

文章编号: 1672-8785(2019)10-0020-06

小型化前倾毫米波双狭缝 天线的设计与制作

周 健^{1*} 赵 敏^{1,2} 孙 芸¹ 伍滨和² 孙晓玮¹

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050;

2. 东华大学理学院, 上海 201620)

摘 要: 常规侧向探测天线主波束垂直于天线辐射面, 会导致飞行探测漏报率高, 因此有必要研究具有前倾探测功能的天线, 以提高探测准确率。基于 HFSS 软件, 设计了狭缝天线结构。设计的输入参数如下: 频段为 36.85~37.15 GHz, 收发隔离度优于 50 dB, 前倾角为 20°~24°, 旁瓣抑制制度要求大于 -10 dB, 天线长度小于 85 mm, 方位角大于 80°, 俯仰角小于 11°, 增益大于 11 dB。测试结果表明, 天线增益为 12 dB, 在 36.85~37.15 GHz 条件下, 方位角位于 116°~134° 之间, 俯仰角位于 8°~9° 之间, 前倾角在 22°~24° 之间, 旁瓣抑制制度位于 -11.45~-14.60 dB 之间, 且波束方向可控。在 36.5~37.5 GHz 频率范围内, 驻波比保持在 1.413 以下, 收发隔离度保持在 -51.132 以下, 天线总长度为 83 mm。该天线的测试结果与设计一致, 能满足设计要求, 为无人机侧向探测器提供天线技术支撑。

关键词: 缝隙天线; 前倾探测; 毫米波; 小型化

中图分类号: TP271; O44; TN928; TN603.5 **文献标志码:** A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.10.004

Design and Fabrication of Miniaturized Forward Millimeter Wave Dual-slit Antenna

ZHOU Jian^{1*}, ZHAO Min^{1,2}, SUN Yun¹, WU Bin-he², SUN Xiao-wei¹

(1. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;

2. College of Science, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: The main beam of the conventional lateral detection antenna is perpendicular to the radiation surface of the antenna, which will result in a high false detection rate of flight detection. Therefore, it is necessary to study the antenna with forward tilt detection function in order to improve the detection accuracy. Based on

收稿日期: 2019-08-20

基金项目: 中科院联合基金(6141A01100101)

作者简介: 周健(1970-), 男, 江苏大丰人, 研究员, 博士, 主要从事毫米波探测器研究。

E-mail: zjian@mail.sim.ac.cn

HFSS software, a slit antenna structure was designed. The input parameters of the design were in the frequency band 36.85–37.15 GHz, the isolation between transmitter and receiver was better than 50 dB, the forward inclination angle was 20° – 24° , the side lobe suppression was more than -10 dB, the antenna length was less than 85 mm, the azimuth angle was more than 80° , and the horizontal angle was less than 11° , the gain was more than 11 dB. The test results show that the gain is 12 dB. Under the condition of 36.85–37.15 GHz, the azimuth angle is between 116° – 134° , the pitch angle is between 8° – 9° , the forward tilt angle is between 22° – 24° , the side lobe suppression is ranged from -11.45 dB to -14.60 dB, and the beam direction is controllable. In the frequency range of 36.5–37.5 GHz, the standing wave ratio (SWR) is kept below 1.413, the isolation between transceiver and receiver is kept below -51.132 , and the total antenna length is 83 mm. The test results are consistent with the design, which can meet the design requirements, and provide antenna technical support for the UAV's lateral detector.

Key words: slot antenna; forward tilt detection; millimeter wave; miniaturization

0 引言

毫米波探测器因能对目标速度和距离进行探测, 已成为未来发展的趋势。它在飞行器避障方面具有广泛的应用潜力, 受到科学界和企业界的关注^[1-2]。现代飞行器小型化对天线的波束、增益和体积都提出了特殊的要求, 迫切要求体积小、有前倾功能、增益高、波束可控的天线结构与之匹配。优化设计天线有利于进一步提高探测器微系统的探测能力, 降低其重量和体积, 以适应目标近距探测的需求。

毫米波天线分为微带天线和狭缝。其中, 微带天线可实现基于 PCB 板的能量辐射, 其优点是容易设计集成, 缺点是波束方向的可控性较差, 多为球形波束。狭缝天线的优点在于波束形状和方向的可控性好。常规的狭缝天线研究主要集中在利用超材料增强吸波效果方面^[3-9]。关于侧向探测的狭缝天线波束方向调制研究较少。已报道的狭缝天线主波束都垂直于天线表面, 侧向探测时不具备前倾探测功能, 易影响对动目标探测的精度, 导致飞行器侧向探测时漏报; 另一方面, 现有飞行器为了保持长航时, 对天线的重量和体积提出了限制。因此有必要研究长度受限、具有前倾探测功能的毫米波天线, 实现飞行器对侧向目标的准确探测与识别。

此外, 常规探测天线的增益较低, 通常小于 10 dB, 工作频段也较低^[10-11], 主要用于 RFID 收发信号。至今未见双狭缝天线应用于

Ka 波段毫米波探测的报道。

本文利用 HFSS 软件进行天线结构和电学性能设计, 并制作出 Ka 波段的狭缝天线, 优化性能指标, 旨在制作出符合飞行器前倾探测技术要求的天线。

1 天线设计

1.1 狭缝天线的基本原理

狭缝天线分为单狭缝和双狭缝天线。本文研究双狭缝天线。双狭缝天线通过波导或在空腔谐振器的宽壁或窄壁上开出一个或数个缝隙结构来辐射或接收毫米波。毫米波双狭缝天线通过馈电波导激励主模波, 使之沿着波导轴向传输, 再通过缝隙向外辐射, 对目标反射信号进行探测, 实现目标识别。狭缝天线结构的侧视图和俯视图分别如图 1 和图 2 所示。

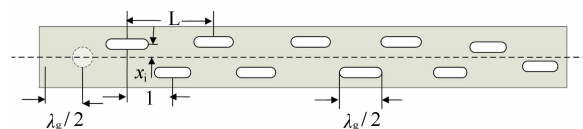


图 1 宽边纵向缝隙行波天线结构的俯视图

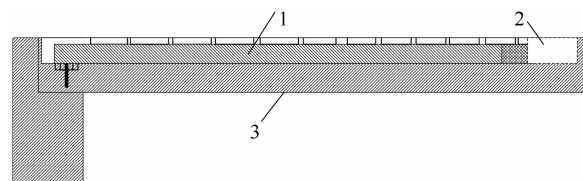


图 2 双缝隙天线设计结构的侧视图

根据波导终端的不同形式, 波导缝隙阵天线可分为行波阵和驻波阵。本文设计的是一个波导行波阵天线。行波阵的波导终端接吸收负

载,用于吸收波导尾端剩余的电磁波,防止因反射导致旁瓣增大。天线波导的波长为 λ_g ,单元间距 l 均为 $\lambda_g/2$ 。Stevenson 等给出了狭缝天线的等效电路,根据传输线理论和波导模的格林函数,导出矩形波导缝隙的计算公式^[12]。图1所示为波导宽边纵向偏置缝隙。本文缝隙个数 N 取为13。缝隙电导可表达为

$$g = 2.09 * (a/b) * (\lambda_g/\lambda) * \cos^2(\pi\lambda/\lambda_g) * \sin(\pi d/a) \quad (1)$$

$$\lambda_g = \lambda / \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2} \quad (2)$$

式中, a 为波导宽边尺寸, λ_g 为波导波长, b 为窄边尺寸, d 为狭缝的偏移量,相邻缝隙间距均为 $\lambda_g/2$ 。因此馈电端的输入电导为 N 个缝隙电导之和:

$$g = \sum_{i=1}^N g_i \quad (3)$$

为保证输入端匹配, $g_{in}=1$;如不计互耦,则 $g_i=K * a_i^2$ 。 K 为常数, a_i 为缝隙 i 的相对激励振幅。计算步骤为:先求出 K ,再确定 g_i ,再利用 g_i 与缝隙偏移量 x 间的关系,确定缝隙位置;即求出各个缝隙的归一化电导 g ,再将求出的归一化电导值代入式(1)中,可得各个缝隙的偏移量^[13-15]。

1.2 狭缝天线波束与结构设计

采用双排缝隙结构,增加方位角的调节冗余。基于波导转微带结构,用馈电针减小馈电损耗。用激光焊接玻璃绝缘子和馈电针,固定馈电针在波导腔体中的深度,保证后期安装过程中玻璃绝缘子的位置稳定,从而保证转换效率的稳定性。采用一端吸波材料的方法减少回波对辐射的影响,保证天线旁瓣的抑制度。

狭缝天线的波束指向取决于狭缝宽度和狭缝中心之间的间距。波束的指向、宽度和俯仰角可通过狭缝的位置调节。仿真结果表明,双排狭缝的横向间距越大,天线的方位角就越小。狭缝的纵向间距会影响天线的俯仰角。设计输入参数,频段为6.85~37.15 GHz,收发隔离度优于50 dB,前倾角为20°

~24°,旁瓣抑制制度要求优于-10 dB,天线长度小于85 mm,方位角大于80°,俯仰角小于11°,增益大于11 dB。基于HFSS软件,反复调节狭缝的尺寸和间距等参数,获得优化的增益、方位角、俯仰角和前倾角等设计参数。

设计流程包括:(1)确定长方体金属空腔的尺寸(长宽高)、狭缝的长度和宽度。在长方体空腔金属结构表面加工出狭缝,狭缝沿金属空腔表面长度方向平行排列,间距可调,离中轴线的距离可调。馈电位置可调。(2)先调节馈电位置,获得狭缝面最大的能量辐射。(3)通过改变狭缝间距来调节俯仰角的大小。(4)通过改变离中轴线的距离调节俯仰角的大小。(5)形成设计图,基于HFSS仿真获得天线的方向图。(6)绘制天线的三维结构图,制作天线。与电路馈电点连接,波导腔体与毫米波电路板之间通过玻璃绝缘子和馈电针实现“场-路”连接。

图3、图4和图5显示了36.85 GHz、37 GHz和37.15 GHz频率下天线输出随角度变化的关系。各频率下前倾角、方位角、俯仰角和旁瓣抑制比与频率变化的关系见表1。

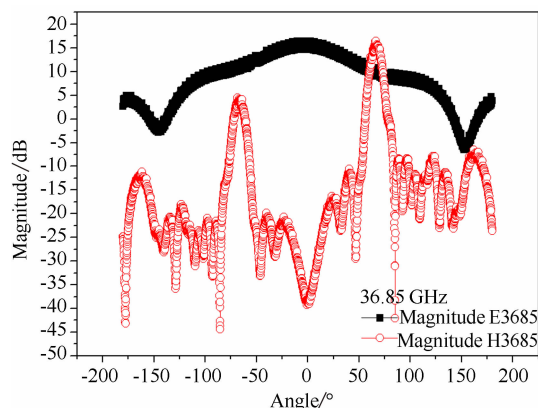


图3 36.85 GHz频率下天线输出随角度(方位角 Φ 、俯仰角 θ)变化的模拟结果

由表1可见,前倾角在22.4°~24.8°之间时,旁瓣抑制制度大于11 dB,方位角大于80°,俯仰角小于11°,符合设计要求。

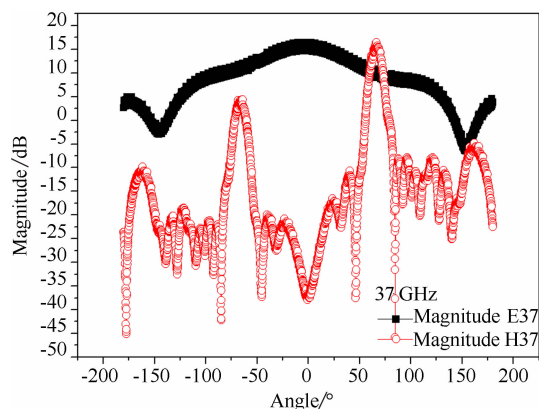


图 4 37 GHz 频率下天线输出随角度(方位角 Φ 、俯仰角 θ)变化的模拟结果

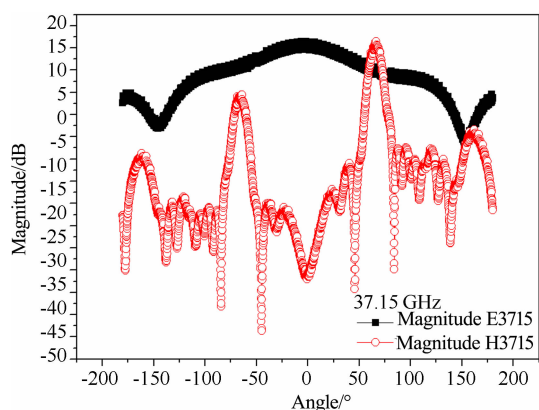


图 5 37.15 GHz 频率下天线输出随角度(方位角 Φ 、俯仰角 θ)变化的模拟结果

2 天线的制作与测试

2.1 双狭缝天线的制作步骤

步骤一：加工出大体为长方体结构且一端具有矩形缺口的介质层，在其上电镀金属层，得到介质芯。该介质芯的长度 L 为 78 mm，宽度 W 为 7 mm，高度 H 为 5 mm，介质的介电常数在 2.52~2.7 之间。金属层的材质为铜，其厚度为 0.4 mm。此外，介质芯 1 的尺寸可以根据需要进行调节。天线长度为 8 mm。

步骤二：在介质层远离矩形缺口一端的下表面上激光打孔，形成馈电孔；其中，孔直径

为 $\Phi 2 \pm 0.05$ mm。

步骤三：在金属层上激光打孔，形成交替分布于介质芯中轴线两侧的两排狭缝。相邻两个狭缝中心之间在介质芯中轴线方向上的间距为 5~7 mm，且所述第一狭缝的中心和天线中轴线的距离为 0.2~0.6 mm。激光打孔完成后，在金属层的表面电镀银。

步骤四：提供一金属框架，将介质芯安装在四个侧壁所构成的内腔中。在介质芯的矩形缺口中填充吸波材料，在馈电孔处安装馈电玻璃绝缘子和馈电针。用焊枪将馈电针与玻璃绝缘子焊接在一起，得到馈电点。

步骤五：将介质芯与金属框架共同安装在一天线支架槽中，采用银浆加热固化方法将金属框架固定在支架槽中，并采用金属框架的定位壁将介质芯的周缘压紧并固定在支架槽内，形成完整天线。其中，支架槽的材质为黄铜，厚度为 1.5 ± 0.1 mm。

2.2 双狭缝天线的测量与结果分析

图 6、图 7、图 8 分别显示了测试的 36.85 GHz、37 GHz 和 37.15 GHz 频率下天线输出随角度(方位角 Φ 、俯仰角 θ)变化的关系。测试结果表明，方位角、俯仰角和俯仰角主波瓣偏角(前倾角)能达到预期设计要求。图 9 是双狭缝天线的实际照片。

由表 2 可见，36.85 GHz、37 GHz 和 37.15 GHz 条件下，方位角位于 $116^\circ \sim 134^\circ$ 之间，能满足探测器周视探测的需要。天线俯仰角位于 $8^\circ \sim 9^\circ$ 之间，达到了小于 10° 的设计要求，可保证电磁波能量集中在扇面内，保证在同样发射功率、同样探测距离条件下，在方位角上具有更宽的能量分布，从而实现宽视角探测。天线波束旁瓣抑制位于 11.45~14.6 dB 之间，保证电磁波辐射沿着主扇面波束方向，保

表 1 前倾角、方位角、俯仰角和旁瓣抑制比与频率变化的关系(模拟结果)

频率/GHz	功率/dB	前倾角/ $^\circ$	方位角/ $^\circ$	俯仰角/ $^\circ$	旁瓣抑制/dB
36.85	15.71	22.4	90.4	8.8	11.53
37	15.51	22.4	82.7	10.8	11.55
37.15	15.47	24.8	81	9.6	11.61

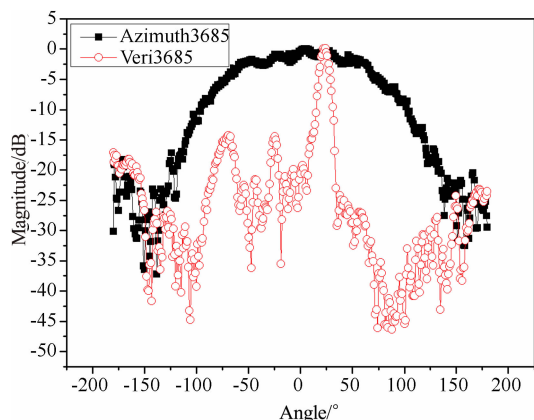


图 6 36.85 GHz 频率下天线输出功率随角度(方位角 Φ 、俯仰角 θ)的变化

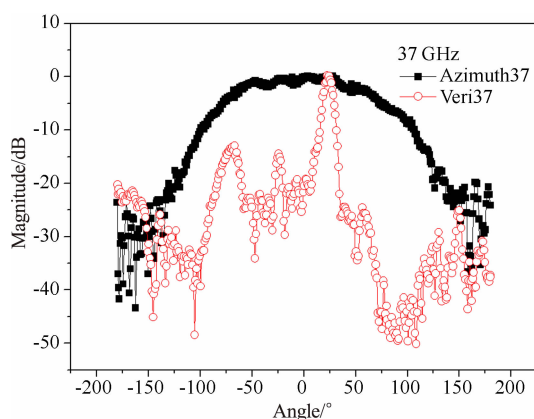


图 7 37 GHz 频率下天线输出功率随角度(方位角 Φ 、俯仰角 θ)的变化

证探测距离最大化。

天线前倾角在 $22^\circ \sim 24^\circ$ 之间,能保证探测器前倾探测,最终保证飞行探测的准确率,防止漏检。前倾角度在频点 36.85 GHz、37 GHz 和 37.15 GHz 处的设计值分别为 22.4° 、 22.4° 和 24.8° ,实际制作天线的测量结果为 22° 、 22.5° 和 24° ,偏差小于 5%,达到设计要求。

图 10 显示了 36.5~37.5 GHz 范围内驻波比和收发隔离度随频率的变化关系。由图可知,在 36.5~37.5 GHz 范围内驻波比保持在 1.413 以下,收发隔离度保持在 -51.132 以

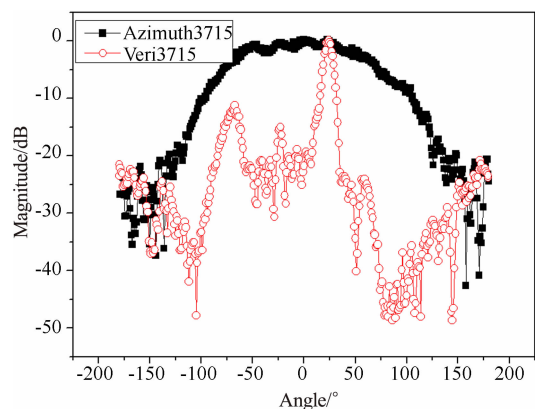


图 8 37.15 GHz 频率下天线输出功率随角度(方位角 Φ 、俯仰角 θ)的变化

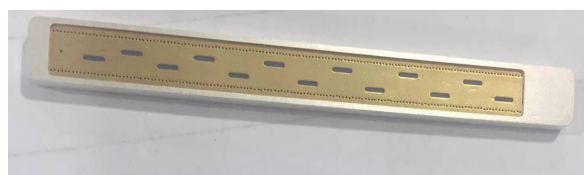


图 9 双狭缝天线的实际照片

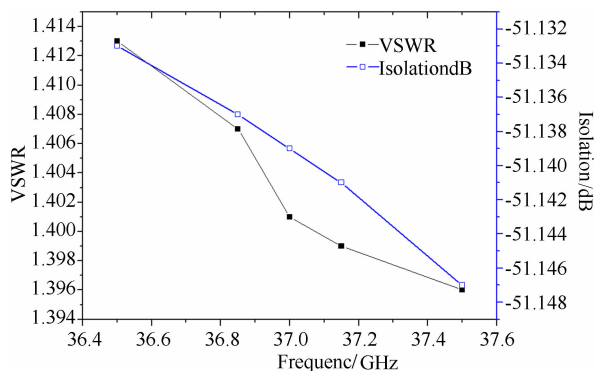


图 10 36.5~37.5 GHz 范围内驻波比和收发隔离度随频率的变化

下。这使得天线具有良好的隔离度,发射天线对接收天线接收信号的干扰几乎可以忽略,从而提高了探测器的测距精度,降低了漏检率,为无人机侧向探测器提供天线技术支撑。

3 总结

基于 HFSS 软件,设计了狭缝天线结构。设计的输入参数如下:频段在 36.85~37.15 GHz 之

表 2 前倾角、方位角、俯仰角和旁瓣抑制比与频率变化关系的测试结果

频率/GHz	前倾角/ $^\circ$	方位角/ $^\circ$	俯仰角/ $^\circ$	旁瓣抑制/dB
36.85	22	129	8	14.6
37	22.5	134	9	13.16
37.15	24	116	8	11.45

间,收发隔离度优于 50 dB,前倾角在 $20^{\circ}\sim 24^{\circ}$ 之间,旁瓣抑制度要求大于 10 dB,天线长度小于 85 mm,方位角大于 90° ,俯仰角小于 11° ,增益大于 11 dB。测试结果表明,天线增益为 12 dB,36.85~37.15 GHz 频率下,方位角位于 $116^{\circ}\sim 134^{\circ}$ 之间,俯仰角位于 $8^{\circ}\sim 9^{\circ}$ 之间,前倾角在 $22^{\circ}\sim 24^{\circ}$ 之间,旁瓣抑制位于 $-11.45\sim -14.6$ dB 之间,且波束方向可控。36.5~37.5 GHz 范围内驻波比保持在 1.413 以下,收发隔离度保持在一 51.132 以下,使得天线具有良好的隔离度,天线长度为 83 mm。测试结果与设计结果相一致,能满足探测器电学和微型化应用的指标要求,为无人机侧向探测器提供天线技术支撑。

参考文献

- [1] Elliott R S. 天线理论与设计 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1992.
- [2] Hamadallah M. Frequency Limitation on Broad Band Performance of Shunt Slot Arrays [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1989, **37**(7): 817-823.
- [3] Gu C, Qu S B, Pei Z B, et al. The Design of a Quasi-omnidirectional Tabulate Metamaterial Absorber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(3): 0378011-0378015.
- [4] Ma Y, Chen Q, Grant J, et al. A Terahertz Polarization Insensitive Dual Band Metamaterial Absorber [J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(6): 945-947.
- [5] Lee J, Yoon Y, and Lim S. Ultra-thin Polarization Independent Absorber Using Hexagonal Interdigital Metamaterial [J]. *ETRI Journal*, 2012, **34**(1): 126-129.
- [6] Kianinejad A, Chen Z N, Qiu C W. A Single-layered Spoof-plasmon-mode Leaky Wave Antenna with Consistent Gain [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 2017, **65**(2): 681-687.
- [7] Zeng Y J, Chen Z N, Qing X M, et al. Design of a Near-Field Nonperiodic Zero Phase Shift-Line Loop Antenna with a Full Dispersion Characterization [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, **65**(5): 2666-2670.
- [8] Qing X M, Goh C K, Chen Z N. A Broadband UHF Near-Field RFID Antenna [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, **58**(12): 3829-3838.
- [9] 肖军, 李秀萍, 齐紫航, 等. 基于 $0.13\ \mu\text{m}$ SiGe BiCMOS 工艺的在片背腔贴片天线 [J]. *红外与毫米波学报*, 2019, **38**(3): 310-314.
- [10] 杨欢欢, 曹祥玉, 高军, 等. 一种超薄吸波材料及其在缝隙天线中的应用 [J]. *电子与信息学报*, 2012, **34**(11): 2790-2793.
- [11] Liu H W, Weng C H, Yang C F. Design of Near-Field Edge-Shorted Slot Microstrip Antenna for RFID Handheld Reader Applications [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2011, **10**: 1135-1139.
- [12] 杨丽娜, 粮华清. 单层波导缝隙阵天线的设计与仿真 [J]. *火控雷达技术*, 2010, **29**(2): 82-88.
- [13] 蒋德富, 刘健. 波导缝隙天线的设计和仿真 [J]. *现代电子技术*, 2013, **36**(2): 14-16.
- [14] 周健, 黄冰, 孙芸, 等. 一种宽水平角窄俯仰角狭缝天线及其制作方法: CN201811560725 [P]. 2018-12-20.
- [15] 周健, 黄冰, 孙芸, 等. 一种前倾双狭缝天线及其制作方法: CN201811567450 [P]. 2018-12-20.