

文章编号: 1671-7449(2025)01-0041-05

一种V波段SIW插槽嵌套喇叭天线的设计

田学良^{1,2}, 苏新彦^{1,2*}, 王黎明^{1,2}, 李璇^{1,2}, 武国强³, 马文⁴

(1. 中北大学 信息与通信工程学院, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 信息探测与处理山西省重点实验室, 山西 太原 030051;

3. 太原重工股份有限公司, 山西 太原 030024; 4. 山西太重数智科技股份有限公司, 山西 太原 030025)

摘要: 针对传统毫米波雷达体积大、带宽不足以及增益较低等问题, 设计了一种V波段基片集成波导(Substrate Integrated Waveguide, SIW)插槽嵌套喇叭天线。该天线将传统SIW结构进行喇叭状等效设计, 通过金属层插槽和喇叭嵌套的方式对天线的电磁辐射进行控制及优化。采用HFSS软件对天线的中心频率、带宽、增益、最大反射系数及尺寸进行了仿真验证实验。结果表明, 所设计天线中心频率为60 GHz, 阻抗带宽为14.5 GHz, 最大反射系数为-37.03 dB, 增益为9.78 dBi, 且天线的尺寸较小, 为35 mm×10.2 mm×1.88 mm。

关键词: 毫米波; 基片集成波导(SIW); 嵌套喇叭; 阻抗带宽; 增益

中图分类号: TN822 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/csjs.1671-7449.2025007

引用格式: 田学良, 苏新彦, 王黎明, 等. 一种V波段SIW插槽嵌套喇叭天线的设计[J]. 测试技术学报, 2025, 39(1): 41-45.

TIAN Xueliang, SU Xinyan, WANG Liming, et al. Design of a V-Band SIW slot nested horn antenna[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(1): 41-45.

Design of A V-Band SIW Slot Nested Horn Antenna

TIAN Xueliang^{1,2}, SU Xinyan^{1,2*}, WANG Liming^{1,2}, LI Xuan^{1,2}, WU Guoqiang³, MA Wen⁴

(1. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Shanxi Key Laboratory of Signal Capturing and Processing, North University of China, Taiyuan 030051, China;

3. Taiyuan Heavy Industry Co., Ltd., Taiyuan 030024, China;

4. Shanxi Taizhong Digitization & Intelligence Technology Co., Ltd., Taiyuan 030025, China)

Abstract: Aiming at the problems of large size, insufficient bandwidth and low gain of traditional millimeter wave radar, a V-band substrate integrated waveguide(SIW) slot nested horn antenna is designed. The antenna is realized by equivalent the traditional SIW structure into a horn shape, and the electromagnetic radiation of the antenna is controlled and optimized by the design of metal layer slots and horn nesting. The center frequency, bandwidth, gain, maximum reflection coefficient and size of the antenna are designed by using HFSS software. The results show that the center frequency of the designed antenna is 60 GHz, the impedance bandwidth is 14.5 GHz, the maximum reflection coefficient is -37.03 dB, the gain of the antenna is 9.78 dBi, and the antenna size is small, 35 mm×10.2 mm×1.88 mm.

Key words: millimeter wave; substrate integrated waveguide(SIW); nested horn; impedance bandwidth; transmission gain

收稿日期: 2024-04-09

基金项目: 2022年山西省应用基础研究计划资助项目(202203021212123); 省部共建动态测试技术国家重点实验室开放研究基金资助项目(2022-SYSJJ-08); 山西省重点研发计划资助项目(202202110401015)

作者简介: 田学良(1999-), 男, 硕士生, 主要从事无线通信、多目视觉测量研究。E-mail: tianxueliang99@163.com。

* 通信作者: 苏新彦(1966-), 女, 副教授, 博士, 主要从事目标信息获取和处理技术、电磁兼容等研究。E-mail: su_xy@nuc.edu.cn。

0 引言

24、77和60 GHz是目前毫米波雷达使用的主要频段,而欧洲电信标准化协会和美国联邦通信委员会制定的频谱法规和标准规定,从2022年1月1日起,欧洲和美国将不再允许将24 GHz的超宽带用于工业用途。同时,中国工信部发布的《汽车雷达无线电管理暂行条例(草案)》对76~79 GHz频段的使用作出了限制,规定该频段仅限于汽车雷达使用,限制了其他地面雷达的应用,预计其他地区也将实施类似的规定。所以,60 GHz将成为雷达传感器在全球工业场景中的最佳选择,采用此频段的传感器能够收集丰富且精度很高的点云数据。

Ramesh等^[1]于2015年提出了一种利用介质加载指数型锥形槽天线,该天线带宽为3.64 GHz,增益为6.45 dBi,其带宽和增益相对如今高速发展的雷达技术来说,已经很难满足其性能要求。Shanmuganatham等^[2]于2021年提出了一种树形缝隙的基片集成波导(Substrate Integrated Waveguide, SIW)天线,该天线仿真增益达到7.46 dBi,带宽为9.7 GHz,同Ramesh等设计的天线相比,该天线增益及带宽各项性能指标都有一定的进展。而更新更优的SIW天线是由Spurek等于2022年提出的一种基于SIW的60 GHz 5G频段圆极化天线阵列^[3],其天线体积为31 mm×18.732 mm×1.88 mm,带宽为8.6 GHz,增益为13 dBi,该天线相对上述其他天线在增益性能方面有一定的优越性,但是该增益指标是以牺牲尺寸和带宽为前提满足的,窄带的天线无法保证中心频率附近电性能的稳定性^[4],因此设计一款高增益、宽带宽的天线以收集更精细且密集的点云数据成为当下亟待解决的问题。

本文设计了一种V波段SIW插槽嵌套喇叭天线,利用喇叭嵌套以及插槽结构,显著提高了天线的带宽及增益性能,可应用于高分辨率、高精度点云数据的采集与传输,进而实现更清晰准确的雷达成像。

1 SIW 插槽喇叭天线结构设计

1.1 SIW 嵌套喇叭结构设计

本文所设计天线采用传统矩形波导^[5],并运用矩形波导中 TE_{mn} 模下的最低次模式 TE_{10} 模^[6],结合矩形波导理论,通过式(1)和式(2)可得矩形波导的截止波长 λ_c 和截止频率 f_c 。

$$\lambda_c = \frac{2\pi}{k_c} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}}, \quad (1)$$

$$f_c = \frac{\nu}{\lambda_c} = \frac{\nu}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}, \quad (2)$$

式中: a 和 b 分别为矩形波导的长和宽; m 和 n 对应 TE_{mn} 模式; k_c 为截止波数,对应截止波长 λ_c 和截止频率 f_c ; ϵ 和 μ 分别为Rogers RT/duroid 5880的介电常数和磁导率。根据式(3)进一步计算矩形波导横截面的长 W_i 和宽 h ,

$$Z_e = \frac{h}{W_i} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_r}} \frac{\lambda_0}{\lambda_c}. \quad (3)$$

为保持天线的适配性,阻抗匹配一般取 50Ω 。因此,在SIW结构中,需要计算SIW金属通孔列宽 W_i 和金属通孔的间隙 S ,微带部分结合文献^[7]所提出的 $\frac{\lambda}{4}$ 锥形拐角,可以更好地将电磁波辐射进入SIW矩形波导中。所设计天线采用传统的矩形波导计算公式可得金属通孔的列宽 W_i ,其中孔径 d 和通孔间距 S 是SIW的重要参数,具体条件为 $d \leq \frac{\lambda_g}{5}$, $S \leq 2d$ 和 $d < 0.1 W_i$ ^[8], λ_g 为矩形波导的波长,因此, S 和 d 分别选择0.6 mm和0.3 mm以保持较低的辐射损失。SIW的宽度通过式(4)得出。

$$W_i = W_i + \frac{d^2}{0.95S}. \quad (4)$$

最终,天线通过微带线输入信号^[9],采用SIW通孔结构对电磁辐射进行控制,实现了矩形波导 TE_{10} 模式,其中,天线的SIW列宽取值3.383 mm,基板厚度 h 为1.22 mm,结构如图1所示。

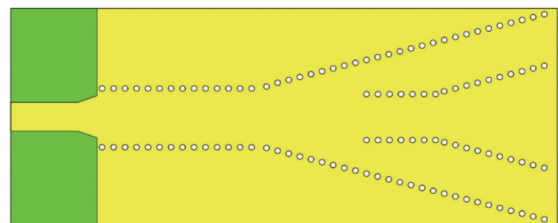


图1 嵌套喇叭结构

Fig. 1 Nested horn structure

1.2 天线插槽设计

由于矩形SIW具有和传统介质填充的矩形金属波导相似的传输特性,SIW插槽天线和传统金

属波导插槽天线的设计方法基本相同。但是由于 SIW 是靠印刷电路板 (Printed Circuit Board, PCB) 工艺^[10]制成,其厚度较薄,并且是通过金属化通孔来等效传统金属波导的窄边侧壁,因此,PCB 只能在 SIW 的上下两个宽边金属面开缝来实现辐射。本文采用 Rogers RT/duroid 5880 高频介质材料^[11]制作 SIW 天线,考虑到采用传统的 PCB 工艺进行加工,在基板顶部和底部印刷了厚为 $0.33\ \mu\text{m}$ 的金属铜进行电磁辐射^[12],最终设计得到如图 2 所示的 SIW 插槽嵌套喇叭天线。

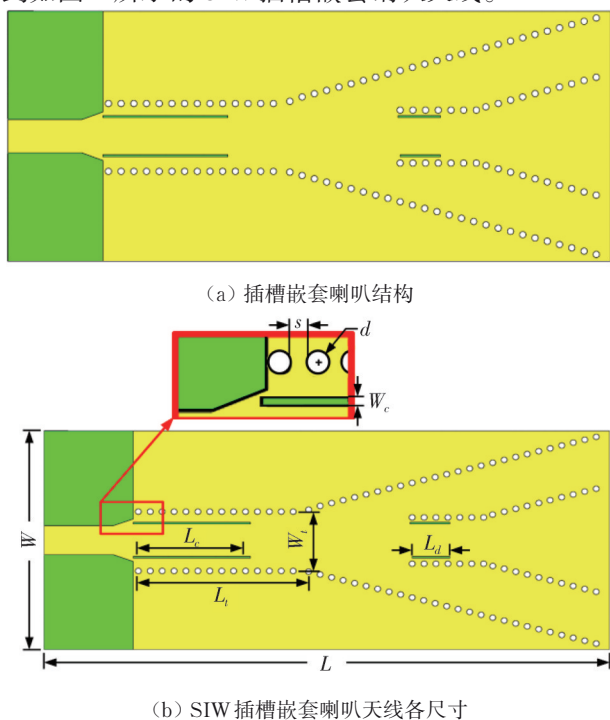


图 2 天线设计式样

Fig. 2 Antenna design pattern

1.3 插槽嵌套喇叭天线展宽带宽的机理

插槽嵌套的设计改变了天线内部的电磁场分布,通过精心设计插槽位置和形状可以实现对天线性能的精确控制。插槽的引入可以调整天线的阻抗特性,有助于天线在更宽的频率范围内实现阻抗匹配。插槽在天线内部引入特定的反射、折射和散射,这些物理过程对电磁场分布进行了有效的调整,从而使插槽嵌套喇叭天线能够在更宽的频率范围内保持较高的辐射效率和增益。插槽嵌套设计有助于减小喇叭口径尺寸,同时改善波束宽度和喇叭内介质与空气层的匹配,这意味着天线在保持较小尺寸的同时,能够获得更宽的波束覆盖和更好的辐射性能。归纳来说,插槽嵌套喇叭天线展宽带宽的机理在于通过优化天线结构设计和电磁场调控机制,改善天线的波束特性和阻抗匹配性能,从而实现在更宽的频率

范围内保持较高的辐射效率和增益。这种设计不仅提高了天线的性能,还为其在雷达、通信和卫星系统等领域的应用提供了更广阔的空间。

2 天线传输特性分析

经过上述两个阶段性设计过程,最终得到了天线的整体结构,本节将进一步对该天线各设计阶段性性能进行仿真分析,主要在谐振频率、阻抗带宽及最大反射系数方面进行对比阐述。图 3 分别为主要结构的设计对天线核心指标的影响。

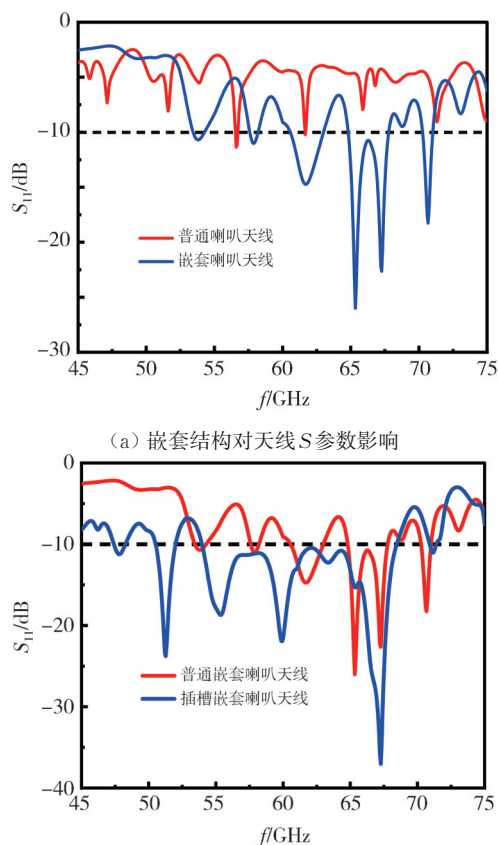


图 3 各阶段结构对天线性能的影响

Fig. 3 Influence of structure on antenna performance at various stages

表 1 为在本节所述各结构设计下的天线性能参数比较。结果表明,插槽嵌套喇叭天线性能明显优于其他结构。因此,通过设计嵌套喇叭状天线和天线金属层插槽的方式,可以有效地提高天线的带宽和增益性能。

表 1 三种结构设计下的性能对比

Tab. 1 Comparison of performance under three structural designs

结构	带宽/GHz	增益/dBi	最大反射系数/dB
传统喇叭天线	0.19	5.43	-11.35
嵌套喇叭天线	2.42	10.56	-14.72
插槽嵌套喇叭天线	14.50	9.78	-37.03

3 天线仿真结果

对所设计天线核心参数优化后得到图4所示的天线增益指标,所设计天线最终得到14.5 GHz的带宽和9.78 dBi的增益,天线性能指标的优化可以用于更好地收集点云数据,在图像处理方面得到广泛的应用^[13]

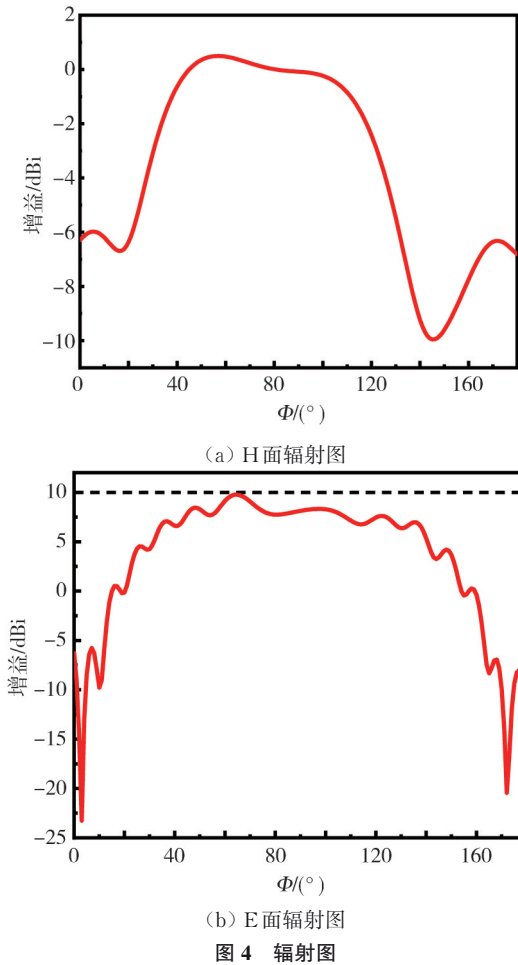


Fig. 4 Radiation pattern

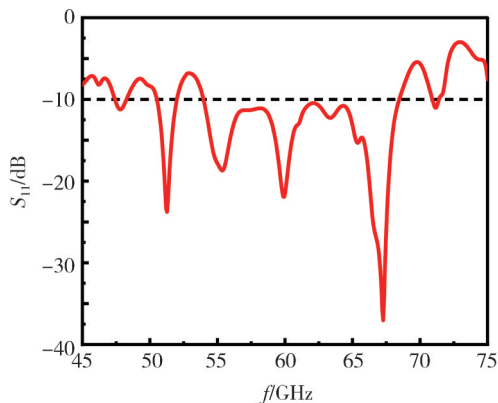


Fig. 5 Bandwidth performance of SIW slot nested horn antennas

带宽性能见图5,仿真结果给出了14.5 GHz的带宽,该V波段的SIW插槽嵌套喇叭天线所支持的频带宽度较宽,在一定程度上有利于实现更高的距离分辨率^[14],且60 GHz左右的中心频率保证了雷达传感器的速度分辨率。在工业场景中,丰富的点云数据对于保持高质量成像至关重要。

表2给出了所设计的SIW插槽嵌套喇叭天线的最终尺寸参数,表3对比了本文所设计天线与其他报道天线在带宽、增益、尺寸和反射系数方面的性能对比,结果表明本文所设计天线在带宽性能上具有绝对性优势,在反射系数方面优于绝大部分天线,且天线增益和尺寸相对优于大部分天线。因此,它能确保在中心频率60 GHz附近天线电性能的优越性^[15]。

表2 天线设计参数具体值

Tab. 2 Specific values of antenna design parameters

含义	符号	数值/mm
天线宽度	W	10.2
天线长度	L	35
金属化通孔列宽	W_t	3.383
矩形波导长度	L_r	8.405
金属化通孔半径	d	0.3
金属化通孔孔径	S	0.6
辐射带单元间距	P	0.15
缝隙阵单元宽度	W_c	0.192
一段缝隙阵单元长度	L_c	5.9
二段缝隙阵单元长度	L_d	1.4

表3 天线性能对比

Tab. 3 Comparison of antenna performance

文献	尺寸/mm ³	增益/dBi	带宽/GHz	回波损耗/dB
[1]	14×8.4×0.381	6.45	3.64	-21.31
[2]	7×12×0.508	7.46	9.70	-45.12
[3]	31×18.732×1.88	13.59	8.60	-38
[16]	14×8×0.381	6.812	4.22	-38.3
[17]	36×13×0.543	13.59	0.60	-10
本文	35×10.2×1.88	9.78	14.54	-37.03

4 结语

本文提出了一种基于Rogers RT/duroid 5880介电材料的SIW插槽嵌套喇叭天线。插槽嵌套的设计可以增加喇叭内部结构的电磁耦合,有助于增强天线的辐射效率和带宽,通过调整插槽的尺寸、位置和数量,可以优化天线内部的电磁场分布,进而拓宽天线的带宽。同时,插槽的嵌套结构可以视为在原始SIW喇叭中引入了多个调谐回路,每个插槽都可以视为一个独立的谐振器,它们之间通过电磁耦合相互作用形成多调谐回路,这种设计有助于在更宽的频率范围内实现阻抗匹配和能量传输,进而提升带宽。此外,插槽嵌套设计还能够优化H面SIW

喇叭与馈电网络之间的阻抗匹配,通过调整插槽的尺寸和位置,可以使天线的输入阻抗在更宽的频率范围内与馈电网络保持匹配,良好的阻抗匹配能够减少能量反射和损耗,提高天线的辐射效率和带宽。另一方面,喇叭天线的辐射场是由其口面尺寸与传播型所决定的,通过精心设计和调整插槽嵌套喇叭的口面尺寸和传播型,可以在不增加口径面积的情况下优化辐射模式,从而增强特定方向的辐射强度,提高增益。同时,对于需要扩展频带的喇叭天线,减小颈部与口面处的反射是关键,通过插槽嵌套的设计可以更有效地控制这些反射,减少能量损失,提高整体效率,从而在相同口径面积下获得更高的增益。插槽嵌套喇叭天线的结构还有助于实现更简单且容易控制的方向图。通过优化设计和调整,可以使得天线在期望的方向上具有尖锐的主瓣,同时减小副瓣,提高天线增益。通过参数优化,最终得到 14.5 GHz 带宽、9.78 dBi 增益的 V 波段 SIW 插槽嵌套喇叭天线,高增益的性能指标可以收集更密集的点云数据,进而形成更好的图像质量,较小的天线尺寸可以降低雷达系统设计的部署成本。

参考文献:

- [1] RAMESH S, RAO T R. Indoor radio link characterization studies for millimeter wave wireless communications utilizing dielectric-loaded exponentially tapered slot antenna [J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2015, 29(4): 551-564.
- [2] SHANMUGANANTHAM T, KUMAR K B, KUMAR S A. Analysis of tree-shaped slotted impedance matching antenna for 60 GHz femtocell applications [J]. *ICT Express*, 2021, 7(4): 426-431.
- [3] SPUREK J, RAIDA Z. SIW-based circularly polarized antenna array for 60 GHz 5G band: feasibility study [J]. *Sensors*, 2022, 22(8): 2945.
- [4] SINGH A, REHMAN S U, YONGCHAREON S, et al. Multi-resident non-contact vital sign monitoring using radar: a review [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(44): 4061-4084.
- [5] 黄波. 毫米波及太赫兹双频微带天线仿真研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [6] MUNGARU N K, SHANMUGANANTHAM T. Broad-band H-spaced head-shaped slot with SIW-based antenna for 60 GHz wireless communication applications [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2019, 61(8): 1911-1916.
- [7] MUNGARU N, SHANMUGANANTHAM T. Substrate-integrated waveguide-based slot antenna for 60 GHz wireless applications [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2019, 61(11/12): 1945-1951.
- [8] HONG Y P, BANG J, CHOI J. Gain-enhanced 60-GHz SIW cavity-backed slot array antenna using metallic grooves [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2019, 62: 1299-1306.
- [9] LIU P, PEDERSE G F, HONG W, et al. Dual-polarized wideband low-sidelobe slot array antenna for V-band wireless communications [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023, 7(8): 6667-6677.
- [10] 陈鑫鹏. 基于多模谐振的宽带小型化天线的设计与研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- [11] YANG T, ZHAO Z, YANG D, et al. A single-layer circularly polarized antenna with improved gain based on quarter-mode substrate integrated waveguide cavities array [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, 19(12): 2388-2392.
- [12] 罗永愿, 彭麟, 廖欣. X 频段介质加载圆极化喇叭天线设计 [J]. *电讯技术*, 2023, 63(2): 275-280.
- LUO Yongyuan, PENG Lin, LIAO Xin. Design of an X-band dielectric loaded circular polarization horn antenna [J]. *Telecommunication Engineering*, 2023, 63(2): 275-280. (in Chinese)
- [13] ZHU Y, CHEN K, TANG S Y, et al. Ultrawideband strip-loaded slotted circular patch antenna array for millimeter-wave applications [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2023, 22(9): 2230-2234.
- [14] 胡广, 李仲茂, 邱昕. 一种高增益 5G 毫米波缝隙天线的设计 [J]. *无线电工程*, 2022, 52(4): 651-656.
- HU Guang, LI Zhongmao, QIU Xin. Design of a high-gain 5G millimeter wave slot antenna [J]. *Radio Engineering*, 2022, 52(4): 651-656. (in Chinese)
- [15] 罗伟. 基于 SIW 的 W 波段 CTS 天线阵列设计 [J]. *无线通信技术*, 2023, 32(4): 43-46.
- LUO Wei. Design of W-band continuous transverse stub antenna array based on substrate integrated waveguide [J]. *Wireless Communication Technology*, 2023, 32(4): 43-46. (in Chinese)
- [16] YANHONG X, PEIPEI D, ANYI W. Design of a high isolation tri-band MIMO antenna for coal mine applications [J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2023, 37(13): 1106-1121.
- [17] AI-ALEM Y, KISHK A A. Highly efficient unpackaged 60 GHz planar antenna array [J]. *IEEE Access*, 2019: 719033-19040.