第 44 卷第 3 期
2025 年 6 月

红 外 与 毫 米 波 学 报
J. Infrared Millim. Waves

Vol. 44, No. 3
June, 2025

文章编号:1001-9014(2025)03-0445-07

DOI:10. 11972/j. issn. 1001-9014. 2025. 03. 014

基于多物理场耦合的空中目标红外探测多参数联合寻优方法

丁 翔[1,2*], 乔 凯[1,2]

(1. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094;
2. 天基综合信息系统全国重点实验室, 北京 100094)

摘要:弱小目标高灵敏度探测是天基红外感知的重要发展方向,而以目标背景辐射特性为驱动的红外探测系统指标体系设计方法是主要突破点之一。以民航飞机为典型的空中目标活跃于对流层上部及平流层底部,在复杂地球背景杂波和大气衰减效应作用下,表现出暗弱多变的辐射特性,对天基红外探测效能提出了极大的挑战。针对这一问题,本文提出了一种基于多物理效应耦合的空中目标红外探测系统多参数联合寻优方法。首先,基于目标、背景的光谱辐射特性以及目标-天基探测平台的光谱大气透过率变化特征完成对天空中目标探测谱段的初步优选,并提出了探测灵敏度需求。然后,建立了以目标运动速度限、地球背景限、探测灵敏度为三大边界的系统参数寻优方法,实现了空中目标红外探测指标体系的建立。

关 键 词:空中目标;红外探测系统;多参数联合寻优;探测灵敏度;谱段优化

中图分类号:TP702 **文献标识码**:A

Multi-physics coupling-based multi-parameter joint optimization technique for aerial target infrared detection

DING Xiang[1,2*], QIAO Kai[1,2]

(1. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China;
2. National Key Laboratory of Space Integrated Information System, Beijing 100094, China)

Abstract: One of the key areas of advancement in space-based infrared sensing is the high-sensitivity detection of small and weak targets. A major innovation in this regard is the design of the infrared detection system indicator, which is influenced by the characteristics of the target background radiation. The effectiveness of space-based infrared detection is significantly challenged by airborne targets, especially civil aircraft. These targets are active in the upper troposphere and lower stratosphere. They exhibit weak and variable radiation characteristics due to complex background clutter and atmospheric attenuation. Aiming to address this issue, this paper proposes a multi-parameter joint optimization method for an airborne target infrared detection system based on the coupling of the multiple physical effects. Firstly, the initial optimization of the target detection spectral band in the sky is completed based on the spectral radiation characteristics of the target, the background, and the spectral atmospheric transmittance change characteristics of the target-sky-based detection platform. Subsequently, the detection sensitivity requirements are proposed. Then, a system parameter optimization method is established with the target motion speed limit, earth background limit, and detection sensitivity as the three major boundaries. This method facilitates the creation of an infrared detection index system for air targets.

Key words: airborne targets, infrared detection system, multi-parameter joint optimization, infrared detection sensitivity, detecting spectral optimization

引言

随着技术的发展,以隐身飞行器、民航客机等为代表的空中目标遍布全球各地,广泛应用于交通运输、侦察监视等应用领域。随之而来,对空中目标的探测监视逐渐发展为当前的主要研究方向。相对于地基和空基平台,天基平台以其轨道高度和工作时长的优势,具备覆盖范围广、可对热点区域

收稿日期:2024-09-18,**修回日期**:2024-10-17 **Received date**:2024-09-18,**revised date**:2024-10-17

作者简介(Biography):丁翔(1995—),女,汉族,安徽青阳人,北京跟踪与通信技术研究所助理研究员,硕士,主要研究领域为天基光学遥感方向. E-mail: dingxiang1212@163. com

[*] **通讯作者**(Corresponding author): E-mail: dingxiang1212@163. com

进行持续连续监视的能力，成为当前的主要探测方法。然而，复杂地球背景杂波、强大气衰减和空中目标低红外特征设计[1-2]极大地抑制了空中目标的可探测性。因此，研究空中目标光谱辐射特性并建立针对空中目标的天基红外探测指标体系成为当前的研究热点。

目标的红外特征研究是分析其可检测性的前提[3-9]。空中目标在高速飞行中形成的高温羽流和高温蒙皮具有明显的红外辐射特性，许多研究团队针对空中目标的红外特征展开了广泛的研究，并基于目标红外辐射特性仿真软件和大量空中目标红外特性实测数据进行了验证[10-15]。飞行于大气层内的空中目标通过与周围环境的相互作用形成了复杂的光谱辐射特性，对空中目标光谱辐射特性研究对天基红外探测指标体系的形成具有十分重要的作用，因此国内外多个研究团队对2~5 μm光谱范围内多个探测谱段的目标特性和探测效能展开了研究分析，覆盖了空中目标尾焰特征谱段和具有高大气透过率的蒙皮探测谱段，包括4.14~4.18 μm、2.65~2.90 μm、4.25~4.50 μm等[16-24]。针对空中目标光谱特性复杂导致的高灵敏度探测难题，Ni等提出了一种基于探测谱段自适应寻优的红外探测模型，并通过数值仿真验证了对空中目标探测效能的提升[25]。目前对空中目标探测效能的分析大多数均基于既定系统参数，而对空中目标最优探测系统参数的研究少有提及。Yuan等[24]研究了一种基于光学衍射限的最优探测分辨率分析方法，但是忽略了其他基础参数对探测效能的影响，且忽略了空中目标的运动速度对探测积分时间参数的限制。当前针对空中目标最优探测系统参数的研究仅停留在单一系统参数影响研究上，没有全面研究影响系统探测性能的因素及其相互间的约束关系，包括空中目标特性、探测器参数、光学系统参数。

针对上述问题，本文提出了一种基于多物理场耦合的空中目标红外探测系统多参数联合寻优方法。首先，建立了考虑积分时间内目标运动的时空微分特征和探测器像元内响应模型的天基红外探测全链路仿真模型。分析空中目标和复杂地球背景的光谱辐射强度，综合考虑目标探测对比度和探测能量获取等因素优选探测谱段。最后，参考模块化探测效能评价方法，考虑积分时间背景限制、目标运动速度限两项边界条件对系统参数进行遍历寻优，实现针对特定光电探测器的探测系统参数的最优化设计。研究结果为空中目标在复杂红外地球背景下的高灵敏度探测和系统参数设计提供了理论依据。

1 数理模型

1.1 空中目标红外特性表征模型

空中目标相对于弹道导弹、临近高超飞行器等高速运动目标而言，其运动速度低、红外辐射特性弱，且天基探测条件下，目标辐射强度受飞行高度、飞行速度、探测器观测角度、太阳高度角等因素影响，模型示意图如图1所示。

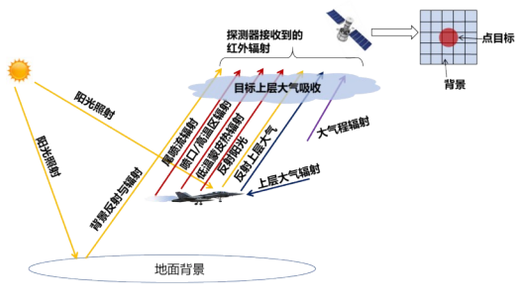

图1 空中目标天基红外探测物理模型

Fig. 1 Physical model of space-based infrared detection of aerial targets

空中目标的红外辐射能量主要由机体蒙皮热辐射、尾焰热辐射和蒙皮的阳光反射组成，为全面分析目标的辐射特性，需从目标的蒙皮及尾焰的表面温度和发射率以及目标的运动特性等方面综合考虑，设计空中目标红外特征表征模型。

空中目标在运动过程中，蒙皮与外界大气摩擦产生热辐射，通常认为蒙皮是光谱连续发射的灰体，光谱发射率一般为小于1的常数。机体自身的蒙皮热辐射服从普朗克定律，主要影响因素为蒙皮温度和发射率。机体蒙皮的光谱辐射出的射度为

$$M\left(T_{\mathrm{skin}},\lambda\right)=\frac{c_1}{\lambda^5}\frac{1}{\mathrm{e}^{c_2/\lambda T_{\mathrm{skin}}}-1}\quad,\qquad(1)$$

其中，第一辐射常数 $c_1=2\pi hc^2=3.7415\times10^4\,\mathrm{W\cdot cm^{-2}\cdot\mu m^4}$，第二辐射常数 $c_2=hc/k=1.43879\times10^4\,\mu\mathrm{m\cdot K}$，$T_{\mathrm{skin}}$为蒙皮温度，$h$为普朗克常数，$K$为波尔兹曼常数。飞机运动过程中，随着速度的增大，气动加热产生的飞机蒙皮热辐射不能忽视，尤其在飞机的前向和侧向，飞机蒙皮温度为

$$T_{\mathrm{s}}=T_{\mathrm{atm}}\left[1+\beta\left(\frac{\upsilon-1}{2}\right)M_{\mathrm{a}}{}^2\right]\quad,\qquad(2)$$

其中，T_{s}为飞机蒙皮驻点区温度，T_{atm}为机体周围大气环境温度；β为机体温度恢复系数，其值表示导致

机体周围气体温度升高的占比,一般取0.82~0.84;υ为空气的定压热容量和定容热容量之比,υ=1.4,Ma为飞机马赫数。相比之下,太阳、天空和地球辐射对空中目标红外特征的影响可以被忽略不计[26]。通常,当飞机在较冷的大气中飞行时,机体周围的低温大气与机体蒙皮相互热交换,使得整机蒙皮温度下降。当机体与周围大气热平衡后,其蒙皮平均温度T_{ave}为

$$T_{ave} = T_{atm} + C\cdot\left(T_s - T_{atm}\right) \quad , \quad (3)$$

其中,C为热平衡系数[27]。

蒙皮发射率与飞机外表使用的涂层材料有关,本文飞机蒙皮发射率选取0.5[16-17,28]。机体蒙皮热辐射强度I_{skin}为

$$I_{skin}(\lambda) = \frac{\varepsilon_{skin}}{\pi} M\left(T_{ave},\lambda\right) A_{skin} \quad , \quad (4)$$

其中,ε_{skin}为蒙皮的发射率,A_{skin}为驻点区(蒙皮)到探测器之间的投影面积。

飞机尾喷口产生的高温喷焰主要是由碳氢燃料生成的气体和高温颗粒组成的混合物,主要成分有水蒸气、二氧化碳和一氧化碳等,这些分子的能级跃迁对应的所有光谱谱线的总和形成了尾焰辐射光谱。经分析,尾焰温度分布和光谱发射率是尾焰辐射强度的主要影响因素[16-17,24,29-31]。图2(a)是典型的空中目标尾焰温度分布特征,与当地飞行高度和气压有关。通过分析尾焰中的气体辐射光谱,可以看出碳氢燃料产生的尾焰红外辐射光谱能量主要集中在2.7 μm和4.3 μm附近,图2(b)为尾焰典型红外光谱发射率随谱段变化趋势[22]。

根据空中目标尾焰温度分布特征,为简化尾焰辐射强度模型计算,利用网格法将温度分布分为若干个小网格,网格大小设置为$M\times N$,先分别计算各网格中的辐射强度,再将所有网格积分得到总尾焰的辐射强度,即尾焰的红外辐射强度I_{plume}为

$$I_{plume}(\lambda) = \frac{\varepsilon_{plume}}{\pi} \sum_{i=1}^{M\times N} M\left(T_i,\lambda\right) A_{grid} \quad , \quad (5)$$

其中,ε_{plume}为尾焰发射率,A_{grid}为每个网格的投影面积,表达式为

$$A_{grid} = \frac{L\times W}{M\times N} \quad , \quad (6)$$

其中,L、W分别表示尾焰分布的长和宽。

蒙皮阳光反射主要指镜面反射和漫反射[32],考虑到太阳位置的变化,蒙皮阳光反射为

$$I_{reflect}(\lambda) = \frac{\tau_{sun}\cdot r_{diff}}{\pi} \left(\frac{R_{sun}}{R_{e-s}}\right)^2 M\left(T_{sun},\lambda\right) A_{ref}, \quad (7)$$

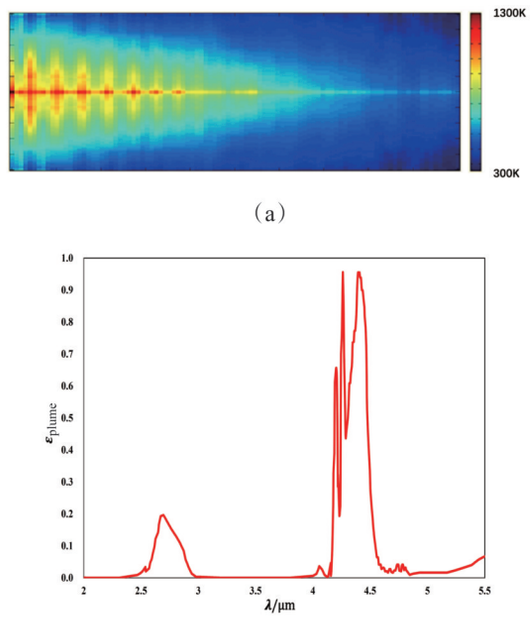

图2　飞机尾焰的光谱辐射特性:(a)空中目标尾焰温度分布特征;(b)尾焰红外发射率

Fig. 2　Spectral radiation characteristics of aircraft tail flames: (a) Characteristics of the temperature distribution of the tail flame of an airborne target; (b) Infrared emissivity of the tail flame

其中,τ_{sun}表示大气透过率,T_{sun}表示太阳温度,r_{diff}表示飞机蒙皮的漫反射率,A_{ref}表示飞机蒙皮沿阳光方向的投影面积,太阳半径$R_{sun} = 6.9627\times10^8$ m,平均日地距离$R_{e-s} = 1.4960\times10^{11}$ m。

综上,考虑空中目标到达探测系统的大气透过率$\tau_{atm}(\lambda)$和大气路径辐射$I_{path}(\lambda)$后,空中目标的红外特性$I_{aircraft}$可表征为

$$I_{aircraft} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(\left(I_{skin}(\lambda) + I_{plume}(\lambda) + I_{reflect}(\lambda)\right)\tau_{atm}(\lambda) + I_{path}(\lambda)\right) d\lambda \quad , \quad (8)$$

其中,λ_1和λ_2为探测谱段的两端波长。

1.2　全链路天基红外探测模型

天基红外空中目标探测链路涉及多个物理场的耦合,不仅包含目标自身与周围环境复杂的物理效应,还包含大气传输、光电耦合效应、探测器采样等过程。天基观测条件下的信号传输链路如图3所示,目标辐射信息通过复杂的链路环节转换为传感器后端的数字信号。

天基观测下,空中目标与系统之间的张角小于系统的角分辨率,可以认为是点源目标。对于点目标来说,由于大气传输、光学系统等造成的点扩散

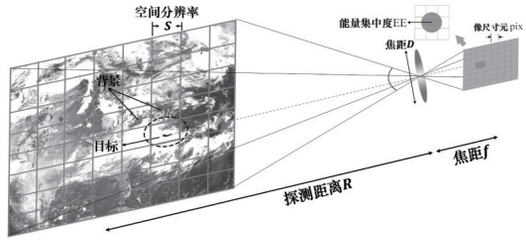

图3 信号传输链路

Fig. 3 Signal transmission link

效应，只有部分信号落在目标的中心像素上[33]。当目标位于像素中心时，落在目标中心像素内的光斑能量占总能量的百分比就是系统的能量集中度(EE)，其与点源成像的高斯分布点扩散函数(PSF)之间的映射关系可表达为

$$\int_{-0.5}^{0.5}\frac{1}{2\pi\sigma^2}e^{-\frac{m^2+n^2}{2\sigma^2}}\mathrm{d}m\mathrm{d}n=\mathrm{EE} \quad . \quad (9)$$

如图4(a)即为将光学系统PSF进行微像元分割后并被不同像元采样后的成像表征。当红外相机在积分时间内进行场景能量积累的时候，由于目标会运动可能会产生跨像元、目标形变等现象，因此必须建立积分时间内微运动模型来提高对红外探测系统单个像元获取运动点目标能量的性能[34]。

探测器通过光学系统收集空中目标和背景的辐射特性，并将其转换为存储在探测器积分电容中的光电子。目标和背景的响应电子数为

$$N_{\mathrm{tar}}=I_{\mathrm{q,tar}}\cdot A_{\mathrm{opt}}\cdot\tau_{\mathrm{atm}}\cdot\tau_{\mathrm{opt}}\cdot\mathrm{EE}\cdot\eta\cdot T_{\mathrm{int}}/R^2 \ , \quad (10)$$

$$N_{\mathrm{back}}=L_{\mathrm{q,back}}\cdot\mathrm{ifov}^2\cdot A_{\mathrm{opt}}\cdot\tau_{\mathrm{atm}}\cdot\tau_{\mathrm{opt}}\cdot\eta\cdot T_{\mathrm{int}} \ , \quad (11)$$

$I_{\mathrm{q,tar}}$为目标光子强度，A_{opt}为入瞳面积，$A_{\mathrm{opt}}=\pi D^2/4$，$D$为相机口径。$\tau_{\mathrm{atm}}$为大气透过率，$\tau_{\mathrm{opt}}$为光学效率，$\eta$为量子效率，$T_{\mathrm{int}}$为积分时间，$R$为探测距离，ifov为角分辨率。

本论文通过探测信噪比来表达空中目标探测能力，同时为了全面、客观地反映红外探测时各物理过程对探测效能的影响，采用模块化评估方法，实现目标-背景-系统分离[36]。根据探测信噪比公式

$$\mathrm{SNR}=N_{\mathrm{tar}}/\mathrm{Noise} \quad . \quad (12)$$

并结合目标公式(10)和(11)可得天基红外探测系统的探测灵敏度可表达为

$$\mathrm{SEI}=\frac{\sqrt{N_{\mathrm{back}}+n_{\mathrm{read}}^2}\cdot R^2}{A_{\mathrm{opt}}\cdot\tau_{\mathrm{opt}}\cdot\mathrm{EE}\cdot\eta\cdot T_{\mathrm{int}}} \quad , \quad (13)$$

其中，系统噪声大致可分为服从泊松分布的信号相关量子散粒噪声$\sqrt{N_{\mathrm{back}}}$和信号无关的电路噪声n_{read}[35]，NEI值越小，意味着探测系统的灵敏度越高。

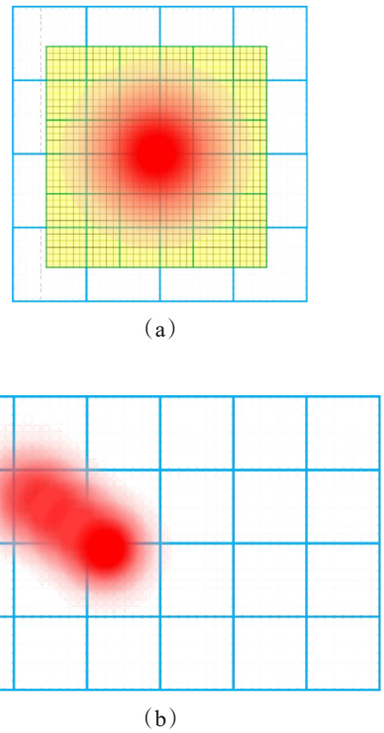

图4 积分时间内目标运动模型：(a)微像元分割；(b)积分时间内微运动模型

Fig. 4 Target motion model in integral time: (a) microimage element segmentation; (b) integral In-time micro-motion model

2 数值分析

2.1 探测谱段优选

红外探测系统需要根据观测的目标和背景环境慎重选择系统工作谱段，谱段选择的中心位置和波段宽度合适与否直接影响系统的探测性能。探测谱段选择的基本原则是选取目标与背景红外辐射相差较大波段，提高目标的发现概率。

系统探测谱段的选择不仅需要考虑空中目标的红外辐射特性变化规律，还要结合背景红外辐射特性和大气透过率[25]。根据图5及图6可知，目标的主要辐射源来自尾焰的发射峰谱段，而在中波探测谱段发射峰值部分大气透过率几乎为0，因此本论文仅针对短波谱段范围进行对比分析。表1为两类典型空中目标的几何参数和飞行参数，图6为该两类典型空中目标的昼夜辐射强度特性以及日间海陆背景、日间云背景的光谱辐射特性。

为保证系统探测性能，需选取目标与背景对比度较大的谱段，从而有效抑制背景辐射，得到较高

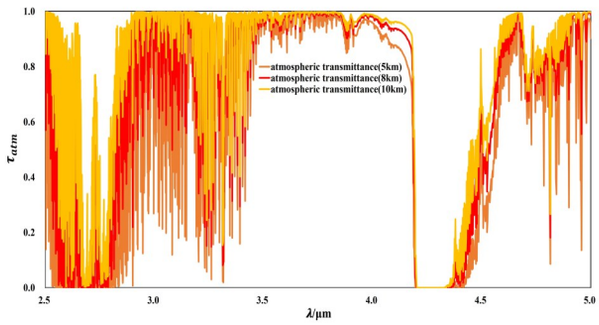

图5　不同飞行高度下目标到探测系统大气透过率

Fig. 5　Atmospheric transmittance from target to detection system at different flight altitudes

表 1　典型飞机参数

Table 1　Typical aircraft parameters

型号	长度 /m	翼展 /m	最大速度 /Mach	最大高度 /m	发动机型号
典型空中目标 X	16	45.8	0.95	18 300	F135/PW100×2
典型空中目标 Y	44.5	41.8	1.25	18 000	F101-GE-102×4

的图像信噪比和探测灵敏度。由图6可知,2.5~2.6 μm、3.0~3.5 μm的背景辐射亮度较高,导致系统积分时间较短,不利于目标探测对比度的提升。空中目标的反射辐射属于机会探测,不能作为谱段优选的主要考量因素。当以空中目标的蒙皮热辐射和尾焰辐射为主要考量因素时,谱段2.6~2.68 μm、2.72~2.76 μm和2.8~2.95 μm具有较强的目标探测对比度,因此本文选取2.6~2.95 μm作为空中目标探测的主谱段。典型空中目标 X 与典型空中目标 Y 在谱段2.6~2.95 μm的辐射强度约为25 W/sr和50 W/sr,考虑积分时间内微运动模型[34]后,为保证信噪比优于10的高灵敏度探测,探测灵敏度需优于1.7 W/sr。

2.2　参数寻优设计分析

在完成谱段的优选及探测灵敏度的需求后,本文以目标运动速度限、地球背景限为边界建立系统参数寻优方法。目标运动速度和地球背景辐亮度均为限制系统积分时间的主要因素,速度限最大积分时间为目标以当前速度乘以积分时间不大于一个像元宽度,背景限最大积分时间为该时间内探测器积累的响应电荷不超过满阱电荷的50%,即 T_{int} 需要满足:

$$T_{\mathrm{int}} \leqslant \left\{ \frac{0.5N_{\mathrm{full}}}{P_{\mathrm{back}}}, \frac{S}{v_{\mathrm{tar}}} \right\}_{\min} , \quad (14)$$

其中,N_{full} 为满阱电子数,S 为像元宽度,v_{tar} 为空中目标飞行速度,背景辐射功率 P_{back} 表达为

$$P_{\mathrm{back}} = L_{\mathrm{q,back}} \cdot \mathrm{ifov}^2 \cdot A_{\mathrm{opt}} \cdot \tau_{\mathrm{atm}} \cdot \tau_{\mathrm{opt}} \cdot \eta$$

多帧叠加可实现对系统噪声的进一步抑制,但图像叠加不是无限的,最大帧数是目标在该帧数下的飞行距离不超过空间分辨率,即

$$\mathrm{Num} \leqslant \left\{ \frac{\mathrm{GR}}{v_x \cdot \mathrm{Fr}}, \frac{\mathrm{GR}}{v_y \cdot \mathrm{Fr}} \right\}_{\min} , \quad (15)$$

其中,GR为空间分辨率,v_x 和 v_y 分别为纵向速度和横向速度,Fr为帧频。

系统参数的最优化设计需要结合具体的红外探测器来分析,不同积分电容的设置具有不同的最优匹配光学参数。本文以国内某自研2 K×2 K短波碲镉汞红外探测器为例进行计算。不考虑多帧叠

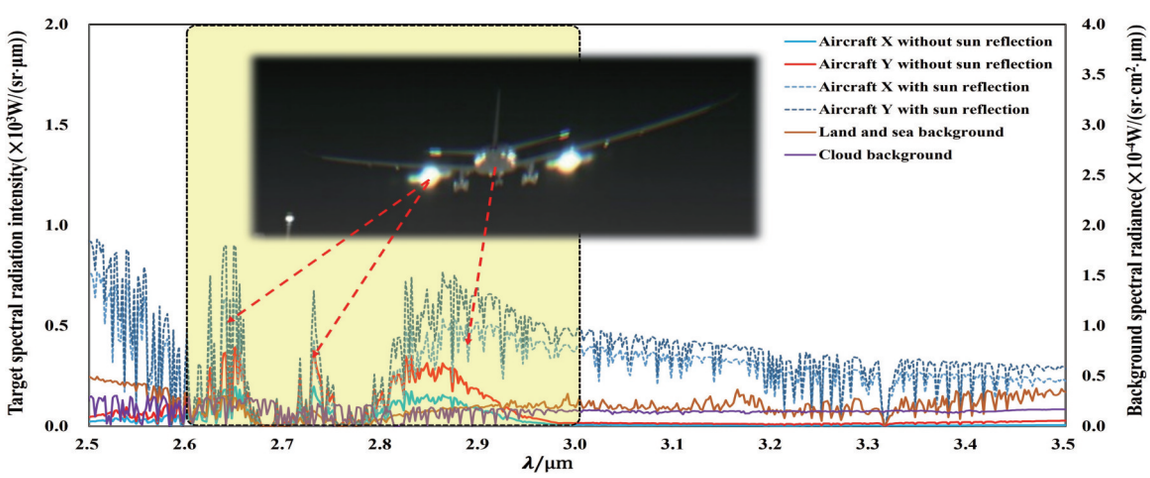

图6　空中目标与典型背景光谱辐射特性

Fig. 6　Spectral radiation characteristics of aerial targets and typical background

加的探测灵敏度分析结果如图7所示，考虑多帧叠加噪声抑制方法的探测灵敏度分析结果如图8所示。根据分析结果，可得以下结论：

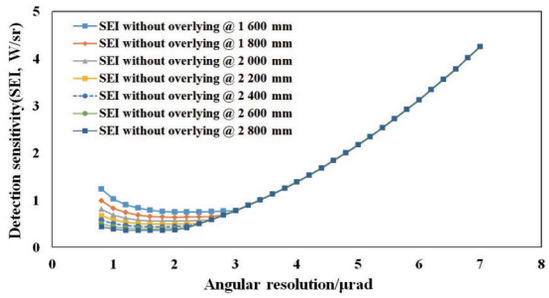

图7 不考虑多帧叠加相机探测灵敏度

Fig. 7 The detection sensitivity of the multi-frame stacking camera is not considered

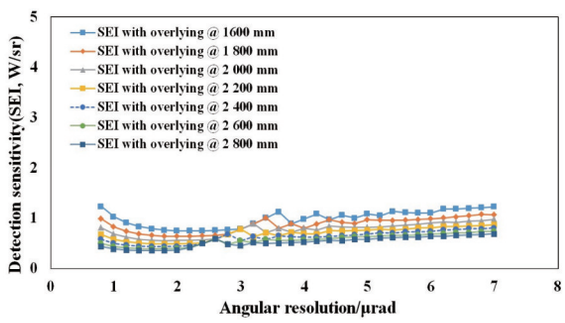

图8 考虑多帧叠加后相机探测灵敏度

Fig. 8 Camera detection sensitivity after considering multi-frame superposition

（1）采用多帧叠加的方法可以有效抑制探测系统噪声，提高探测灵敏度。光学系统的角分辨率越低，通过多帧叠加进行噪声抑制的效果越明显。数值分析结果表明，当以2 800 mm口径、7 μrad角分辨率进行探测时，采用多帧叠加的方式可抑制噪声至多帧叠加前的16.2%，探测能力提升6倍以上。

（2）综合分析多帧叠加和不叠加的探测灵敏度结果，当采用2 800 mm口径时，角分辨率为1.5 μrad时，系统探测灵敏度最优可达0.355 W/sr。当采用1 600 mm口径时，角分辨率为2.2 μrad时，系统探测灵敏度最优可达0.747 W/sr。不同探测口径具有不同的最优探测角分辨率，当背景限积分时间和速度限积分时间相同时，系统探测灵敏度达到最优。

3 总结

复杂地球背景下的空中目标由于强背景杂波以及大气衰减的作用，对天基红外探测能力提出了极大的挑战。本文从天基红外成像基础原理出发，提出了基于多物理效应耦合的空中目标红外探测系统多参数联合寻优方法。首先，从辐射源头出发，对飞机蒙皮热辐射、蒙皮对太阳的反射辐射和尾焰热辐射进行了光谱特性建模分析。然后，建立了考虑积分时间内目标运动的时空微分特征和探测器像元内响应模型的天基红外探测全链路仿真模型。以典型空中目标Y和典型空中目标X为例，分析了不同探测谱段下目标的探测对比度，并优选出2.6~2.95 μm探测谱段。接着，以我国自研的2 K×2 K短波碲镉汞红外探测器为例，考虑积分时间背景限制、目标运动速度限两项边界条件对系统参数进行遍历寻优，分析出不同探测口径下的最优探测角分辨率以及可实现的探测灵敏度。当采用2 800 mm光学口径时，其最优角分辨率为1.5 μrad，探测灵敏度可达0.355 W/sr，当采用1600 mm光学口径时，最优角分辨率为2.2 μrad时，系统探测灵敏度最优可达0.747 W/sr。本论文的研究结果为空中目标在复杂红外地球背景下的高灵敏度探测和系统参数设计提供了理论依据，为目标红外探测技术领域开辟了新的前景。

References

[1] Zheng Q, Xu Z, Wang Y, et al. Overall optimization design of high temperature components cooling coefficient for lower infrared turbofan engine[J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 102: 102990.

[2] Zhang T, Dong W, Wang Z Y, et al. Investigation of infrared spectral emissivity of low emittance functional coating artefacts[J]. Infrared Physics & Technology, 2020, 110: 103454.

[3] Li N, Lv Z, Huai W, et al. A simulation method of aircraft plumes for real-time imaging[J]. Infrared Physics & Technology, 2016, 77: 153-161.

[4] Zhou Y, Wang Q, Li T, et al. A numerical simulation method for aircraft infrared imaging[J]. Infrared Physics & Technology, 2017, 83: 68-77.

[5] Zhou Y, Wang Q, Li T. A new model to simulate infrared radiation from an aircraft exhaust system[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 30(2): 651-662.

[6] Chen H, Zhang H, Xi Z, et al. Modeling of the turbofan with an ejector nozzle based on infrared prediction[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 159: 113910.

[7] Sun W, Wang S B. Study on infrared images simulation of fighter aircraft[C]//2019 19th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). IEEE, 2019: 1703-1708.

[8] Wu S, Zhang K, Niu S, et al. Anti-interference aircraft-tracking method in infrared imagery[J]. Sensors, 2019, 19(6): 1289.

[9] Nam J, Chang I, Lee Y, et al. Effect of flight altitude on

minimal infrared signature of combat aircraft[J]. Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, 2020, 33(6): 375-382.

[10] Mahulikar S P, Sane S K, Gaitonde U N, et al. Numerical studies of infrared signature levels of complete aircraft[J]. The aeronautical journal, 2001, 105(1046): 185-192.

[11] Mahulikar S P, Sonawane H R, Rao G A. Infrared signature studies of aerospace vehicles[J]. Progress in aerospace sciences, 2007, 43(7-8): 218-245.

[12] Baranwal N, Mahulikar S P. IR signature study of aircraft engine for variation in nozzle exit area[J]. Infrared Physics & Technology, 2016, 74: 21-27.

[13] Sircilli F, Retief S J P, Magalhães L B, et al. Measurements of a micro gas turbine plume and data reduction for the purpose of infrared signature modeling [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2015, 51(4): 3282-3293.

[14] Lee J H, Chae J H, Ha N K, et al. Efficient prediction of aerodynamic heating of a high speed aircraft for IR signature analysis[J]. Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, 2019, 47(11): 768-778.

[15] Hu H, Li Y, Wei Z, et al. Optimization of the MSMGWB model used for the calculation of infrared remote sensing signals from hot combustion gases of hydrocarbon fuel[J]. Infrared Physics & Technology, 2020, 107: 103286.

[16] Cha J H, Kim T, Bae J Y, et al. Variation of supersonic aircraft skin temperature under different Mach number and structure[J]. Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, 2014, 17(4): 463-470.

[17] Pan X, Wang X, Wang R, et al. Infrared radiation and stealth characteristics prediction for supersonic aircraft with uncertainty [J]. Infrared Physics & Technology, 2015, 73: 238-250.

[18] Wang Y, Xie F, Wang J. Short-wave infrared signature and detection of aircraft in flight based on space-borne hyperspectral imagery[J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14 (12): 122801.

[19] Gu B, Baek S W, Jegal H, et al. Infrared signature characteristic of a microturbine engine exhaust plume[J]. Infrared Physics & Technology, 2017, 86: 11-22.

[20] Kou T, Zhou Z, Liu H, et al. Multispectral radiation envelope characteristics of aerial infrared targets[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 103: 251-259.

[21] Kou T, Zhou Z, Liu H, et al. Multi-band composite detection and recognition of aerial infrared point targets[J]. Infrared Physics & Technology, 2018, 94: 102-109.

[22] Rao A, Mahulikar S. Aircraft powerplant and plume infrared signature modelling and analysis [J]. Aiaa Journal, 2013, 91.

[23] QIAO Kai, ZHI Xi-Yang, YANG Dong, et al. A performance characterization and matching design method of space-based optical detection for weak aerial target [J]. Journal of Infrared Millim. Waves,2019,38(5):642~647.

[24] Yuan H, Wang X R, Guo B T, et al. Performance analysis of the infrared imaging system for aircraft plume detection from geostationary orbit[J]. Applied optics, 2019, 58 (7): 1691-1698.

[25] Ni X , Yu S , Su X ,et al. Detection spectrum optimization of stealth aircraft targets from a space-based infrared platform[J].Optical and Quantum Electronics, 2022, 54 (3):1-12.

[26] Mahulikar S P, Potnuru S K, Rao G A. Study of sunshine, skyshine, and earthshine for aircraft infrared detection[J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2009, 11(4): 045703.

[27] Wang X. Infrared Radiation Analysis and Imaging Simulation of Aerial Target [D]. University of Chinese Academy of Sciences, 2021.
王霄.空中目标红外辐射特性分析与成像仿真技术研究[D].中国科学院大学, 2021.

[28] Li N, Lv Z, Wang S, et al. A real-time infrared radiation imaging simulation method of aircraft skin with aerodynamic heating effect [J]. Infrared Physics & Technology, 2015, 71: 533-541.

[29] Retief S J P, Smit P, Dreyer M M. Mid-wave infrared characterization of an aircraft plume[C]//2011 Saudi International Electronics, Communications and Photonics Conference (SIECPC). IEEE, 2011: 1-6.

[30] An C H, Kang D W, Baek S T, et al. Analysis of plume infrared signatures of S-shaped nozzle configurations of aerial vehicle [J]. Journal of Aircraft, 2016, 53 (6) : 1768-1778.

[31] Feng Y. Infrared characteristics and flow field of the exhaust plume outside twin engine nozzle[C]. International Conference on Optoelectronics and Microelectronics Technology and Application. SPIE, 2017, 10244: 221-226.

[32] Huang W, Ji H Y.Effect of reflected background radiation by skin on infrared characteristics of subsonic aircraft[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44 (6) : 2039-2043.
黄伟,吉洪湖.蒙皮反射的背景辐射对亚声速飞机红外特征的影响研究[J].红外与激光工程, 2015, 44(6): 2039-2043.

[33] Yang T, Zhou F, Xing M. A method for calculating the energy concentration degree of point target detection system [J].Spacecr.Recovery Remote Sens,2017, 38(2): 41-47.

[34] Zhang J, Zheng L, Zhou X X, et al. Signal-to-noise analysis of point target detection using image pixel binning for space-based infrared electro-optical systems[J]. Infrared Physics & Technology, 2023, 133: 104757.

[35] Konnik M, Welsh J. High-level numerical simulations of noise in CCD and CMOS photosensors: Review and tutorial[J]. arXiv preprint arXiv:1412.4031, 2014.

[36] Zhou X, Ni X, Zhang J, et al. A novel detection performance modular evaluation metric of space-based infrared system[J]. Optical and Quantum Electronics, 2022, 54 (5): 274.