

## 星载 220 GHz 分谐波混频器设计\*

丁成<sup>1</sup> 魏星<sup>1</sup> 施永荣<sup>2\*\*</sup>( <sup>1</sup> 南京电子器件研究所, 南京, 210016 ) ( <sup>2</sup> 南京航空航天大学电子信息工程学院/集成电路学院, 南京, 211106 )

2023-10-20 收稿, 2023-12-16 收改稿

**摘要:** 为满足星载辐射计系统应用, 提出了一款 220 GHz 次谐波混频器。基于平面 GaAs 肖特基二极管 3D 电磁模型, 混频器电路和结构优化设计采用 HFSS 和 ADS 联合仿真实现。通过在 50  $\mu\text{m}$  厚的石英基板上倒装反向并联二极管对以及采用纳米银胶将基板粘接在硅铝波导腔的工艺方式, 设计并加工实现了一款 210~240 GHz 分谐波混频器, 单边带最小变频损耗仿真结果为 7.33 dB, 实测变频损耗优于 9.6 dB。按照某卫星规定的各项环境试验条件验证其在不同环境条件下的性能, 结果证明该混频器试验前后一致性较好。

**关键词:** 太赫兹; 反向并联二极管对; 分谐波混频器; 肖特基二极管

**中图分类号:** TN773 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3819(2024)01-0024-05

## Design of a Spaceborne 220 GHz Subharmonic Mixer

DING Cheng<sup>1</sup> WEI Xing<sup>1</sup> SHI Yongrong<sup>2</sup>( <sup>1</sup> Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing, 210016, CHN )( <sup>2</sup> College of Electronic and Information Engineering/College of Integrated Circuits, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 211106, CHN )

**Abstract:** To meet the application of the spaceborne radiometer system, a 220 GHz subharmonic mixer is proposed in this paper. Based on the 3D electromagnetic model of GaAs planar Schottky diodes, the mixer circuits and structure are optimized as a whole by adopting RF circuits simulation software (ADS) and electromagnetic field simulation software (HFSS). The design and fabrication of 210-240 GHz subharmonic mixer were achieved by inverting antiparallel diodes pair on a 50  $\mu\text{m}$  thick quartz substrate, as well as bonding the substrate to the silicon aluminum waveguide cavity using nano-silver adhesive. The simulated minimum conversion loss of the single side band (SSB) is 7.33 dB, and the measured conversion loss is better than 9.6 dB. Its performance under various environmental test conditions, as stipulated by a certain satellite, is verified, and the results demonstrate good consistency of the mixer.

**Key words:** terahertz; antiparallel diodes pair; subharmonic mixer; Schottky diodes

## 引言

星载毫米波/亚毫米波云雨大气探测系统是监测热带地区天气发生和发展的最为有效的手段之一。近年来, 国内外很多研究机构和组织都致力于在静止轨道上发展毫米/亚毫米波辐射计<sup>[1-3]</sup>。220 GHz 是星

载辐射计中常用的大气窗口, 而混频器是超外差式辐射计系统中的核心器件之一。由于基波混频器的本振源频率高、驱动功率大, 成本高昂、技术难度大, 而太赫兹分谐波混频器只需射频频率 1/2 的本振频率就可以获得与基波混频相近的变频损耗, 故在毫米波系统中得到了广泛应用。

近二十年来, 国外研究机构主要有基于分立器

\* 基金项目: 国家自然科学基金(62371229)

\*\* 联系作者: E-mail: yongrongshi@nuaa.edu.cn

件和集成电路的两种太赫兹混频器技术<sup>[4-5]</sup>,相关的研究文献有:2018年 M.J. Lancaster设计了一款集成腔体滤波器的 290~310 GHz 混频器,单边带变频损耗 9~10 dB<sup>[6]</sup>,对带外信号有较强的抑制作用。2019年 JPL 实验室的 Treuttel J 等人设计了一款工作在 2 THz 全固态低温接收机,在 150 K 的低温环境下,该集成混频器最佳噪声温度小于 18 000 K<sup>[7]</sup>。国内由于受限于半导体器件、机械加工和装配精度等因素,太赫兹混频器大多采用混合集成的方式,相关的报道有:2015年,中国科学院国家空间科学中心赵鑫等人设计了一款 433~450 GHz 分谐波混频器,该混频器变频损耗小于 17 dB<sup>[8]</sup>。2020年电子科技大学的杨益林设计了一款基于 185~225 GHz 单片集成混频器结构,该混频器在频带内单边带变频损耗为 7.2~10.5 dB<sup>[9]</sup>。但绝大多数的报道仅限于实验室应用,未进行不同环境下的试验验证。星载微波产品需要在飞行前模拟卫星飞行时经历的力学环境、在轨期间的真空环境和热循环应力环境等,因此验证其在各种环境下的工作性能是很有必要的。

本文基于 50  $\mu\text{m}$  厚的石英基片,采用反向并联二极管对设计并制作了一款 220 GHz 分谐波混频器,并按照卫星环境试验规范进行了各项试验,结果表明该混频器变频损耗优于 9.6 dB,最小变频损耗为 7.47 dB;各项环境试验条件下混频器性能良好、工艺稳定,可应用于星载微波辐射计。

## 1 设计原理及结构模型

### 1.1 二极管实现分谐波混频方案选择

混频器有基波混频和谐波混频之分:基波混频方案中本振源获取困难、成本高、体积大;而谐波混频器由于本振频率为射频频率的 1/2、1/4,甚至 1/8,可以有效解决本振源难的问题。本文选择用反向并联二极管设计分谐波混频的方案,理论上总混频输出信号仅包含本振的偶次谐波混频项,二极管的一致性越好,对奇次谐波分量的抑制就越强;混频输出中无直流分量,无需加直流偏置。

### 1.2 二极管建模

在太赫兹频段,传统的二极管等效电路模型及参数测试法已不再适用,二极管物理尺寸造成的寄生参量已不能忽视<sup>[10]</sup>,并且二极管的非线性效应也无法用经典理论准确预测。当前国内外机构通过构建二极管三维模型模拟二极管在高频时的电磁效应,同时分析二极管的重要参数(如阳极半径和

空气桥尺寸等)对二极管性能的影响。本文选用 Teratech 公司的平面肖特基二极管对,厚度为  $15 \pm 2 \mu\text{m}$ ,外形如图 1(a)所示,通过扫描电子显微镜,精确测量二极管对的半绝缘载体层、重掺杂缓冲层、外延层、钝化层、欧姆接触层以及阳极等尺寸,按照测量尺寸在 HFSS 里建立三维仿真模型,见图 1(b)。结合实测结果修改并完善模型,依据测试的二极管结电容  $C_{j0}$ 、模型中二极管的阳极面积、阳极半径以及耗尽层宽度来修正各材料的参数。依据测量的外延层厚度、耗尽层厚度、欧姆接触面积分别估算外延层电阻  $R_{\text{epi}}$ 、缓冲层电阻  $R_{\text{buf}}$ 、欧姆接触电阻  $R_{\text{ohmic}}$ 。二极管阳极柱尺寸为  $3 \mu\text{m}^2$ ,级联电阻  $8 \Omega$ ,理想系数 1.18,零偏置时结电容为 4.42 fF,结电压为 0.6 V。

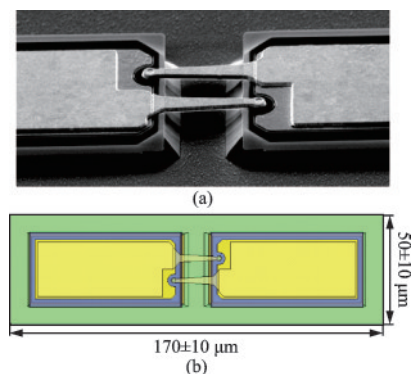


图1 GaAs 反向并联空气桥二极管(a)物理尺寸图;(b)三维模型图

Fig.1 GaAs anti-parallel air-bridged Schottky diodes:  
(a) Physical dimensions; (b) 3D model

### 1.3 分谐波混频器设计

混频器的设计指标为:在 210~240 GHz 范围内,单边带变频损耗小于 10 dB。根据此指标,采用的分谐波混频器电路原理图如图 2 所示,包括横跨射频减高波导的微带与波导转换探针、探针与反向并联二极管对间的匹配、本振双工器等。其中本振双工器的作用是防止射频信号进入本振端口,同时防止本振信号泄漏到中频端口。射频输入端减高波导的截止频率高于本振频率,可有效抑制本振信号泄露至射频端。

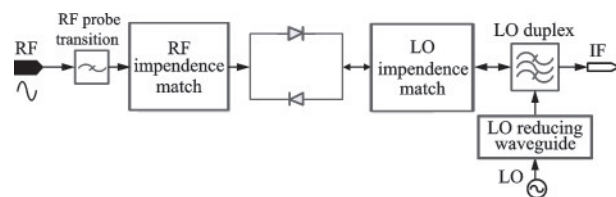


图2 二次分谐波混频器原理框图

Fig.2 Schematic diagram of the sub-harmonic mixer

电路选择介电常数为 3.78 的  $50\ \mu\text{m}$  的石英基板。中频低通滤波器采用紧凑微带谐振单元结构电路形式,可以有效减小尺寸;本振滤波器采用阶梯阻抗电路形式以优化带外抑制性能。射频信号和本振信号分别通过 WR-4.3 和 WR-08 标准波导输入分谐波混频器,经过减高波导馈入到二极管对。将各无源电路和二极管等在 HFSS 软件中建立模型,如图 3 所示。

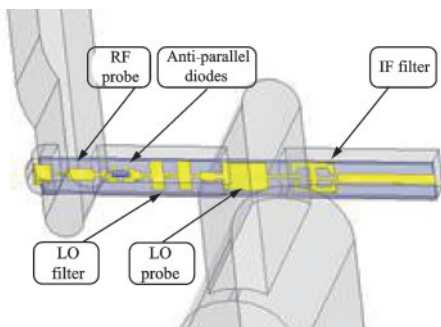


图 3 分谐波混频器整体仿真模型

Fig.3 Simulation model of the sub-harmonic mixer

## 2 仿真设计、实物测试及结果分析

### 2.1 仿真设计

射频波导探针过渡需要在宽频带内保证将输入信号以低插入损耗的方式馈入悬置微带线上。对分谐波混频器中的射频波导探针过渡进行仿真,其结构如图 4(a)所示,仿真结果如图 4(b)所示。

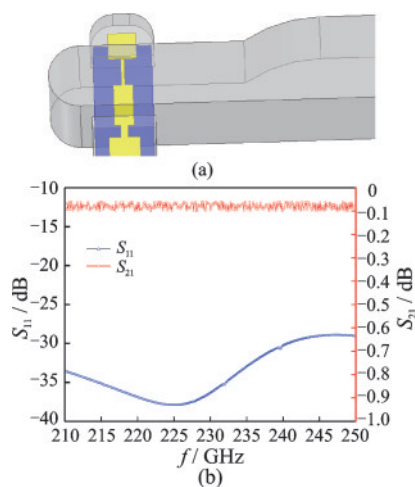


图 4 射频过渡输入探针:(a) 三维结构图;(b) 仿真结果

Fig.4 RF input probe transition: (a) The 3D model; (b) Simulated results

从图 4(b)可以看出,在输出频率 210~240 GHz,过渡结构的插入损耗( $S_{21}$ )小于 0.1 dB,回

波损耗( $S_{11}$ )优于 20 dB,在 225 GHz 回波损耗达到 40 dB,满足设计要求。

本振双工器包含探针、中频滤波器和本振滤波器,结构如图 5(a)所示, $S$  参数仿真结果如图 5(b)所示。

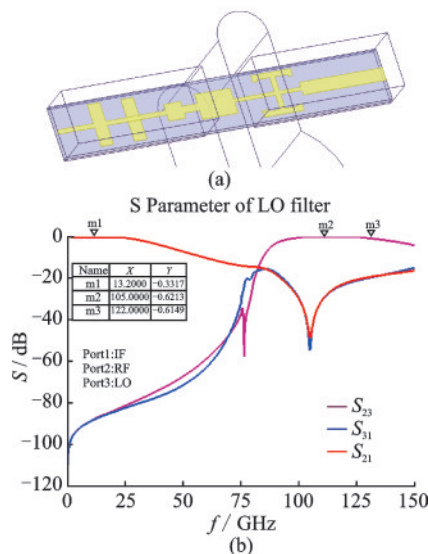


图 5 本振双工器滤波器:(a)三维结构;(b) 仿真结果

Fig.5 LO duplex: (a) The 3 D model; (b) Simulated results

从图 5(b)可以看出,本振双工器在中频输出端(DC~28 GHz)插入损耗( $S_{21}$ )小于 0.4 dB;在 110~120 GHz 频率范围内,插入损耗( $S_{23}$ )小于 0.7 dB,对本振信号和中频信号隔离较高。

将各枝节的仿真结果导出 SNP 文件,在 ADS 中建立仿真拓扑如图 6(a)所示。在 ADS 中进行整体电路谐波平衡仿真,以 210~240 GHz 最小变频损耗为优化目标,仿真结果如图 6(b)所示。

由图可见,在 210~243 GHz 频率带宽内,变频损耗优于 9.5 dB;在 229 GHz 附近变频损耗最小为 7.33 dB。

### 2.2 实物测试及结果分析

通过纳米银胶将石英板粘接在波导悬臂上,该纳米银胶导电性良好,体积电阻率优于  $10^{-3}\ \Omega\cdot\text{cm}$ ;同时该胶具有良好的界面兼容性及粘着性;此外,胶中的纳米尺寸颗粒使得电路兼有很高的连接强度和良好抗疲劳性能(纳米银胶在经历约 1 000 次冷热循环后才出现首次失效)<sup>[11-13]</sup>。波导采用硅铝合金材料加工制成,相对于传统的黄铜材料,硅铝合金材料具有较高的强度和硬度,同时热导性能好[导热系数大于  $80\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ],热膨胀系数小[约为  $(7\sim 20)\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ],与基板更兼容。图 7 为分谐波混频器的实物照片。

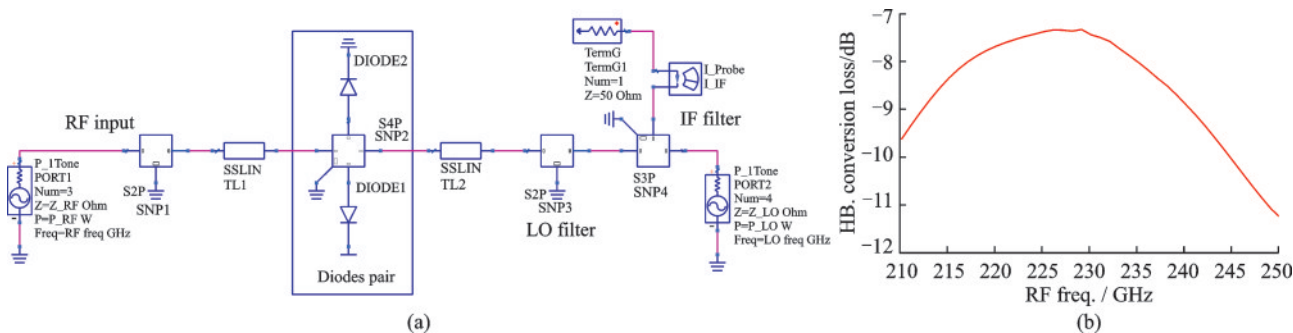


图6 混频器的 (a) 电路仿真拓扑结构和 (b) 变频损耗仿真结果  
Fig.6 (a) Simulation topology and (b) simulated result of the conversion loss of the sub-harmonic mixer

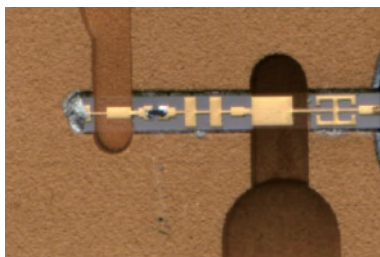


图7 220 GHz混频器实物照片  
Fig.7 Photograph of the 220 GHz mixer

测试系统框图如图8所示。混频器 220 GHz 的输入信号由 Agilent E8257D 信号源提供 X 波段信号并经 18 次倍频后得到,输入功率为  $-10$  dBm。本振源的 110 GHz 驱动信号由 Agilent E8257D 信号源提供 Ku 波段的激励信号并经 6 次倍频后得到,本振信号功率为 5 dBm 左右。混频器产生的中频信号通过 Rohde & Schwarz 频谱仪进行变频损耗测试。混频器的变频损耗测试结果如图 9 所示。

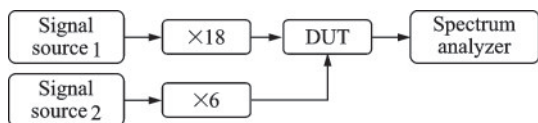


图8 220 GHz混频器测试框图  
Fig.8 Chart of the 220 GHz mixer test system

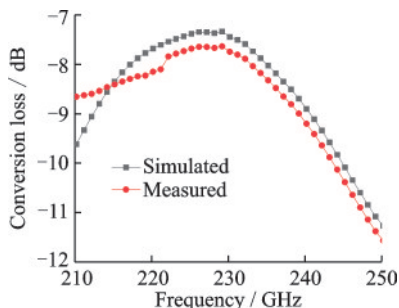


图9 混频器变频损耗实测与仿真结果  
Fig.9 Simulated and measured results of the mixer

由图可见,在 210~240 GHz 频率范围内,该混频器实测变频损耗小于 9.6 dB;在 230 GHz 变频损

耗达到最小值 7.47 dB。

测试结果趋势与仿真结果一致,但低频段 (210~223 GHz) 略有差异。分析原因主要包括: (1) 商用的 ADS 仿真软件中没有精确的肖特基二极管模型,仿真软件中二极管等效参数与实际模型中存在差异; (2) 导电胶厚度、探针位移、二极管安装位移、腔体加工精度等可能引入的工作频率偏移。

表 1 给出了本文混频器与其他 220 GHz 频段附近混频器的性能比较。

表 1 220 GHz 频段附近的混频器性能对比

Tab.1 Performance comparison of mixers near the 220 GHz band

| Ref.      | $f/\text{GHz}$ | Conversion loss (SSB) /dB |                           |
|-----------|----------------|---------------------------|---------------------------|
|           |                | Simulation                | Test                      |
| [14]      | 185-255        | 7.1(220 GHz best)-10.5    | 7.5(225 GHz best)         |
| [15]      | 170-260        | —                         | 7.8(230 GHz best)-17.2    |
| [16]      | 180-250        | 8.0 typ.                  | —                         |
| [17]      | 220-260        | Optimum 8.4               | 8.6-11.4                  |
| This work | 210-243        | 7.33(229 GHz best)-9.50   | 7.47(230.2 GHz best)-9.60 |

为了将混频器用于星载环境,本文参照某卫星环境规范中组件级试验矩阵,对该混频器进行了热学和力学环境试验。热学试验主要是通过热循环检验混频器承受热循环应力的能力,力学试验包括正弦振动(依据 GJB360B-2009 方法 204,条件 D 执行)、随机振动[依据 GJB360B-2009 方法 214,条件 I(F)执行]和冲击(依据 GJB360B-2009 方法 213,条件 C 执行),用以验证混频器承受鉴定级振动(模拟卫星在运载火箭发射阶段所经受的振动环境)/冲击(模拟卫星在运载火箭发动机点火以及运载火箭各级之间分离时一瞬间对卫星产生的冲击)环境能否正常工作的能力。

太赫兹辐射计一般都处于航天器外围,温度变化范围大。用于验证的热循环试验温度范围为

-55~100℃,温变速率 $\geq 5^\circ\text{C}/\text{min}$ ,高温保温 1.5 h,低温保温 2 h,循环次数为 200 次。

热学试验后通过高倍电子显微镜检验混频器内部石英基板和二极管等,未发现裂缝以及肉眼可识别的空洞、裂缝等。

将分谐波混频器安装到振动台上,进行力学试验。试验后复测性能,试验前后性能基本一致,如图 10 所示。

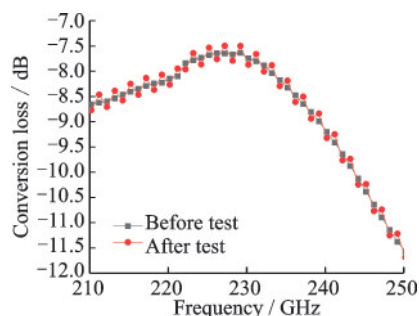


图 10 混频器试验前后变频损耗测试结果对比

Fig.10 Measured results of the mixer before and after tests

试验表明,本文设计的混频器在工作频带内性能合格,并按照卫星鉴定试验矩阵完成验证,可以满足星载产品的长期可靠性使用需求。

### 3 结 论

本文介绍了一种基于反向并联二极管对的分谐波混频器。以分谐波混频的基础理论为依据,利用 ADS 和 HFSS 联合仿真,实现了 220 GHz 分谐波混频器的设计制作,并进行了相关星载环境试验验证。测试结果表明,该分谐波混频器在 210~240 GHz 频率范围内,变频损耗小于 9.6 dB,在 230 GHz 变频损耗达到最小值 7.47 dB,与仿真结果基本一致。该分谐波混频器性能优异,工艺稳定性好,可适用于星载毫米波/亚毫米波辐射计系统。

### 参 考 文 献

- [1] Cuadrado-Calle D, Rea S, Auriacombe O, et al. EQM front-end receivers at 183 and 229 GHz for the microwave sounder on MetOp-SG[C]. 2020 33rd General Assembly Scientific Symp URSL. Rome: IEEE, 2020: 1-4.
- [2] Maestrini A, Gatilova L, Treuttel J, et al. 1 200 GHz and 600 GHz Schottky receivers for JUICE-SWI[C]. 27th International Symposium on Space Terahertz Technology. Nanjing, 2016: 44-46.
- [3] Cuadrado-Calle D, George D, Ellison B, et al. Celestial signals: are low-noise amplifiers the future for millimeter-wave radio astronomy receivers?[J]. IEEE Microw Mag, 2017, 18(6): 90-99.
- [4] 曹浩一,董亚洲,王正,等.太赫兹通信芯片关键技术与系统发展浅析[J].数据与计算发展前沿,2021,3(5): 82-97.
- [5] 解启林,王蕤,张弦,等.工艺优先的低成本太赫兹模块研制技术[J].电子工艺技术,2022,43(2): 68-71.
- [6] Guo C, Shang X, Lancaster M J, et al. A 290-310 GHz single sideband mixer with integrated waveguide filters[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2018, 8(4): 446-454.
- [7] Treuttel J, Schlecht E, Siles J, et al. A 2 THz Schottky solid-state heterodyne receiver for atmospheric studies[C]. Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy. Edinburgh, United Kingdom: SPIE, 2016: 9914-9920.
- [8] 赵鑫,蒋长宏,张德海,等.基于肖特基二极管的 450 GHz 二次谐波混频器[J].红外与毫米波学报,2015,34(3): 301-306.
- [9] Yang Y, Zhang B, Zhao X, et al. 220 GHz wideband integrated receiver front end based on planar Schottky diodes[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2020, 62(8): 2737-2746.
- [10] Tang A K. Modelling and characterization of terahertz planar Schottky diodes[D]. Sweden: Chalmers University of Technology, 2013.
- [11] 向红印,高官明,黄培德,等.纳米银浆低温烧结性能的研究进展[J].材料导报,2016,30(S1): 64-66, 86.
- [12] Gong H, Wang T Y, Zhu J Q, et al. Compressive experimental analysis and constitutive model of sintered nano-silver[J]. Journal of Applied Mechanics, 2023, 90(3): 031004.
- [13] 杨呈祥,李欣,孔亚飞,等.纳米银焊膏封装大功率 COB LED 模块的性能研究[J].发光学报,2016,37(1): 94-99.
- [14] 杨益林.太赫兹成像系统前端技术[D].成都:电子科技大学,2020.
- [15] Radiometer Physics. Harmonic Mixers[Z]. [2023-12-16]. <https://www.radiometer-physics.de/products/mmwave-and-terahertz-products/mixers-subharmonic-and-harmonic-mixers/harmonic-mixers/>.
- [16] Millitech. Subharmonic Mixers[Z]. [2023-12-16]. <http://www.millitech.com/MMW-MixerDetector-MSH/>.
- [17] 胡海帆,赵自然,马旭明,等. GaAs 肖特基二极管的 250 GHz 二次谐波混频器研究[J].红外与激光工程,2019,48(7): 12-18.



丁 成(DING Cheng) 男,1987 年 12 月生,东南大学硕士,高级工程师,主要研究方向为星载微波组件及太赫兹接收机。