

## 基于点目标特征参数提取的红外多光谱设计

谷 牧<sup>1,2</sup>, 任栖锋<sup>1</sup>, 廖 胜<sup>1</sup>, 周金梅<sup>1</sup>, 赵汝进<sup>1</sup>

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 为了提高等效温度、等效面积的稳定性和分辨率, 提出一种基于点目标特征参数提取的红外多光谱设计方法。首先, 通过多光谱设计准则模拟仿真了多波段的抗误差能力, 确定了光谱设计的影响因素。然后, 根据红外辐射测量系统噪声分析, 确定了光电导中波和长波探测器都达到最佳工作性能的条件。最后, 根据波段信噪比估计和红外大气窗口确定了光谱的具体分布。性能分析结果表明, 设计的光谱能在目标各种变化的情况下, 使中波和长波协同工作, 大大提高了等效温度、等效面积的稳定性和分辨率。

**关键词:** 红外多光谱设计; 点目标; 等效温度; 等效面积

中图分类号: TN211 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20190462

## Infrared multi-spectral design based on point target feature parameter extraction

Gu Mu<sup>1,2</sup>, Ren Qifeng<sup>1</sup>, Liao Sheng<sup>1</sup>, Zhou Jinmei<sup>1</sup>, Zhao Rujin<sup>1</sup>

(1. Institute of Optics and Electronics Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to improve the stability and resolution of equivalent temperature and area, an infrared multi-spectral design method was proposed based on feature parameter extraction of point target. Firstly, the anti-error ability of multi bands was simulated by multi spectral design criteria, and the influencing factors of spectrum design were determined. According to the noise analysis of the ground-based infrared radiation measurement system, the conditions for the best working performance of the middle wave and long wave photodetectors were determined. Finally, the spectral distribution was determined according to the estimation of the band SNR and the infrared atmospheric window. The performance analysis results show that the designed spectrum can make the medium wave and the long wave work together in the case of various changes of the target, greatly improving the stability and resolution of the equivalent temperature and the equivalent area.

**Key words:** infrared multi-spectral design; point target; equivalent temperature; equivalent area

收稿日期: 2019-12-20; 修订日期: 2020-01-08

基金项目: 国家自然科学基金 (61501429)

作者简介: 谷牧 (1994-), 男, 博士生, 主要从事红外辐射特性分析等方面的研究。Email: 977931430@qq.com

导师简介: 任栖锋 (1978-), 男, 研究员, 主要从事红外光电系统研制等方面的研究。Email: renqf@ioe.ac.cn

## 0 引言

远距离点目标红外多光谱测量,反演等效温度和等效面积是重要的点目标非成像探测技术,也是远距离目标成像探测的必要补充。等效温度和等效面积能大致估计远距离点目标的温度和面积,其随时间的变化能反应目标的运行状态。通常情况下,等效温度和等效面积是缓慢变化的,但在目标执行特定任务或发生故障时,它们可能会有一个可观的突变。因此,保证等效温度和等效面积的可靠性,实现它们随时间变化的观测能力能提高等效温度和等效面积这两个物理量的价值,增强远距离目标感知能力。而如何设计红外多光谱提升等效温度和等效面积的可靠性,在低信噪比下提高温度分辨率和面积分辨率仍然是一个值得分析与探讨的问题。

其实两个波段以上探测就可以得到目标的等效温度和等效面积,王国强等利用双波段比色测温原理获得了等效温度和等效面积,他们主要从中心波长、波段宽度、波长间隔对双波段进行了优化<sup>[1]</sup>。舒锐等基于目标和诱饵等干扰具有不同等效温度以及变化的特点,探讨了天基观测的最佳探测双波段和最佳探测多波段<sup>[2]</sup>。李春来等研究了地基红外辐射谱系统,他们用光栅分光实现了中波和长波分别 16 个波段,共 32 个波段;中波和长波的光谱分辨率分别为 0.125  $\mu\text{m}$  和 0.25  $\mu\text{m}$ 。他们实现的辐射谱仪能达到探测目标的目的,但存在中波和长波不能协同工作的问题;对于温度为 400 K、面积为 12  $\text{m}^2$ 、距离为 1 000 km 的目标,中波信噪比未达到 1 而长波信噪比已超过了 4<sup>[3]</sup>。美国波音公司的 Skinner 等人用  $\text{CaF}_2$  棱镜对中波进

行分光,用 NaCl 棱镜对长波进行分光,共得到 116 个波段,研制了带宽阵列光谱系统 (BASS);并将其装配在夏威夷 3.6 m 的先进光电系统上,对远距离点目标进行了长期的观测,获取了目标的等效温度和等效面积,但未对等效温度、等效面积的稳定性和分辨率进行讨论<sup>[4-5]</sup>。可以看出对于点目标等效温度和等效面积的提取,可以用双波段、多波段、甚至 116 个波段进行探测。但究竟多少个波段,多宽的波段宽度,中波和长波如何利用将有利于等效温度、等效面积可靠性和分辨率的提高,这仍然是模糊不清的。

文中以提高等效温度、等效面积的稳定性和分辨率为目的,对红外多光谱的波段数、波段宽度、中波和长波协同工作等展开探讨,从而对红外多光谱进行设计。对红外辐射测量系统的噪声进行分析,确定视场角在  $1 \times 10^{-6}$  rad 时,能使中波探测器和长波探测器的性能都达到最佳;最终确定在中波 3.3~4.3  $\mu\text{m}$  和 4.4~5.2  $\mu\text{m}$  设计 10 个波段,在长波 8~12  $\mu\text{m}$  设计 26 个波段;共计 36 个波段,中波光谱分辨率为 0.2  $\mu\text{m}$ ,长波光谱分辨率为 0.15  $\mu\text{m}$ 。

## 1 多光谱设计

由于目标和测量场景不同,通常不同的光电设备有不同的设计准则<sup>[6-7]</sup>。如图 1 所示,设计的多光谱探测系统主要的探测目标是远距离目标,其距地面 200~2 000 km。对于红外光电系统,辐射定标、特别是大气传输修正会给系统带来很大的测量不确定度;在某一测量时间段,它会使测量光谱值以固定形状偏离真实值,从而使等效温度和等效面积偏离真实值。

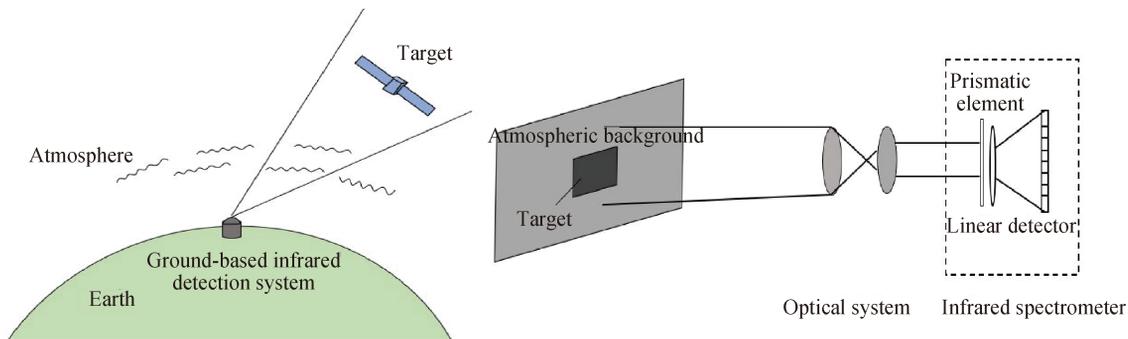


图 1 (a) 远距离点目标探测示意图; (b) 红外多光谱系统工作原理

Fig.1 (a) Schematic diagram of long-range point target detection; (b) Working principle of infrared spectral system

同时,对于 1 500~2 000 km 的目标,由于距离探测器远,获得的测量值的信噪比较低,因此,不能满足高的温度分辨率和面积分辨率。所以,需要对多光谱进行设计,保证红外光谱系统在能探测目标情况下,获得可靠的等效温度、等效面积和较高的温度分辨率、面积分辨率。

### 1.1 等效温度和等效面积的估计方法以及多光谱设计准则

远距离点目标通常由不同温度和表面积的部件组成,它们共同发出红外辐射。但在实际处理的时候,通常将其简化为一块有一定温度和面积的灰体发出的红外辐射。点目标达到红外辐射测量系统入瞳的辐射照度,该量是在量纲还原和大气修正后得到:

$$\Phi_M = \Phi_T + \sigma = \frac{1}{R^2} \cdot \frac{\varepsilon A_t \cdot \int_{\lambda_i}^{\lambda_i + \Delta\lambda} M(T, \lambda) d\lambda}{\pi} + \sigma \quad (1)$$

式中:  $\Phi_M$  为红外测量系统实际测量的辐照度;  $\Phi_T$  为红外测量系统理论上接收的辐照度;  $\sigma$  为测量时引入的误差;  $R$  为点目标到测量系统的距离;  $\varepsilon$  为目标的表面发射率,  $\varepsilon A_t$  为目标到探测器的投影面积  $A_t$  和目标表面发射率的乘积,被视为等效面积;  $M(T, \lambda)$  为黑体辐射出射度,即普朗克公式。可见式中有两个未知数,等效温度  $T$  和等效面积  $\varepsilon A_t$ ; 根据数学中解方程组的思想,两个未知数、两个方程即可解出等效温度和等效面积。但由于误差的影响,等效温度和等效面积会产生较大的偏差且很不稳定。采用更多的波段测量,可得到更多方程,如下式得到  $n$  个方程:

$$\begin{aligned} \Phi_{M1} &= \Phi_{T1} + \sigma_1 = \frac{1}{R^2} \cdot \frac{\varepsilon A_t \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_1 + \Delta\lambda} M(T, \lambda) d\lambda}{\pi} + \sigma_1 \\ \Phi_{M2} &= \Phi_{T2} + \sigma_2 = \frac{1}{R^2} \cdot \frac{\varepsilon A_t \cdot \int_{\lambda_2}^{\lambda_2 + \Delta\lambda} M(T, \lambda) d\lambda}{\pi} + \sigma_2 \\ &\vdots \\ \Phi_{Mn} &= \Phi_{Tn} + \sigma_n = \frac{1}{R^2} \cdot \frac{\varepsilon A_t \cdot \int_{\lambda_n}^{\lambda_n + \Delta\lambda} M(T, \lambda) d\lambda}{\pi} + \sigma_n \quad (2) \end{aligned}$$

在多波段的情况下,这是一个超定非线性方程组,可用最小二乘法求解。其残差为:

$$J(T, \varepsilon A) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (\Phi_{Mi} - \Phi_{Ti})^2 \quad (3)$$

残差越小,说明等效温度和等效面积越合理。于是问题转化为求解非线性无约束最优化问题:

$$\min J(T, \varepsilon A) = \min \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (\Phi_{Mi} - \Phi_{Ti})^2 \quad (4)$$

以 Gauss-Newton 法可以求解该最优化问题,得到等效温度和等效面积。以等效温度和等效面积为判定准则,其偏差越小、标准差越小及分辨率越高,说明等效温度和温度面积计算得越合理。

### 1.2 多波段抵抗误差能力

红外辐射测量系统测量值的准确度一般不是很高:辐射定标不确定度通常在 5% 左右,利用大气参数测量设备实现大气传输修正不确定度通常在 20% 左右,因此,测量值的不确定度往往超过了 20%<sup>[8]</sup>;同时,由于红外系统探测远距离点目标,大气背景辐射、望远镜光学系统和红外探测器引起的噪声会产生不可忽视的随机误差,噪声的大小视目标远近和大小而定。测量不确定度会使反演的等效温度和等效面积偏离真实值,测量随机噪声会使等效温度和等效面积的分辨率降低。

#### 1.2.1 多波段抗测量不确定度能力

测量不确定度是指对测量结果的不肯定,是表征被测量的真值在测量值某个范围的一个估计。地基红外辐射测量系统测量值的不确定度往往超过了 20%,这意味着测量真值在测量值正负 20% 的这个范围内;若用单波段或少数几个波段进行测量,这些测量值都偏大或偏小的概率就会比较大,而采用更多波段这种情况便会得到抑制。假设测量真值在测量值的 20% 这个范围内均匀分布,对面积 20 m<sup>2</sup>、温度 300 K 的目标仿真计算 1 000 次得出等效温度、等效面积与真值偏差的平均值随波段数的变化,如图 2 所示。可以看出:等效温度、等效面积与真值的偏差随波段数的增加而减小,当波段数较少(例如为 4)时,等效温度和等效面积的偏差非常大,温度偏差超过了 18 K,面积偏差到达了 9 m<sup>2</sup>。

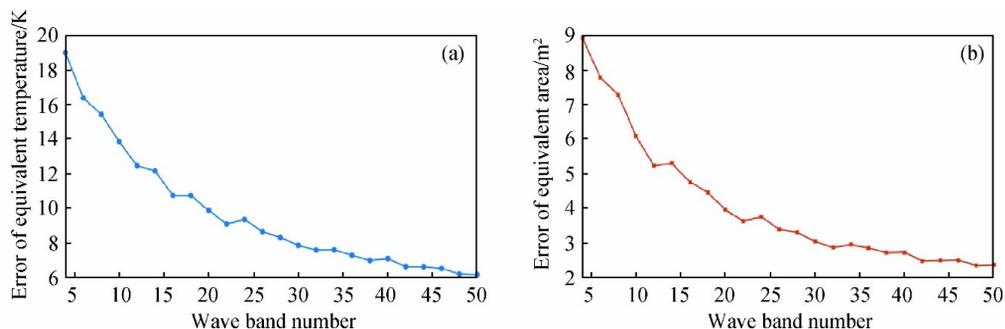


图 2 (a) 等效温度与真值偏差的平均值随波段数的变化; (b) 等效面积与真值偏差的平均值随波段数的变化

Fig.2 (a) Variation of number of wavebands with mean deviations of equivalent temperature and true value ; (b) Variation of number of wavebands with mean deviations of equivalent area and true value

### 1.2.2 多波段抗噪能力

随机噪声对等效温度和等效面积的分辨率会产生较大影响。对面积 20 m<sup>2</sup>、温度 300 K 的目标进行仿真计算, 在目标信号中加入高斯噪声, 使其信噪比为 5、10、15、20。起始波段数为 4, 以 2 递增至 50 个波段数, 每个波段数计算 1 000 次等效温度和等效面积, 得到每个波段数等效温度和等效面积的标准差。分析了长波 8~12 μm 的波段数和信噪比对反演等效温度和等效面积分辨率的影响; 也进一步分析了长波加上中波 3~5 μm 的波段数和信噪比对反演等效温度和等效面积分辨率的影响, 计算结果如图 3、4 所示。由于目标温度在 300 K 左右, 中波辐射量小于长波辐射量, 这导致中波的信噪比会小于长波的信噪比; 因此, 以长波信噪比为 10、中波信噪比以 2 递减, 分析中波信噪比与长波信噪比不一致时对等效温度和等效面积分辨率的影响, 计算结果如图 5 所示。由于中波总的可用波段宽度少于长波总的可用波段宽度, 因此, 也分析了中波和长波的波段数不一致时对等效温

度和等效面积分辨率的影响, 计算结果如图 6 所示。

从图 2~5 可以看出, 不管是长波还是中波加长波, 等效温度和等效面积的标准差都随着波段数的增加而减小, 这说明波段数的增加能有效地降低噪声对提取等效温度和等效面积分辨率的影响。同时随着波段数的增加, 等效温度和等效面积的标准差先下降较剧烈而后下降较平缓; 波段数增至 30 时, 等效温度和等效面积的标准差下降了 50% 左右; 波段数增至 50 时, 等效温度和等效面积的标准差下降 65% 左右。信噪比对等效温度和等效面积的影响要强于波段数, 等效温度和等效面积的标准差减小一倍, 只需信噪比提升一倍, 而要增加 30 个波段数才能达到相同效果。长波加中波相对于长波而言, 其等效温度和等效面积的标准差都很大程度地减小, 这表明它抵抗噪声影响的能力更强。中波和长波信噪比不一致时, 中波信噪比高于长波的 40%, 中波加长波的抗噪能力不会受到太大影响; 但中波信噪比低于长波的 20%, 中波加长波的抗噪能力将减弱与只有长波时相同。

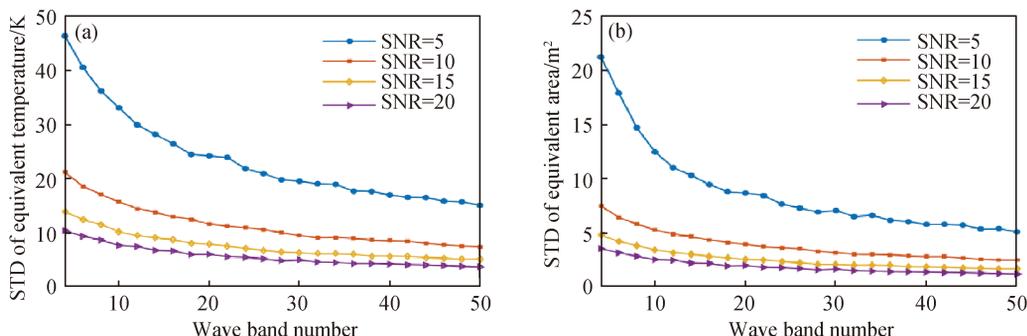


图 3 长波 (8~12 μm)。 (a) 等效温度标准差随波段数和信噪比的变化; (b) 等效面积标准差随波段数和信噪比的变化

Fig.3 Long wave (8~12 μm). (a) Variation of equivalent temperature standard deviation with wave band number and SNR; (b) Variation of equivalent area standard deviation with wave band number and SNR

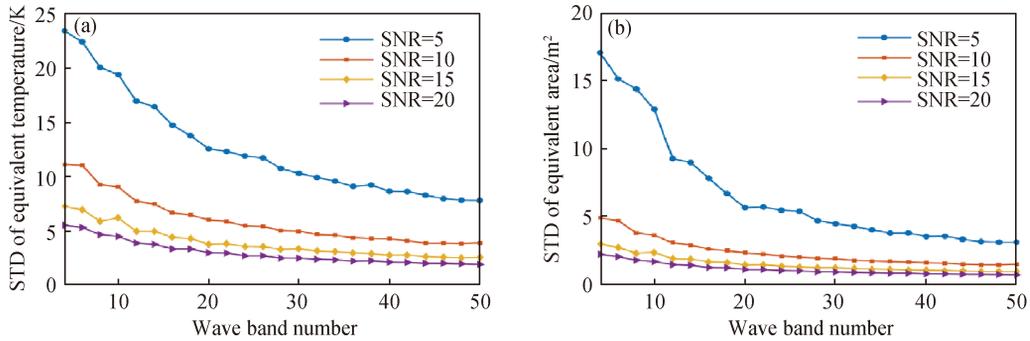


图 4 中波(3~5 μm)和长波(8~12 μm)。(a) 等效温度标准差随波段数和信噪比的变化; (b) 等效面积标准差随波段数和信噪比的变化

Fig.4 Mid wave (3~5 μm) and long wave (8~12 μm). (a) Variation of equivalent temperature standard deviation with wave band number and SNR; (b) Variation of equivalent area standard deviation with wave band number and SNR

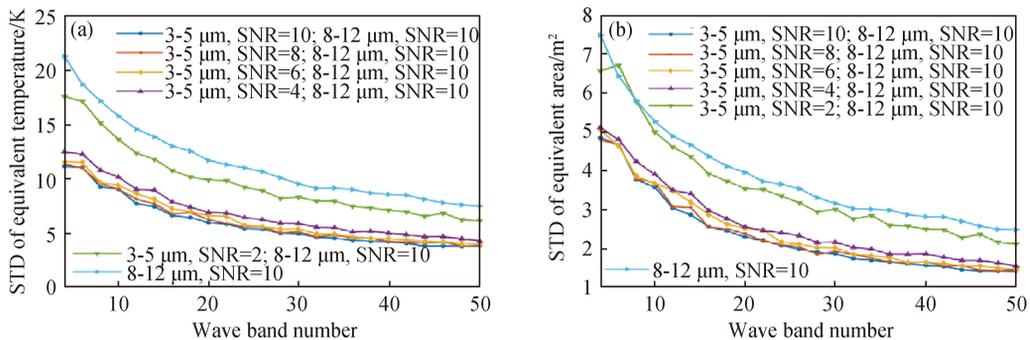


图 5 中波和长波信噪比不一致。(a) 等效温度标准差随波段数和中波信噪比的变化; (b) 等效面积标准差随波段数和中波信噪比的变化

Fig.5 Inconsistency of signal-to-noise ratio between mid wave and long wave. (a) Variation of equivalent temperature standard deviation with wave band number and SNR of mid wave; (b) Variation of equivalent area standard deviation with wave band number and SNR of long wave

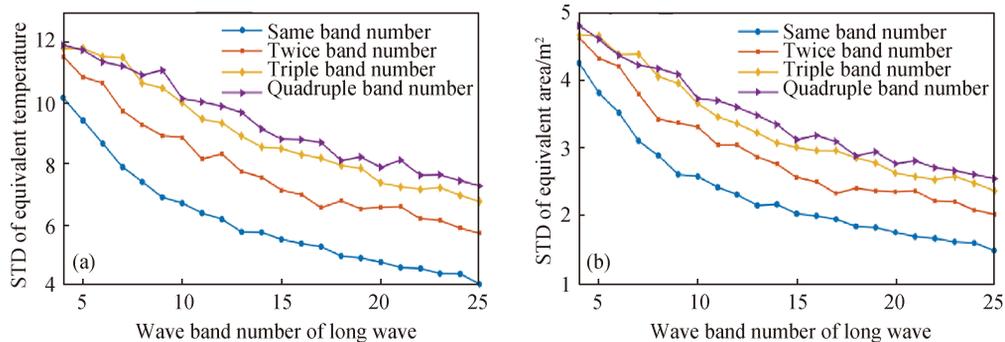


图 6 中波和长波波段数不一致。(a) 等效温度标准差随波段数的变化; (b) 等效面积标准差随波段数的变化

Fig.6 Inconsistency of wave band number between mid wave and long wave. (a) Variation of equivalent temperature standard deviation with wave band number; (b) Variation of equivalent area standard deviation with wave band number

从图 6 可以看出,中波和长波波数不一致时,中波波数的减小会使等效温度和等效面积分辨率降低;但这种降低程度不算很大,因为在长波波数为中波波数的 4 倍时,等效温度分辨率仅降低了约 2 K,等效面积分辨率仅降低了约 1 m<sup>2</sup>。

### 1.3 多波段设计分析

红外光电系统需要探测 2 000 km 处的目标,多波段抵抗误差能力为基于点目标特征参数提取的红外多光谱设计提供以下几点启发:

(1) 在满足信噪比的前提下,尽可能使用更多的

波段,以减小等效温度、等效面积与真值的偏差,也可以一定程度提升等效温度、等效面积的分辨率;

(2) 使用中波加长波探测点目标,中波的使用能显著地提升等效温度、等效面积的分辨率;

(3) 中波信噪比不低于长波信噪比一半,等效温度、等效面积的分辨率不会受影响;中波的波段数少于长波的波段数时,等效温度、等效面积的分辨率会有一定程度的降低,但降低得不大;如有需要可减少中波的波段数而增加波段宽度,因为波段信噪比相对波段数对等效温度和等效面积分辨率的影响更大。

1.3.1 红外辐射测量系统视场角的确定

为了探测 2 000 km 处的目标,很有必要对红外辐

射测量系统的噪声进行分析,以确保中波和长波探测器都能达到最佳工作性能条件。红外辐射测量系统的主要参数如表 1 所示,它主要受到来自 3 方面噪声的影响:一是大气背景辐射引起的光子噪声;二是光学系统自发辐射引起的光子噪声;三是探测器自身的噪声。红外光电系统要能探测到更远点目标,应抑制大气背景辐射和光学系统自发辐射引起的光子噪声;若这两部分的噪声远大于探测器自身噪声,会使红外探测器的性能大大下降;使光电导器件工作于探测器限,此时这两部分的噪声和探测器自身噪声在一个量级,这样能充分发挥红外探测器的性能,从而使红外辐射测量系统能探测到远距离点目标。

表 1 红外多光谱系统参数

Tab.1 Parameters of infrared spectral system

Optical system	Aperture/m	Transmittance	Infrared spectrometer	Transmittance	HgCdTe detector	$D^*/\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$	Area/ $\text{cm}^2$	Signal bandwidth $\Delta f$
	1.2	0.8		0.5 (Mid wave)		$3.5\times 10^{11}$ (Mid wave)	$4\times 10^{-4}$ $\text{cm}^2$ (Mid wave)	2
				0.3 (Long wave)		$7.5\times 10^{10}$ (Long wave)	$7\times 10^{-4}$ $\text{cm}^2$ (Long wave)	

探测器自身噪声可以通过测量的探测器光谱探测率进行估算,将其等效于由背景辐射引起的光子噪声。根据光电导探测器的背景限探测率公式<sup>[9]</sup>:

$$D_{\text{blip}}^* = \frac{\lambda}{2hc} \sqrt{\frac{\eta}{\Phi}} \quad (5)$$

式中: $\lambda$ 为探测器的截止波长; $h$ 为普朗克常数; $c$ 为光速; $\eta$ 为探测器的量子效率; $\Phi$ 为入射的背景光子通量密度。可以将实测的探测器光谱探测率带入上式,得到探测器噪声等效光子通量密度和实测时的背景光子通量密度之和;再由普朗克公式计算出背景光子通量密度,则可得探测器噪声等效光子通量密度。因此噪声等效光子通量密度可以表示为:

$$\Phi_t = \eta \cdot \left( \frac{\lambda}{2hc \cdot D_c^*} \right)^2 - \Phi_b$$

$$\Phi_b = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(300)d\lambda}{4F^2} \quad (6)$$

式中: $\Phi_b$ 为实测探测率条件下的背景光子通量密度; $M(300)$ 为温度 300 K 的黑体光子辐出度; $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 为探测器响应的光谱范围; $F$ 为探测器的  $f$ 数。光学系统自身具有温度,且它在红外探测器的视场内;因此,光学系统自发辐射会进入探测器像面上,引起光

学系统的背景光子通量密度。光学系统自身热辐射在探测器像面上的辐射能量可以等效为一个温度 212 K 黑体直接在探测器前所带来的辐射能量<sup>[10]</sup>。因此,光学系统在探测器上的背景光子通量密度可以表示为:

$$\Phi_o = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(212)d\lambda}{4F^2} \quad (7)$$

式中: $M(212)$ 为温度 212 K 的黑体光子辐出度。红外辐射测量系统视场内的大气背景辐射会通过光学系统传输进入到探测器像面上。根据辐射传输理论可以得到大气背景光子通量密度:

$$\Phi_a = \frac{A_p \Omega_{\text{FOV}} \tau_0 \tau_s \int_{\lambda_1}^{\lambda_1+\Delta\lambda} L_{\text{bs}}(\lambda) \tau_a(\lambda) \lambda d\lambda}{hc \cdot A_d} \quad (8)$$

式中: $A_p$ 为光学系统入瞳面积; $\tau_a(\lambda)$ 为大气透过率; $L_{\text{bs}}(\lambda)$ 大气背景辐亮度由 MODTRAN 软件在海拔 3 000 m 中纬度地区晴朗无雨的条件下计算得出; $\tau_0$ 为光学系统的透过率; $\tau_s$ 为光谱仪的透过率; $\Omega_{\text{FOV}}$ 为红外系统的视场角; $A_d$ 为探测器像元面积。计算可得:中波探测器噪声等效光子通量密度为  $5.3\times 10^{14}e^-$ ,长波探测器噪声等效光子通量密度为  $6.2\times 10^{16}e^-$ ;光学系统在中波探测器上的背景光子通量

密度为  $2.5 \times 10^{12} e^-$ , 光学系统在长波波探测器上的背景光子通量密度为  $1.3 \times 10^{15} e^-$ 。可以看出: 光学系统引起的背景光子通量密度相对探测器噪声等效光子通量密度小了一两个数量级, 因此, 光学系统引起的背景光子通量密度可以忽略不计。计算大气背景光子通量密度还需知道红外辐射测量系统的单像素视场角和波段宽度, 波段宽度可由测量的探测器光谱探测率初始确定在  $0.2 \mu\text{m}$  左右; 视场角对大气背景光子通量密度的影响更关键, 要确定合适的视场角使大气背景光子通量密度和探测器噪声等效光子通量密度

在同一数量级。大气背景光子通量密度随视场角的变化如图 7 所示, 可以看出: 对于长波而言, 视场角降至  $3 \times 10^{-4} \text{ rad}$  时, 大气背景光子通量密度降至与长波红外探测器噪声等效光子通量密度相同数量级; 对于中波而言, 视场角降至  $1 \times 10^{-6} \text{ rad}$  时大气背景光子通量密度降至与中波红外探测器噪声等效光子通量密度相同数量级。因此, 为了保证中波和长波探测器的工作性能, 视场角选择  $1 \times 10^{-6} \text{ rad}$ , 此时长波主要受探测器噪声影响, 中波主要受大气背景光子噪声和探测器噪声的共同影响。

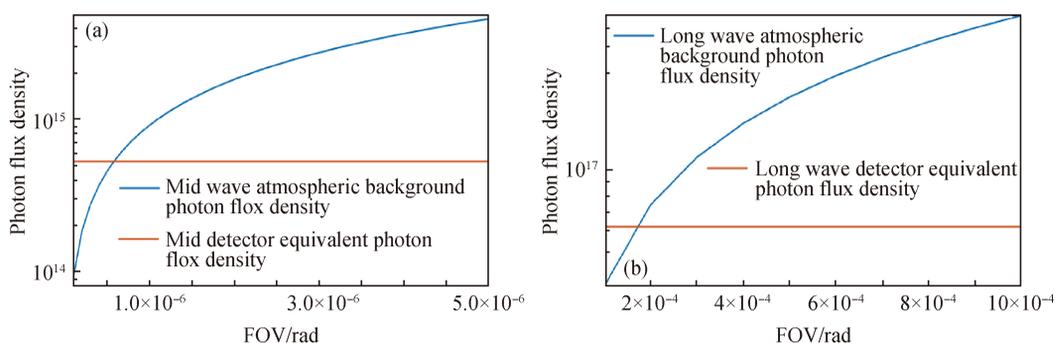


图 7 (a) 中波、(b) 长波的大气背景光子通量密度随视场角变化

Fig.7 Variation of photon flux density of atmospheric background with field angle for (a) Mid wave; (b) Long wave

### 1.3.2 波段数和波段宽度的确定

确定好红外辐射测量系统的视场角后, 进一步确定中波和长波的波段数和波段宽度。波段宽度以温度 300 K、面积  $20 \text{ m}^2$ 、距离 2 000 km 目标的长波信噪比能达到 5, 中波信噪比能达到 2.5 来确定; 然后中波和长波的大气窗口以波段宽度划分出最多的波段数。根据上述红外辐射测量系统的噪声分析, 由公式 (5) 可得到红外辐射测量系统的探测率表达式:

$$D_c^* = \frac{\lambda}{2hc} \sqrt{\frac{\eta}{\Phi_t + \Phi_o + \Phi_a}} \quad (9)$$

式中:  $\Phi_t$  为探测器噪声等效光子通量密度;  $\Phi_o$  为光学系统光子通量密度;  $\Phi_a$  为大气背景光子通量密度。由该探测率可得出红外辐射测量系统探测目标时的信噪比表达式:

$$SNR = t_o t_s A_t \frac{A_p}{\pi R^2} \int_{\lambda}^{\lambda+\Delta\lambda} M(\lambda) t_a(\lambda) d\lambda \cdot \frac{D_c^*}{\sqrt{\Delta f \cdot A_d}} \quad (10)$$

式中:  $A_t$  为目标面积;  $R$  为目标距离;  $M$  为黑体辐射度;  $\Delta f$  为电子学信号带宽;  $A_d$  为探测器像元面积。计算可得出中波波段宽度达到  $0.2 \mu\text{m}$ , 其信噪比能高于

2.5; 长波波段宽度达到  $0.15 \mu\text{m}$ , 其信噪比能接近 5; 中波可划分出 10 个波段, 长波可划分出 26 个波段。各波段具体信噪比如图 8 所示, 可以看出: 信噪比主要受大气透过率的影响; 中波平均信噪比为 3.52, 中波信噪比本应随着波长的增加 (辐射量增加) 而增大, 但大气透过率的影响使其在某些波长处出现下降; 长波平均信噪比为 4.53, 长波信噪比本应较为平缓, 但大气透过率的影响使其在  $9.5 \mu\text{m}$  处出现了较大的下降。

## 2 性能分析

上述已经完成了红外多光谱的设计, 一共设计了 36 个波段, 由多波段抗测量不确定性能力可知: 等效温度、等效面积分别与真值的平均偏差在 7 K、 $3 \text{ m}^2$  左右 (对于温度 300 K、面积  $20 \text{ m}^2$  的目标)。为了验证中波、长波是否协同工作以及等效温度、等效面积分辨率的提升程度; 分别计算了等效温度和等效面积的标准差随目标与探测器的距离目标温度和目标面积的变化。

从图 8~10 可以看出: 无论是目标距离、温度还是

面积的变化,中波加长波的温度和面积标准差都远低于长波。这说明设计的光谱能在目标各种变化的情况下,使中波和长波探测器性能达到最佳、协同工作,大大提高等效温度和等效面积的分辨率。对于目标距离变化来说,它将相同程度地影响中波和长波的信噪比;目标距离越近,其信噪比就越高,温度和面积的

分辨率也越高。目标距离 1 500 km 时,中波加长波的等效温度标准差为 5.7 K,等效面积的标准差为 2.0 m<sup>2</sup>;目标在极限探测距离 2 000 km 时,中波加长波的等效温度标准差为 9.8 K,等效面积标准差为 3.7 m<sup>2</sup>。对于目标温度变化来说,由于普朗克函数的特点,它将更大程度地影响中波的信噪比;随着目标温度的增高,

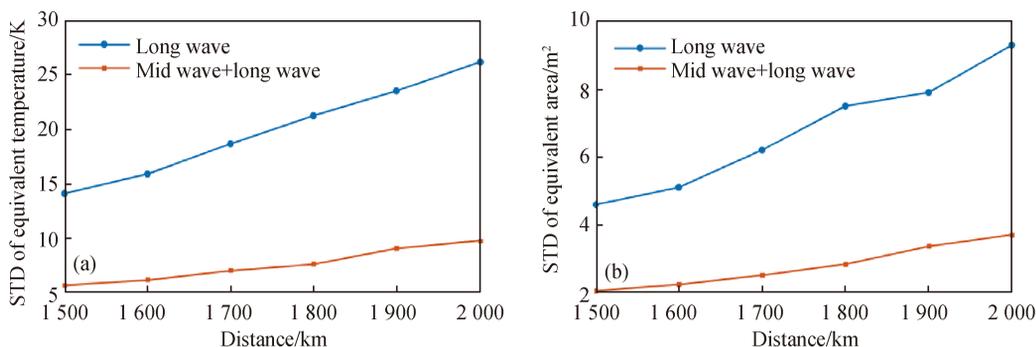


图 8 温度 300 K, 面积 20 m<sup>2</sup> 的目标。(a) 等效温度标准差随距离变化; (b) 等效面积标准差随距离变化

Fig.8 For a target with temperature of 300 K and area of 20 m<sup>2</sup>. (a) Standard deviation of equivalent temperature varies with distance; (b) Standard deviation of equivalent area varies with distance

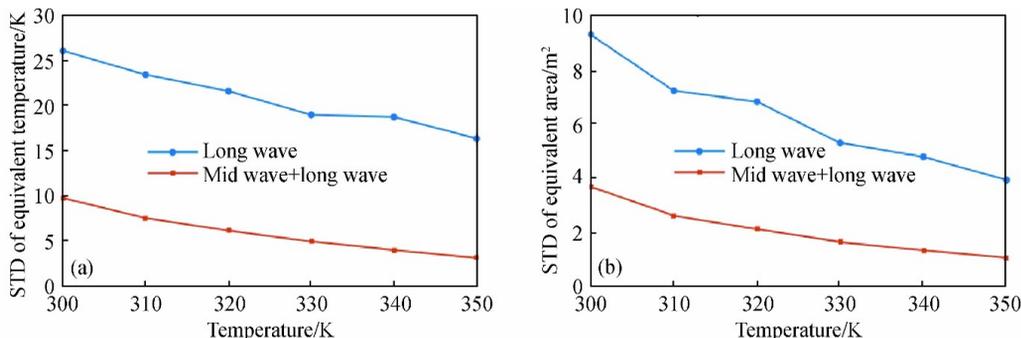


图 9 距离为 2 000 km, 面积 20 m<sup>2</sup> 的目标。(a) 等效温度标准差随目标温度变化; (b) 等效面积标准差随目标温度变化

Fig.9 For a target with distance of 2 000 km and area of 20 m<sup>2</sup>. (a) Standard deviation of equivalent temperature varies with target's temperature; (b) Standard deviation of equivalent area varies with target's temperature

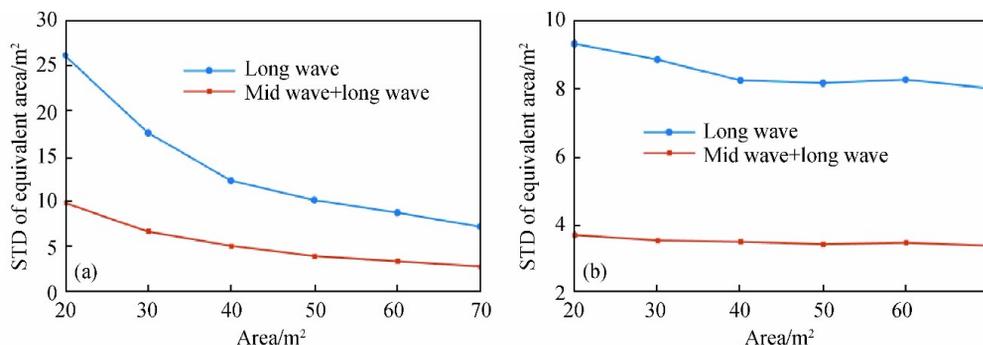


图 10 距离为 2 000 km, 温度 300 K 的目标。(a) 等效温度标准差随目标面积变化; (b) 等效面积标准差随目标面积变化

Fig.10 For a target with distance of 2 000 km and temperature of 300 K. (a) Standard deviation of equivalent temperature varies with target's area; (b) Standard deviation of equivalent area varies with target's area

中波信噪比增大的幅度更大。目标温度为 300 K 时,中波加长波的等效温度标准差为 9.8 K,等效面积标准差为 3.7 m<sup>2</sup>;目标温度为 350 K 时,等效温度标准差为 3.17 K,等效面积标准差为 1.1 m<sup>2</sup>。对于面积变化来说,它与距离变化一样将相同程度地影响中波和长波的信噪比;目标面积越大,目标信号越强,其信噪比也越高。目标面积为 20 m<sup>2</sup> 时,中波加长波的等效温度标准差为 9.8 K,等效面积标准差为 3.7 m<sup>2</sup>;目标面积为 70 m<sup>2</sup> 时,中波加长波的等效温度标准差为 2.8 K,等效面积标准差为 3.4 m<sup>2</sup>。

### 3 结 论

文中以提高等效温度、等效面积的稳定性和分辨率为目的,对红外多光谱的波段数、波段宽度、中波和长波协同工作等展开探讨,从而对红外多光谱进行设计,得出以下结论:

(1) 等效温度、等效面积与其真值的偏差随波段数的增加而快速减小;其分辨率受信噪比的影响更大,随波段数的增加而增加,且先增加得快而后增加得慢;相比只用长波,中波加长波能更大地提升分辨率;中波信噪比和波段数适当小于长波时,等效温度、等效面积的分辨率不会受太大的影响。

(2) 根据地基红外辐射测量系统噪声分析,确定了大气背景辐射是影响光电中波红外探测器和长波红外探测器达到最佳工作性能的主要因素,确定了当该光电系统的视场角为  $1 \times 10^{-6}$  rad 时,能使中波和长波探测器都达到最佳工作条件。

(3) 根据波段信噪比估计和大气红外窗口,最终确定在中波 3.3–4.3  $\mu\text{m}$  和 4.4–5.2  $\mu\text{m}$  设计 10 个波段,在长波 8–12  $\mu\text{m}$  设计 26 个波段;共计 36 个波段,中波光谱分辨率为 0.2  $\mu\text{m}$ ,长波光谱分辨率为 0.15  $\mu\text{m}$ 。

该设计方法为基于点目标特征参数提取的红外多光谱系统研制提供了一些重要的理论依据,但点目标探测的红外多光谱系统十分复杂,是否能有效地指导系统的研制,有待下一步的实际验证。

#### 参考文献:

[1] Wang Guoqiang, Wu Yuanhao. Ground-based measurement on the infrared characteristic of space object [J]. *Infrared & Laser*

*Engineering*, 2011, 40(9): 1634–1639. (in Chinese)

王国强, 吴元昊. 空间目标红外辐射特征的地基测量[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(9): 1634–1639.

[2] Shu Rui, Zhou Yanping, Lu Chunlian. Best detection wavelength bands selection method based on multispectral radiation difference [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2505–2512. (in Chinese)

舒锐, 周彦平, 卢春莲. 基于多光谱辐射特性差异的最佳探测波段的确定方法[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(8): 2505–2512.

[3] Li Chunlai, Wang Yueming, Liu Yinnian, et al. Spectrum measurement system of infrared radiation for spatial object [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2007, 36(6): 857–861. (in Chinese)

李春来, 王跃明, 刘银年, 等. 空间目标红外辐射谱测量系统[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(6): 857–861.

[4] Gu Mu, Ren Qifeng, Zhou Jinmei, et al. Modeling and analyzing of time-resolved satellite infrared spectrum based on ground-based detector [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(5): 059501. (in Chinese)

谷牧, 任栖峰, 周金梅, 等. 基于地基观测的时序卫星红外光谱建模与分析[J]. *物理学报*, 2019, 68(5): 059501.

[5] Skinner M, Russell R, Kelecyc T, et al. Observations in the thermal IR and visible of a retired satellite in the graveyard orbit, and comparisons to active satellites in GEO. Acta [J]. *Astronaut*, 2014, 105(1): 1–10.

Liu Zunyang, Shao Li, Wang Yafu, et al. A band selection method for infrared warning satellites based on radiation flux apparent contrast [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2014, 33(5): 492–497. (in Chinese)

刘尊洋, 邵立, 汪亚夫, 等. 基于辐射通量表观对比度光谱的红外预警卫星探测波段选择方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2014, 33(5): 492–497.

[7] Hu Jianming, Qiao Kai, Zhi Xiyang, et al. Influence of complex environment on the detectability of weak and small aerial target under space-based observation mode [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2019, 38(3): 351–357. (in Chinese)

胡建明, 乔凯, 智喜洋, 等. 天基观测条件下复杂环境对空中弱小目标可探测性的影响[J]. *红外与毫米波学报*, 2019, 38(3): 351–357.

[8] Yang Ciyin, Zhang Jianping, Cao Lihua. Ground-based spatial object infrared radiation feature measurement technique [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(2): 304–310. (in Chinese)

杨词银, 张建萍, 曹立华. 地基空间目标红外辐射特性测量技术[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(2): 304–310.

[9] Chen Bailiang, Li Xiangyang. Infraed Imaging Detectors for

- Space Applications[M]. Beijing: Science Press, 2016: 36-37. (in Chinese)
- 陈伯良, 李向阳. 航天红外成像探测器[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 36-37.
- [10] Yu Fei, Ren Qifeng, Li Hua, et al. Measurement method of self-thermal radiation for coaxial total reflection infrared optical system [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0104003. (in Chinese)
- 余菲, 任栖锋, 李华, 等. 同轴全反红外光学系统自身热辐射测量方法[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(1): 0104003.