

绕月 SAR 天线热控设计

祝尚坤, 孔祥举, 徐计元, 黄璐
(南京电子技术研究所, 南京 210039)

摘要: 合成孔径雷达(SAR)天线是遥感卫星的重要载荷之一, 面对月球轨道舱外天线复杂的外热流环境, 结合轨道特点, 对天线开展了详细的外热流分析, 解析了月球环境的热设计难点, 进行了针对性的热控设计, 解决了极地轨道下天线在一个很大的外热流和极小的外热流间不断循环的问题。采用 TMG 软件对天线进行了热仿真分析, 并利用热模拟件进行了热平衡试验。分析和试验结果表明, 天线各单机温度满足指标要求。本文适用于平板 SAR 天线, 对有源 SAR 天线的热控设计具有一定的借鉴意义。

关键词: 合成孔径雷达天线; 热控设计; 热模拟件; 热平衡试验

中图分类号: TN828 **文献标志码:** A

Thermal Control Design of Lunar SAR Antenna

ZHU Shangkun, KONG Xiangju, XU Jiyuan, HUANG Lu

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: Synthetic aperture radar (SAR) antenna is one of the important loads of remote sensing satellites. In the face of the complex external heat flow environment of the antenna outside the lunar orbital module, combined with the characteristics of the orbit, the detailed external heat flow analysis of the antenna is carried out and the thermal design difficulties of the lunar environment are analyzed. The targeted thermal control design is carried out too, which solves the problem that the antenna circulates continuously between a large external heat flow and a small external heat flow in the polar orbit. The thermal simulation analysis of the antenna is carried out by using TMG software, and the thermal balance test is carried out by using the thermal simulator. The analysis and test results show that the temperature of each single antenna meets the index requirements. This paper is applicable to the planar SAR antenna and has certain reference significance for the thermal control design of active SAR antenna.

Key words: synthetic aperture radar antenna; thermal control design; thermal simulation components; heat balance test

引言

绕月卫星探测器在轨运行时, 舱外设备如合成孔径雷达(SAR)天线等会受到来自太阳、月球等天体以及太空黑背景的冷热环境的影响。而月球与地球热环境差异较大, 表面没有大气层, 导致近月轨道的月球红外热流差别巨大, 日照侧的红外热流峰值与太阳热流相当, 最高可达 $1\ 314\ \text{W}/\text{m}^2$, 暗侧的红外热流则几乎为 0。因此, 绕月卫星探测器 SAR 天线经历的热环境较近地轨道的更为复杂、恶劣^[1-2]。目前在轨的卫星天线故障中, 有大约三分之二的故障是进入阴影区后温度骤降导致的, 因此对于需要频繁进出阴影的卫星轨道, 减少入轨后的热相关的故障非常重要^[3-5]。同时 SAR 天线热耗波动大, 温度指标要求高, 因此高效、可靠的热控系统成为绕月探测器 SAR 天线研究的重点之一^[6-8]。

本文针对某环月轨道 SAR 天线所处的复杂外热流环境进行了详细的分析, 针对月球环境的热设计难点进行解析, 解决了极地轨道下天线在一个很大的外热流和极小的外热流间不断循环的问题。针对 T/R 组件和天线阵面进行了散热设计。由于天线辐射面受外热流影响大、对热流变化更敏感, 制定了合理的热控设计方案, 通过仿真计算对该热控方案的合理性进行了分析验证, 并进行了热模拟件的热平衡试验。

1 物理模型

1.1 天线组成

充分考虑到某 SAR 天线轻量化高集成叠层设计要求, 所有设备通过有源安装板集成^[9-10], 天线结构如图 1 所示。天线有源安装板正面为缝隙波导天线和天线阵子, 背面安装 T/R 组件、二次电源、波控单元、功分器等电子设备。

收稿日期: 2023-05-06; 修回日期: 2023-09-20

引用格式: 祝尚坤, 孔祥举, 徐计元, 等. 绕月 SAR 天线热控设计[J]. 微波学报, 2024, 40(3): 29-33.

ZHU Shangkun, KONG Xiangju, XU Jiyuan, et al. Thermal control design of lunar SAR antenna[J]. Journal of Microwaves, 2024, 40(3): 29-33.

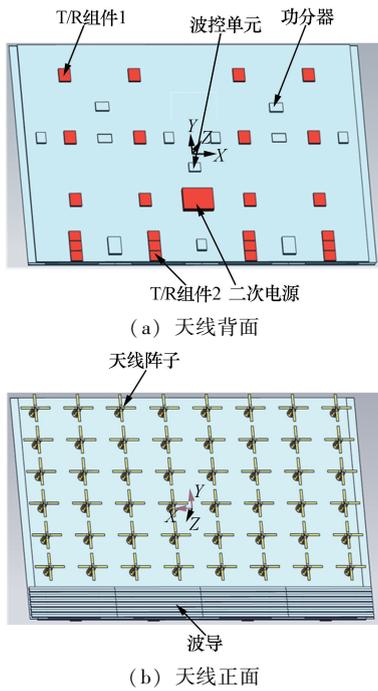
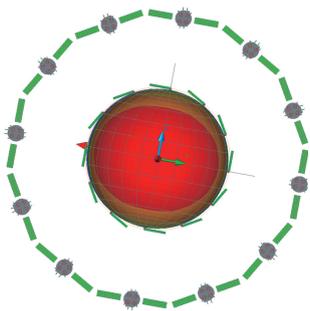


图1 SAR天线结构示意图

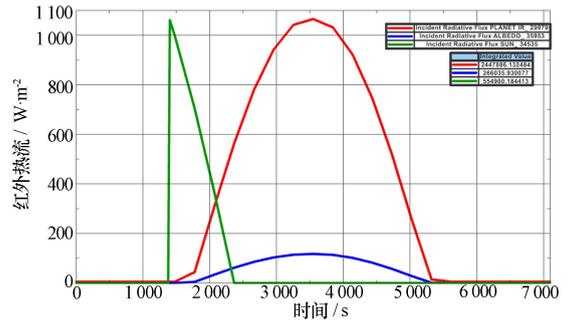
1.2 外热流分析

轨道外热流是热设计的重要因素之一,主要由卫星所处的轨道环境和卫星姿态决定^[8]。卫星通过调整姿态使得天线辐射面尽量不被太阳直接照射到,避免了太阳外热流对 SAR 天线的影[11-13]。但由于月球表面没有大气层,导致近月轨道的红外热流差别很大,日照侧的红外热流峰值与太阳热流相当,高达 $1\ 314\ \text{W}/\text{m}^2$,暗侧的红外热流则几乎为0。这导致一年中卫星总有一段时间每轨都需要进出月球暗侧一次,在这期间卫星 SAR 天线每轨受到的外热流均在剧烈变化,如果不控制好热流变化对天线的影,天线单机会出现每轨在高低温之间循环的情况。制定合理的热控方案是十分必要的,在此之前需要统计出极端工况下的外热流变化情况。

图2 太阳入射角为 90° 时天线的轨道姿态
(太阳垂直射向 X 方向,即图中红色区域)

天线所处的轨道为倾角 $i=90^\circ$ 的极地轨道,如图2所示。由轨道分析可知,由于太阳和月球相对位置的不断变化,太阳入射角 β' 角在 $0^\circ\sim 360^\circ$ 之间不断变化。

在 $\beta'=0^\circ$ 时天线辐射面受到的外热流最大,如图3所示,红线代表月球红外外热流、蓝线代表月球返照外热流、绿线代表太阳外热流 $\beta'=90^\circ$ 时天线辐射面全程不会被太阳照射,此时受到的外热流最小。

图3 太阳入射角为 0° 时天线辐射面外热流曲线

1.3 内热源分析

SAR 天线有多种工作模式,每个周期工作时间一般为5 min,其典型工作模式的热耗如表1所示。

表1 天线工作热耗统计

序号	单机名称	数量	热耗/W
1	T/R 组件 1	12	12
2	T/R 组件 2	12	10
3	二次电源	1	25
4	波控单元	1	3

1.4 热控难点分析

对于星载 SAR 天线来说,主要存在以下热控难点和特点。

(1)外热流非常复杂。月球表面无大气层,月面温度从 $-120\ ^\circ\text{C}\sim 180\ ^\circ\text{C}$ 快速循环,月球红外热流呈现出 $0\ \text{W}/\text{m}^2\sim 1\ 400\ \text{W}/\text{m}^2$ 的剧烈变化趋势。

(2)热控质量少。轻量化天线的设计需要热控尽可能合理分配给主动加热和被动热控系统。

(3)热控资源少。面对月食多种极端工况,热控功率有限,无疑增加了热设计的难度,需要寻找散热与保温的平衡点。

(4)温度指标要求高。SAR 天线上 T/R 组件等数十个单机设备的温度指标要求高。

2 热控方案设计

2.1 热设计概述

天线阵面热控系统需要在宇宙空间的冷热环境条件下,带走 T/R 组件等单机工作时产生的热量;当单机或组件的环境温度较低时进行补偿加热,以保证其温度指标在要求的范围内;从而保证天线长期稳定、高可靠性工作。

该天线热控设计充分考虑了轻量化的设计特点,重点考虑发热单机数量与分布,以降低局部热聚集,避

免采用热管而增加质量;采用密度约为铝合金三分之二的导热碳纤维复合材料代替铝合金蒙皮。采用光亮的金属镀层降低天线辐射面的散热能力,降低天线辐射面对外界剧变外热流的影响。采取涂覆导热填料为 T/R 组件等单机建立高效传热通道,保证了有效载荷开机时 T/R 组件及其他单机的散热。

2.2 散热面选择

由于 SAR 天线需要对月面开展工作,辐射面不能被遮挡,故所选用天线辐射面为散热面。根据上一节中对天线辐射面的外热流分析可知,由于月球红外热流变化剧烈,结合天线工作特点,首先需要解决的是剧烈变化的外热流环境对天线的影 响,配合采用主动热控措施来降低天线的温度波动。

将天线辐射面涂镀一层低发射率的金属箔层,实现天线接地的同时,抑制天线对外热流的吸收。除了天线辐射面外,其余五个面包覆多层隔热组件,将天线单机与空间环境进行热隔离,削弱外热流对天线单机温度的影响。多层设计有 15 层,最内层是一层 25 μm 聚酰亚胺薄膜,最外层为导电型 F46 薄膜镀银二次表面镜热控涂层。

天线热控系统由热控涂层、多层隔热组件、控温加热回路、测温回路等产品组成,为 T/R 组件、二次电源等天线阵面设备提供了良好的工作温度环境。热控设计原理如图 4 所示。

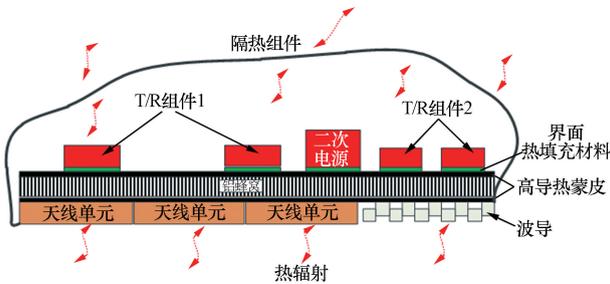


图 4 热控设计原理图

2.3 主动加热系统设计

为保证天线阵面各模块之间 T/R 组件的温度一致性,对 T/R 组件设置补偿加热器,防止有源单机的温度过低。对温度要求高的单机(T/R 组件、二次电源等)采用温度补偿加热器进行主动控温。该类电加热器采用聚酰亚胺薄膜加热片,具有密度低、加热效率高的特点,可使天线上的有源单机在不工作时维持基本一致的温度水平,保证了开机时天线单机的温度一致性。主动控温回路采用平台母线为电加热器供电,根据热电偶遥测温度控制加热器的开关。电加热器采用薄膜型电加热片串、并联组成,所有加热器采用主备份一体化设计,可通过地面修改控温阈值。在重要有源单机附近设置测温回路,测温器件采用 MF501 热敏

电阻,实时监测单机温度,通过温控仪实现加热回路的开与关。

3 仿真热设计

3.1 天线热分析

作为舱外载荷,SAR 天线背面全部包覆多层隔热组件,星体及舱外大型部件的影响可以忽略。结合热控设计方案,应用 NX-TMG 软件对天线结构进行了简化,所建立的天线热分析模型如图 5 所示,并进行了瞬态热模拟分析。根据外热流分析,得到天线工作状态下的极端高低温工况如下:

- (1)高温工况: $\beta' = 45^\circ$,冬至日,天线处于寿命末期。
- (2)低温工况: $\beta' = 90^\circ$,夏至日,天线处于寿命初期。

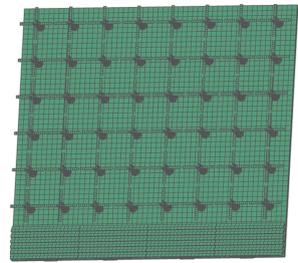


图 5 热仿真模型

分析得到在轨稳定运行后典型工况下的设备温度和变化曲线如表 2 和图 6 所示,图 6 中横坐标为运行时间,纵坐标为天线单机的温度。

表 2 热仿真温度结果

单机	工况 1 (高温工况)/ $^\circ\text{C}$		工况 2 (低温工况)/ $^\circ\text{C}$		工作温度 要求/ $^\circ\text{C}$
	MIN	MAX	MIN	MAX	
T/R 组件 1	18	46	-30	-12	-35~55
T/R 组件 2	19	45	-34	-13	-35~55
二次电源	19	49	-31	-10	-35~55
缝隙波导 天线	7	50	-42	-28	-60~60

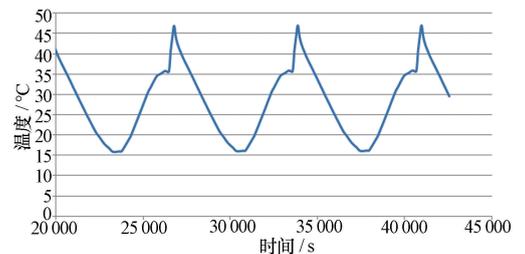


图 6 高温工况 T/R 组件温度曲线

从热分析结果可以看出,高温工况最高温度控制在了 50 $^\circ\text{C}$ 以下,最低温度高于 -35 $^\circ\text{C}$,通过主动加热的保温功能,使得 SAR 天线的温度控制在指标范围之内。

3.2 热平衡试验验证

真空热平衡试验是验证星载热控设计效果最为重要的措施,通过天线热平衡试验,可验证热控系统方案

设计的正确性,获取天线模块温度分布数据,从而修正热分析数学模型。为了验证天线热控设计方案,设计并投产了天线模块的热控模拟件,如图7所示,并将其作为热设计验证对象开展了热平衡试验,其中单机热量可通过加热片发热实现。

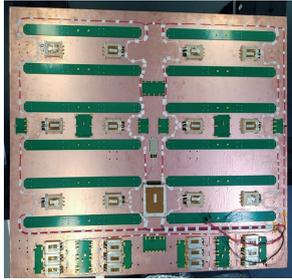


图7 天线热控模拟件

图8为SAR天线在真空罐内的试验布局。在真空罐内通液氮,使罐内温度维持在 $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近,从而模拟空间环境温度。通过环控测试台采集天线在真空罐内的实时温度,通过红外加热笼模拟在轨的外热流情况。天线在真空罐里的试验前状态如图9所示。

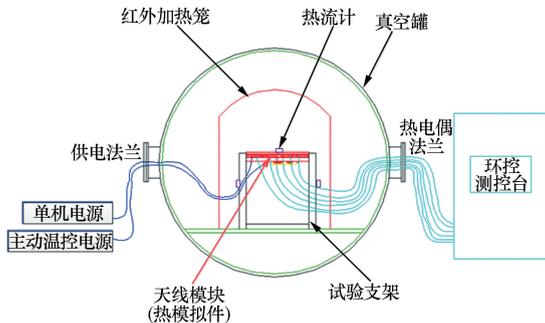


图8 热平衡试验布局图

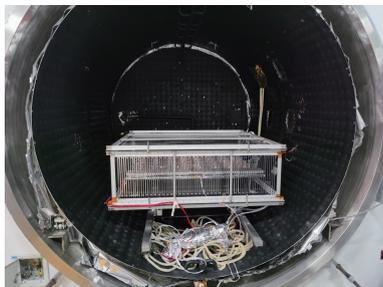


图9 天线热平衡试验状态

主动开关控制系统为星载天线热控系统重要组成部分,在天线温度低于最低设定温度时开启加热回路,在温度达到最高设定温度时关闭加热回路,天线模块主动热控系统组成如图10所示。开展热平衡试验时,该模块放置于真空罐外,通过真空法兰转接控制真空罐内的天线模块主动加热系统正常工作。

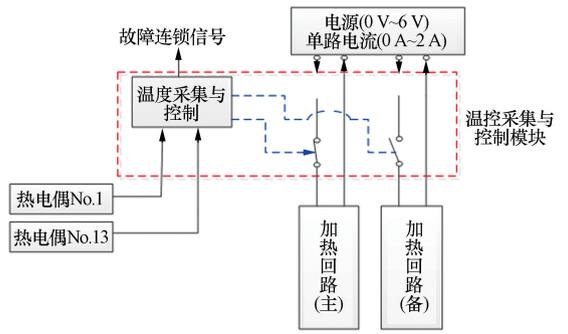


图10 试验用主动加热控制系统

按照热设计时高温和低温工况开展热平衡试验,天线热试验结果及温度曲线如表3和图11所示,其中TC1~TC20分别代表20个T/R组件的温度测点。

表3 热平衡试验的温度结果

单机	工况1 (高温工况)/ $^{\circ}\text{C}$		工况2 (低温工况)/ $^{\circ}\text{C}$		工作温度 要求/ $^{\circ}\text{C}$
	MIN	MAX	MIN	MAX	
T/R 组件 1	19	48	-32	-11	-35~55
T/R 组件 2	21	47	-32	-11	-35~55
二次电源	21	50	-30	-8	-35~55
缝隙波导 天线	8	52	-44	-26	-60~60

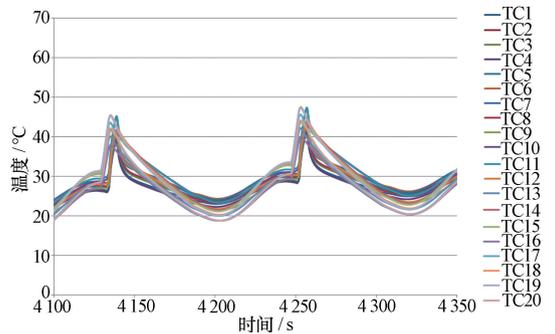


图11 高温试验工况 T/R 组件温度曲线

热试验数据对比仿真结果表明,数量最多的单机T/R组件的最大温度差异在 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,SAR天线的各部件温度水平满足要求,各单机在高温工况和低温工况的温度也都在指标范围之内。

4 结束语

本文针对舱外天线复杂的外热流环境,对舱外SAR天线在深空探测轨道运行提出了一种热设计方案。解析了深空环境的热设计难点,解决了极地轨道复杂外热流不断循环的热控问题。仿真热分析和热平衡试验表明,天线各单机温度在指标范围之内,验证了热设计的有效性。该设计方法对其他星载SAR天线的热控设计具有借鉴作用。

参考文献

- [1] 胡明春. 空基平台一体化阵列天线技术综述[J]. 微波学报, 2022, 38(5): 15-21

- HU M C. A review of platform-adapting array antennas for air-based applications[J]. *Journal of Microwaves*, 2022, 38(5): 15-21
- [2] 赵旭昊,邢英,岳海波,等. 某卫星有源相控阵天线系统在轨失效分析[J]. *现代雷达*, 2023, 45(9): 32-37
ZHAO X H, XING Y, YUE H B, et al. On-orbit failure analysis of active phased array antenna system for a satellite[J]. *Modern Radar*, 2023, 45(9): 32-37
- [3] 张传强,孟恒辉,耿利寅,等. 星载平板有源SAR天线热设计与验证[J]. *航天器工程*, 2017, 26(6): 99-105
ZHANG C Q, MENG H H, GENG L Y, et al. Thermal design and verification of spaceborne planar active SAR antennas[J]. *Spacecraft Engineering*, 2017, 26(6): 99-105
- [4] 李亦健,李春志,王润楠,等. 某高功率星载SAR可展开天线的热设计[J]. *现代雷达*, 2021, 43(12): 45-51
LI Y J, LI C Z, WANG R N, et al. Thermal design of a high power spaceborne SAR deployable antenna[J]. *Modern Radar*, 2021, 43(12): 45-51
- [5] 李涛,徐太栋,李艳龙,等. 一种星载相控阵天线的热设计研究[J]. *电子机械工程*, 2023, 39(6): 34-37
LI T, XU T D, LI Y L, et al. Research on thermal design of a spaceborne phased array antenna[J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2023, 39(6): 34-37
- [6] 侯增祺,胡金刚. 航天器热控制技术—原理及其应用[M]. 北京:中国科学技术出版社,2007
HOU Z Q, HU J G. *Spacecraft thermal control technology-principles and applications*[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2007
- [7] 倪勇,李建新,陈辉,等. 星载SAR相控阵天线一体化热设计[J]. *现代雷达*, 2016, 38(4): 60-63
NI Y, LI J X, CHEN H, et al. Integrated thermal design of spaceborne SAR phased array antennas[J]. *Modern Radar*, 2016, 38(4): 60-63
- [8] 陶院,高青松,景春妍,等. 星载微波辐射计热定标源热设计与应用[J]. *微波学报*, 2016, 32(6): 81-85
TAO Y, GAO Q S, JING C Y, et al. Thermal design and application of spaceborne microwave radiometer thermal calibration source[J]. *Journal of Microwaves*, 2016, 32(6): 81-85
- [9] 赵晖,刘才瑞,薛晟,等. L频段星载相控阵天线设计与实现[J]. *微波学报*, 2022, 38(6): 10-13
ZHAO H, LIU C R, XUE S, et al. Design and implementation of a spaceborne L-band phased array antenna[J]. *Journal of Microwaves*, 2022, 38(6): 10-13
- [10] 王艳,王执姬,李嘉睿,等. 高集成阵列天线微通道散热设计方法研究[J]. *电子机械工程*, 2023, 39(1): 36-39
WANG Y, WANG Z J, LI J R, et al. Research on design method of microchannel heat dissipation of highly integrated array antenna[J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2023, 39(1): 36-39
- [11] 杜剑波,朱明月,高何,等. 应用水冷散热的多通道星载SAR热真空试验设计[J]. *航天器工程*, 2020, 29(4): 141-149
DU J B, ZHU M Y, GAO H, et al. Design of multi-channel spaceborne SAR thermal vacuum test using water-cooled heat dissipation[J]. *Spacecraft Engineering*, 2020, 29(4): 141-149
- [12] PARK T Y, KIM S Y, YI D W, et al. Thermal design and analysis of unfurlable CFRP skin-based parabolic reflector for spaceborne SAR antenna[J]. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2021, 22: 433-444
- [13] CAO S Z, ZHOU H, FENG Y D, et al. Thermal design and simulation of space-borne membrane antenna[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2021, 146(5): 2317-2321
- 祝尚坤 男,1991年生,硕士,工程师。主要研究方向:星载雷达热控系统设计工作。
E-mail: zhushangkun@cetc.com.cn
- LI L. Research and design of high gain directional antenna for tunnel communication[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020
- [11] 于连博. 倾斜印刷对数周期天线及其阵列研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2016
YU L B. Printed Log-per iodie dipole antennas and arrays with axis-tilting[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016
- 丁小锐 女,1998年生,硕士生。主要研究方向:电磁场与微波技术、射频与天线技术。
姜兴(通信作者) 女,1962年生,教授,博士生导师。主要研究方向:天线和电磁测量。
E-mail: jiang_x@guet.edu.cn

(上接第21页)

- [8] 黄丽梅,姜兴,孙逢圆,等. 应用于脑出血探测的宽带定向天线研究[J]. *微波学报*, 2022, 38(1): 41-46
HUANG L M, JIANG X, SUN F Y, et al. Research on broadband directional antenna applied in cerebral hemorrhage detection[J]. *Journal of Microwaves*, 2022, 38(1): 41-46
- [9] 吴锋涛,袁乃昌. 用于导引头的印刷对数周期天线研究[J]. *电波科学学报*, 2006, 21(2): 280-283
WU F T, YUAN N C. Analysis of printed log periodic dipole antenna used in seeker[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2006, 21(2): 280-283
- [10] 李龙. 应用于隧道通信的高增益定向天线研究与设计[D]. 成都:电子科技大学,2020