

# 空间目标地基探测场景下BIB探测器性能需求分析

郭小庆, 梁芳\*, 汪泽文, 董祚汝, 林一超, 张传胜, 王晓东\*

(中国电子科技集团公司第五十研究所太赫兹技术创新中心, 上海 200331)

**摘要:** 探测器性能是实现空间目标探测的决定性因素之一。文章针对空间目标地基探测场景, 分析了阻挡杂质带探测器的性能指标需求。通过建立地基探测场景辐射传输模型, 对背景辐射及点目标辐射进行理论计算并分析了辐射与探测器性能指标的关系。以空间碎片为典型目标、地基望远镜为搭载平台, 文章分析计算了中纬度高海拔探测环境下探测器量子效率、暗电流、满阱、比探测率等关键性能指标需求。研究结果为地基探测器结构设计奠定了理论基础。

**关键词:** 红外探测; 空间目标; 地基探测场景; BIB探测器

中图分类号: TN215

文献标识码: A

## Performance requirement analysis of BIB detector in space target ground-based detection scenario

GUO Xiao-Qing, LIANG Fang\*, WANG Ze-Wen, DONG Zuo-Ru, LIN Yi-Chao,  
ZHANG Chuan-Sheng, WANG Xiao-Dong\*

(Terahertz Technology Innovation Center, The fiftieth Research Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Shanghai 200331, China)

**Abstract:** The performance of detectors is one of the key factors for space target detection. In this paper, the performance requirements of blocked impurity band detectors for the ground-based detection scenario of space targets are analyzed. The theoretical calculation of background radiation and point target radiation is carried out by establishing the radiation transmission model of ground-based detection scenario. The correlation between radiation and detector performance is also analyzed. Taking space debris as a typical target and ground-based telescope as a carrying platform, the key performance requirements such as quantum efficiency, dark current, full well and specific detectivity are analyzed and calculated in the mid-latitude and high-altitude detection environment. This work lays a theoretical foundation for the detector structure design of ground-based detection.

**Key words:** infrared detection, space targets, ground-based detection scenario, BIB detectors

## 引言

空间碎片、航天器等均为典型的空間目标。其中, 空间碎片是存在于空间中的人造产物, 包含失效卫星、完成任务的火箭、碰撞碎片等。空间碎片数量多、尺寸小, 对航天器的发射和运行构成了威胁。空间碎片、航天器等空间目标的探测对航空航天任务的顺利开展有重要意义<sup>[1]</sup>。

空间目标的温度主要由太阳辐射决定, 以空间碎片为例, 在地影区时温度可低于 200 K, 到日照区时温度可高于 300 K。此外空间碎片分布在低轨道、中轨道、高轨道以及地球同步轨道上。基于探测目标辐射信号暗弱、分布范围广的特点, 采用地基红外探测的技术手段可实现全天时探测<sup>[2]</sup>。

地基红外探测系统的核心部件为红外探测器,

收稿日期: 2024-11-19, 修回日期: 2024-12-03

Received date: 2024-11-19, Revised date: 2024-12-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(62301321, 62171286); 上海市扬帆计划(23YF1444300, 22YF1446200, 22YF1446300); 上海市优秀学术/技术带头人计划(21XD1423600)

**Foundation items:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (62301321, 62171286); the Shanghai Sailing Program (23YF1444300, 22YF1446200, 22YF1446300); Program of Shanghai Academic/Technology Research Leader (21XD1423600)

作者简介(Biography): 郭小庆(1996—), 女, 重庆人, 工程师, 硕士学位, 主要研究领域为红外探测技术方向. E-mail: 187323146@qq.com

\*通讯作者(Corresponding authors): E-mail: jerniferlf@163.com; wxd06296@163.com

其性能直接影响地基红外探测系统的探测能力。红外探测器的选用需根据应用场景决定<sup>[3-4]</sup>。空间目标辐射信号能量主要集中在长波及甚长波红外波段;同时考虑到大气吸收,地基红外探测系统大部分处于高海拔地区。阻挡杂质带(Blocked Impurity Band, BIB)探测器由于其波段宽、灵敏度高的优势在国外被广泛用于地基红外探测系统<sup>[5-7]</sup>,如美国 AEOS 望远镜搭载的 BASS 载荷、日本 mini Tao 望远镜搭载的 MAX38 载荷等。

BIB 探测器为背景限探测器,即由于背景辐射引起的噪声占主导限制了探测器性能<sup>[8-9]</sup>。需对各组分辐射进行分析计算,并以此为依据分析该场景下 BIB 探测器性能需求。因此,为了给地基应用场景下 BIB 探测器的设计提供参考,本文通过理论分析建立了探测目标为空间碎片时的地基探测场景模型并计算出场景中包括空间碎片辐射、大气辐射、光学系统辐射等目标和背景辐射,根据辐射与探测器指标的关系设计出满足探测场景需求的 BIB 探测器。

## 1 辐射理论分析

### 1.1 探测场景及辐射传输模型

探测场景由探测目标、探测系统以及探测环境构成,如图 1(a)所示,其中探测目标为空间目标;探测系统包含地基望远镜搭载平台和有效载荷;探测环境由温度、湿度、海拔、气候等环境因素决定。

根据辐射理论,温度高于绝对零度的物体都会产生辐射,因此探测场景中探测器接收到的辐射包含目标辐射和背景辐射。

目标信号传输流程如图 1(b)所示:目标辐射能量透过大气后被搭载平台的望远镜主镜接收,然后

通过光学系统传输至有效载荷内的探测器端实现光电转换。除目标产生的辐射外,其他辐射均为背景辐射<sup>[10]</sup>。在地基高背景应用环境中,有效载荷内部常采用冷光学技术实现杂散辐射抑制<sup>[11-14]</sup>。因此,探测器接收到的背景辐射主要包含大气辐射、望远镜平台辐射、杜瓦窗口辐射、杜瓦内部的冷光学组件辐射等。

### 1.2 背景辐射

#### 1.2.1 大气辐射

在红外波段,由水蒸气、二氧化碳产生的辐射为大气辐射的主要来源。绝大部分水蒸气和二氧化碳集中在对流层,其浓度随着海拔升高迅速减小。为避免高背景辐射影响探测灵敏度,探测系统应处于高海拔地区。

同一海拔高度上,大气参数近似相等,因此可将大气简化成由不同垂直层组成的结构。通过多层辐射传输理论可计算出大气整体辐射以及透过率。MODTRAN 软件基于大气传输模型用于计算设定探测场景下的大气辐射亮度以及大气透过率。

此时将大气等效成面源黑体。根据黑体辐射理论,温度为  $T$  的黑体,不同波长  $\lambda$  下的辐射亮度为<sup>[15]</sup>:

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

式(1)中,  $h$  为普朗克常数,  $h=6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ;  $c$  为光速,  $c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。探测器面接收到的辐照度为:

$$E(\lambda, T) = \varepsilon L(\lambda, T) \Omega \quad (2)$$

式(2)中,  $\varepsilon$  为发射率,  $\Omega$  为探测器像元立体视场角。  $\Omega$  的计算与光学参数有关,公式如下:

$$\Omega = \frac{\pi D^2}{4f^2} = \frac{\pi}{4F^2} \quad (3)$$

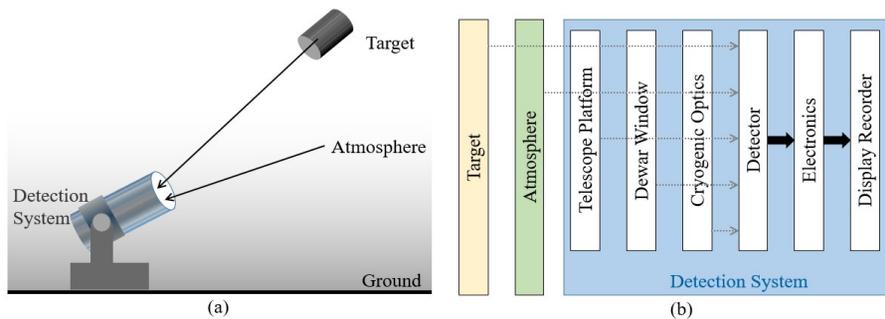


图 1 探测与传输:(a)空间目标地基探测场景示意图;(b)光电信号传输流程示意图,其中灰色箭头表示辐射光信号、黑色箭头表示电信号

Fig. 1 Detection and transmission: (a) ground-based detection diagram of space target; (b) schematic diagram of photoelectric signal transmission process, the gray arrow represents the light signal and the black arrow represents the electrical signal

式(3)中, $D$ 为光学系统口径, $f$ 为焦距, $F$ 为光学系统 $F$ 数。当探测器响应覆盖波段为 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 时,探测接收到的辐照度为<sup>[13]</sup>:

$$E = \varepsilon \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T) d\lambda \cdot \frac{\pi}{4F^2} = \varepsilon \cdot \frac{\pi \cdot L(T)}{4F^2} \quad (4)$$

大气辐射亮度 $L_{\text{atm}}$ 以及大气透过率 $t_{\text{atm}}$ 采用MODTRAN软件计算得到,大气发射率 $\varepsilon_{\text{atm}}$ 为1。考虑到光学系统透过率 $t_{\text{opt}}$ 以及杜瓦窗口透过率 $t_{\text{win}}$ ,大气在探测器面的辐照度为:

$$E_{\text{atm}} = \varepsilon_{\text{atm}} \cdot t_{\text{opt}} \cdot t_{\text{win}} \cdot \frac{\pi \cdot L_{\text{atm}}}{4F^2} \quad (5)$$

### 1.2.2 光学系统辐射

光学系统辐射包括地基望远镜平台辐射和杜瓦内部的冷光学组件辐射。

红外宽波段工作的地基望远镜多为反射式。当反射镜温度同为 $T_{\text{opt1}}$ 、反射率同为 $\rho_{\text{opt1}}$ 、发射率同为 $\varepsilon_{\text{opt1}}$ 时,根据公式(4)以及光线传播过程,与环境温度相同的 $n$ 片反射镜辐射到探测器端辐照度分别为:

$$E_{\text{opt1}_1} = \varepsilon_{\text{opt1}} \cdot \rho_{\text{opt1}}^{n-1} \cdot t_{\text{opt2}} \cdot t_{\text{win}} \cdot \frac{\pi \cdot L(T_{\text{opt1}})}{4F^2} \quad (6)$$

$$E_{\text{opt1}_2} = \varepsilon_{\text{opt1}} \cdot \rho_{\text{opt1}}^{n-2} \cdot t_{\text{opt2}} \cdot t_{\text{win}} \cdot \frac{\pi \cdot L(T_{\text{opt1}})}{4F^2} \quad (7)$$

...

$$E_{\text{opt1}_n} = \varepsilon_{\text{opt1}} \cdot t_{\text{opt2}} \cdot t_{\text{win}} \cdot \frac{\pi \cdot L(T_{\text{opt1}})}{4F^2} \quad (8)$$

式(6)中, $t_{\text{opt2}}$ 为冷光学组件的等效透过率。

由于BIB探测器工作波段宽,杜瓦内部匹配的冷光学组件多采用反射式结构。当杜瓦内部反射镜温度同为 $T_{\text{opt2}}$ 、反射率同为 $\rho_{\text{opt2}}$ 、发射率同为 $\varepsilon_{\text{opt2}}$ 时,同理可得 $m$ 片低温反射镜辐射到探测器端辐照度分别为:

$$E_{\text{opt2}_1} = \varepsilon_{\text{opt2}} \cdot \rho_{\text{opt2}}^{m-1} \cdot t_{\text{win}} \cdot \frac{\pi \cdot L(T_{\text{opt2}})}{4F^2} \quad (9)$$

$$E_{\text{opt2}_2} = \varepsilon_{\text{opt2}} \cdot \rho_{\text{opt2}}^{m-2} \cdot t_{\text{win}} \cdot \frac{\pi \cdot L(T_{\text{opt2}})}{4F^2} \quad (10)$$

...

$$E_{\text{opt2}_m} = \varepsilon_{\text{opt2}} \cdot t_{\text{win}} \cdot \frac{\pi \cdot L(T_{\text{opt2}})}{4F^2} \quad (11)$$

因此,总的光学系统辐射为:

$$E_{\text{opt}} = E_{\text{opt1}_1} + E_{\text{opt1}_2} + \dots + E_{\text{opt1}_n} + E_{\text{opt2}_1} + E_{\text{opt2}_2} + \dots + E_{\text{opt2}_m} \quad (12)$$

此外,冷光学组件等效透过率 $t_{\text{opt2}}$ 由 $m$ 片低温反射镜决定,计算公式如下:

$$t_{\text{opt2}} = \rho_{\text{opt2}}^m \quad (13)$$

光学系统透过率 $t_{\text{opt}}$ 由 $n$ 片常温反射镜和 $m$ 片低

温反射镜决定,计算公式如下:

$$t_{\text{opt}} = \rho_{\text{opt1}}^n \cdot \rho_{\text{opt2}}^m \quad (14)$$

### 1.2.3 杜瓦窗口辐射

杜瓦窗口位于环境和真空低温杜瓦最外层交界处,用于透过进入杜瓦内最终达到探测器面的目标辐射信号。

为匹配BIB探测器,杜瓦窗口工作波段需覆盖探测器响应波段。窗口自发辐射能量由温度 $T_{\text{win}}$ 和发射率 $\varepsilon_{\text{win}}$ 决定,杜瓦窗口温度 $T_{\text{win}}$ 与环境温度相同。窗口的单面发射率由单面透射率决定,计算公式为:

$$\varepsilon_{\text{win}} = 1 - \sqrt{t_{\text{win}}} \quad (15)$$

式(15)中, $t_{\text{win}}$ 为窗口整体透过率。窗口表面辐射满足朗伯余弦定律,因此窗口辐射到探测器面的辐照度为:

$$E_{\text{win}} = \varepsilon_{\text{win}} \cdot \frac{\pi \cdot L(T_{\text{win}})}{4F^2} \quad (16)$$

### 1.3 目标辐射

对于地基探测场景,空间目标成像多为点目标,即空间目标对探测系统靶面张角 $\Omega_t$ 小于探测器单像元视场角<sup>[16-17]</sup>。

当探测距离为 $R$ 时,望远镜平台接收到的目标辐射通量为:

$$\Phi_{\text{tar,opt}} = \varepsilon_{\text{tar}} \cdot t_{\text{atm}} \cdot L(T_{\text{tar}}) \cdot \Omega_t \cdot A_0 \quad (17)$$

式(17)中, $\varepsilon_{\text{tar}}$ 为目标发射率、 $T_{\text{tar}}$ 为目标温度、 $A_0$ 为光学系统面积, $A_0 = \pi D^2/4$ ,靶面张角 $\Omega_t$ 由目标投影面积 $A_{\text{tar}}$ 与探测距离决定, $\Omega_t = A_{\text{tar}}/R^2$ 。

目标辐射透过光学系统及杜瓦窗口后,到达探测器的辐射通量为<sup>[16]</sup>:

$$\Phi_{\text{tar}} = \varepsilon_{\text{tar}} \cdot t_{\text{atm}} \cdot t_{\text{opt}} \cdot t_{\text{win}} \cdot L(T_{\text{tar}}) \cdot \frac{A_{\text{tar}}}{R^2} \cdot A_0 \quad (18)$$

由于大气抖动和光学系统影响,点目标成像产生弥散现象。目标辐射能量会分布在多个探测器像元上,形成扩散的弥散斑,成像中心处像元的能量占比最大。

目标在探测器面的辐射照度为:

$$E_{\text{tar}} = \frac{\Phi_{\text{tar}}}{A_d \cdot N} \quad (19)$$

式(19)中, $A_d$ 为探测器像元面积, $N$ 为目标成像的像元数。

### 1.4 总辐射

探测器面接收到的总辐射照度 $E$ 由背景辐射照度 $E_b$ 和目标辐射照度 $E_{\text{tar}}$ 共同决定:

$$E = E_b + E_{\text{tar}} = E_{\text{atm}} + E_{\text{opt}} + E_{\text{win}} + E_{\text{tar}} \quad (20)$$

因此总辐射通量  $P$  为:

$$P = P_b + P_{tar} = E_b \cdot A_d + E_{tar} \cdot A_d \quad (21)$$

单光子能量为:

$$E_{ph} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (22)$$

其中,  $\nu$  为光子频率。

因此, 探测器面接收到的光子通量为:

$$P_{ph} = P/E_{ph} \quad (23)$$

## 2 探测器性能理论分析

### 2.1 探测器响应分析

探测器响应  $R_v$  指探测器输出电信号与入射辐射信号之比, 主要由响应覆盖波段  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  和量子效率  $\eta$  决定。

探测器将  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  波段内的光信号转换成电信号, 转换效率即为量子效率  $\eta$ 。

因此探测器总电流为<sup>[18]</sup>:

$$I = I_b + I_s + I_{dark} = \eta \cdot q \cdot P_{ph} + I_{dark} \quad (24)$$

式(24)中,  $I_b$  和  $I_s$  分别为背景和自辐射引起的电流,  $q$  为电子电荷量。

探测器电流信号转化为电压信号  $V$  的方式输出<sup>[19]</sup>:

$$V = V_b + V_s + V_{dark} = \frac{I \cdot t_{int}}{C_{int}} \quad (25)$$

式(25)中,  $V_b$ 、 $V_s$  和  $V_{dark}$  分别为背景辐射、目标辐射、暗电流转化的电压,  $t_{int}$  为积分时间,  $C_{int}$  为积分电容。最大输出电压受限于探测器设计摆幅  $V_b$ , 其与积分电容共同决定了探测器满阱  $Q_{well}$ :

$$Q_{well} = \frac{V_b \cdot C_{int}}{q} \quad (26)$$

因此, 探测器响应  $R_v$  的计算公式为<sup>[16]</sup>:

$$R_v = \frac{V}{P} \quad (27)$$

### 2.2 探测器噪声

BIB 探测器总噪声  $V_n$  主要包含散粒噪声  $V_{nshot}$ 、读出噪声  $V_{nread}$  和系统噪声  $V_{nsystem}$ , 计算关系如下:

$$V_n^2 = V_{nshot}^2 + V_{nread}^2 + V_{nsystem}^2 \quad (28)$$

其中, 系统噪声根据实际测试得到。

#### 2.2.1 散粒噪声

当光子按照一定概率分布撒到探测器上时, 由于量子涨落而形成的噪声为散粒噪声。背景和自辐射以及暗电流都会引起散粒噪声, 符合泊松分布, 根据电流水平可计算出散粒噪声电流<sup>[20]</sup>:

$$I_{nshot} = \sqrt{2 \cdot I \cdot \Delta f} \quad (29)$$

式(29)中,  $\Delta f$  为噪声等效带宽, 与积分时间的关系为<sup>[13]</sup>:

$$\Delta f = \frac{1}{2 \cdot t_{int}} \quad (30)$$

因此, 由散粒噪声引起的噪声电压为:

$$V_{nshot} = \frac{I_{nshot} \cdot t_{int}}{C_{int}} \quad (31)$$

#### 2.2.2 读出噪声

读出噪声电子数  $n_{read}$  由读出电路决定, 并与满阱相关。根据电子数与电压关系, 读出噪声电压  $V_{nread}$  可表示为:

$$V_{nread} = \frac{N_{read} \cdot q}{C_{int}} \quad (32)$$

#### 2.3 灵敏度分析

信噪比 SNR 为目标信号与噪声信号的比值, SNR 数值大小可用来衡量目标是否被有效探测<sup>[18]</sup>, 其计算公式为:

$$SNR = V_s / V_n \quad (33)$$

比探测率  $D^*$  为单位功率的辐射信号入射时, 单位面积的探测器在单位带宽下测量时的信噪比, 单位为  $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ , 可用来衡量探测器的灵敏度, 计算公式为<sup>[20]</sup>:

$$D^* = \frac{\sqrt{A_d \cdot \Delta f}}{V_n} \cdot R_v \quad (34)$$

## 3 地基探测场景中探测器性能需求分析

当探测场景中探测目标、搭载平台以及探测环境确定时, 根据辐射传输模型可计算出背景与目标辐射, 然后根据辐射能量与探测器性能之间的关系, 分析可适用于地基探测场景的探测器性能指标, 以指导探测器参数设计。

### 3.1 实际探测场景分析

#### 3.1.1 空间碎片参数

采用空间碎片作为探测目标, 探测目标设定参数为: 目标发射率 0.9、目标温度范围 200~300 K、目标尺寸 10 cm、轨道高度 300 km。不同温度下目标辐射亮度如图 2 所示。

由图 2 可知, 目标辐射亮度主要集中在长波及甚长波红外波段, 随着目标温度降低, 辐射能量减弱且辐射峰值往甚长波方向移动。对于微弱目标探测, 探测系统的工作波段应与目标辐射谱结合。

#### 3.1.2 探测环境参数

探测环境设定参数为: 中纬度冬季无云、环境温度 280 K。采用 MODTRAN 计算不同海拔高度下

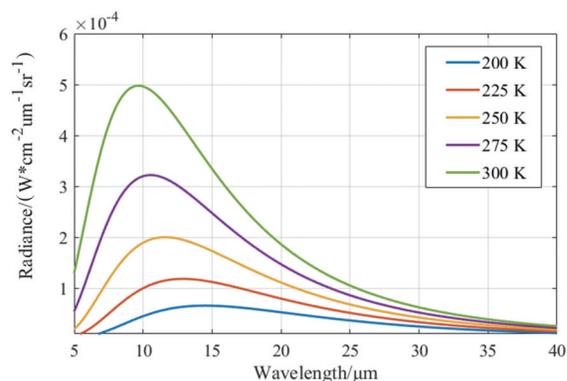


图2 不同温度下空间碎片的辐射亮度  
Fig. 2 Radiance of space debris at different temperatures

大气辐射亮度以及大气透过率,如图3所示。

随着海拔升高,大气辐射减小、透过率提高,探测时应选择高海拔地区以减小背景辐射影响。当海拔为4 km时,大气在甚长波红外都具有一定的透过性,可实现宽波段探测。

### 3.1.3 搭载平台参数

地基望远镜光学系统结构分为折射式、反射式和折反式三类。反射结构可减小色差,更适用于宽波段探测。此外,由于反射式具有色差小的特点,与折射式结构相比反射式望远镜口径更大,红外波段空间目标多为点目标,望远镜口径增大可提高收集到的目标辐射信号。为匹配 BIB 探测器,地基望远镜采用反射式大口径光机结构,如搭载有 BIB 探测器的 AEOS、miniTAO 等地基望远镜均为反射式大口径望远镜。

由于地基探测场景为高背景环境,空间目标微弱,探测系统采用杂散辐射抑制技术,可提升信噪比以实现有效探测。通过降低光学元件热辐射、提升光学元件透过率或反射率、设置光阑等措施,可

有效抑制杂散辐射<sup>[14,21-22]</sup>。因此,除地基望远镜平台,其他光学系统均采用高反射冷光学技术,冷光学组件结构设计如图4所示。

冷光学组件中光学元件都为镀金反射光学元件,整个光学系统参数如表1所示。

### 3.2 实际场景中辐射计算

冷光学组件可有效抑制背景辐射,根据目标和背景中各组分能量计算对比可评估冷光学组件的背景辐射抑制效果。

当工作波段为8~28  $\mu\text{m}$ 时,冷光学组件辐射与温度的关系如图5所示。

冷光学组件温度由77 K增大至280 K时,辐射照度由 $5 \times 10^{-9} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 增大至 $7 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。除冷光学组件外,目标和背景中其他组分的辐射照度如表2所示。

当冷光学组件温度为280 K时,探测器面总的背景辐照度约 $2.2 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。随着冷光学组件温度降低至77 K,背景辐照度减小至 $1.5 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,减少了32%,实现了背景辐射的抑制。77 K冷光学组件辐射照度比200 K温度下的目标辐射低一个数量级,此时可忽略冷光学产生的杂散辐射对探测的影响。

探测器接收的总辐射通量为 $1.4 \times 10^{-10} \text{ W}$ 、光子照度为 $1.1 \times 10^{10}$  光子/s。其中由目标引起的辐射通量为 $3.9 \times 10^{-13} \sim 2.5 \times 10^{-12} \text{ W}$ 、光子照度为 $3.1 \times 10^7 \sim 1.7 \times 10^8$  光子/s。

### 3.3 BIB 探测器性能需求分析

根据探测场景下辐射能量与探测器性能的关系,对 BIB 探测器需求指标进行分析计算。

式(24)可计算出由目标引起的电流水平高于

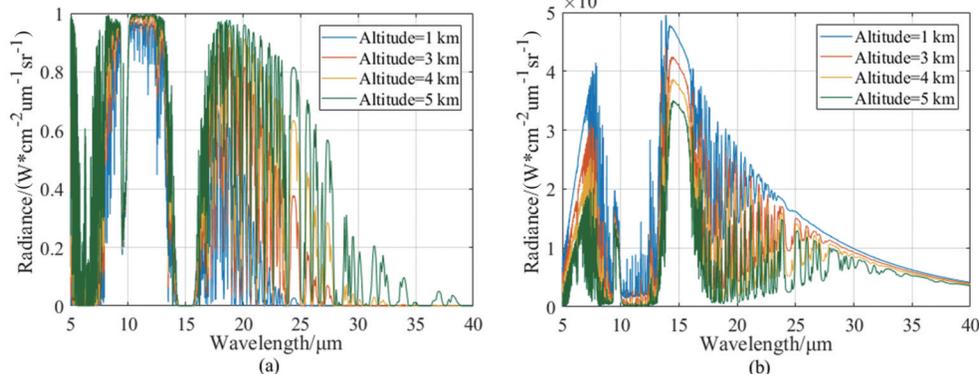


图3 透过率与辐射亮度:(a)不同海拔下大气透过率曲线;(b)不同海拔下大气辐射亮度曲线

Fig. 3 Transmittance and radiance: (a) atmospheric transmittance curve at different altitudes; (b) atmospheric radiance curve at different altitudes

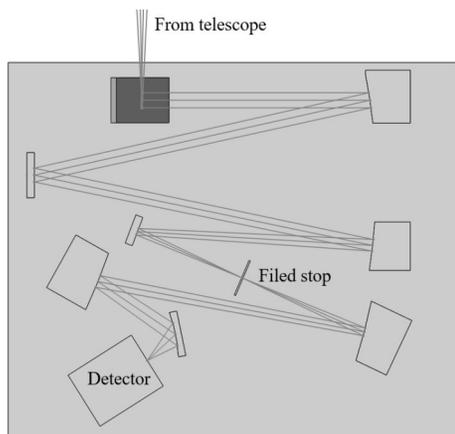


图4 冷光学组件结构图

Fig. 4 Cryogenic optical structure

表1 光学系统参数

Table 1 Optical system parameters

项目	取值	
地基望远镜	望远镜口径	1 m
	系统 F 数	F12
	主镜 M1 反射率	0.95
	次镜 M2 反射率	0.95
杜瓦窗口	窗口片透过率	0.7
冷光学组件	光学元件数	8
	单片反射率	0.97
光学系统等效透过率		0.50

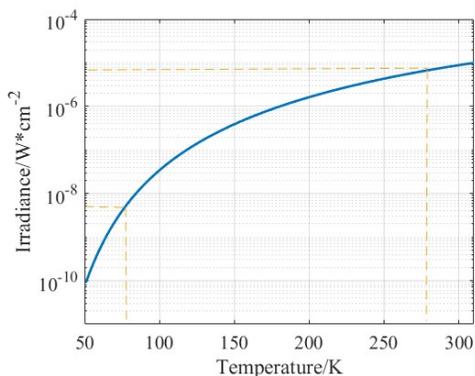


图5 冷光学组件辐射照度随工作温度的关系

Fig. 5 Irradiance of cryogenic optical components at different operating temperatures

表2 各组分辐射照度

Table 2 Irradiance of each part

项目	辐射照度/W·cm <sup>-2</sup>	
背景	大气	$5.4 \times 10^{-6}$
	望远镜平台	$2.4 \times 10^{-6}$
	杜瓦窗口	$7.3 \times 10^{-6}$
目标	空间碎片	$4.3 \times 10^{-8} \sim 2.7 \times 10^{-7}$

pA 量级。为避免探测器暗电流影响灵敏度指标,暗电流应小于由背景和目标引起的电流,因此暗电流应不高于 pA 量级。

满阱的设计取决于实际应用场景,在低背景环境满阱相对较小,而在高背景环境满阱需求大。由于地基探测场景为高背景环境,因此探测器应具有大动态范围以满足需求。BIB 探测器的最大满阱受探测器像元面积的限制,当探测器像元面积为  $9 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$  时,最大满阱在  $10 \text{ Me}^-$  量级。

BIB 探测器量子效率指标是决定灵敏度以及目标能否被有效探测的关键。计算时读出噪声取  $0.1 \text{ mV}$ 、系统噪声取  $0.3 \text{ mV}$ 。相同积分时间(未饱和)、不同空间碎片温度下,量子效率与信噪比的关系如图 6(a)所示。由图 6(a)可知,信噪比与量子效率正相关,并随目标温度增大而提高。设定 SNR 大于 3 为有效探测,则  $200 \text{ K}$  温度空间碎片有效探测对应的量子效率大于 40%。量子效率与比探测率的关系如图 6(b)所示,探测灵敏度  $D^*$  随量子效率增大而提高。因此,BIB 探测器量子效率指标需求大于 40%,对应比探测率  $D^*$  优于  $7 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

综上,当 BIB 探测器响应覆盖波段为  $8 \sim 28 \mu\text{m}$ 、量子效率大于 40%、暗电流不高于 pA 量级、满阱为  $10 \text{ Me}^-$ 、读出噪声为  $1000 \text{ e}^-$  (对应  $0.1 \text{ mV}$ )、比探测率优于  $7 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$  时,可满足在对应空间碎片地基探测场景的探测需求。地基望远镜 MAX38 载荷搭载的 BIB 探测器性能指标为响应覆盖波段  $8 \sim 38 \mu\text{m}$ 、暗电流  $2.4 \text{ pA}$ 、满阱  $10 \text{ Me}^-$ 、读出噪声  $800 \text{ e}^-$ ,与本文中分析的 BIB 探测器需求指标基本吻合,验证了本文理论分析计算方法的可行性与通用性。

#### 4 结语

本文基于空间目标的地基探测场景建立了辐射传输模型,计算了场景中目标和背景传输到探测器的辐射,并依据辐射、噪声、灵敏度之间的关系,分析了背景限 BIB 探测器在地基探测场景下的性能需求。文中计算的 BIB 探测器性能需求与探测目标为空间碎片时相对应,但分析计算方法具有通用性,当探测场景改变时,依然可计算出对应的探测器需求性能。为后续实际应用中 BIB 探测器的设计提供了参考,对空间目标的有效探测提供了理论支撑。

#### References

[1] Skinner M A, Russell R W, Kelecy T, et al. Observations

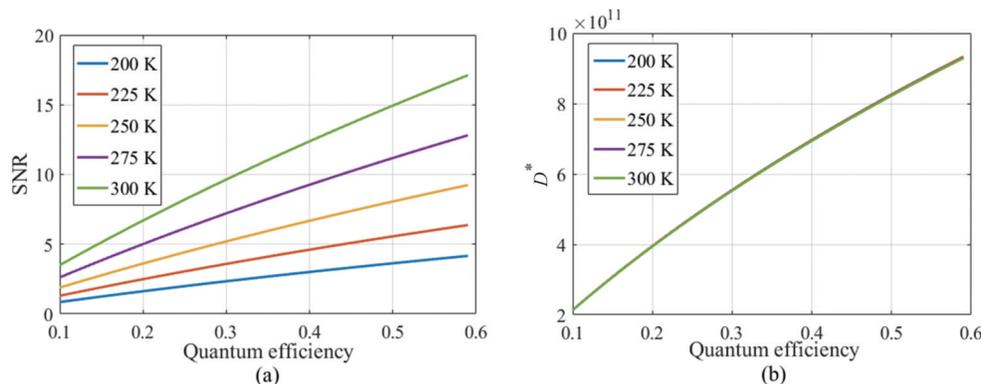


图6 SNR与 $D^*$ : (a)不同温度空间碎片的SNR与量子效率的关系; (b)不同温度空间碎片的 $D^*$ 与量子效率的关系

Fig. 6 SNR and  $D^*$ : (a) relationship of SNR with quantum efficiency for space debris detection at different temperatures; (b) relationship of  $D^*$  with quantum efficiency for space debris detection at different temperatures

- in the thermal IR and visible of a retired satellite in the graveyard orbit, and comparisons to active satellites in GEO [J]. *Acta Astronautica*, 2014, 105(1): 1–10.
- [2] Huang Z G. Research on Space Target of Ground-based Infrared Detection Technology [D]. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, University of Chinese Academy of Sciences, 2018.  
(黄智国.空间目标地基红外探测技术研究[D].中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所)), 2018.
- [3] Li Q, Xie R Z, Wang F, et al. SRH suppressed P-G-I design for very long-wavelength infrared HgCdTe photodiodes [J]. *Opt. Express*, 2022, 30: 16509–16517.
- [4] Xiao Y L, Deng K, Zhang K, et al. On-Chip Room-Temperature Operated Short-Wavelength-Infrared Si:S Photodetector with a Vertical Junction [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(49).
- [5] Ma X Z, Tang L B, Zhang Y P, et al. Research Progress of Silicon-based BIB Infrared Detector [J]. *Infrared Technology*, 2023, 45(1): 1–14.  
(马兴招,唐利斌,张玉平,等.硅基BIB红外探测器研究进展[J].红外技术), 2023, 45(1): 1–14.
- [6] Nakamura T, Miyata T, Sako S, et al. MiniTAO/MAX38 first light: 30-micron band observations from the ground-based telescope [C]. *Proceedings of Spie the International Society for Optical Engineering*, 2010, 7735.
- [7] Hoffmann W F, Hinz P M, Denis Defrère, et al. Operation and performance of the mid-infrared camera, NOMIC, on the Large Binocular Telescope [C]. *Proceedings of Spie the International Society for Optics and Photonics*, 2014.
- [8] Guo J X, Zhang T, Zhang K, et al. Sharp Interface Blocked Impurity Band Very Long-Wavelength Infrared Photodetector With High-Temperature Epitaxy [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2024, 45(6): 952–955.
- [9] Deng K, Zhang K, Li Q, et al. High-operating temperature far-infrared Si:Ga blocked-impurity-band detectors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2022, 120: 211103.
- [10] Jin H. Study on the Influence of Background Radiation on the Performance of Infrared Detection System [D]. Institute of Optics and Electronics, University of Chinese Academy of Sciences, 2016.  
(金和.背景辐射对红外探测系统性能的影响研究[D].中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所)), 2016.
- [11] Huang Z G, Wang J L, Yin L M, et al. Development of Cold Optical Infrared Imaging Terminal with Multiband [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(09): 57–65.  
(黄智国,王建立,殷丽梅,等.多波段冷光学红外成像终端研制[J].红外与激光工程), 2018, 47(09): 57–65.
- [12] Wu L M, Zhou F, Wang H Y. Study on the Relationship between the Infrared Detectors Background Limit Detectivity and the Optical Systems Work Temperature [J]. *Spacecraft Recov Remot Sens*, 2010, 31(01): 36–41.  
(吴立民,周峰,王怀义.红外探测器比探测率与光学系统工作温度关系研究[J].航天返回与遥感), 2010, 31(01): 36–41.
- [13] Li C L, Lin C, Chen X W, et al. Space-borne LWIR FPA imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(09): 2253–2260.  
(李春来,林春,陈小文,等.星载长波红外焦平面成像系统[J].红外与激光工程), 2012, 41(09): 2253–2260.
- [14] Wang H, Chen Q F, Ma Z P, et al. Development and Prospect of Stray Light Suppression and Evaluation Technology (Invited) [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(7): 0751406.  
(王虎,陈钦芳,马占鹏,等.杂散光抑制与评估技术发展及展望(特邀)[J].光子学报), 2022, 51(07): 0751406.
- [15] Bai Y Z. Principle and Technology of Photoelectric Imaging [M]. Beijing Institute of Technology Press, 2006.  
(白廷柱.光电成像原理与技术)[M].北京理工大学出版社, 2006.
- [16] Cao L H, Wan C M, Zhang Y F, et al. Infrared Radiation Characteristic Measure Method of Point Target [J]. *J Infrared Millim. Waves*, 2015, 34(04): 460–464.  
(曹立华,万春明,张云峰,等.点目标的红外辐射特性测量方法[J].红外与毫米波学报), 2015, 34(04): 460–464.
- [17] Sun C M, Yuan Y, Zhao F. Analysis of SNR for Space-based Imaging Detection of Space Object [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(05): 1654–1659.  
(孙成明,袁艳,赵飞.空间目标天基成像探测信噪比分析)

- 析[J]. 红外与激光工程), 2015, 44(05): 1654-1659.
- [18] Wu Z F. Infrared and Low-light Technology [M]. National Defence Industry Press, 1998.  
(吴宗凡. 红外与微光技术) [M]. 国防工业出版社, 1998.
- [19] Mao J X, Guo J H, Li L H, et al. Calculation of Parameters for Long Wave Infrared FPA Detectors Applied in Low-temperature Background [J]. Infrared Technology, 2023, 45(05): 553-558.  
(毛京湘, 郭建华, 李立华, 等. 低温背景应用长波红外焦平面探测器性能参数的计算[J]. 红外技术), 2023, 45(05): 553-558.
- [20] GB/T 17444-2013, Measuring Methods for Parameters of Infrared Focal Plane Arrays[S].  
(GB/T 17444-2013, 红外焦平面阵列参数测试方法[S]).
- [21] Zhang Z Y, Chang J, Huang Y F, et al. Reinforcement learning-based stray light suppression study for space-based gravitational wave detection telescope system [J]. Opto-Electron Eng, 2024, 51(2): 230210.  
(张梓扬, 常军, 黄一帆, 等. 基于强化学习的空间引力波探测望远镜系统外杂光抑制研究[J]. 光电工程), 2024, 51(2): 230210.
- [22] Yu Q H, Xiao X S, Chen F S, et al. Design Method for Triple Conjugate Optical System with Good Stray Light Control Performance [J]. J. Infrared Millim. Waves, 2019, 38(01): 8-14.  
(于清华, 肖锡晟, 陈凡胜, 等. 三重共轭消杂散光光学系统的设计方法研究(英文)[J]. 红外与毫米波学报), 2019, 38(01): 8-14.