

# 基于同心多尺度成像的机载光电系统探测能力分析

吴雄雄<sup>1</sup>, 王晓蕊<sup>1</sup>, 郭冰涛<sup>2</sup>, 袁航<sup>1</sup>, 李珂<sup>1</sup>, 袁影<sup>1</sup>

<sup>1</sup>西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;

<sup>2</sup>西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065

**摘要** 同心多尺度成像技术为突破传统光学成像中分辨率与视场之间的矛盾提供了一条有效的途径。将同心多尺度成像模式应用于机载光电探测系统, 实现机载广域宽视场高分辨目标探测。综合分析了目标辐射空间分布、目标辐射传输和光学系统成像等特性, 建立了表征同心多尺度成像系统的探测能力理论模型, 得到了系统探测能力与组成单元透镜的口径、焦距、间距等参数之间的变化关系。并用光学设计软件 Zemax 设计了实际光学系统, 数值模拟了空中来袭运动目标的光谱信号信噪比(SNR)响应特征。结果表明合理增加同心多尺度成像系统中的物镜焦距、减小目镜焦距、增大系统口径和降低探测信噪比阈值等能够有效提高成像系统的探测能力。

**关键词** 光学设计; 同心多尺度; 宽视场; 目标辐射; 探测能力

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0422001

## Analysis on Detection Capability of Airborne Optoelectronic System Based on Monocentric Multiscale Imaging

Wu Xiongxiang<sup>1</sup>, Wang Xiaorui<sup>1</sup>, Guo Bingtao<sup>2</sup>, Yuan Hang<sup>1</sup>, Li Ke<sup>1</sup>, Yuan Ying<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

<sup>2</sup>Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an, Shaanxi 710065, China

**Abstract** The technology of monocentric multiscale imaging provides an effective approach to overcome the contradiction between resolution and field of view in traditional optical imaging. In this paper, the model of monocentric multiscale imaging is applied in the airborne optoelectronic detection system to achieve the wide field of view and high-resolution detection of the target. We comprehensively analyze the characteristics about the space distribution and transmission of the target radiation, and the imaging performance of optical system. Then we establish the theoretical model of detection capability of the monocentric multiscale imaging system to obtain the variation relationship between the detection capability of the system and the parameters such as the aperture, focal length, and distance of the element lens. The actual optical system is designed by using the optical design software Zemax, and the response characteristics of the signal to noise ratio (SNR) of the spectral signal of the incoming moving target is numerically simulated. The results show that appropriately increasing the focal length of the objective lens, reducing the focal length of the eyepiece, increasing the aperture of the system and reducing the detection SNR threshold of the monocentric multiscale imaging system can effectively improve the detection capability of the imaging system.

**Key words** optical design; monocentric multiscale; wide field of view; target radiation; detection capability

**OCIS codes** 220.3630; 220.4830; 000.4430

## 1 引 言

传统机载光电成像探测能力分析模型尽管考虑了复杂背景环境的影响, 但是大多都针对光学系统

有效口径进行探测能力理论计算, 没有考虑具体光学系统设计相关的视场、分辨率及其内部结构设计参数<sup>[1-2]</sup>。在光学成像领域, 人们总是希望设计的光学系统具有长焦距、高分辨率、宽视场、小体积、大相

收稿日期: 2017-09-11; 收到修改稿日期: 2017-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(61377007, 61575152, 61775174)、国防基础科研计划(JCKY2016208B001)

作者简介: 吴雄雄(1992—), 男, 博士研究生, 主要从事光电成像系统设计与仿真方面的研究。E-mail: wuxx1992@126.com

导师简介: 王晓蕊(1976—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光电成像系统工程优化设计、协同仿真、性能测试与评估等方面的研究。E-mail: xrwang@mail.xidian.edu.cn(通信联系人)

对口径等成像特点。其中分辨率和视场角是光学成像系统的两个关键技术指标。兼顾宽视场与高分辨成像一直是空天监视、预警探测、安全监控等领域追求的方向<sup>[3-7]</sup>。但是由于受到透镜系统比例法则的制约<sup>[8]</sup>,传统成像系统无法同时实现宽视场与高分辨成像。随着高科技作战和新型机载装备的发展,各国对军事应用提出了探测范围广、范围远、分辨率高等要求。因此有必要研究兼顾宽视场与高分辨统一的机载成像系统,并对其探测能力进行研究分析。

目前已经探索出许多宽视场与高分辨统一的典型成像方式。例如,Sargent等<sup>[9]</sup>通过利用高分辨相机扫描的方式获得宽视场高分辨率图像,但是扫描获取的宽幅图像帧与帧之间存在时间间隔,仅适用于静态场景;Suntharalingam等<sup>[10]</sup>通过拼接多个探测器获得连续的更大的探测器实现大视场高分辨率成像,虽然该探测器适用于单次曝光获取图像的应用场合,但是其存在拼接缝隙,获取的图像内存在盲区;闫阿奇等<sup>[11]</sup>通过使用鱼眼透镜扩大视场,但是其成像面存在畸变,整个像面上无法实现一致分辨率,尤其边缘区域被严重压缩,信息损失较大;Wilburn等<sup>[12]</sup>通过使用相机阵列同时获取一系列视角不同的图像,最后通过图像拼接实现宽视场全景成像,但是该方法相机阵列物理尺寸太大,成本太高。

近年来,美国杜克大学的Brady等<sup>[13]</sup>提出了多尺度光学设计,该系统包括一个大的物镜和一系列小的光学元件组成的多孔径中继成像阵列结构,集成了物镜的大视场采集能力和多孔径中继成像阵列结构的局部像差校正能力。但是该系统的多孔径阵列由不同的光学元件组成,生产和装配比较困难。因此Brady等<sup>[14-16]</sup>把物镜设计为同心球形物镜,形成同心多尺度成像结构,这样多孔径阵列不同位置的的光学元件完全对称一致。依照同心多尺度模式设计的十亿超高像素相机有AWARE-2、AWARE-10等,AWARE-2相机拥有的视场为 $120^{\circ} \times 50^{\circ}$ ,角分辨率为 $40 \mu\text{rad}$ <sup>[17]</sup>,AWARE-10相机拥有 $100^{\circ} \times 60^{\circ}$ 的视场,角分辨率为 $25 \mu\text{rad}$ <sup>[18]</sup>,真正地实现了宽视场高分辨十亿超高像素成像。

同心多尺度成像模式成功地避开了加工探测器拼接和光学设计等一系列技术挑战,是实现宽视场高分辨成像的最佳方式之一。为了实现对广域空中目标的监视与预警,本文将同心多尺度成像系统应用于机载光电探测系统,分析了目标辐射空间分布

及传输特性,研究了系统探测能力与组成单元透镜的口径、焦距、间距等参数之间的关系,为系统光学设计提供理论依据,并数值模拟了空中来袭运动目标的光谱信号信噪比(SNR)响应特征,提出了提高系统探测能力的方法。

## 2 机载光电成像系统探测原理

对机载光电成像系统探测能力的分析,需要研究整个系统链路环节。首先太阳辐射能量的空间分布使空间目标的全部或部分区域被照亮。目标表面的反射能量和自身的辐射能量在空间传输一段距离后进入光学探测系统。当电荷耦合器件(CCD)的焦平面接收到目标辐射能量后,转换为携带图像信息的电信号,然后图像采集处理单元对电信号进行采集处理,进而实现目标的探测与识别。

机载光电成像系统探测原理如图1所示,包括目标的反射和自身辐射、大气传输、光学系统、探测器等模块。目标辐射强度包括目标自身辐射强度和目标表面反射辐射强度两部分。现有文献大多忽略对目标表面的反射辐射强度的分析,虽然反射辐射强度总体上弱于目标本征辐射,但在目标特定方位上,这种反射辐射对光电系统的探测距离有着较大贡献。

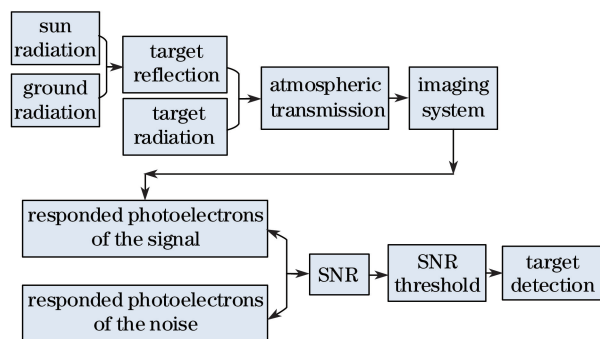


图1 机载光电成像系统探测原理

Fig. 1 Detection principle of airborne optoelectronic imaging system

### 2.1 目标辐射强度空间分布

目标的辐射强度包括目标自身的辐射和反射的背景辐射。反射的背景辐射能量主要来源于太阳、地面、大气热辐射以及地面和大气的二次反射辐射。建立目标反射辐射来源的空间分布如图2所示,图中OXYZ表示以空中目标中心为原点的直角坐标系, $\alpha$ 表示太阳高度角, $\beta$ 表示目标方位角。由于背景辐射经目标反射较为复杂,需要分解分析,即从XOY水平面和YOZ垂直面进行分析,分为以下三种情况。

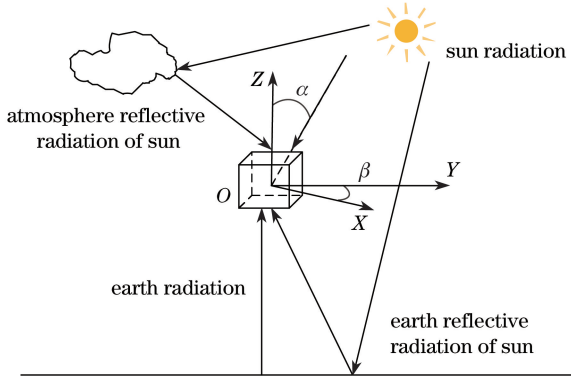


图 2 目标反射的背景辐射分布

Fig. 2 Distribution of reflected background radiation of the target

### 2.1.1 空中目标与探测相机位于同一水平面

当空中目标与探测相机在同一水平面内(即在  $XOY$  平面内), 目标反射背景辐射主要受天空背景和太阳辐射的影响。假设空中目标迎着太阳飞行, 太阳高度角为  $\alpha$ ,  $\alpha \in (0, \pi/2)$ , 目标与探测相机水平夹角为  $\beta$ ,  $\beta \in (0, \pi/2)$ , 目标与探测相机的相对位置如图 3 所示。于是得到  $XOY$  水平面内目标反射的背景辐射强度空间分布为

$$F_{\text{ref}} = E_{\text{sun}} A_{\text{head}} \sin \alpha \cos \beta \cdot \rho + L_{\text{ground}} (A_{\text{head}} \cos \beta + A_{\text{side}} \sin \beta) \cdot \rho, \quad (1)$$

式中  $E_{\text{sun}}$  表示太阳辐射照度,  $A_{\text{head}}$  和  $A_{\text{side}}$  分别表示目标有效的头部反射面积和侧反射面积,  $\rho$  表示目标表面的反射率,  $L_{\text{ground}}$  表示背景辐射亮度。

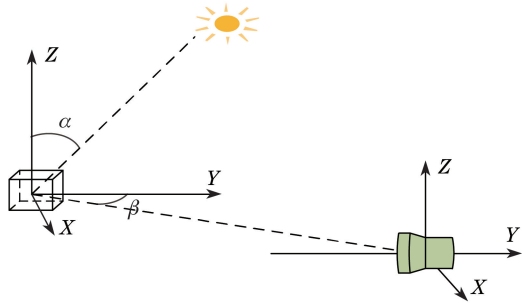


图 3 目标与探测相机位于同一水平面

Fig. 3 Target and detecting camera located at the same plane

目标的自身辐射主要来源于目标蒙皮、尾喷口和尾焰等。由普朗克黑体辐射公式得目标单色辐出度  $M(\lambda)$  为

$$M = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left\{ \frac{1}{\exp[hc/(\lambda kT)] - 1} \right\}, \quad (2)$$

式中  $h$  为普朗克常数,  $c$  为真空中光速,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为目标的表面温度, 可利用工程简化算法计算目标不同部位的温度<sup>[19]</sup>。此时目标自身辐射的空间分布可表示为

$$F_{\text{self}} = \epsilon \left( \frac{M}{\pi} A_{\text{head}} \cos \beta + \frac{M}{\pi} A_{\text{side}} \sin \beta \right), \quad (3)$$

式中  $\epsilon$  表示目标的发射率。

### 2.1.2 空中目标位于探测相机下方

目标与探测相机不在同一水平面, 当目标位于探测相机下方迎着太阳飞行时, 如图 4 所示,  $\alpha$  为太阳高度角,  $\alpha \in (0, \pi/2)$ ,  $\beta$  为目标与探测相机的俯仰夹角,  $\beta \in (0, \pi/2)$ , 目标下表面反射进入探测相机的辐射能量可以忽略不计, 只考虑头部和上表面反射进入探测相机的辐射能量, 则目标反射的辐射强度分布为

$$F_{\text{ref}} = E_{\text{sun}} [A_{\text{on}} \sin(\beta - \alpha) + A_{\text{head}} \cos(\beta - \alpha)] \rho + L_{\text{ground}} (A_{\text{on}} \sin \beta + A_{\text{head}} \sin \beta) \rho, \quad (4)$$

式中  $A_{\text{on}}$  表示目标有效的上反射面积。

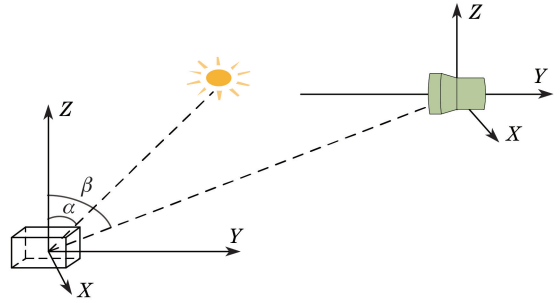


图 4 目标位于探测相机下方

Fig. 4 Target located below the detecting camera

此时目标自身辐射的空间分布可表示为

$$F_{\text{self}} = \epsilon \left( \frac{M}{\pi} A_{\text{head}} \sin \beta + \frac{M}{\pi} A_{\text{on}} \cos \beta \right). \quad (5)$$

### 2.1.3 空中目标位于探测相机上方

当目标位于探测相机上方迎着太阳飞行时, 如图 5 所示,  $\alpha$  为太阳高度角,  $\alpha \in (0, \pi/2)$ ,  $\beta$  为目标与探测相机的俯仰夹角,  $\beta \in (\pi/2, \pi)$ , 则目标反射的辐射强度分布为

$$F_{\text{ref}} = E_{\text{sun}} A_{\text{head}} \sin \alpha \cos(\beta - \pi/2) \rho + L_{\text{ground}} A_{\text{down}} \sin(\beta - \pi/2) \rho, \quad (6)$$

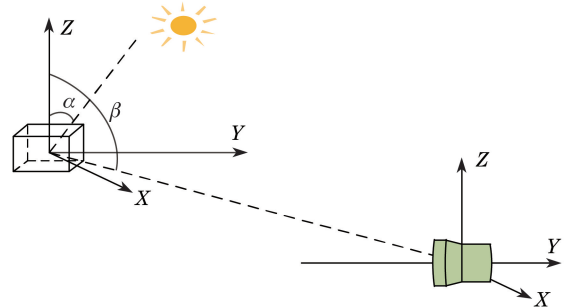


图 5 目标位于探测相机上方

Fig. 5 Target located above the detecting camera

式中  $A_{\text{down}}$  表示目标有效的下反射面积。

此时目标自身辐射的空间分布可表示为

$$F_{\text{self}} = \varepsilon \left[ \frac{M}{\pi} A_{\text{head}} \cos\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{M}{\pi} A_{\text{down}} \sin\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right) \right]. \quad (7)$$

## 2.2 目标辐射传输分析

从以上对空间目标的辐射特性分析可以看出, 这里的空间目标辐射属于扩展源(面目标)辐射。空间目标光谱辐射经过大气衰减传输被光学系统所接收, 光学系统入瞳接收到的光谱辐射强度为

$$E = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (F_{\text{ref}} + F_{\text{self}}) d\lambda \cdot \tau(\lambda, R), \quad (8)$$

式中  $\tau(\lambda, R)$  表示光谱透过率, 由 Beer-Lambert 定律<sup>[20]</sup> 可得  $\tau(\lambda, R) = \exp[-\mu(\lambda) \cdot R]$ , 其中  $\mu(\lambda)$  为大气介质的衰减系数或消光系数,  $R$  为路径距离。

一般情况下, 目标与探测光学系统之间的距离较远, 假设目标与探测相机入瞳处的距离为  $R$ , 如图 6 所示。设光学系统的入瞳面积为  $S$ ,  $S = \pi(D/2)^2$ ,  $D$  是光学系统的有效通光口径, 则以目标中心为基准点到光瞳面的立体角为  $\Omega = \frac{\pi D^2}{4R^2}$ 。设探测器的像元尺寸面积  $A_{\text{det}} = a \cdot b$ , 则能被单个像元成像的目标面积为

$$A_{\text{src}} = \frac{a}{f} R \frac{b}{f} R = \frac{abR^2}{f^2}, \quad (9)$$

式中  $f$  为光学系统的有效焦距,  $a$ 、 $b$  为探测器像元的长和宽。

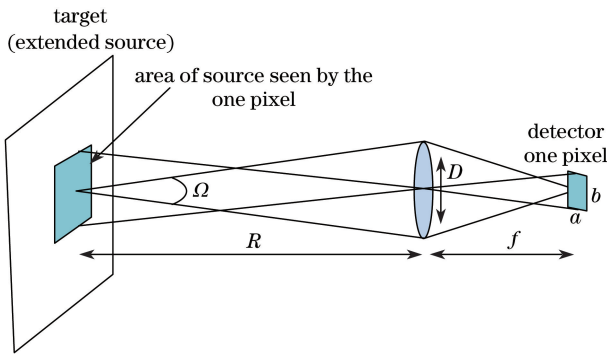


图 6 目标辐射传输至光学系统示意图

Fig. 6 Schematic of target radiation transmission to the optical system

进入光学系统最后到达探测器上单个像元的能量为

$$\phi = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \frac{F(\lambda) A_{\text{src}} \pi D^2 \tau_1 \tau(\lambda, R) \cos \theta}{4R^2} d\lambda = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \frac{F(\lambda) ab \pi D^2 \tau_1 \tau(\lambda, R) \cos \theta}{4f^2} d\lambda, \quad (10)$$

式中  $\tau_1$  为光学系统的光谱透过率,  $\tau(\lambda, R)$  为大气透过率,  $\theta$  为光学系统光轴方向与目标表面法线方向的夹角,  $F(\lambda)$  为单位时间内目标总的辐射能量,  $F(\lambda) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (F_{\text{ref}} + F_{\text{self}}) d\lambda$ 。在一定积分时间  $t$  内, 探测器上每个像元响应的进入光学系统的光电子数为  $N = \frac{\eta \varepsilon t \phi}{(hc/\lambda)}$ , 式中  $\lambda$  为波长的平均值,  $\eta$  为平均量子效率,  $\varepsilon$  为像元填充因子。

## 2.3 极限探测距离计算

在目标探测领域, 极限探测距离是评价系统探测能力最直接的指标。而信噪比计算是衡量相机能否满足探测要求、评估系统总体指标、计算极限探测距离的必要环节。一般计算信噪比的模型有光电子数形式的信噪比计算模型<sup>[2, 21]</sup>、比探测率形式的探测信噪比计算模型等。但是比探测率形式的探测信噪比计算模型假设了噪声大小是恒定的。这种计算模型简单, 适用于探测器性能粗略估计, 但其无法用来对系统各部分噪声大小进行计算分析, 以进一步采取相应的技术措施提高系统的探测性能<sup>[22]</sup>。因此, 本研究主要从光电子数的角度分析计算了探测系统的信噪比。

以电子数为单位计算的信噪比, 其基本定义是输出目标信号等效光电子数比上系统探测噪声等效光电子数, 即  $R_{\text{SN}} = N/N_{\text{noise}}$ ,  $N$  是探测器的每个像元响应的进入光学系统的光电子数,  $N_{\text{noise}}$  是同一时间内系统接收到的总体噪声电子数。

探测器在对空间目标探测时, 噪声来源有光子噪声、热噪声、探测器噪声、驱动电路固有噪声和环境引入噪声等。本研究只考虑主要噪声, 即光子噪声、读出噪声和探测器暗电流噪声。光子噪声是目标和背景入射光子流随机波动引起的噪声。暗电流噪声主要是由探测器电荷载流子热运动导致的, 该噪声是一种白噪声, 服从泊松分布。读出噪声描述了从焦面电子到放大电流再到模数(AD)转换整个过程中所有的电子学噪声。以上提及的三种噪声是相互独立的, 因此, 系统总体噪声的等效电子数是所有噪声贡献的平方根<sup>[23]</sup>, 其计算公式为:  $N_{\text{noise}} = \sqrt{n_b^2 + n_r^2 + n_d^2}$ , 式中  $n_b$  表示光子噪声的等效电子数,  $n_r$  表示读出噪声的等效电子数,  $n_d$  表示探测器暗电流噪声的等效电子数。

为使探测器能从噪声信号中提取出目标信号, 在对空间目标进行成像探测时系统的信噪比必须大于等于由探测概率和虚警概率所确定的信噪比



阈值  $T$ , 即  $R_{SN} \geq T$ 。最后代入以上各个计算公式推导得到极限探测距离  $R$  表示为

$$R \leq \frac{\ln \frac{\pi D^2 F a b \tau_1 \cos \theta \lambda \eta \epsilon t}{4 f^2 h c T N_{\text{noise}}}}{\mu} \quad (11)$$

为了实现广域空中目标的探测与识别, 将同心多尺度成像系统应用于机载光电探测系统。由于同心多尺度成像系统中特有的中继结构, 通过分析(11)式, 研究机载同心多尺度成像系统的极限探测距离, 必须研究计算同心多尺度成像系统的有效通光口径  $D$  和有效焦距  $f$ 。

### 3 基于同心多尺度成像模式的光学系统参数计算

同心多尺度成像系统由一个较大的球形对称物镜和一组完全相同的次级微型中继相机组成。图 7 显示了一个同心多尺度相机 AWARE-2 的外形结构图和光学结构图<sup>[16]</sup>。球形对称物镜对广域场景一次成像, 生成弯曲的中间像面; 次级微型相机阵列对广域视场进行分割且分割的视场有所重叠。每个次级微型相机进一步矫正主物镜的残余像差, 在各自对应的视场通道内对中间像面中继成像。最后利用计算机对子图像进行拼接, 形成广

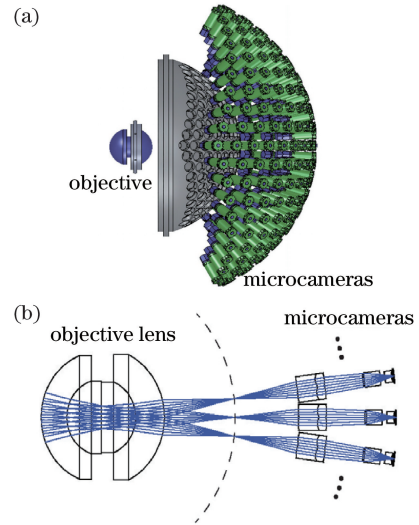


图 7 AWARE-2 相机的(a)外形图和(b)光路图  
Fig. 7 (a) Outline structure and (b) optical layout of AWARE-2 camera

域宽视场高分辨图像。

由于次级微型相机完全相同, 因此只考虑主物镜与单个次级微型相机组合形成的系统模型。整个系统模型可以看作是由一个开普勒望远镜系统和人眼观察系统组成, 如图 8 所示。人眼观察系统的入瞳口径与望远系统的出瞳匹配相等, 如图 8 中  $D_2$  所示。

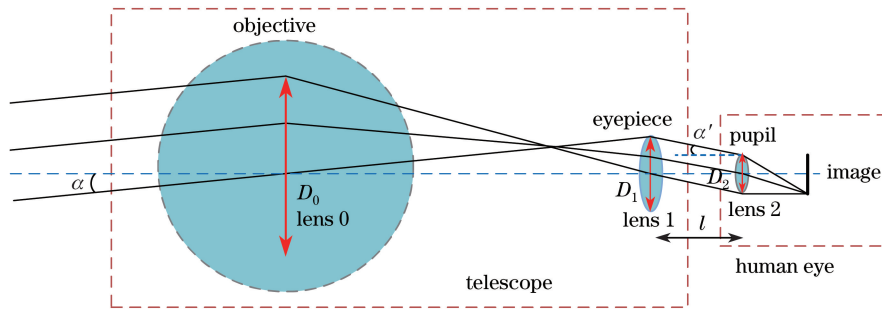


图 8 同心多尺度系统单通道成像示意图

Fig. 8 Schematic of single channel imaging of the monocentric multiscale system

假设探测器的尺寸为  $X$ , 望远镜无焦系统的角放大率为  $M$ ,  $M = \frac{f_0}{f_1}$ ,  $f_0$  为物镜焦距,  $f_1$  为目镜焦距。系统的视场为  $\alpha$ , 整个同心多尺度成像系统的有效焦距从探测器计算, 则透镜 2 的焦距为  $f_2 = \frac{X}{2M \tan \alpha}$ , 因此得到整个同心多尺度成像系统的有效焦距为

$$f = \frac{X}{2 \tan \alpha} = M f_2 = \frac{f_0 f_2}{f_1} \quad (12)$$

从图 8 可以看出, 口径  $D_1$  由系统视场  $\alpha$  和透镜 0 与透镜 1 之间的距离决定, 口径  $D_1$  的计算公式为

$$D_1 = 2(f_0 + f_1) \cdot \tan \alpha \quad (13)$$

为了使渐晕最小, 系统光阑应该置于透镜 2<sup>[15]</sup>, 且必须满足:

$$M \tan \alpha = \frac{D_1 - D_2}{2l} \quad (14)$$

式中  $l$  为透镜 1 与透镜 2 的距离。因此, 整个同心多尺度成像系统的入瞳口径为

$$D = M D_2 = M(D_1 - 2l \cdot M \tan \alpha) = 2 \tan \alpha \cdot \frac{f_0}{f_1} \left( f_0 + f_1 - l \frac{f_0}{f_1} \right) \quad (15)$$

假设视场  $\alpha = 5^\circ$ ,  $l = 5 \text{ mm}$ , 绘制出系统有效口径  $D$  与  $f_0$  和  $f_1$  的关系图, 如图 9 所示。

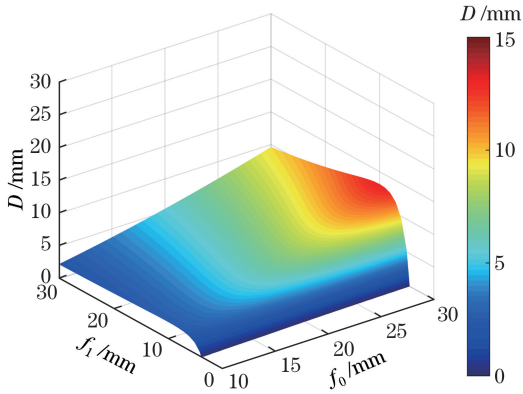


图 9 系统口径与透镜焦距之间的关系

Fig. 9 Relationship between the system aperture and the focal length of the lens

从图 9 可以看出,系统有效口径  $D$  随着物镜焦距  $f_0$  的增大而增大,随着目镜焦距  $f_1$  的增大先增大后减小。于是为了找到最合适的  $f_1$  使得口径最大,用系统有效口径  $D$  对  $f_1$  进行求导,得:

$$\frac{dD}{df_1} = 4lf_0^2 f_1^{-3} \tan \alpha - 2f_0^2 f_1^{-2} \tan \alpha, \quad (16)$$

令(16)式为 0,得到  $f_1 = 2l$ 。因此,得出最终口径和焦距的关系式为

$$D = 2 \frac{f_0}{f_1} \left( \frac{f_0}{2} + f_1 \right) \tan \alpha, \quad (17)$$

此时系统口径  $D$  与焦距  $f_0$  和  $f_1$  之间的关系如图 10 所示。

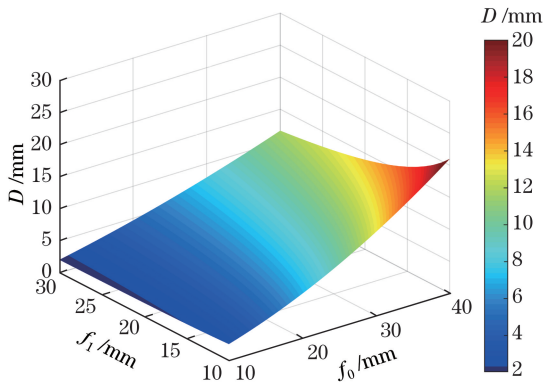


图 10 系统口径与焦距  $f_0$  和  $f_1$  之间的关系

Fig. 10 Relationship between the system aperture and the focus length  $f_0, f_1$

从图 10 可以看出,当物镜焦距  $f_0$  较小时,目镜焦距  $f_1$  与系统口径  $D$  之间基本没有影响关系。随着物镜焦距  $f_0$  变大,目镜焦距  $f_1$  逐渐对系统口径  $D$  有影响,但是影响关系依旧不明显。从理论上说,增大物镜焦距  $f_0$ 、减小目镜焦距  $f_1$  能够增大有效孔径  $D$ ,但是实际情况中增大物镜焦距  $f_0$  会使得物镜体积太大,减小目镜焦距  $f_1$  会使得目镜与后端透

镜之间距离太近,造成装配时的余量不足,因此目镜焦距  $f_1$  不宜过小。将同心多尺度光学系统的有效焦距和口径[即(12)和(17)式]代入探测距离公式(11)式中得到:

$$R \leq \frac{1}{\mu} \cdot \ln \frac{\pi \tan^2 \alpha \left( \frac{f_0}{2} + f_1 \right)^2 Fab\tau_1 \cos \theta \lambda \eta t}{f_2^2 hcTN_{\text{noise}}}, \quad (18)$$

该式即为基于同心多尺度成像模式的光学系统极限探测距离计算公式。

#### 4 机载同心多尺度成像系统极限探测距离仿真分析

同心多尺度成像系统主镜采用球形对称光学系统,即由一个透明介质的球形透镜以及一系列的外包球壳组成。随着球壳数目的增加,设计的自由度增加,可以更好地优化各个参数以改善系统的成像质量,但同时设计的复杂度增高。综合考虑,本研究中主镜采用两层同心球形透镜,如图 11 所示,焦距计算公式为

$$f = \frac{1}{2} \cdot \frac{r_1 r_2 n_1 n_2}{r_2(n_1 - 1)n_2 + r_1(n_2 - n_1)}, \quad (19)$$

式中  $n_1, n_2$  为透镜的折射率,  $r_1, r_2$  为球形透镜的曲率半径。

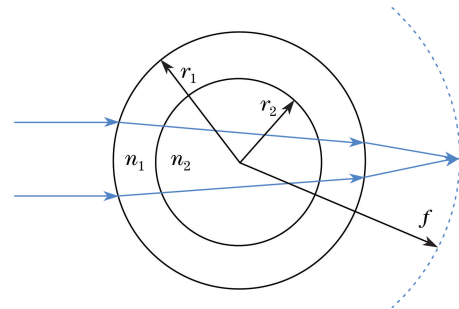


图 11 两层同心球形透镜

Fig. 11 Two-layer monocentric lens

分析(18)式可知,系统的极限探测距离受目标方位角、光学系统视场、内部透镜组的焦距、光学系统透过率、曝光时间以及探测器的信噪比阈值、平均量子效率等参数的影响。假设目标与探测光学系统在同一水平面内,且目标与光学系统的夹角  $\beta = 0^\circ$ 。太阳可等效为温度为 5900 K 的黑体辐射,垂直入射到地球表面的辐照度约为  $800 \text{ W/m}^2$ ,太阳高度角  $\alpha = 45^\circ$ 。目标各个面的面积  $A = 9 \text{ m}^2$ ,目标总的辐射功率  $F = F_{\text{ref}} + F_{\text{self}}$ 。其他仿真参数为:仿真计算的波段范围为  $3 \sim 5 \mu\text{m}$ ,平均波长  $\lambda = 4 \mu\text{m}$ ,

光学系统光谱透过率  $\tau=80\%$ , 曝光时间  $t_0=0.1\text{ s}$ , 平均量子效率  $\eta=0.6$ , 像元大小为  $8\ \mu\text{m}\times 8\ \mu\text{m}$ , 像元填充因子  $\epsilon=0.4$ , 探测信噪比阈值  $T=3$ , 系统总体噪声光电子数为  $400\ \text{s}^{-1}$ , 大气介质的衰减系数  $\mu=0.2$ 。

分别取物镜的焦距  $f_0$  为 45, 75, 100 mm, 得到此时探测距离  $R$  与  $f_1, f_2$  的关系如图 12 所示。

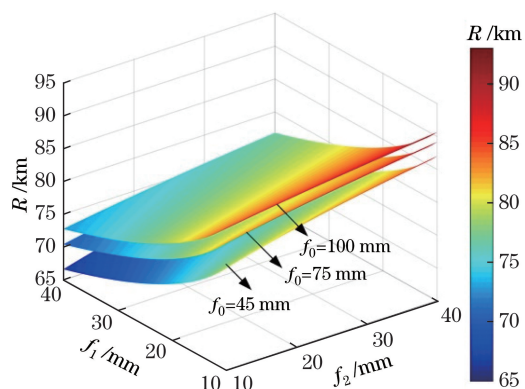


图 12 探测距离  $R$  与焦距  $f_0, f_1, f_2$  的关系  
Fig. 12 Relationship between detection distance  $R$  and focus length  $f_0, f_1, f_2$

从图 12 可以看出, 探测距离  $R$  随着焦距  $f_0$  的增大而增大, 随着  $f_1$  的减小而增大, 而焦距  $f_2$  的值对探测距离的影响不大。对比系统口径  $D$  与焦距  $f_0$  和  $f_1$  之间的关系图(图 10)可以看出, 探测距离  $R$  和系统口径  $D$  关于焦距  $f_0$  和  $f_1$  之间的变化关系相同, 同时也说明了增大系统口径  $D$  可以提高系统的探测能力。

依照上述对同心多尺度成像系统各个参数之间的分析, 取焦距  $f_0=75\text{ mm}$ ,  $f_1=20\text{ mm}$ ,  $f_2=15\text{ mm}$  为初始结构, 利用 Zemax 光学设计软件对光学系统进行建模, 设计波长为  $3\sim 5\ \mu\text{m}$ , 选用红外玻璃材料, 最终优化设计得到的光学系统焦距为  $f=24\text{ mm}$ , 系统  $F$  数为 2, 视场  $\alpha=\pm 4^\circ$ , 光学系统结构如图 13 所示, 成像点列图和调制传递函数 (MTF) 曲线分别如图 14、图 15 所示 (OBJ 表示物方视场, RMS 表示均方根), 可以看出系统成像质量好, 接近衍射极限。

数值模拟了该车载同心多尺度成像系统探测运动目标得到的光谱信号信噪比响应特征, 结果如图 16 所示。成像系统的结构参数与文中优化设计得到光学系统参数一致, 系统焦距  $f=24\text{ mm}$ , 系统口径  $D=12\text{ mm}$ , 系统  $F$  数为 2。由第二节对目标的辐射强度空间分布分析可得, 计算目标辐射强度考虑了目标各个方向的面积。因此, 目标姿态的变

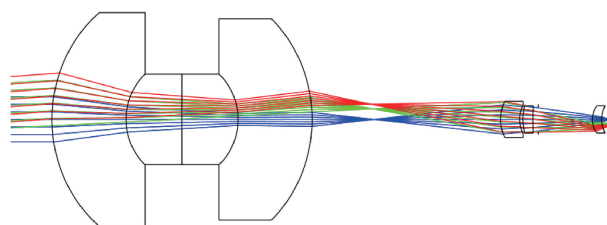


图 13 优化设计得到的系统光路图

Fig. 13 Optical layout of the system after optimization design

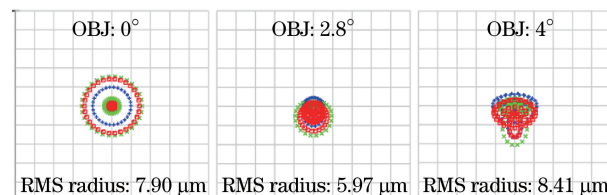


图 14 光学系统成像点列图

Fig. 14 Spot diagram of the optical system imaging

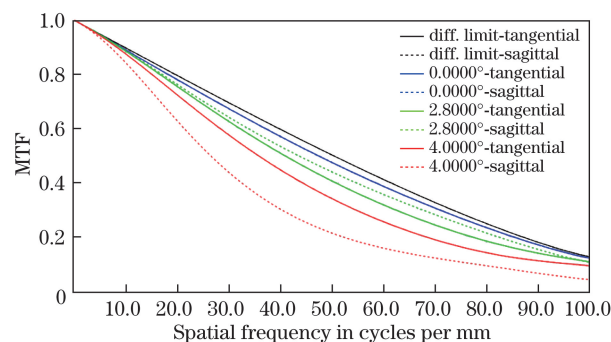


图 15 光学系统的 MTF 曲线

Fig. 15 MTF curves of the optical system

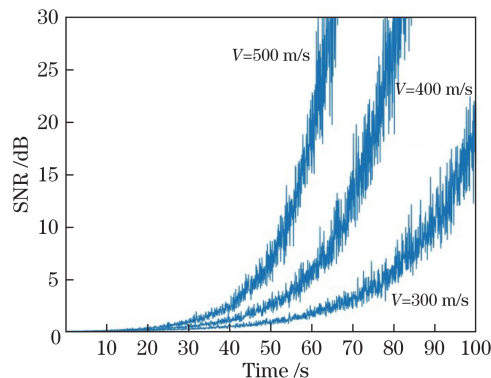


图 16 不同运动速度的目标光谱信号信噪比响应特征

化会引起探测的目标辐射强度变化。假设目标与成像系统在同一水平面内, 初始距离为 100 km, 目标分别以 300, 400, 500 m/s 的速度 ( $V$ ) 迎头飞向成像系统, 得出探测目标光谱信号信噪比与时间的变化关系如图 16 所示。可以看出, 目标速度越大, 信噪比变化的幅度越大, 在较短时间内目标光谱信号的

信噪比便超过了探测信噪比阈值。

数值模拟了该机载同心多尺度成像系统探测运动目标的信噪比随着探测距离的变化关系,结果如图 17 所示。从图中可以看出,当目标靠近探测相机时,开始阶段信噪比增幅速率较小,但在 82 km 以后,信噪比增幅速率较快。随着探测距离的减小,探测器所探测的光谱信号信噪比呈现增大趋势,整体呈现指数式增长特征。在开始阶段,由于距离较远,目标光谱辐射信号衰减严重,探测器所探测到的光谱信号较为微弱,因此降低信噪比阈值,可有效提高系统的极限探测距离。另外,通过目标信噪比光谱响应特征曲线可建立目标运动模式与光谱响应特性的映射关系,为目标运动模式的反演和识别提供理论基础。

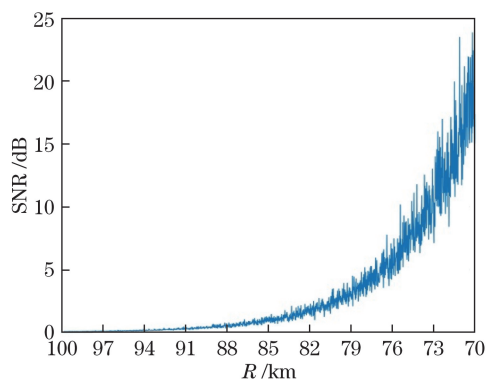


图 17 探测目标的信噪比与探测距离的变化关系  
Fig. 17 Variation relationship between the SNR of detection target and detection distance

## 5 结 论

同时满足宽视场与高分辨在各个成像领域都有广泛的应用需求。在传统的光学设计过程中,高分辨率与大视场互为矛盾。基于同心多尺度的成像技术为突破传统光学成像中分辨率与视场之间的矛盾提供了一条有效的途径。通过分析扩展源目标在空间的辐射分布、辐射传输和光学系统的成像特性等,建立了表征机载同心多尺度成像系统探测能力的理论模型,得到了系统探测能力与组成单元透镜的口径、焦距、间距等参数之间的变化关系,数值模拟了空中来袭运动目标的光谱信号信噪比响应特征,并提出了提高系统探测能力的方法。本结果可为机载同心多尺度宽视场高分辨成像系统设计、系统性能评估及目标运动模式的反演和识别提供理论基础。

### 参 考 文 献

[1] Zhang J H, Fan R Y, Zhao N, *et al.* Electro-optic

system detection ability to space-object in strong background[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 212-216.

张己化, 范如玉, 赵宁, 等. 强背景下光电系统空间目标探测能力[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(1): 212-216.

[2] Zhang Y, Niu Y X, Yang L, *et al.* Analysis and study on detection capability of satellite photoelectric imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0111004.

张颖, 牛燕雄, 杨露, 等. 星载光电成像系统探测能力分析与研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0111004.

[3] Kaiser N, Aussel H, Burke B E, *et al.* Pan-STARRS: a large synoptic survey telescope array[C]. *SPIE*, 2002, 4836: 154-164.

[4] Leininger B, Edwards J, Antoniadis J, *et al.* Autonomous real-time ground ubiquitous surveillance-imaging system (ARGUS-IS)[C]. *SPIE*, 2008, 6981: 69810H.

[5] Mei G, Zhai Y, Miao J Y, *et al.* Design of a high resolution and wide field space infrared optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1222004.

梅贵, 翟岩, 苗健宇, 等. 空间高分辨率宽视场红外光学系统设计[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1222004.

[6] Wang H. Optical system for ultraviolet warning camera with wide field of view and large relative aperture[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(12): 3212-3216.

王红. 大相对孔径大视场紫外告警相机光学系统[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(12): 3212-3216.

[7] Xue Q S, Huang Y, Lin G Y. Optical system design of wide-angle and high-resolution spaceborne imaging spectrometre[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0822001.

薛庆生, 黄煜, 林冠宇. 大视场高分辨力星载成像光谱仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0822001.

[8] Lohmann A W. Scaling laws for lens systems[J]. *Applied Optics*, 1989, 28(23): 4996-4998.

[9] Sargent R, Bartley C, Dille P, *et al.* Timelapse GigaPan: capturing, sharing, and exploring timelapse gigapixel imagery[C]. *Fine International Conference on Gigapixel Imaging for Science*, 2010.

[10] Suntharalingam V, Berger R, Clark S, *et al.* A 4-side tileable back illuminated 3D-integrated Mpixel CMOS image sensor[C]. *IEEE International Solid-State Circuits Conference*, 2009: 38-39.

[11] Yan A Q, Yang J F, Cao J Z, *et al.* Optical system design of space fisheye camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1022004.

闫阿奇, 杨建峰, 曹剑中, 等. 航天鱼眼相机光学系统



- 设计的研究[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1022004.
- [12] Wilburn B, Joshi N, Vaish V, *et al.* High performance imaging using large camera arrays[J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 765-776.
- [13] Brady D J, Hagen N. Multiscale lens design[J]. Optics Express, 2009, 17(13): 10659-10674.
- [14] Brady D J, Gehm M E, Stack R A, *et al.* Multiscale gigapixel photography[J]. Nature, 2012, 486(7403): 386-389.
- [15] Tremblay E J, Marks D L, Brady D J, *et al.* Design and scaling of monocentric multiscale imagers[J]. Applied Optics, 2012, 51(20): 4691-4702.
- [16] Marks D L, Son H S, Kim J, *et al.* Engineering a gigapixel monocentric multiscale camera[J]. Optical Engineering, 2012, 51(8): 083202.
- [17] Son H S, Johnson A, Stack R A, *et al.* Optomechanical design of multiscale gigapixel digital camera[J]. Applied Optics, 2013, 52(8): 1541-1549.
- [18] Marks D L, Llull P R, Phillips Z, *et al.* Characterization of the AWARE 10 two-gigapixel wide-field-of-view visible imager[J]. Applied Optics, 2014, 53(13): 54-63.
- [19] Kou T, Wang H Y, Wu X M, *et al.* Detection probability envelope of airborne photoelectric system in complex condition[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0304002.
- 寇添, 王海晏, 吴学铭, 等. 复杂环境下机载光电系统探测概率包线研究[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0304002.
- [20] Holst G C. Electro-optical imaging system performance[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015: 167-171.
- Holst G C. 光电成像系统性能[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 167-171.
- [21] Yuan Z W, Huang S C, Xiong Z G, *et al.* Narrowband detection waveband selection for infrared warning satellites based on synthetic signal-to-noise ratio[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(9): 090401.
- 苑智玮, 黄树彩, 熊志刚, 等. 基于综合信噪比的红外预警卫星窄带探测波段选择[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(9): 090401.
- [22] Cao Y M, Zhang W, Cong M Y. Analysis of signal-to-noise ratio calculation for satellite-based infrared staring sensor[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(4): 955-959.
- 曹移明, 张伟, 丛明煜. 星载红外凝视相机信噪比计算分析[J]. 宇航学报, 2007, 28(4): 955-959.
- [23] Driggers R G, Friedman M H, Nichols J. Introduction to infrared and electro-optical systems[M]. Boston: Artech House, 2012: 449-455.