

衍射光学系统红外光谱目标探测性能

周 凯^{1,2}, 李道京^{1*}, 王烨菲³, 姚 园³, 乔 明¹

- (1. 中国科学院空天信息创新研究院 微波成像技术国家级重点实验室, 北京 100190;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 衍射光学系统具有大口径轻量化的优点,但其光谱范围较窄,能利用的红外信号能量较小,通常认为采用后会使得红外相机的探测信噪比降低。基于衍射光学系统,分析了对地观测红外相机的目标探测性能,结合一个非制冷红外相机信噪比计算示例,明确了在地物背景和目标光谱特性不同的条件下,基于衍射光学系统的红外相机仍可能具有良好的目标探测性能。同时将红外相机等效噪声功率与激光和电子学系统进行对比,提出了红外探测系统的性能还可能进一步提高的观点,给出了一种引入激光本振结合电子学滤波细分红外光谱降低等效噪声功率的方法。

关键词: 红外探测; 衍射光学系统; 信噪比; 等效噪声功率; 光谱特性; 激光本振
中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200371

Target detection performance of infrared spectrum with diffractive optical system

Zhou Kai^{1,2}, Li Daojing^{1*}, Wang Yefei³, Yao Yuan³, Qiao Ming¹

- (1. National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The diffractive optical system has the advantages of large diameter and light weight, but its spectral range is narrow and the infrared signal energy that can be used is small. Therefore, it is generally believed that the detection signal to noise ratio (SNR) of the infrared camera will be reduced when it is adopted. Based on the diffractive optical system, the target detection performance of the ground observation infrared camera was analyzed, combined with an example of the calculation of the SNR of the uncooled infrared camera, the viewpoint that infrared cameras based on diffractive optical systems may still have good target detection performance was clarified when the spectral characteristics of ground object background and target were different. Meanwhile, the equivalent noise power of the infrared camera was compared with the laser and the electronic system. As a conclusion, the viewpoint that the performance of the infrared detection system may be further improved was proposed, and a method of introducing the laser local oscillator combined with the electronic filter which can subdivide infrared spectrum to reduce equivalent noise power was given.

Key words: infrared detection; diffractive optical system; signal to noise ratio; equivalent noise power; spectral characteristics; laser local oscillator

收稿日期:2020-12-17; 修订日期:2021-02-09

基金项目:中国科学院重点项目 (E03701010F)

作者简介:周凯,男,博士生,主要研究方向为激光 SAR 信号处理,红外目标探测。

通讯作者:李道京,男,研究员,博士,主要从事雷达系统和雷达信号处理方面的研究。

0 引言

近年来,衍射光学系统得到了快速发展^[1],其轻量化大口径的特点使高分辨率成像易于实现,但其光谱范围较窄,一般认为适于激光雷达使用^[2-4],当其用于红外相机时,需采用色差校正技术^[5]。然而,即便经过色差校正,红外相机所能利用的信号能量也将大幅降低,导致红外探测信噪比大幅降低。假定衍射光学系统的光谱范围仅为传统光学系统光谱范围的 1/20,探测信噪比在原理上将减少至原来的 1/20,这使其红外应用受到影响。衍射光学系统轻量的特点使其大口径容易实现,增加其直径 4.5 倍,其红外探测信噪比也可以保证。

上述红外探测通常用于对地成像场合,当红外相机用于目标探测时,考虑到地物背景和目标光谱特性不同,衍射光学系统窄的光谱范围,实际上有助于地物背景和背景分离,并将有利于目标探测。

近年来单光子探测技术得到快速发展,红外相机是否能借鉴相关技术进一步提高其探测性能是值得思考的。时宽(积分时间)一定的红外信号是宽带噪声信号的特点使其等效噪声功率较高,从原理上讲,细分光谱会降低红外等效噪声功率,有助于提高红外相机的探测性能。

在衍射光学系统和细分红外光谱的基础上,分析对地观测红外相机的目标探测性能,研究新的降低红外等效噪声功率方法,对非制冷红外相机技术的发展和具有应用具有重要意义。

文中第 1 节对基于衍射光学系统的红外系统进行了介绍,并对其参数进行了分析,包括信噪比、灵敏度、比探测率和光学系统角分辨率;第 2 节基于信噪比研究了衍射光学系统红外相机的探测性能;第 3 节对电子学系统、激光系统和红外系统的等效噪声功率进行了对比分析;第 4 节对文中工作进行了总结,给出了研究结论。

1 红外系统和参数分析

图 1 为衍射光学系统红外相机系统光路示意图,红外信号经衍射主镜接收后,利用与衍射主镜具有相同色散、相反光焦度的衍射透镜进行色差校正,该方法也称为 Schupmann 消色差方法,最后由光电探测器

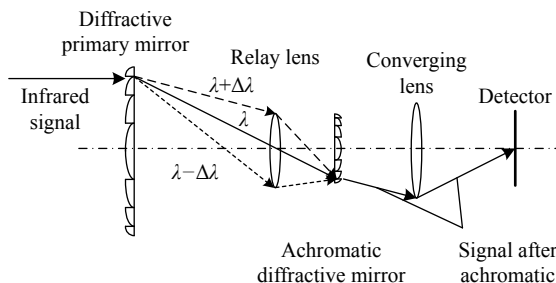


图 1 衍射光学系统红外相机系统光路示意图

Fig.1 Optical path diagram of infrared camera system based on diffractive optical system

探测后成像。

此节对红外系统中的信噪比、灵敏度及比探测率等重要参数进行了介绍;由于红外系统的比探测率计算较为复杂,将给出一个计算示例,并重点分析了使用如图 1 所示的衍射光学系统后比探测率不变的本质原因;最后推导了比探测率与光学系统角分辨率关系。

1.1 信噪比

假设单个目标像元在受到红外辐射时产生的目标信号电压峰值为 V_{ts} , 其可描述为^[6]:

$$V_{ts} = P_t R' = P_t D^* V_N (A_d / (2t_{int2}))^{-1/2} \quad (1)$$

式中: P_t 为单个目标像元接收到的辐射功率; R' 表示探测器光谱范围内的波段响应度; D^* 为探测器的比探测率,是归一化的波段探测度,其表示在某一波段内,面积为 1 cm^2 的焦平面上有 1 W 的入射功率,并用 1 Hz 带宽的电路测量时的信噪比; A_d 表示探测器单个像元面积; t_{int2} 为实际工作中探测器的积分时间; V_N 为探测器噪声电压峰值。类似的,单个背景像元对应的信号电压峰值 V_{bs} 为:

$$V_{bs} = P_{bg} R' = P_{bg} D^* (\lambda) V_N (A_d / (2t_{int2}))^{-1/2} \quad (2)$$

式中: P_{bg} 为单个背景像元接收到的辐射功率。联立可知红外探测器输出的、可检测的最小信噪比 SNR 为:

$$SNR = (V_{ts} - V_{bs}) / V_N = \Delta P D^* (\lambda) (A_d / (2t_{int2}))^{-1/2} \quad (3)$$

式中: ΔP 是单个目标像元和背景像元上的辐射功率差。

1.2 灵敏度

作为可检测的最小接收功率,红外探测器的接收灵敏度 ΔP 与探测距离 R 的关系可表示为^[6]:

$$\Delta P = |(L_t - L_{bg}) / N_t| A_t A_0 \tau_a \eta_0 / R^2 \quad (4)$$

式中: N_t 表示目标在焦平面上所占的像元个数; A_t 和 A_0 分别表示目标的有效辐射面积和光学系统入瞳面

积, 而 A_0 与光学系统口径 D_0 的关系可表示为 $A_0 = \pi\left(\frac{D_0}{2}\right)^2$; τ_a 和 η_0 分别表示大气透过率和光学系统透过率; L_t 和 L_{bg} 分别表示目标和背景的辐射亮度, 其可通过下式计算得到^[7]:

$$L = \frac{\varepsilon M(T)}{\pi} \quad (5)$$

式中: $M(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5 \exp(c_2/\lambda T) - 1} d\lambda$ 表示黑体红外辐射度, c_1 和 c_2 分别为第一、第二辐射常数; T 为目标或者背景的温度; ε 为目标或背景的发射率。为便于计算, 一般通过下式并结合查找黑体相对辐射度表来计算此积分^[8]。

$$M(T) = [F(\lambda_2 T) - F(\lambda_1 T)] \sigma T^4 \quad (6)$$

式中: σ 为斯蒂芬常数; $F(\lambda T)$ 为黑体相对辐射度函数。

1.3 比探测率

从公式 (3) 中可以看出, 在除 D^* 外其余参数不变的情况下, D^* 越大, 探测信噪比越高, 所以进一步研究 D^* 是值得的。对于光电探测器, D^* 可描述为下式^[6]:

$$D^* = \frac{4K \cdot F^2 \cdot T_B^2 \cdot \lambda_p}{c_2 \cdot \eta_{or} \cdot NETD \cdot (2t_{int1} \cdot A_d)^{1/2} M(T_B)} \quad (7)$$

式中: K 为峰值探测率到有效探测率的转换系数; F 为

光学系统 F 数; λ_p 为峰值波长; $NETD$ 表示噪声等效温差, 对于制冷型探测器, 其值较低, 从而可得到较大的比探测率值; η_{or} 和 t_{int1} 分别为测试 $NETD$ 时的光学系统透过率和积分时间; $M(T_B)$ 为背景辐射度。表 1 给出了一个利用公式 (7) 计算非制冷探测器 D^* 的具体示例, 得到其计算值为 $5.4 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

由于背景辐射度 $M(T_B)$ 是波长的函数, 当输入主镜使用衍射光学系统后, 由于光谱范围变窄, 将直接导致 $M(T_B)$ 变化, 下面给出具体分析。图 2 为黑体相对辐射度函数 $F(\lambda T)$ 随着 λT 的变化曲线, 假设 λ 的变化范围为 $0 \sim 15 \mu\text{m}$, $T = 1000 \text{ K}$, 即 λT 的变化范围为 $0 \sim 15 \times 10^3 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。图 2(a)、(b) 和 (c) 分别给出 λT 取不同范围时黑体相对辐射度函数曲线。

假定输入主镜使用衍射光学系统, 中心波长为 $10.8 \mu\text{m}$, 其可用的光谱宽度为 $0.2 \mu\text{m}$, 相比于探测器 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 的光谱范围, 相应的积分区间会减少为原来的 $1/20$ 。虽然从图 2(a) 中 λT 的全部范围看, $F(\lambda T)$ 并非 λT 的线性函数, 但是在特定温度下 (如 $T = 300 \text{ K}$), 小光谱范围内 (如 $8 \sim 12 \mu\text{m}$) 时, 从图 2(b) 中可以看出 $F(\lambda T)$ 近似为 λT 的线性函数。此时, 由公式 (6) 可知, 目标/背景辐射度会由于使用衍射光学系统后波

表 1 D^* 计算相关参数

Tab.1 Relevant parameters for calculating D^*

Parameters	Value	Parameters	Value
Conversion factor K	0.7	F number of optical systems	1
Grass background temperature in Summer T_B	303 K	Detector peak wavelength λ_p	$10.8 \mu\text{m}$
First radiation constant c_1	$3.7415 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^2$	Second radiation constant c_2	$1.4388 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$
Optical system transmittance during testing η_{or}	0.6	Background emissivity	0.93
Noise equivalent temperature difference $NETD$	$40 \times 10^{-3} \text{ K}$	Integration time during testing t_{int1}	$34.56 \times 10^{-6} \text{ s}$
Detector pixel area A_d	$(14 \times 10^{-6})^2 \times 10^4 \text{ cm}^2$	Detector specific detectivity D^*	$5.4 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$

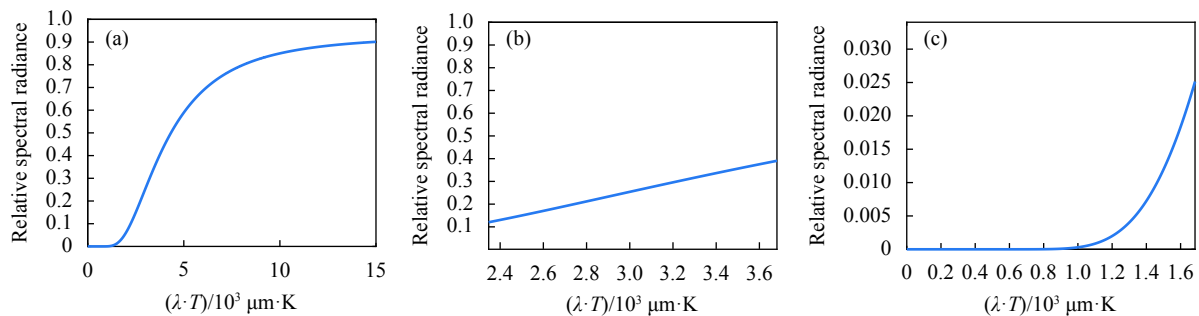


图 2 λT 取不同范围时黑体相对辐射度函数图。(a) λT 取全部范围; (b) λT 取 $2.4 \times 10^3 \sim 3.6 \times 10^3 \mu\text{m} \cdot \text{K}$; (c) λT 取 $0 \sim 1.5 \times 10^3 \mu\text{m} \cdot \text{K}$

Fig.2 Graph of relative radiant exitance function of black-body when λT takes different ranges. (a) λT takes entire range; (b) λT takes $2.4 \times 10^3 \sim 3.6 \times 10^3 \mu\text{m} \cdot \text{K}$; (c) λT takes $0 \sim 1.5 \times 10^3 \mu\text{m} \cdot \text{K}$

段积分区间缩小为原来的 1/20 而同比缩小。

另外从图 2(c) 中也可以看出, 当 λT 减小到一定程度后, 黑体相对辐出度已趋近于零, 正如背景辐出度非常小的深空背景, 其光学系统部件所产生的红外杂散辐射就成为影响背景辐射的主要因素^[9]。而对地观测时, 背景辐出度较强不可忽略, 且由公式 (5) 知当目标和背景的光谱特性相同时, 目标和背景的辐亮度都会随着光谱范围的缩小会同比例减小。

此外, 受到光谱范围缩减影响的参数还有 $NETD$, 在 $NETD$ 数值的实验室测量中, 其可由下式计算^[10]:

$$NETD = \frac{\Delta T}{(V_{ts} - V_{bs})/V_N} \quad (8)$$

式中: ΔT 为目标/背景温差。从该式可知, 随着光谱范围的缩小, 目标/背景峰值电压差同比缩小, 而 $NETD$ 则同比增大。

所以, 最终从公式 (7) 中可以看出, 随着光谱范围的缩小, 背景辐出度 $M(T_B)$ 同比缩小, 而 $NETD$ 又同比增大, 在此基础上 D^* 一般不会变化。

参考文献 [9] 研究了深空背景条件下的红外探测器比探测率与光学系统工作温度的关系, 明确了制冷条件下可获得较高比探测率的结论。根据参考文献 [9], 当深空背景条件下口径 300 mm, 光学系统 $F=2$, 系统工作温度 300 K (非制冷) 时, 8~14 μm 长波红外的 D^* 可达到 $3.82 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。根据参考文献 [7], 对于大气背景条件下口径 44 mm, 光学系统 $F=2$, 峰值波长 $\lambda_p = 4.167 \mu\text{m}$, 等效噪声温差 $NETD < 16 \text{ mK}$ 时, 制冷型探测器的 D^* 估算结果为 $1.159 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

上述两例均为对空观测, 当探测器选为非制冷且用于对地观测时, D^* 将有所减少。考虑到影响 D^* 估算的因素较多, 为保证文中分析结果的可靠性, 后文中 D^* 取值为文献 [7] 中的 1/8, 即为 $1.4 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

1.4 光学系统角分辨率

将红外相机用于对地观测时, 光学系统俯仰向和方位向的角分辨率可分别描述为:

$$\begin{cases} \rho_a = \arctan(a/f) \approx a/f \\ \rho_r = \arctan(b/f) \approx b/f \end{cases}, (a, b \ll f) \quad (9)$$

式中: a 和 b 分别为两个方向上的像元尺寸; f 为光学系统的焦距, 其可表示为光学系统口径 D_0 和 F 数的乘积 $f = D_0 F$ 。

当两个方向的像元尺寸均为 14 μm , 焦距 $f = 100 \text{ mm}$ 时, 两维的角分辨率均为 0.14 mrad, 对应 15 km 处空间分辨率约为 2 m。

以焦距与口径的比值替换光学系统 F 数, 并将公式 (9) 代入公式 (7) 可得 D^* 与光学系统角分辨率的关系如下:

$$D^* = \frac{K \cdot T_B^2 \cdot \lambda_p \cdot \pi \cdot A_d^{1/2}}{c_2 \cdot \eta_{0r} \cdot NETD \cdot A_0 \cdot (2t_{int1})^{1/2} \cdot \rho_a \cdot \rho_r \cdot M(T_B)} \quad (10)$$

从该式可以看出, 相机角分辨率越高, 每个像元接收的来自单位立体角内的背景辐出度越小, D^* 越大。

2 探测性能分析

在上节对红外系统参数分析的基础上, 此节以探测信噪比作为红外相机探测性能的表征, 具体分析使用衍射光学系统前后红外探测性能的变化。

联立公式 (3) 和公式 (4), 红外探测信噪比可描述如下:

$$SNR = \frac{\delta |L_t - L_{bg}| / N_r |A_r A_0 \tau_a \eta_0 D^*}{R^2 \cdot (A_d / (2t_{int2}))^{1/2}} \quad (11)$$

当红外相机用于对地观测时, 假设背景为夏季草地, 在距离 15 km 处, 相应地设置大气透过率 $\tau_a = 0.75$ 。对不同温度的车辆目标, 下面对一个衍射光学系统非制冷红外相机的探测信噪比进行分析, 表 2 为系统参数。

假定探测器光谱范围为 8 ~ 12 μm , 且目标和背景

表 2 系统参数

Tab.2 System parameters

Parameters	Value	Parameters	Value
Signal extraction factor δ	0.707	Number of pixels occupied by the vehicle target on the focal plane N_r	1
Atmospheric transmittance τ_a	0.75	Optical system aperture D_0	100 mm
Optical system transmittance η_0	0.6	Optical system entrance pupil area A_0	$79 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
Integration time in actual work t_{int2}	$10 \times 10^{-3} \text{ s}$	Target effective radiation area A_r	$4 \times 10^4 \text{ cm}^2$
Background surface temperature	303 K	Target surface temperature	304/306/308 K
Detection range R	15 km	Detector specific detectivity D^*	$1.4 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$

的辐出度光谱特性相同,如图 3 所示(不同仅由温差引起),当输入主镜使用衍射光学系统后,其可用的光谱宽度缩小为 $0.2\ \mu\text{m}$ (如 $10.7\sim 10.9\ \mu\text{m}$),由公式(5)和 1.3 节分析可知,当积分区间减少为原来的 $1/20$ 时,目标和背景亮度均会缩减为原来的 $1/20$,而 D^* 保持不变,由公式(11)可得,给定探测距离下的信噪比会同比降低。

表 3 给出了目标/背景光谱特性相同时在不同光学系统下的红外探测信噪比,可以看出,对于温差 $1\ \text{K}$ 的目标/背景,在传统光学系统下的信噪比为 3.9 ,而在衍射光学系统下仅为 0.19 ,信噪比下降为原来的 $1/20$,此时需增大衍射光学系统口径直径 4.5 倍才能保证原有的探测信噪比。

表 3 目标/背景光谱特性相同时不同光学系统下红外探测信噪比

Tab.3 Infrared detection SNR under different optical systems when the spectral characteristics of target/background are same

Parameters	Value
Target/background emissivity	0.93/0.93
Target/background spectral range	8-12 μm
Target radiance	$(3.82/3.94/4.06)\times 10^{-3}\ \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$
Background radiance	$3.75\times 10^{-3}\ \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$
SNR of infrared detection with traditional optical system	3.9/11.9/20
SNR of infrared detection with diffractive optical system	0.19/0.55/0.92

当目标和背景的光谱特性不同,典型的如目标光谱范围本身就较小在 $0.6\ \mu\text{m}$ 量级,如图 4 所示,目标辐出度对波长的响应强点主要集中在 $10.4\sim 11\ \mu\text{m}$ 光谱范围内,其余幅值较小,为简化问题,设其为零。输入主镜使用衍射光学系统后窄谱段的目标亮度减小为原来的 $1/3$,而背景亮度减小为原来的 $1/20$,此时两者差的绝对值并不会同比下降而导致信噪比也同比大幅下降。这表明,在一定条件下红外相机的探测性能不会因为衍射光学系统的使用而大幅下降,而通常目标和背景光谱特性不同的特点,也为衍射光学系统的使用提供了机会。在此基础上,增大衍射光学系统口径,将弥补能量损失甚至进一步提升红外探测性能。

表 4 为目标/背景光谱特性不同时在不同光学系统下的红外探测信噪比,可以看出,对于温差 $1\ \text{K}$ 的目标/背景,在传统光学系统下的信噪比为 15.2 ,而在衍射光学系统下为 9.7 ,信噪比仅下降为原来的 $1/1.5$ 。

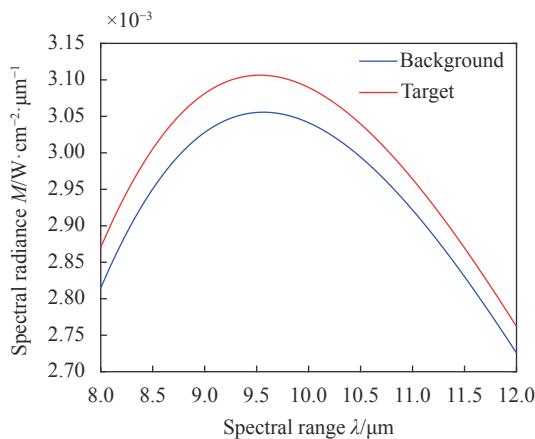


图 3 目标/背景温差 $1\ \text{K}$ 时相同的辐出度光谱曲线

Fig.3 Same spectral curve of radiance at target/background temperature difference of $1\ \text{K}$

因此,基于衍射光学系统,采用非制冷探测器,对地面温差目标仍具有良好的探测性能。

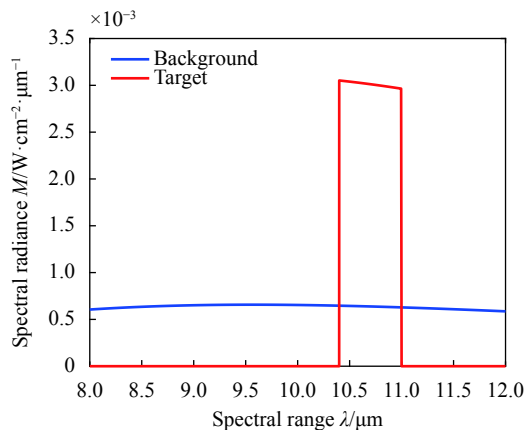


图 4 目标/背景温差 $1\ \text{K}$ 时不同的辐出度光谱曲线

Fig.4 Different spectral curve of radiance at target background temperature difference of $1\ \text{K}$

表 4 目标/背景光谱特性不同时不同光学系统下红外探测信噪比

Tab.4 Infrared detection SNR under different optical systems when the spectral characteristics of target/background are different

Parameters	Value
Target/background emissivity	0.93/0.2
Target/background spectral range	10.4-11 μm/8-12 μm
Target radiance	$(5.75/5.92/6.1) \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$
Background radiance	$8.08 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$
SNR of infrared detection with traditional optical system	15.2/14/12.9
SNR of infrared detection with diffractive optical system	9.7/10.1/10.5

3 等效噪声功率分析

探测系统的等效噪声功率,与探测灵敏度对应,是衡量探测系统性能的主要指标,并适用于微波雷达、毫米波辐射计、射电望远镜、激光雷达、激光通信和红外相机等系统。此节将对分析电子学系统、激光系统和红外系统的等效噪声功率。

3.1 电子学系统

在以微波雷达^[11]和射电望远镜^[12-13]为典型代表的电子学系统中,均采用了本振接收机,主要考虑了热噪声影响。在温度 $T = 300 \text{ K}$,热噪声能量 $kT = 4.1 \times 10^{-21} \text{ J}$,其中玻耳兹曼常数 $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 。

微波雷达通常使用窄带信号,信号带宽为其时宽的倒数。为获得最大的探测信噪比,其匹配滤波器的系统接收带宽一般设置为其信号带宽。射电望远镜接收带宽通常较宽,其热噪声信号带宽即为系统接收带宽,为降低热噪声影响,通常也会采用制冷接收机。

设电子学系统接收带宽为 B_n ,等效噪声功率表达式为 $P_m = kTB_n$,当射电望远镜 B_n 为 4 GHz 时,其等效噪声功率为 $1.6 \times 10^{-11} \text{ W}$ 。

射电望远镜接收信号时宽为 10 ms 时,对应的信号带宽为 100 Hz,基于此可根据需要对 4 GHz 带宽射电信号进行窄带滤波处理,降低等效噪声功率。增加信号时宽,可增加输入信号能量,利用更窄的滤波带宽降低等效噪声功率,有助于目标和背景信号分离并提高探测性能。

3.2 激光系统

在激光雷达和激光 SAR^[14]中,主要需考虑散弹噪声的影响。以波长 10.8 μm 的激光雷达为例,散弹噪声 $h\nu = 1.8 \times 10^{-20} \text{ J}$ (单光子能量),其中普朗克常量 $h =$

$6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, ν 为激光频率。传统的直接探测激光雷达,其探测灵敏度在 100 个光子水平,近年来也出现了基于单光子计数的直接探测高灵敏度激光雷达。

激光也属于窄带信号,其信号带宽通常为其时宽的倒数,为获得最大的探测信噪比,匹配滤波时的系统接收带宽通常也设置为其信号带宽。设激光系统接收带宽为 B_n ,等效噪声功率表达式为 $P_m = h\nu B_n$,当信号时宽为 0.25 ns,对应的 B_n 为 4 GHz 时,其等效噪声功率为 $7.3 \times 10^{-11} \text{ W}$;当信号时宽为 10 ms,对应带宽为 100 Hz 时,其等效噪声功率为 $1.8 \times 10^{-18} \text{ W}$ 。通常条件下,激光信号的线宽在 10 kHz 量级, B_n 也在 10 kHz 量级,此时其等效噪声功率为 $1.8 \times 10^{-16} \text{ W}$ 。

相比直接探测激光雷达,基于激光本振的相干探测激光雷达技术近年得到快速发展,其探测灵敏度已远优于 1 个光子。2014 年,美国 Montana 州立大学进行了微弱回波合成孔径激光雷达 SAL 成像实验,证明 SAL 可在分辨单元回波能量接近单光子的情况下进行相干成像^[15],其图像信噪比在 0 dB 水平,假定其相干成像用了 100 个脉冲,目标的单脉冲信噪比在 -20 dB 量级。该实验从一个方面表明了相干探测具有良好的微弱信号探测能力,其探测灵敏度已远优于单光子探测器。此外,近年发展起来的相干探测激光通信技术^[16],已明确了其探测灵敏度可大幅提高的结论。

通常激光本振功率可设置得足够高(在 mW 量级),这使得接收端仅受限于量子噪声且容易实现窄带滤波^[17],由此可获得较高的探测灵敏度。由于工作波段接近,基于激光本振的探测技术很值得红外相机系统借鉴。

3.3 红外相机

对于红外相机系统,其等效噪声功率可由探测器

噪声电压和响应度表示如下:

$$P_N = \frac{V_N}{R'} \quad (12)$$

将公式 (1) 中的响应度公式代入可得:

$$P_N = \frac{(A_d / (2t_{int}))^{1/2}}{D^*} \quad (13)$$

对于中心波长为 10.8 μm , 光谱宽度为 4 μm 的红外信号, 其所对应的带宽约为 10300 GHz; 当光谱宽度为 0.2 μm , 其所对应的带宽约为 500 GHz。红外信号是宽带噪声信号, 不同的光谱宽度对应的红外信号能量不同。光谱宽度相差 20 倍, 对应的信号能量也相差 20 倍, 但由于 D^* 不随光谱范围变化, 红外相机的等效噪声功率也不随光谱范围变化。

当积分时间 (信号时宽) 为 10 ms, 由上式知此时的等效噪声功率为 6.8×10^{-12} W, 适当增大积分时间, 可增加信号能量进一步减少其等效噪声功率。表 5 给出了不同系统中不同时宽对应的等效噪声功率, 可以看出, 与信号时宽为 10 ms 激光窄带系统相比, 信号时宽为 10 ms 的红外系统的等效噪声功率要高出 4 个数量级。

表 5 不同系统中的等效噪声功率

Tab.5 Equivalent noise power in different systems

	Signal time width	Equivalent noise power
Electronics system	0.25 ns	1.6×10^{-11} W
Laser system	0.25 ns	7.3×10^{-11} W
	10 ms	1.8×10^{-16} W
Infrared system	10 ms	6.8×10^{-12} W

红外系统的等效噪声功率较高的原因, 是由于红外探测器是一个光电转换器件, 其性能最终还是在电子学表征, 目前有限的电子学带宽, 会对宽带红外信号探测产生影响。从具体分析看, 在光谱宽度 0.2 μm 条件下, 其所对应的信号带宽约为 500 GHz, 远大于积分时间 10 ms 对应的 100 Hz 信号带宽, 光电转换后当电子学带宽有限如 4 GHz 时, 频谱严重重叠大幅提高了噪声信号的功率谱密度, 并大幅降低了 100 Hz 窄带滤波的效果。显然, 有限的电子学带宽和严重的红外信号频谱重叠, 是红外相机等效噪声功率高的主要原因。

假定以时宽为 10 ms 的激光窄带系统等效噪声功率作为红外相机探测灵敏度参考, 目前红外相机探

测性能的改善, 还有很大空间。除了采用制冷型探测器, 目前提升其探测灵敏度的另一个方法就是引入激光本振信号, 去除宽带红外信号的频谱混叠。

借鉴相干激光雷达和射电望远镜探测方式, 在红外相机接收系统中引入激光本振, 基于光纤耦合的单元探测器原理框图如图 5 所示:

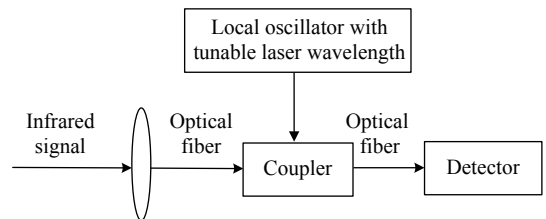


图 5 激光本振单元探测器原理框图

Fig.5 Principle block diagram of the laser local oscillator unit detector

该激光本振为中心波长可调谐的激光种子源, 其可调谐的光谱宽度为 0.2 μm , 通过对激光本振的波长步进调整, 可对宽谱段红外信号在电子学频域实现无混叠的范围选通, 同时等效细分红外光谱。假定电子学带宽在 4 GHz 量级 (对应的光谱范围是 1.5 nm), 当波长步进为 1.5 nm 时, 通过本振波长步进调谐完成 0.2 μm 光谱范围覆盖约需 125 次, 再通过非相干积累提升宽谱段红外信号能量对应的信噪比。

对于阵列探测器, 目前有空间光路混频和基于光纤阵列网络混频两种方式可供选择。空间光路混频结构简单但容易引入较大的空间相差使得混频效率低, 为此, 一种考虑是采用带有激光本振耦合器的光纤阵列结构, 使用多个红外波段的激光单元探测器拼接形成阵列探测器, 此处的探测器为平衡探测器; 另一种考虑是将激光相控阵^[18-19]中的光波导馈电网络与阵列探测器耦合, 引入激光本振信号后对每个探测单元都实施光电探测, 显然这是一个新型的红外阵列探测器。

当红外信号光谱宽度为 0.2 μm , 假定引入激光本振实施光电探测后在电子学频域无混叠条件下可将红外信号的带宽控制在 4 GHz (对应的光谱范围为 1.6 nm), 原理上可降低红外等效噪声功率 125 倍, 达到 2.7×10^{-15} W, 进一步利用数字信号处理实施窄带滤波, 即可使红外等效噪声功率与激光窄带系统接近。

红外等效噪声功率的降低可增大 D^* , 假定实际工作中可将红外等效噪声功率降低 20 倍, D^* 即可增大 20 倍, 由此可弥补目标/背景辐出度光谱特性相同时

引入衍射光学系统所带来的信号能量损失,提高探测信噪比 SNR。

上述方法的本质是细分红外信号光谱,将光学不便实现的纳米分辨率光谱分光,转到电子学频域实现。该方法可大幅降低红外等效噪声功率,其高的光谱分辨率也为目标和背景信号分离提供了有利条件,同时为提高非制冷红外相机探测性能提供了新的技术途径。

值得说明的是,对地观测时地物背景辐射对等效噪声功率的影响较大,通过细分光谱可大幅减少其影响,但同时也可能会降低目标信号能量,实际应用中应考虑联合处理目标不同的光谱信息,避免探测性能损失,如通过对不同光谱获取的图像进行非相干累积,提高图像中目标检测所需的信噪比。

4 结 论

基于衍射光学系统,文中分析了对地观测红外相机的目标探测性能,给出了一个非制冷红外相机信噪比计算示例。研究表明当地物背景和目标光谱特性不同时,红外相机的目标探测性能不会因为衍射光学系统的使用而大幅下降,基于衍射光学系统的红外相机仍可能具有良好的目标探测性能。

文中将红外相机等效噪声功率与激光和电子学系统进行对比,其在红外系统引入激光本振结合电子学滤波细分红外光谱降低等效噪声功率的方法,为提高非制冷红外相机探测性能提供了新的技术途径。目前光电探测器的电子学带宽在不断扩大(已超过 40 GHz),有利于文中激光本振红外探测器的技术实现,持续开展相关研究工作具有重要意义。

参考文献:

- [1] Jiao Jianchao, Su Yun, Wang Baohua, et al. Development and application of GEO membrane based diffraction optical imaging system [J]. *Space International*, 2016, 6: 49-55. (in Chinese)
- [2] Zhu Jinyi, Xie Yongjun. Large aperture lidar receiver optical system based on diffractive primary lens [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(5): 0518001. (in Chinese)
- [3] Hu Xuan, Li Daojing. Space-based synthetic aperture LiDAR system with 10 m diffractive aperture [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(12): 0510010. (in Chinese)
- [4] Li Daojing, Hu Xuan, Zhou Kai, et al. Synthetic aperture Lidar imaging detection based on conformal diffractive optical system [J]. *Acta Optical Sinica*, 2020, 40(4): 0428001. (in Chinese)
- [5] Ren Zhibin, Hu Jiasheng, Tang Honglang, et al. Study on chromatic aberration correction of 10 meter large aperture membrane diffractive primary lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 46(4): 422004. (in Chinese)
- [6] Wang Bingxue, Zhang Qiheng, Chen Changbin, et al. A mathematical model for operating range of a staring IR search and track system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 031(7): 8-11. (in Chinese)
- [7] Kuang Yaowu. Study on the optical system of dual-mode infrared/laser seeker[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- [8] Luo Zhenying, Bai Lu, Ning Hui, et al. Analysis of operating range of infrared detection system based on NETD [J]. *Infrared*, 2017, 38(5): 27-30. (in Chinese)
- [9] Wu Limin, Zhou Feng, Wang Huaiyi. Study on the relationship between the infrared detectors background limit detectivity and the optical systems work temperature [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2010, 31(1): 36-41. (in Chinese)
- [10] Wang Xiaojian, Liu Yang, Chen Lei, et al. Discussion on the operation range of the infrared imaging system for point target expressed by NETD and ΔT [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S2): 2. (in Chinese)
- [11] Skolnik M I. Radar Handbook[M]. New York: The McGraw-Hill Companies Inc, 2010.
- [12] Nan Rendong, Jiang Peng. 500 m aperture spherical radio telescope (FAST) [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(17): 1-3. (in Chinese)
- [13] EVN and Global VLBI results and images[EB/OL]. [2019-12-13]. <http://old.evlbi.org/gallery/images.html>.
- [14] Li Daojing, Du Jianbo, Ma Meng, et al. System analysis of spaceborne aperture lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11): 262-269. (in Chinese)
- [15] Barber Z W, Dahl J R. Synthetic aperture lidar imaging demonstrations and information at very low return levels [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(24): 5531-5537.
- [16] Ke X, Chen J. Experimental investigation on non-optical heterodyne detection technology of 1 km atmospheric laser communication system [J]. *Journal of Applied Sciences*, 2014(4): 7.
- [17] Wang Hai. Design of a homodyne BPSK system for coherent optical communication[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.
- [18] Yaacobi A, Sun J, Moresco M, et al. Intergrated phased array for wide-angle beam steering[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(15): 4575-4578.
- [19] Jie Sun, Erman Timurdogan, Ami Yaacobi, et al. Large-scale nanophotonic phased array [J]. *Nature*, 2013, 493.7431: 195-199.