

可见光/中波红外双波段共口径光学系统设计

郭钰琳¹, 于 洵¹, 蔡珂珺², 杨 璐³

(1. 西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021, 2. 江苏北方湖光光电有限公司, 江苏 无锡 214035;

3. 西安北方光电科技防务有限公司, 陕西 西安 710043)

摘要: 设计了适用于制冷型 640×512 中波红外凝视焦平面阵列探测器和 1920×1080 的 CCD 的可见光/中波红外共口径光学系统。该系统在中波 $3.6 \sim 4.8 \mu\text{m}$, 可见光 $0.45 \sim 0.9 \mu\text{m}$, 环境温度 $-40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 工作, 可见光系统焦距 500 mm , 视场角为 $0.38^\circ \times 0.43^\circ$, $F/\#$ 为 4; 中波红外系统焦距 600 mm , 视场角为 $0.38^\circ \times 0.43^\circ$, $F/\#$ 为 4.8, 满足 100% 冷光阑效率。本设计利用共用卡塞格林系统, 利用分光镜实现可见光与中波红外光谱分光, 之后接各自校正像差的镜组。该系统满足工程光学的要求, 能够良好成像, 双波段系统在 $-40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 环境温度下的也能够正常工作, 并能够实现可见/中波红外远距离识别。

关键词: 双波段成像; 卡塞格林系统; 共口径结构; 光学设计

中图分类号: TH74 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2018)02-0125-08

Optical Design of TV/IR Dual-band Common-aperture System

GUO Yulin¹, YU Xun¹, CAI Kejun², YANG Lu³

(1. School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

2. Jiangsu North Huguang Optics & Electronics Co. Ltd., Wuxi 214035, China;

3. North Optoelectronic Stock Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: A set of common aperture optical system with dual bands is presented for 640×512 MWIR and 1920×1080 CCD. The system works in the wavelength ranges of $3.6 \sim 4.8 \mu\text{m}$ and $0.45 \sim 0.9 \mu\text{m}$ and in the environment temperature range of $-40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$. The TV system has an effective focal length of 500 mm , field of view of $0.38^\circ \times 0.43^\circ$, and an $F/\#$ of 4; the IR system has a focal length of 600 mm , the field of view of $0.38^\circ \times 0.43^\circ$, an $F/\#$ of 4.8, and a cold shield efficiency of 100%. The system takes advantage of Cassegrain system. The beam splitting of the IR/VR is achieved by using a spectroscope and the aberrations are reduced by using respective correcting lenses. The system obtains good image quality for temperatures lying between $-40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$, and can recognize the long-distance targets.

Key words: dual-band imaging system, Cassegrain system, common aperture, optical design

0 引言

可见光成像是研究在自然环境中物体的反射和辐射, 它可以提供目标丰富的细节, 有利于目标的探测识别, 但由于成像质量易受照明环境的严重影响, 而且难以探测及识别隐藏的目标。红外成像技术的探测识别距离远, 能够昼夜工作, 成像质量随着光照环境和天气条件的影响并不大^[1-2]。但是红外成像不能够准确仔细对目标成像, 同时这有异于人的观察习惯, 某种程度上不能够进行目标的探测识别。

随着科学技术的快速发展, 人们为了获得更高分

辨率、更高效的探测系统, 采用了组合式探测方式, 对目标进行全天候探测, 通过选择多个波段探测从而实现远距离目标的探测与识别。

双波段光学系统可以对被测物进行双波段探测, 在不同波段下对目标进行探测^[3-4]。这是单个的光学系统没办法进行的。它拥有可见光、红外光学系统的综合优势, 但又不是简单的叠加。可见波段光学系统的发展相对而言起步早, 程度高, 能够满足各式各样的设计要求, 而且可见光能被人眼轻易接受。但是可见光学系统使用时必须有光源, 在夜间和微光环境下性能会大大减小甚至于不能使用^[5], 另外容易受到外部

收稿日期: 2017-11-23; 修订日期: 2018-01-02.

作者简介: 郭钰琳 (1992-), 女, 陕西铜川人, 西安工业大学硕士研究生。主要研究方向为光学系统设计。E-mail: ttguoyulin@163.com.

条件的干扰，在有雾、有遮挡的情况下难以探测。红外系统优点十分明显：良好的穿透能力^[6]，隐蔽性好而且具有很好的抗干扰能力。但是红外系统光学元件材料种类有限，红外材料吸收很大，材料受温度影响十分显著。此外由于受波长限制，红外系统的分辨率并不如可见光波段。由此可知，可见光、红外光学系统各有优缺点，将两者适当结合，在良好的观察条件下用可见光波段；在光强较弱、夜间时用红外光路探测，两者配合使用能够有效提高系统探测识别的效率^[7-8]。

在此背景下，此次设计将可见光和中波红外光路融合在一个通道里，实现两个波段间的同时探测识别目标，利于更早的探测识别到目标，并且结合可见光/中波红外波段能够获得更加准确而具体的目标细节。由于在不同光谱波段下，目标所表现的光学特性有很大的差异，因而可以实现全天候、宽覆盖、高分辨率的目标探测识别。故双波段成像技术研究对军事和民用领域的技术发展均有重要意义。

1 光学系统设计

该光学系统中，可见光/红外光学系统采用共光路设计，可见光系统采用像元尺寸为 3.45 μm×3.45 μm，1920 像素×1080 像素的 CCD；中波红外系统采用像元尺寸为 15 μm×15 μm，640 像素×512 像素的制冷型探测器。

1.1 主要的技术指标

光学设计指标如表 1 所示。

1.2 光学方案

该方案采用卡塞格林主次镜反射式无焦压缩准直系统作为公用光路，实现可见光与红外光束传输通道的共孔径，并起到对入射平行光线进行口径压缩的作用，在光路中，目标发出的光线会首先经过主镜和次镜，两次反射准直后出来的是平行光。后面采用分光

的方式将可见光波段与中波红外波段分开，采用分光形式将可见光与红外光传输进不同的通道，剩余像差分别由可见中继镜组以及红外中继镜组校正，分别进入可见光和中波红外两个通道。

其方案原理如图 1 所示。

表 1 光学设计指标

Table 1 Optical design parameters		
Parameter	TV	IR
wavelength/μm	0.45-0.9	3.6-4.8
field	0.38°×0.43°	0.38°×0.43°
Focal length/mm	500	600
F number	4	4.8
Recognition distance	10 km	5 km

在红外与可见光光学系统的中继透镜组，按照薄透镜消色差条件和组合光焦度与各组分光焦度的关系有^[9]：

$$\sum_{i=1}^2 (\phi_i h_i^2 / \nu_i) = 0, \phi = \sum_{i=1}^2 (h_i \phi_i) \tag{1}$$

式中：φ为光焦度；ν为阿贝数；h 为轴上光线的相对入射高度；i 为第 i 个透镜。

1.3 设计结果

利用光学设计软件 ZEMAX 进行多次像差优化设计，得到符合技术指标的卡塞格林无焦同轴共光路光学系统，如图 2 所示。

2 可见光系统设计

可见光中继透镜组选用理化性能较好、易于加工的常用环保型的光学玻璃材料，而且优先选用高折射率的光学玻璃，利于使结构更加紧凑，从而实现小型化的目的。选用的材料有：HK9L、HLAK12、HLAK8A 等，利用材料的合理匹配，从而消除系统的色差以及剩余像差，以保证良好的成像质量。

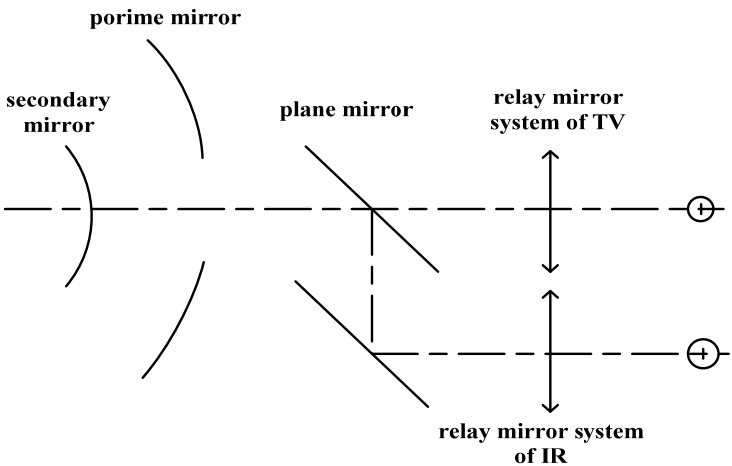


图 1 系统整体光学方案 Fig.1 Optical sketch of the system

2.1 设计结果

可见光系统设计结果如图 3 所示。

2.2 像质评价

从图 4、图 5 和图 6 可知，可见光通道的传递函数光学系统在 150lp/mm 处的传递函数值在 0.3 左右，靠近并部分达到衍射极限；视场的光斑均方根半径均在探测器的像元尺寸 3.45 μm 左右，满足了系统与探测器的匹配要求；可见光通道的场曲和畸变全视场内在 ±0.1% 以内，系统的成像质量较好，达到了预期的设计目标。

3 中波红外系统设计

根据红外探测器的特点和系统要求，中波红外系

统工作波段为 3.7~4.8 μm，常用的材料有：Ge、Si、ZnS 和 ZnSe，Ge 和 Si 由于其高折射率、低色散的特性，设计中产生的像差较小，应用最广。

3.1 设计结果

中波红外系统设计结果如图 7 所示。

3.2 像质评价

从图 8、图 9、图 10 可知，中波红外通道的传递函数光学系统在 33lp/mm（奈奎斯特频率）处的传递函数值接近衍射极限；视场的光斑均方根半径均在探测器的像元尺寸 3.45 μm 左右，满足了系统与探测器的匹配要求；可见光通道的场曲和畸变全视场内在 ±0.5% 以内，系统的成像质量较好，达到了预期的设计目标。

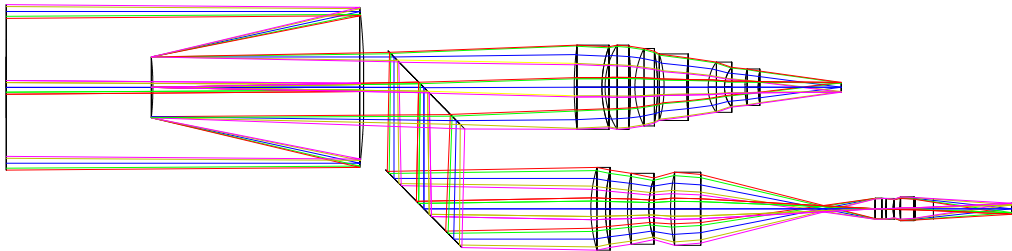


图 2 光学系统结构

Fig.2 Structure of optical system

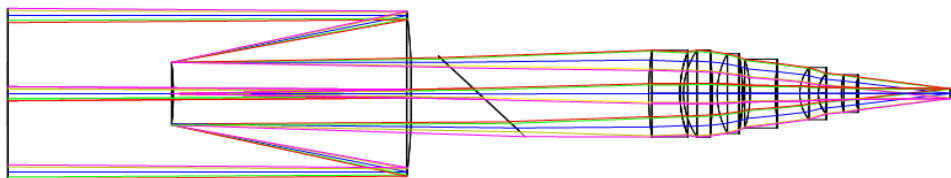


图 3 可见光系统设计结果

Fig.3 The design of visible system

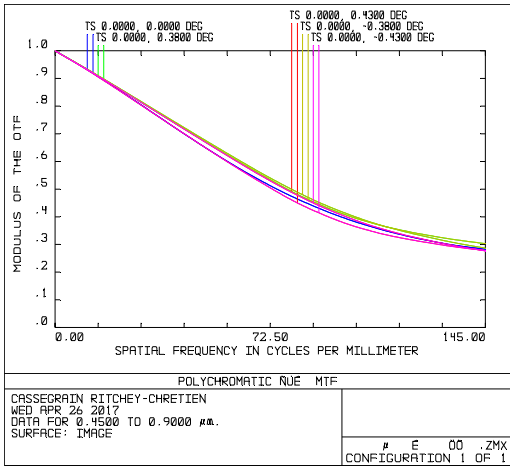


图 4 可见光系统 MTF 图

Fig.4 MTF Curves of TV system

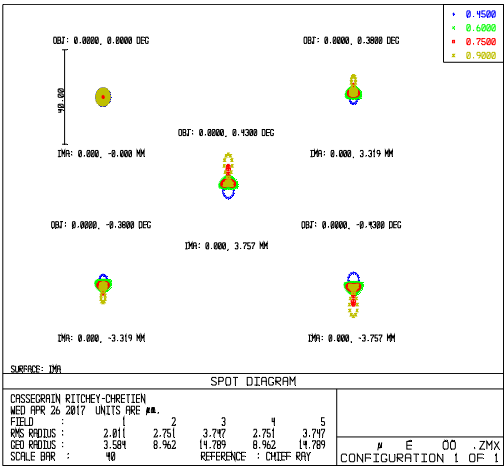


图 5 可见光系统点列图

Fig.5 Spot diagram of TV system

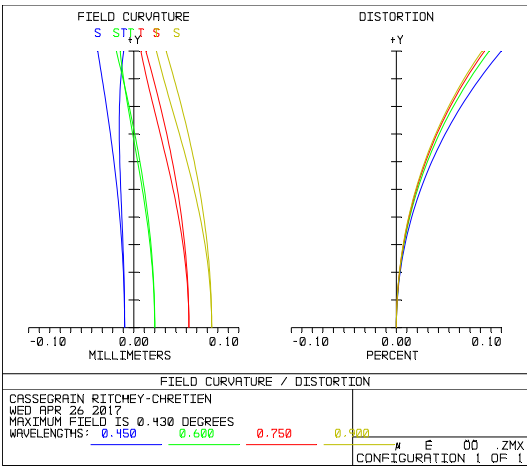


图6 可见光系统场曲与畸变图
Fig.6 Aberration curves of TV system

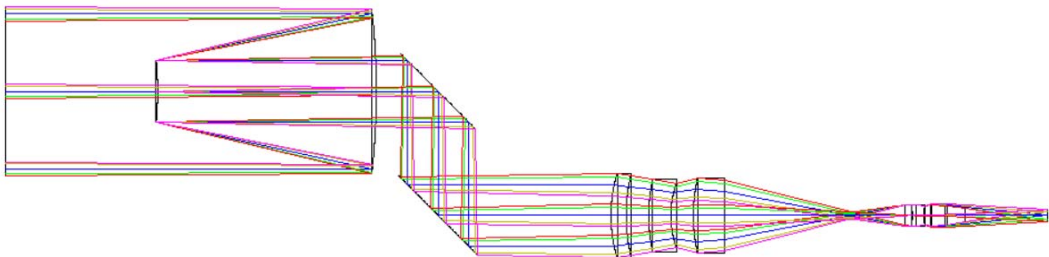


图7 中波红外系统设计结果
Fig.7 The design of IR system

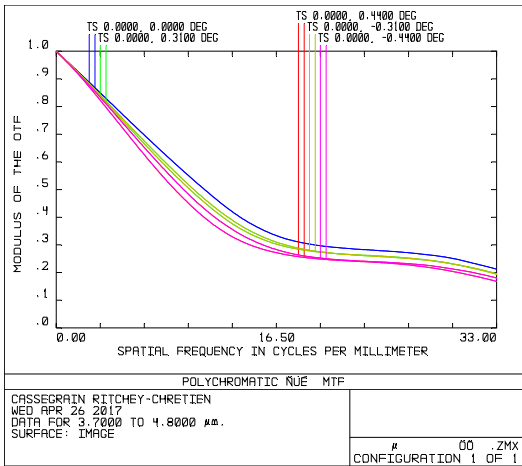


图8 中波红外系统 MTF 图
Fig.8 MTF Curves of IR system

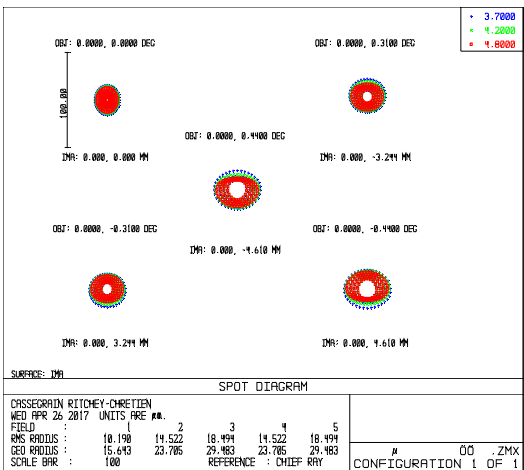


图9 中波红外系统点列图
Fig.9 Spot diagram of IR system

4 光学系统消热差

可见光/红外双波段共光路望远系统工作范围广，要求光学系统在温度变化范围内仍能够保持良好稳定的性能，成像质量。但由于环境的改变，进而会导致光学元件的折射率、透镜的曲率以及厚度等参数的变化，最终导致系统离焦现象，最终导致光学系统的成

像质量降低。因此在可见光/红外双波段共光路望远系统中必须进行系统消热差才能够有效保证稳定的成像质量。一般情况下，由于光学系统壳体材料与光学元件材料随温度变化是非线性的关系，只能在一定的温度内系统自动补偿。可见光波段材料的选择很多，但是对于中波红外系统，选择受到限制。将常用的无热化设计方案综合下来，考虑到系统结构，可靠性以及

补偿方式，本设计决定采用机电主动式补偿方式进行系统的消热差。

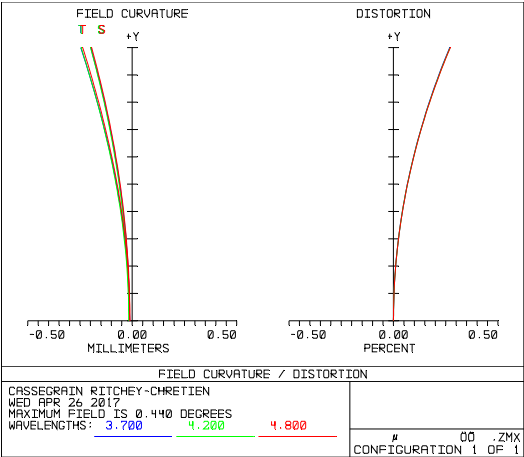


图 10 中波红外系统场曲与畸变图

Fig.10 Aberration curves of IR system

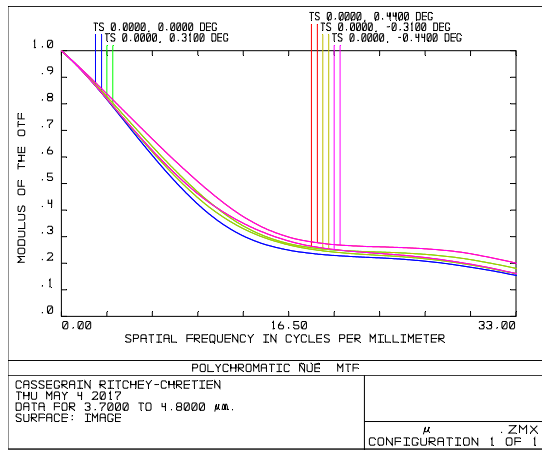
本系统利用探测器的移动来进行像面补偿，这种方法简单有效，不需要过多的机械电子装置，能够降低成

本，但无法稳定焦距，这在本系统中的影响并不大。
在像面移动温度补偿后，系统进行消热差后，在 -40°C 、 -20°C 、 40°C 和 60°C 温度下的 MTF 曲线如图 11 所示，在奈奎斯特频率 33 lp/mm 处各温度 MTF 值接近衍射极限，消热差后系统像质满足设计要求。

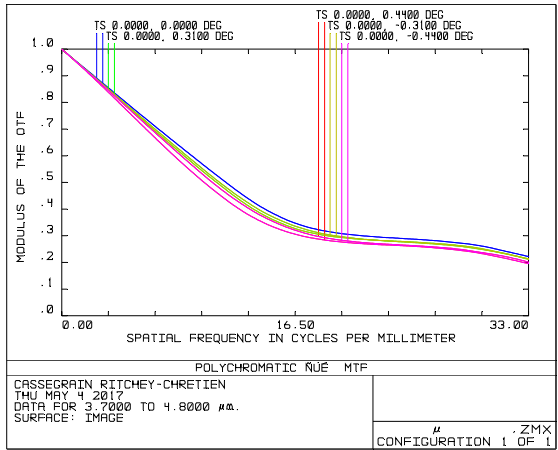
5 探测能力分析

5.1 可见光系统探测能力分析

可见光系统在工作过程中，其识别能力与目标性质、背景、大气、光学系统参数等多种因素有关。根据目标识别以及工程经验，系统通常要同时满足以下 3 个条件：①目标经光学系统成像的尺寸覆盖大于等于 2×2 个像元，根据本系统要求，覆盖至少 8×8 个像元；②目标和背景经大气及光学系统后在像面的对比度应大于提取信号所需最小对比度；③目标辐射的光谱能力经过大气及光学系统传输后，在探测器像面的照度应大于成像所需最小照度。

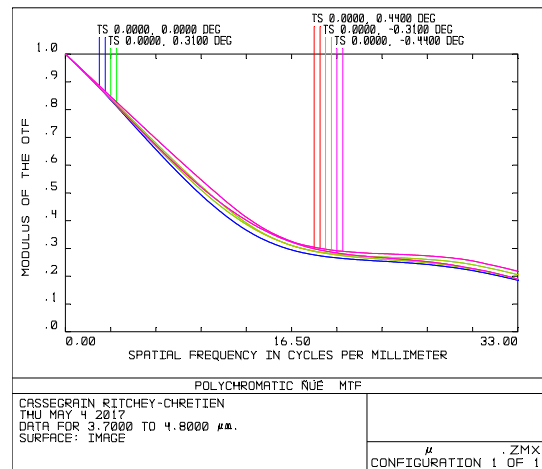


(a) -40°C 时，中波红外系统 MTF 图

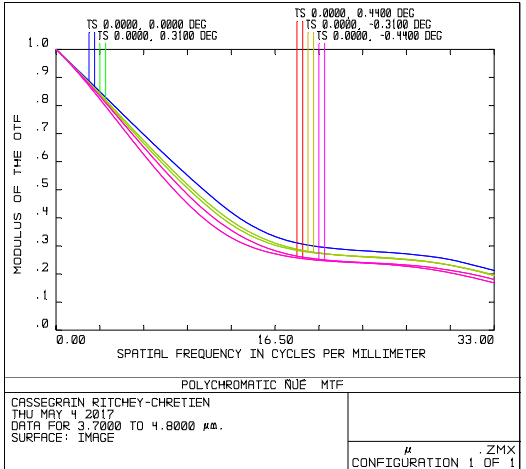


(b) -20°C 时，中波红外系统 MTF 图

(a)When the temperature is -40°C , the MTF curves of IR system (b)When the temperature is -20°C , the MTF curves of IR system



(c) 40°C 时，中波红外系统 MTF 图



(d) 60°C 时，中波红外系统 MTF 图

(c) When the temperature is 40°C , the MTF curves of IR system (d) When the temperature is 60°C , the MTF curves of IR system

图 11 不同温度下的中波红外系统 MTF 图 Fig.11 The MTF curves of IR system at different temperature

1) 目标像的尺寸

本系统主要作用是针对远距离目标的探测识别,系统的成像过程中容易受到大气、光线衍射等因素的影响,为保证准确识别目标,要求目标在探测器上像的尺寸符合以下关系:

$$N \geq N_{\min} \quad (2)$$

式中: N 为目标在 CCD 像面的像尺寸覆盖的像元等级; N_{\min} 为目标在 CCD 上像所覆盖的最小像元等级,取为 8。

目标所成像的尺寸:

$$D_m' = N \cdot d = D_m \frac{f'}{R} \quad (3)$$

式中: N 为目标在探测器上的像元级数; d 为可见光系统探测器像元尺寸, $d=3.45 \mu\text{m}$; D_m 为目标有效截面尺寸,取 $D_m=3000 \text{ mm}$; f' 为可见光系统焦距, $f'=500 \text{ mm}$; R 为目标距离。

当成像的尺寸达到最小探测级数时,根据公式(4)可求系统的最大作用距离:

$$R_{\max} = D_m \frac{f'}{N_{\min} \cdot d} \quad (4)$$

对于直径为 $D_m=3000 \text{ mm}$ 的作用目标,在 95% 探测概率下识别目标对应的线对数 $N=8$ 。代入以上有关数据,计算得到最大作用距离为 54 km,大于所需最大作用距离 10 km,满足探测识别要求。

2) 目标与背景的像面对比度

目标在像面照度:

$$E_m = \frac{\pi}{4} L_m \tau_0 \tau_1 \tau_{2a} (1-a) \left(\frac{D}{f'}\right)^2 k \quad (5)$$

式中: L_m 为目标光亮度。根据亮度公式:

$$L_m = E_0 \rho \cos \theta / \pi$$

式中: ρ 为目标反射系数,取为 0.5; θ 为天顶角,满足最大工作距离时,天顶角取为 $\theta=60^\circ$; E_0 为太阳高度角为 30° 时的辐照度,白天天空背景的照度变化为 $10^2 \sim 10^5 \text{ lx}$,取 $E_0=3 \times 10^4 \text{ lx}$,代入数据得目标光亮度 0.24 cd/cm^2 。 τ_0 为光学系统透过率,根据目前国内的镀膜技术,约为 0.8; τ_1 为目标至系统的大气透过率,采用公式:

$$\tau_1 = e^{-k \cdot a_m \cdot R}$$

式中: k 为水平面大气衰减系数; a_m 为大气斜程衰减系数; R 为最大作用距离,当 R 为 10 km 时,计算得 $\tau_1=0.68$; τ_{2a} 为滤光片的滤光系数,取为 0.6; a 为遮拦面积比, $a=1/9$; D 为光学系统口径, $D=125 \text{ mm}$; f' 为光学系统焦距, $f'=500 \text{ mm}$ 。背景在像面照度为:

$$E_b = \frac{\pi}{4} L_b \tau_0 \tau_{2b} (1-a) \left(\frac{D}{f}\right)^2 \quad (6)$$

式中: L_b 为背景亮度;在可见光范围,背景亮度在 $0.1 \sim 0.6 \text{ cd/cm}^2$ 之间,取背景平均亮度 $L_b=0.4 \text{ cd/cm}^2$; τ_{2b} 为滤光片对背景的滤光系数,取为 0.3。根据公式(5)公式(6)可得目标与背景的对比如为:

$$C = \left| \frac{E_m}{E_b} \right| = \left| \frac{\tau_1 \tau_{2a}}{\tau_{2b}} \cdot \frac{L_m}{L_b} \right| \quad (7)$$

由(7)式可知,目标与背景的对比如与太阳照度、大气透过率等参数有关。当满足最大作用距离 $R=10 \text{ km}$ 时,计算得到目标与背景对比如 $C=0.816$,满足信号检测所需最小对比如。

3) 目标在像面的照度为公式(8):

$$E_m = \frac{\pi}{4} L_m \tau_0 \tau_1 \tau_{2a} (1-a) \left(\frac{D}{f}\right)^2 k \quad (8)$$

计算可得目标在满足最大工作距离时的像面照度 $E=34.2 \text{ lx}$,满足成像最低照度要求。

对于可见光系统,通过计算可知,当满足最大工作距离时,目标的像面尺寸,目标与背景的像面对比如以及目标在像面的最小照度均满足成像要求。因此可以确定参数选择的合理性。

5.2 红外系统探测能力分析

对于中波红外系统,探测器的比探测率 D^* ($\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$) 是衡量探测器的探测能力的一个重要参数,定义为:

$$D^* = \frac{V_s}{V_N} \cdot \frac{(A_d \Delta f)^{1/2}}{H A_d} \quad (9)$$

式中: V_s/V_N 为探测目标信噪比 SNR; A_d 为探测器有效面积; Δf 为噪声等效带宽; H 为探测器接收的辐射度; $H A_d$ 为探测器接收的辐射功率。

当对点物目标成像的时候,不考虑背景辐射亮度的影响,探测器单个像元接收到的目标辐射功率为:

$$\begin{aligned} P &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda A_l w' \tau(\lambda, R) \tau_0 d\lambda \\ &= \frac{A_l A_0 \tau_0}{N R^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau(\lambda, R) L_\lambda d\lambda \end{aligned} \quad (10)$$

式中: L_λ 为目标辐亮度; A_l 为目标有效辐射面积; w' 为光学系统入瞳对目标所张立体角; $\tau(\lambda, R)$ 为大气透过率; τ_0 为光学系统透过率; A_0 为光学系统入瞳面积; N 为目标覆盖探测器的像元个数; R 为探测距离。

大气透过率 τ 在一定范围内与波长无关。将上式整理得:

$$R^2 = \frac{D^* A_l A_0 \tau \tau_0 L}{N \cdot \text{SNR} \sqrt{A_d \cdot \Delta f}} \quad (11)$$

式(11)为中波红外光学系统在均匀背景下的作用距离模型, 可以推出, 在背景辐亮度为 L_b 时:

$$R^2 = \frac{D^* A_t A_0 \tau \tau_0 (L - L_b)}{N \cdot \text{SNR} \sqrt{A_d \cdot \Delta f}} \quad (12)$$

因为中波红外系统是能量系统, 由公式(12)可以得到作用距离与信噪比之间满足的关系:

$$\frac{V_s}{V_N} = \frac{D^* A_t A_0 \tau \tau_0 (L - L_b)}{N \sqrt{A_d \cdot \Delta f} \cdot R_{\max}^2} \quad (13)$$

由式(13)可知, 当目标覆盖的像元数为最小值, 信噪比取最低阈值, 为6时, 红外系统的作用距离最大, 同时, 相应的大气透过率也达到了最小值, 进而对红外系统的探测距离进行计算。

1) 目标有效面积 A_t 可用圆面估算,

$A_t = \frac{\pi}{4} D_m^2 = 70685 \text{ cm}^2$, D_m 为作用目标尺寸, 取 $D_m = 3000 \text{ mm}$ 。

2) 红外系统入瞳面积 A_0 , 其中心遮拦比 $A = 1/3$,

入瞳直径 $D_0 = 125 \text{ mm}$, 则 $A_0 = \frac{\pi}{4} D_0^2 (1 - A^2) = 109.08 \text{ cm}^2$ 。

3) 大气透过率 $\tau(\lambda \cdot R)$, $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ 中波红外波段, 大气透过率取值应小于实际最大作用距离所对应的大气透过率, 取较小透过率 $\tau = 0.3$ 。

4) 光学系统透过率, 根据目前我国的镀膜技术, 红外系统的透过率粗略估算为0.6。

5) 目标的辐射亮度 L :

$$L = \frac{M_{(\lambda_1 - \lambda_2)} \cdot \varepsilon}{\pi} \quad (14)$$

目标辐射普朗克公式:

$$M_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \quad (15)$$

$$M_{(\lambda_1 - \lambda_2)} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_0(\lambda, T) d\lambda = [z(x_2) - z(x_1)] \cdot \sigma T^4 \quad (16)$$

式中: ε 为目标辐射表面的发射率, 为0.7; $M_{(\lambda_1 - \lambda_2)}$ 为目标对应波段内的辐射出射度; T 为目标温度; $z(x)$ 为黑体分数; σ 为玻尔兹曼常数, 为 $\sigma = 5.67 \times 10^{-12} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^4)$; 地面目标 $T = 300 \text{ K}$, 根据黑体辐射计算公式, 查表得:

$$z(x_1) = z(0.38) = 3.80 \times 10^{-2} \quad (17)$$

$$z(x_2) = z(0.50) = 2.22 \times 10^{-1} \quad (18)$$

代入公式(16), 计算得中波红外 $M = 0.0084 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。目标辐射亮度:

$$L = \frac{M_{(\lambda_1 - \lambda_2)} \cdot \varepsilon}{\pi} = \frac{0.00687 \times 0.7}{3.14} = 0.00153 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$$

6) 背景辐射亮度 L_b 具有不确定性, 目标的背景辐射亮度值:

$$L_b = L_{b\lambda} \cdot \Delta\lambda \quad (19)$$

式中: $L_{b\lambda}$ 为背景最大辐射亮度, $L_{b\lambda}$ 取 $1.45 \times 10^{-4} \text{ (W/cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}^{-1})$; $\Delta\lambda$ 为探测波段宽度。计算得:

$$L_b = L_{b\lambda} \cdot \Delta\lambda = 1.595 \times 10^{-4} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$$

7) 中波红外探测系统目标最小覆盖个数一般大于 8×8 , 则最小像元数 $N_m = 64$;

8) A_d 为探测器像元面积, $A_d = 2.25 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$;

9) 噪声等效宽 $\Delta f = 1/2t_{\text{int}}$, t_{int} 为探测器积分时间, 取为 2 ms , 则: $\Delta f = 250 \text{ Hz}$;

10) 对于中波红外系统信噪比取值通常在 $4 \sim 6$ 之间, 当 SNR 取值为6时, 即可使虚警概率在一定范围内, 探测概率满足工作要求;

11) 探测器探测率 D^*

$$D^* = \frac{4F^2 T^2 \lambda_p}{c_0 \tau_0 \cdot \text{NETD} \cdot W_{\text{TB}} \sqrt{\Delta f A_d}} \quad (20)$$

式中: λ_p 为辐射的峰值波长, 取 $4.3 \mu\text{m}$; c_0 为第二辐射常数, 为 $1.44 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$; NETD 为等效噪声温差; W_{TB} 为目标的普朗克光谱辐射强度, 取 500 W/sr 。取平均值 $D^* = 1 \times 10^{-11} \text{ cm} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{Hz}^{1/2}$ 。

通过计算可得, 以探测概率为95%时, 目标在探测器上覆盖的像元数达到最低要求64。且信噪比为6时, 中波红外系统工作距离最远, 将以上得到的所有数据代入公式(12), 计算得到红外系统最大的工作距离 $R = 45 \text{ km}$, 满足系统要求, 因此可以保证红外系统参数的可靠性。

6 结论

本文设计了可见光/红外双波段共口径共光路光学系统, 采用共用卡塞格林反射系统, 实现系统长焦距、双波段、共口径。可见光波段焦距 500 mm , 奈奎斯特频率 $145 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 处的传递函数值在全视场内均比较好, 可见光通道的场曲和畸变全视场内在 $\pm 0.2\%$ 以内; 中波红外通道的传递函数光学系统在 33 lp/mm (奈奎斯特频率) 处的传递函数值在全视场内均比较好, 中波红外通道的场曲和畸变在全视场范围内均在 $\pm 0.5\%$ 以内, 通过二次成像实现 100% 冷光阑效应, 提高信噪比。以上成像性能分析说明, 可见光

/中波红外通道具有较好的成像质量,能够满足系统成像要求,系统参数也保证了可见光通道实现 10 km 的距离识别,中波红外通道实现 5 km 的距离识别,同时在满足探测识别要求的前提下,使用新型光学材料,提高了成像系统的探测识别目标的能力,有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] HE F Y, CUI J C, FENG S L, et al . Narcissus analysis for cooled starting IR system[C]//*SPIE*, 2007, **6772**: 67224.
- [2] Zufiat A , Hand R J. The production of Al-Mgalloy/SiC metal matrix composites by pressureless in filtration[J]. *Journal of Material Science* , 2002, **37**(5): 955-961.
- [3] Yitzhak Nevo. Dual-band optics[J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(5): 053002.
- [4] Jay N Vizgaitis, Arthur Hastings. Dual band infrared picture-in-picture systems[J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(6): 061306.
- [5] Bigwood C, Wood A. Two-element lenses for military applications[J]. *Opt. Eng.*, 2011, **50**(12): 1705.
- [6] 张伟,李克新,武春风,等. 多光谱目标探测的波段选择[J]. *光学技术*, 2005, **31**(6): 893-897.
ZHANG Wei, LI Kexin, WU Chunfeng. Band selection for multi spectral target detector[J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(6): 893-897.
- [7] John Hartke, Eustace L Dereniak. Snapshot dual-band visible hyper-spectral imaging spectrometer[J]. *Optical Engineering*, 2007, **46**(1): 013201.
- [8] 辛云宏,杨万海,王保平. 一种基于双波段红外搜索与跟踪系统的单站测距方法[J]. *红外技术*, 2004, **21**(1): 5-8.
XIN Yunhong, YANG Wanhai, WANG Baoping. A method of single observer ranging based on double bands of IRSTS[J]. *Infrared Technology*, 2004, **21**(1): 5-8.
- [9] 张以谟. *应用光学*[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 302-304.
ZHANG Yimo. *Applied Optics*[M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2008: 302-304.