

文章编号: 2095-4980(2024)10-1104-07

89~183 GHz 冷光学和准光学系统设计

李家辉^{1a,2}, 朱皓天^{*1a,2}, 全加^{1b}, 马跃学^{1b}, 刘广^{1a,2}

(1. 中国科学院 a. 国家空间科学中心; b. 理化技术研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 根据准光和高斯波束的基本原理, 对准光反射镜和透镜进行研究, 设计了一套毫米波亚毫米波天线准光馈电系统, 通过两条光路实现 89~115 GHz、176~183 GHz 两个频段同时接收电磁辐射信号。采用椭球面反射镜和透镜实现波束会聚, 控制系统结构包络; 通过极化栅网分离通道, 对双通道指标进行计算和初步分析。该系统工作在低温环境下, 针对实际需求和冷光学分析, 对准光器件的空间位置和波束半径提出约束并优化。理论计算和仿真结果表明, 该系统满足冷光学和准光学的设计要求。

关键词: 太赫兹; 准光学; 冷光学; 椭球面反射镜; 抛物面反射镜

中图分类号: TN015

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024371

Design of an 89~183 GHz cold optical and quasi-optical system

LI Jiahui^{1a,2}, ZHU Haotian^{*1a,2}, QUAN Jia^{1b}, MA YueXue^{1b}, LIU Guang^{1a,2}

(1a.National Space Science Center; 1b.Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the fundamental principles of quasi-optical and Gaussian beams, research has been conducted on quasi-optical reflectors and lenses, leading to the design of a quasi-optical feed system for millimeter-wave and submillimeter-wave antennas. This system is capable of simultaneously receiving electromagnetic radiation signals in the 89~115 GHz and 176~183 GHz frequency bands through two optical paths. Elliptical reflectors and lenses are utilized to focus the beams and control the system's structural envelope. Polarization grid networks are employed to separate channels, and calculations and preliminary analysis of dual-channel performance are conducted. The system operates in a low-temperature environment, and in response to practical requirements and cold optical analysis, constraints are proposed and optimized for the spatial position and beam radius of quasi-optical components. Theoretical calculations and simulation results indicate that the system meets the design requirements for cold optics and quasi-optics.

Keywords: terahertz; quasi-optics; cold optics; ellipsoidal reflector; parabolic reflector

星载微波辐射探测在气候和气象研究中至关重要, 但目前缺乏统一的参考基准, 导致观测误差, 影响数据的一致性和稳定性^[1]。高精度基准卫星对数据质量保证、满足应用需求具有重大意义, 太赫兹星载辐射计是高精度基准卫星的重要组成部分, 而冷光学和准光学协同设计是太赫兹星载辐射计总体设计中重要设计之一。

冷光学基于斯蒂芬-玻尔兹曼定律^[2], 通过降低光学器件的温度降低其产生的辐射, 从而降低光学系统的噪声^[3]。冷光学广泛用于空间天文探测, 比较有代表性的有 Herschel 望远镜^[4]、詹姆斯·韦伯望远镜^[5-6]。准光学基于高斯波束理论进行系统设计和分析, 是太赫兹波段下常用的一种光路设计技术。太赫兹波介于红外和微波之间, 这个波段下的衍射效应无法忽略, 传统的几何光学理论不再适用, 准光学理论能够更准确地描述电磁波的传播行为^[7], 几何光学理论可认为是准光学理论在特定条件下的简化形式。

与地基辐射计相比, 星载不受时间和地点的限制, 覆盖范围广, 可连续观测, 应用更为广泛, 但其体积重量限制较大, 制冷剂无法补给, 制冷机的功耗也较低, 需在有限的制冷机功耗下进行优化。设计过程中, 在冷

收稿日期: 2024-08-01; 修回日期: 2024-09-10

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFB3905603)

*通信作者: 朱皓天 email:zhuhaotian@nssc.ac.cn

光学约束下，对传统准光设计提出了新的挑战。本文基于冷光学和准光学原理设计了一套毫米波亚毫米波天线准光馈电系统，整体系统工作在低温杜瓦组件中，准光馈电系统的物理温度从 300 K 过渡到 4 K。

1 准光学设计原理

1.1 高斯波束

高斯波束理论是准光学系统设计的基础，是由亥姆霍兹波动方程在近轴近似条件下得到的传输方程，可表示为^[8]：

$$E(r, z) = \sqrt{\frac{2}{\pi\omega_0}} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2} - jkz - j\frac{\pi r^2}{\lambda R} + j\varphi_0\right) \quad (1)$$

式中： r 为距离传播轴的垂直距离； ω 为高斯波束的波束半径； R 为高斯波束的波前曲率半径； φ_0 为相移量； ω_0 为高斯波束的束腰，即 $z=0$ 处的波束半径。图1为高斯波束沿 z 轴方向的传播图，经过束腰位置后波束半径随着传播距离的增加而增加。

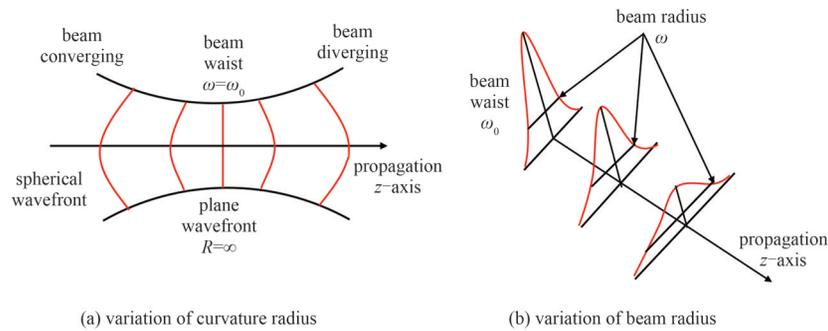


Fig.1 Schematic of Gaussian beam propagating
图1 高斯波束传播示意图

1.2 反射镜和透镜

$ABCD$ 矩阵是解决准光学系统波束变换问题的重要方法^[9]。对于折射率为 n 的薄透镜，其 $ABCD$ 矩阵为：

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -(n-1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： R_1 和 R_2 分别为透镜左右曲面的曲率半径； f 为等效焦距。

对于椭球面反射镜和抛物面反射镜，它们可以等效为一个透镜系统，设计的关键是找到它们的等效焦距 f 。对于椭球面反射镜，等效焦距 f_c 为：

$$f_c = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (3)$$

一种常用的方案是：当 R_1 等于椭球面反射器的椭球焦点 F_1 到入射点的距离， R_2 等于椭球焦点 F_2 到出射点的距离时，入射波束和出射波束匹配^[10-12]。

对于入射角为 45° 的抛物面反射镜，等效焦距 f_p 为：

$$f_p = \frac{R}{2} \quad (4)$$

式中 R 为抛物面的曲率半径。对于任意的入射角，可由几何关系得到其等效焦距。

图2为椭球面反射镜和抛物面反射镜的参数对应图。其中 d_1 和 d_2 分别为入射波束束腰到反射镜的距离和出射波束束腰到反射镜的距离， ω_{in} 和 ω_{out} 分别为入射波束束腰和出射波束束腰。

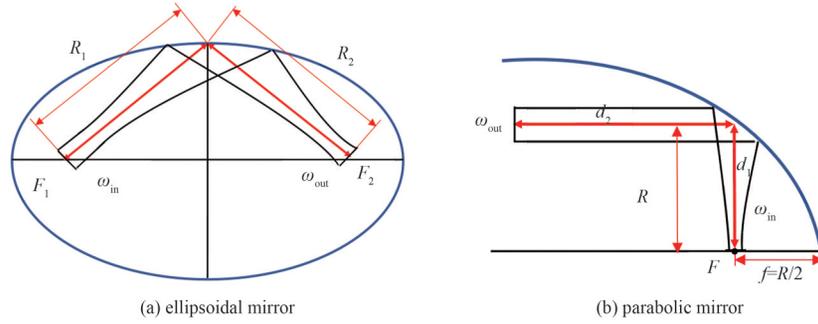


Fig.2 Schematic of Gaussian beam transformation
图2 高斯波束变换图

2 冷光学原理和分析

2.1 冷光学原理

冷光学的基本原理是黑体辐射和斯蒂芬-玻尔兹曼定律,即任何物体都在不停地向外辐射电磁波,且温度越高,辐射越强。对于目标信号,光学器件自身的辐射引入了噪声;对于空间应用的低温系统,制冷机的体积重量受限,冷量有限,引入热辐射可能会导致制冷系统无法降到需要的温度。通过降温的方式抑制这一部分辐射,可以提高信噪比和探测灵敏度,同时也能满足制冷机冷量的约束。黑体的辐射能力如图3所示,随着温度的降低,黑体辐射能力大幅降低。

黑体的单色光谱辐射通量密度可用普朗克定律表示^[13]:

$$M(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1 \right)} \quad (5)$$

式中: λ 为波长; T 为热力学温度; h 为普朗克常数; c 为真空中光速; k 为玻尔兹曼常数。根据式(5),对波长从 0 至 ∞ 积分,可得到黑体的辐射通量密度为:

$$M(T) = \int_0^{\infty} M(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad (6)$$

式中 σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数。式(6)即为斯蒂芬-玻尔兹曼定律,黑体的辐射通量密度与温度的 4 次方成正比。

黑体光谱辐射亮度 $L(\lambda, T)$ 定义为:

$$L(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1 \right)} \quad (7)$$

计算单位面积上一定波段 λ_1 到 λ_2 内的辐射通量 E 为:

$$E = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T) d\lambda \cdot \Omega \quad (8)$$

式中: ε 为发射率; Ω 为立体角。

2.2 杜瓦冷光学分析

杜瓦组件主要目的是为冷光学和准光学系统提供稳定的低温和真空环境。杜瓦组件包括制冷机冷端、真空罩、80 K 冷屏和 20 K 冷屏,制冷机采用两级脉冲管制冷机加节流制冷机的复合制冷方案。系统的漏热主要分为固体传导漏热和辐射漏热。辐射漏热占主导,主要分为两部分:一部分是不同温度部件之间引起的热辐射;另一部分是通过光学窗口引入的漏热。

设计一个准光学和冷光学关系的整体框架,如图4所示。在满足光学指标的基础上,为降低噪声和漏热,需合理降低准光学器件的温度,减小杜瓦窗口。光路设计时,为保证足够能量的信号通过窗口,需合理设计准光学器件的参数和布局,尽可能地能将束腰位置设计在窗口处;天线设计时,应尽可能减小天线立体角,使波束包

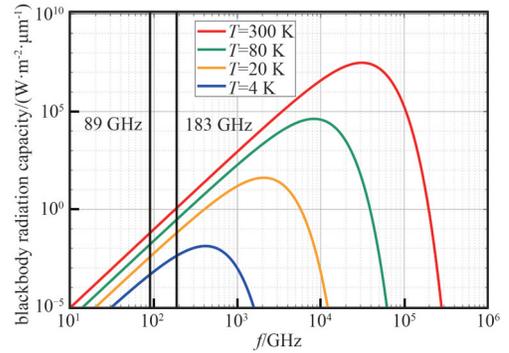


Fig.3 Schematic of blackbody radiation
图3 普朗克黑体辐射图

络更紧凑，能量更集中，避免窗口过大带来的漏热和杂散光。同时将椭球面反射镜放置在低温下，可降低热噪声，提高信噪比。

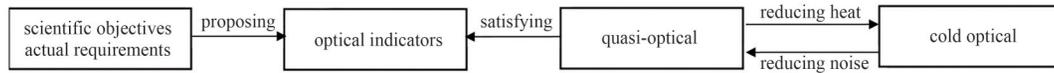


Fig.4 Cold optical and quasi-optical design
图4 冷光准光设计框图

300 K 和 80 K 冷屏之间、80 K 和 20 K 冷屏之间会产生辐射漏热，辐射漏热 Q_r 与温度、发射率和辐射面积有关：

$$Q_r = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} A_r \quad (9)$$

式中： T_1 和 T_2 为辐射两表面的温度； ϵ_1 和 ϵ_2 为辐射两表面的发射率； A_r 为参与辐射换热的总面积。

冷板间的支撑杆和导线所产生的传导漏热 Q_c 为：

$$Q_c = n \frac{\kappa(T_1 - T_2)}{L} A_c \quad (10)$$

式中： n 为支撑杆或导线的数量； κ 为材料从温度 T_1 到温度 T_2 的平均热导率； L 为支撑杆或导线的长度； A_c 为横截面积。

根据式(8)和(9)，采用有限元方法，将各个冷板的温度设置为边界条件，进行稳态分析计算。杜瓦内为真空环境，忽略热对流的影响。冷屏经过处理发射率取值 $\epsilon = 0.03$ ，对不同温区的辐射热通量积分得到辐射漏热。根据式(10)计算传导漏热，结果如表 1 所示。

辐射漏热和传导漏热的总和小于制冷机能够提供的制冷量，设计满足要求。

表 1 漏热和制冷机冷量

Table1 Heat leakage and refrigeration power

	temperature		
	4 K	20 K	80 K
radiation heat leakage/mW	10	100	2 500
conductive heat leakage/mW	13	59	1 000
refrigeration power/mW	50	200	4 000

3 准光学系统设计

系统工作在低温杜瓦中，需综合考虑杜瓦窗口尺寸约束和反射镜尺寸约束，调整光路空间布局和高斯波束半径，使光路结构合理且满足约束条件。89~115 GHz 信号和 176~183 GHz 信号都由波纹喇叭接收。在远场，高斯波束的相对场分布可表示为：

$$\frac{E(r)}{E(0)} = \exp\left[-\left(\frac{r}{\omega}\right)^2\right] \quad (11)$$

式中： $E(r)$ 为距离高斯波束轴 r 处的电场强度； $E(0)$ 为同一截面处高斯波束轴上的电场强度； r 为截距半径； ω 为高斯波束的波束半径。需要注意的是，波束半径能量占比只有 86.5%。选取 1.8 倍的波束半径进行设计，其能量占比约 99.85%^[14-15]，满足设计要求。

光路和杜瓦结构示意图如图 5 所示(非等比例示意图)。考虑到光路布局的紧凑性，2 个频段复用一段光路。抛物面反射镜将准直的信号会聚到杜瓦内，极化栅网将两通道信号分离开：89~115 GHz 信号完全透射，176~183 GHz 信号完全反射。89~115 GHz 信号再经过透镜进行一次波束变换会聚到 F_3 ，176~183 GHz 信号完全反射后会聚到 F_2 ，经过椭球面反射镜波束变换到 F_1 (F_1, F_2, F_3 为高斯波束的束腰位置)。最后，每个通道的信号由对应的馈源喇叭接收。

4 准光学系统仿真计算结果

抛物面反射镜的直径为 160 mm，出射波束沿 z 轴方向，椭球面反射镜和抛物面反射镜的设计参数如表 2 所示。作为计算的输入参数， R_1 和 R_2 分别为反射曲面到 2 个焦点的距离，抛物面反射镜的另一个焦点可认为在无穷远处。采用物理光学(Physical Optics, PO)的计算方法，准光学系统的计算结果如表 3 所示。归一化方向图如图 6 所示，图中给出了 89 GHz、113 GHz、183 GHz 的 E 面和 H 面辐射方向图，其中 E_{ω} 为主极化分量， $E_{\omega\perp}$ 为交叉极化分量，全部归一化处理，得出近场的归一化电场等高图，如图 7 所示。

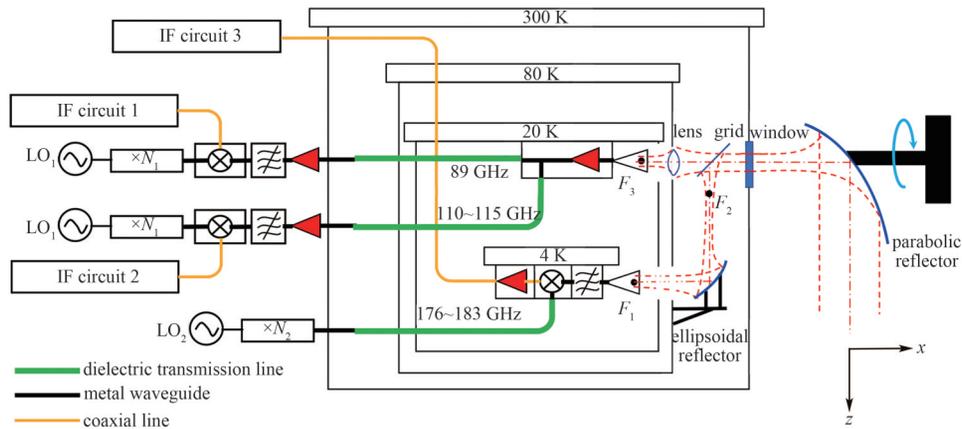


Fig.5 Layout of Dewar and quasi-optical system
图5 杜瓦和光路布局

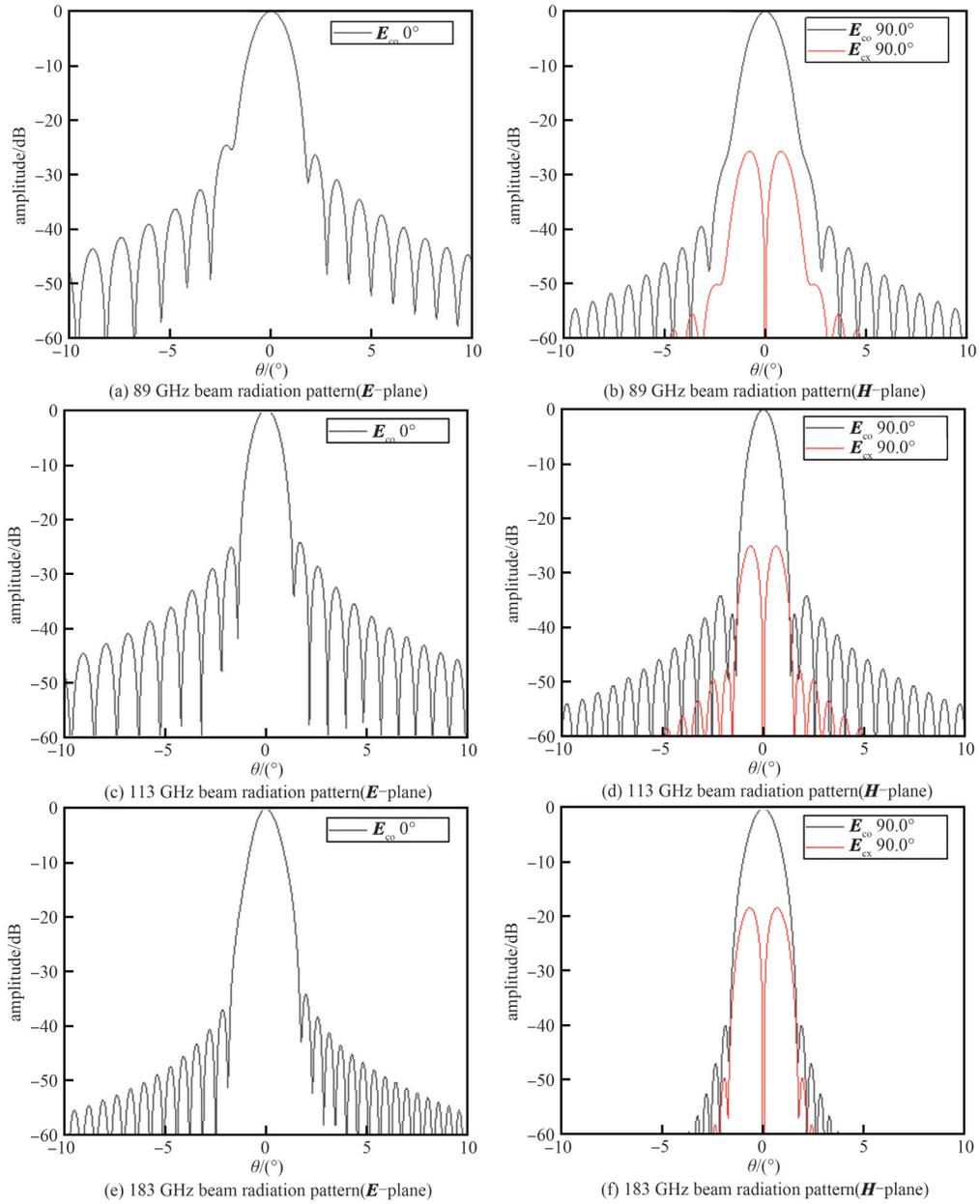


Fig.6 Far-field normalized radiation pattern of each frequency channel
图6 各频率通道的远场归一化辐射方向图

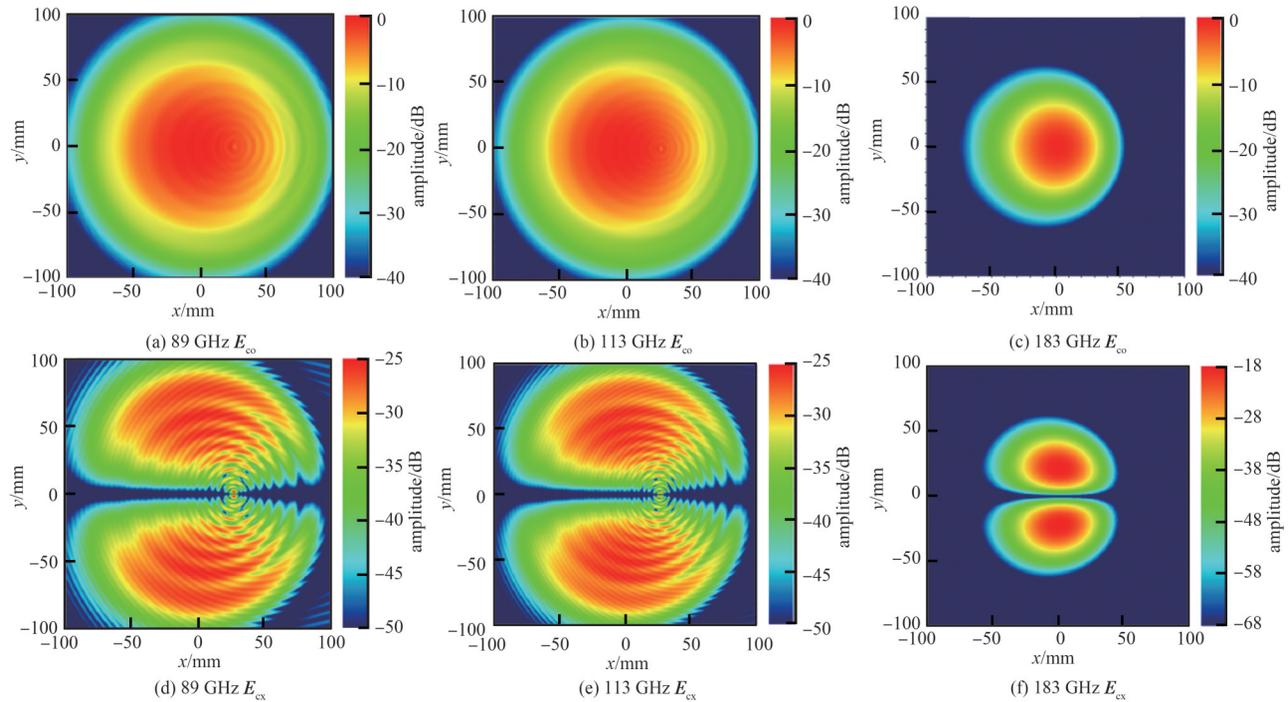


Fig.7 Normalized electric field contour of near-field for each frequency channel
图 7 各频率通道近场的归一化电场等高图

表 2 反射镜的参数

Table 2 Parameters of the reflector

reflector	focal length/mm	distance of R_1 /mm	distance of R_2 /mm
ellipsoidal	46.5	56.7	259.3
parabolic	247.5	495.0	infinite

表 3 准光系统各频段的计算结果

Table 3 Results of quasi-optical system

f /GHz	directivity/dB	-3 dB beam width/(°)	main beam efficiency/%	side lobe levels/dB	cross polarization/dB
89	44.4	1.5	99.5	-25	25
113	45.3	1.2	99.8	-25	25
183	46.1	1.0	98.8	-34	18

由表 3、图 6 和图 7 可得，3 个频段的主波束效率都较高。176~183 GHz 通道波束宽度更窄，能量更集中，这是因为 176~183 GHz 通道多经过了一次椭球面反射镜会聚波束，但椭球面反射镜较大的入射角又带来了交叉极化的恶化。可以通过增大焦距、减小入射角来优化交叉极化分量。受冷光学和杜瓦结构的约束，主要改变焦距参数进行优化，最终优化到 18 dB。

5 结论

本文根据准光学理论和冷光学的约束条件，对冷光学系统进行了热学分析，对 89~183 GHz 辐射计系统的光路进行了理论设计和计算，具体使用高斯波束模型来设计准光光路，采用物理光学的计算方法仿真，得到了可行解，馈源喇叭与光路相耦合，整体光路与制冷机结构相耦合。

参考文献：

[1] 何杰颖,董晓龙,卢乃锰. 空间微波辐射基准传递溯源展望[J]. 空间科学学报, 2023,43(6):1016-1024. (HE Jieying,DONG Xiaolong,LU Naimeng. Perspectives of transmission and traceability of space microwave radiometric benchmark[J]. Chinese Journal of Space Science, 2023,43(6):1016-1024.) doi:10.11728/cjss2023.06.yg17.

- [2] 陈永和. 应用于中短波红外天文观测的空间低温光学系统研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2017. (CHEN Yonghe. Research on space cryogenic optical system for SWIR/MWIR astronomical observation[D]. Beijing, China: Chinese Academy of Sciences, 2017.)
- [3] 殷丽梅,刘莹奇,李洪文. 实现高精度红外探测的冷光学技术[J]. 红外技术, 2013,35(9):535-540. (YIN Limei,LIU Yingqi,LI Hongwen. Cold optics technology to achieve high-accuracy infrared detection[J]. Infrared Technology, 2013,35(9):535-540.) doi:10.11846/j.issn.1001_8891.201309002.
- [4] DOYLE D,PILBRATT G,TAUBER J. The Herschel and Planck space telescopes[J]. Proceedings of the IEEE, 2009,97(8):1403-1411. doi:10.1109/JPROC.2009.2017106.
- [5] WARREN P G,CHANEY D M,HADAWAY J B, et al. Cryogenic radius of curvature matching for the JWST primary mirror segments[J]. Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 2009(7439):743916-1-9. doi:10.1117/12.845115.
- [6] HADAWAY J B,CHANEY D M,CAREY L B. The optical metrology system for cryogenic testing of the JWST primary mirror segments[J]. Proceedings of SPIE, 2011,8126(5):50-58.
- [7] 刘小明,俞俊生,陈晓东. 毫米波及太赫兹准光学技术:理论、应用与发展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022,20(7):631-652. (LIU Xiaoming, YU Junsheng, CHEN Xiaodong. Quasi-optical technology in the millimeter and terahertz wave ranges: theory, applications and development[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022,20(7):631-652.) doi:10.11805/TKYDA2021299.
- [8] WHALE M. Optical characterisation of astronomical submillimetre receivers including ALMA bands 5 and 9[D]. Ireland: National University of Ireland Maynooth, 2010.
- [9] GOLDSMITH P F. Quasi-optical techniques[J]. Proceedings of the IEEE, 1992,80(11):1729-1747. doi:10.1109/5.175252.
- [10] 姚崇斌,李贝贝,谢振超,等. 一种十频段准光学馈电网络[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2023,21(2):139-142. (YAO Chongbin,LI Beibei,XIE Zhenchao, et al. A ten frequency bands quasi optical feed network[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2023,21(2):139-142.) doi:10.11805/TKYDA2022199.
- [11] 李贝贝,姚崇斌,谢振超,等. 太赫兹准光学馈电网络研究进展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(6):939-943. (LI Beibei,YAO Chongbin,XIE Zhenchao, et al. Research progress in terahertz quasi-optical feed network[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(6):939-943.) doi:10.11805/TKYDA201906.0939.
- [12] 刘佳,万继响,施锦文,等. 准光学馈电系统设计与分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(2):180-183. (LIU Jia,WAN Jixiang,SHI Jinwen, et al. Design and analysis of the quasi-optical feed system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(2):180-183.) doi:10.11805/TKYDA2018282.
- [13] 王莹莹,何莘,孟常亮. 星载红外探测器对高超声速飞行器探测距离的计算[J]. 红外与激光工程, 2019,48(7):41-47. (WANG Yingying,HE Ping,MENG Changliang. Detection distance computation of the space borne infrared detector for hypersonic flight vehicles[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019,48(7):41-47.) doi:10.3788/IRLA201948.0704003.
- [14] 李贝贝,钱志鹏,姜丽菲,等. 太赫兹准光学馈电网络系统优化方法[J]. 探测与控制学报, 2022,44(5):112-115,124. (LI Beibei, QIAN Zhipeng,JIANG Lifei, et al. Terahertz quasi-optical feed network system optimization method[J]. Journal of Detection & Control, 2022,44(5):112-115,124.)
- [15] 佟强. 主动毫米波成像准光学系统设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018. (TONG Qiang. Quasi-optical system design for active millimeter-wave imaging[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2018.) doi:10.7666/d.D01586317.

作者简介:

李家辉(2000-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹准光和冷光技术. email:lijiahui221@mails.ucas.ac.cn.

朱皓天(1989-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为太赫兹谱仪技术、太赫兹先进探测器技术.

全加(1988-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为空间深低温脉冲管制冷技术、空间低温制冷系统.

马跃学(1989-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为空间节流制冷技术、小型低温制冷技术.

刘广(1984-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为太赫兹准光系统和超表面天线研究.