenquan. Tri-band branch line coupler with high isolation using coupled lines[J]. Journal of Nanjing University of Information

Science and Technology (Natural Science Edition), 2017,9(1):97-100

A compact dielectric dual-polarized waveguide antenna

MA Zilong¹ CHU Qingxin¹

¹ School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641

Abstract This study proposes a novel compact dielectric dual-polarized waveguide antenna. By using dielectric materials, the physical dimensions of conventional air-filled waveguides can be effectively reduced. To mitigate strong back-lobe radiation, this study proposes a method of designing rectangular slots on waveguide walls, the operating principles of which are similar to that of choke-ring structures. Compared to choke rings, the proposed rectangular slots exhibit several advantages; they have a simple structure and compact size and are easy to fabricate. Through full-wave simulation analyses, the proposed antenna was found to operate at a wide impedance bandwidth greater than 40% and exhibited a high gain of 8.6 ± 0.6 dBi; it also demonstrated stable radiation performance over the operating bandwidth. These advantages imply that the proposed antenna can be used for various applications in X-band frequencies, such as satellite communication.

Key words compact size; waveguide structure; dielectric; dual-polarization; low back-lobe