中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

基于单传感器的三波段共口径光学系统设计

张坤 李京宸 孙思 谌庆荣 杨帆

Design of three-band co-aperture optical system based on single sensor

ZHANG Kun, LI Jing-chen, SUN Si, CHEN Qing-rong, YANG Fan

引用本文:
张坤, 李京宸, 孙思, 谌庆荣, 杨帆. 基于单传感器的三波段共口径光学系统设计[J]. 中国光学, 2024, 17(2): 382−389. doi: 10.37188/CO.2023−0098
ZHANG Kun, LI Jing-chen, SUN Si, CHEN Qing-rong, YANG Fan. Design of three-band co-aperture optical system based on single sensor[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(2): 382-389. doi: 10.37188/CO.2023-0098

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2023−0098

文章编号 2097-1842(2024)02-0382-08

基于单传感器的三波段共口径光学系统设计

张 坤[1], 李京宸[1,2], 孙 思[1*], 谌庆荣[1], 杨 帆[1]
（1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;
2. 中国科学院光场调控科学技术全国重点实验室, 四川 成都 610209）

摘要: 针对现有多波段成像系统体积大、功耗高和集成化设计困难的问题, 本文提出了一种基于单传感器的三波段共口径成像光学系统的设计方法。首先, 在光学系统的光阑处设计 1×2 多波段透镜阵列, 把可见光波段和短波红外波段同时成像在一个像平面上, 并把两个波段中心波长的成像位置偏差控制在一个像元内以实现双波段融合成像。然后, 针对双波段成像衍射极限不同的问题, 提出分通道透镜阵列的离轴偏移量和通光口径大小联合优化方法, 并采用双电动光阑高速控制三个成像通道的切换速度。最后, 设计了一个基于单传感器的焦距为 30 mm, 工作波段分别为 480~900 nm、900~1 700 nm 和 480~1 700 nm 的三波段共口径光学系统。设计及分析结果表明该系统具有成像质量好、结构紧凑、无运动光学元件、成像波段切换速度快等优点。

关 键 词: 单传感器; 透镜阵列; 多波段成像系统; 光学设计
中图分类号: O439 **文献标志码:** A **doi:** 10.37188/CO.2023-0098

Design of three-band co-aperture optical system based on single sensor

ZHANG Kun[1], LI Jing-chen[1,2], SUN Si[1*], CHEN Qing-rong[1], YANG Fan[1]
（1. *Institute of Optics and Electronics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Chengdu* 610209, *China*;
2. *National Key Laboratory of Optical Field Manipulation Science and Technology*,
Chinese Academy of Sciences, *Chengdu* 610209, *China*）
* *Corresponding author*, *E-mail*: *sunsi@ioe.ac.cn*

Abstract: The existing multi-band imaging system has the problems of large volume, high power consumption, and difficulty in integrating design. To address these challenges, we proposed a three-band co-aperture imaging optical system based on single sensor. First, a 1×2 multi-band lens array in the aperture stop of the optical system is designed. This array effectively captures both the visible and short-wave infrared bands simultaneously in a single image plane. In addition, the imaging position deviation of the center wavelength of both bands are controlled within one pixel, resulting in dual-band fusion imaging. To address the issue of different diffraction limits in multi-band imaging, we propose to use the joint optimization method to simultan-

收稿日期: 2023-06-07; **修订日期:** 2023-06-27
基金项目: 四川省自然科学基金(No. 2023NSFSC1308, No. 2023NSFSC0491); 四川省重点研发项目(No. 2022YFG0249); 中国科学院光电技术研究所前沿布点项目(No. C21K003)
Supported by Natural Science Foundation of Sichuan Province (No. 2023NSFSC1308, No. 2023NSFSC0491); Key Research and Development Project of Sichuan Province (No. 2022YFG0249); Cutting-edge Distribution Program of Institute of Optics and Electronics Chinese Academy Sciences (No. C21K003)

eously control the off-axis offset and aperture size of the split channel lens array. On the above basis, we suggest utilizing a dual electric diaphragm to control the switching speed of the three imaging channels. Finally, a three-band co-aperture optical system based on single sensor with a focal length of 30 mm and operating bands ranging from 480 to 900 nm, from 900 to 1 700 nm, and from 480 to 1 700 nm is designed. The system exhibits multiple advantages, such as excellent imaging quality, a compact structure, no moving optical elements, and a rapid switching speed of the imaging band, as indicated by the design and analysis results.
Key words: single sensor; lens array; multi-band imaging system; optical design

1　引　言

同单波段成像系统相比, 多波段成像系统兼具多个单波段光学系统的成像优势[1]。多波段成像系统可以从多个光谱维度去获取目标的特征信息, 因此具有更强的空间态势感知能力[2,3]。通常情况下, 多波段成像系统兼具穿云透雾、全天时工作、伪装目标侦察等独特优势[4], 使其在军事侦察、国防建设、航空测绘和无人驾驶等领域都得到了广泛的应用[5-9]。

随着科技的高速发展, 众多复杂应用场景都开始对多波段成像系统的高度集成设计提出了严苛的要求, 这迫使科研者们必须对多波段成像光学系统进行深入研究。Park 等人[10] 采用同轴两反结构并利用反射镜进行光路折叠的方法, 设计了一个紧凑型共口径双波段远距离倾斜摄影(Long Range Oblique Photography, LOROP)相机, 其工作波长为 0.7~0.9 μm 和 3.7~4.8 μm。Li 等人[11] 采用离轴两反共光路结构设计了一种由光学相机和合成孔径雷达组成的综合成像系统, 该系统可实现 400~900 nm 可见光和近红外波段以及 35 GHz 微波 Ka 波段双频成像。Ma 等人[12] 在两个波段共用前端反射结构、主镜背部加分色镜, 实现了可见光与长波红外同时成像, 并保证了系统结构的紧凑性。Zhang 等人[13] 采用 1×2 透镜阵列设计了一种基于单传感器的双通道成像光学系统, 但该系统中探测器的有效使用率较低。Han 等人[14] 采用同轴两反光学结构并结合次镜分光的方法, 设计了一个可见光与中波红外共口径的成像系统。综上可知, 多波段共口径成像系统仍然存在传感器数量多、体积大、功耗高等缺点, 因而难以满足高度集成化的应用场景需求。

针对以上问题, 本文提出了一种基于单传感器的三波段共口径成像光学系统。在光学系统中设计 1×2 离轴非对称透镜阵列, 把可见光波段和短波红外波段同时成像在一个像平面上, 为了解决双波段同时成像在一个传感器上产生的图像模糊问题, 在成像位置优化的同时把两个波段中心波长的成像位置偏差控制在一个像元内。为了验证本文提出的设计方法的可行性, 设计了一个焦距为 30 mm, 成像视场为 16°, 工作波段分别为 480~900 nm、900~1 700 nm 和 480~1 700 nm 的三波段共口径光学系统, 该光学系统的最大口径为 22 mm, 总长为 65 mm。此外, 该光学系统设计了两个电动光阑, 可实现三个波段的高速切换成像, 因此该三波段成像系统具有更强的复杂环境适应能力。例如, 无人机在高速侦察的过程中突遇团雾、烟尘等情况, 该系统可实现成像波段高速切换以增强空间态势感知能力。

2　基于单传感器的多波段光学系统设计原理

目前, 多波段成像光学系统的设计方法大致分为两种: 第一种是在成像光路中设计滤光片, 通过使用不同的滤光片来控制光学系统的成像波段; 第二种是采用分光的方式进行设计, 通过多个探测器去接收不同波段的成像图像[15]。为了解决多波段光学系统中成像波段切换速度慢, 传感器使用数量多而造成体积大的问题, 本文提出了一种基于单传感器的三波段共口径光学系统的设计方法。

基于单传感器的三波段共口径光学系统的成像原理如图 1 所示。从图 1 可知, 双通道光学系统采用 1×2 双波段透镜阵列进行分通道, 光学系统主要由前置透镜组、1×2 分通道透镜阵列和补

偿透镜组构成，双通道光学系统共用前置透镜组和补偿透镜组。为了避免两个光学通道的成像波段产生混叠，光学系统的光阑设计在分通道透镜的前表面处。中心视场的物点 B 经过前置透镜组准直后，在 1×2 分通道透镜处进行成像光线筛选，补偿透镜组再对通过透镜阵列后的光线进行汇聚和像差补偿，最后都成像在传感器感光面的中心点 B_1 处。与此同时，相同视场的成像光线在经过该光学系统后都汇聚在传感器感光面上的同一位置。

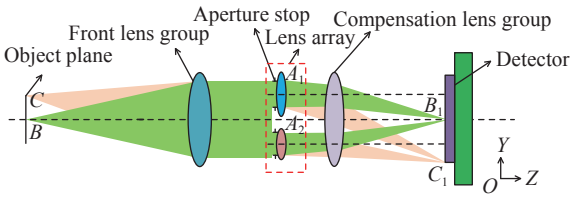


图 1 基于单传感器的三波段共口径光学系统的成像原理图

Fig. 1 Imaging principle diagram of a three-band co-aperture optical system based on single sensor

1×2 分通道透镜阵列由两个大小不同的小透镜 A_1 和 A_2 构成，其中小透镜 A_1 和 A_2 都沿着 Y 轴方向发生了离轴移动，并且两个小透镜的工作谱段不相同。分通道透镜的离轴导致单通道光学系统变成了非轴对称系统，分通道透镜在离轴化设计之后，光学系统的成像质量会发生恶化。因此，为了更好地校正离轴光学系统的像差，提高双通道光学系统的成像质量，在分通道透镜阵列后引入一个补偿透镜组，补偿透镜组对两个单通道光学系统的像差同时进行补偿。

衍射极限成像分辨率计算公式如式(1)所示：

$$\Delta h = \frac{1.22\lambda f}{D} = 1.22\lambda F \quad . \tag{1}$$

其中 F 表示光学系统的 F 数。由式(1)可知，当双通道光学系统的工作波长不同时，当光学系统的焦距 f 和通光口径 D 确定后，工作波长 λ 越长，光学系统的衍射极限分辨率就越低。因此，为了充分利用宽波段相机的成像分辨率，双通道光学系统的 F 数必须进行合理的分配。

为了充分利用宽波段相机的成像分辨率，当宽波段相机的像元尺寸为 L，光学系统的中心工作波长为 λ 时，可根据方程(2)获得该成像通道的 F 数。

$$F = \frac{L}{1.22\lambda} \quad . \tag{2}$$

双通道光学系统的焦距相等，同时又共用一个传感器，因此双通道光学系统的成像视场为：

$$\begin{cases} \theta_x = 2\arctan\left(\dfrac{W}{2f}\right) \\ \theta_y = 2\arctan\left(\dfrac{L}{2f}\right) \end{cases} , \tag{3}$$

其中，W 和 L 分别表示传感器感光面的宽和长。

为了确保 1×2 分通道透镜之间不发生干涉，分通道透镜 A_1 和 A_2 将沿 Y 轴方向发生平移，平移距离应满足如下关系：

$$\begin{cases} l_{A_1} = p \times \dfrac{D_1}{2} \\ l_{A_2} = q \times \dfrac{D_2}{2} \end{cases} , \tag{4}$$

其中，D_1 和 D_2 分别表示两个光学通道的通光孔径，p 和 q 分别表示两个光学通道的位移权重系数，并且必须满足方程(5)，

$$\begin{cases} p > 1 \\ q > 1 \end{cases} . \tag{5}$$

在基于单传感器的三波段共口径光学系统设计过程中，需先按照大口径同轴光学系统进行设计，完成同轴光学系统的设计后，把分通道透镜沿 Y 轴移动，移动距离满足方程(4)，并把光阑设计在分通道透镜的前表面上，然后再进行二次优化以实现双通道成像质量提升。在进行离轴设计后，光学系统的残余像差会比较大。为了更好地校正离轴光学系统的像差以提高成像质量，在 1×2 分通道透镜阵列后再加入一个共同的补偿透镜组，补偿透镜组对两个单通道光学系统的像差同时进行补偿。此外，三波段光学系统属于宽波段成像系统，当三个波段都成像于同一个像平面上时，需要对多波段的位置色差进行校正，因此需要满足以下条件[8]：

$$\begin{cases} \Delta f_{1b} = \left(\dfrac{1}{h_1\varphi}\right)^2 \sum\limits_{i=1}^{k}\left(h_i^2 C_{1i}\varphi_i\right) = 0 \\ \Delta f_{2b} = \left(\dfrac{1}{h_1\varphi}\right)^2 \sum\limits_{i=1}^{k}\left(h_i^2 C_{2i}\varphi_i\right) = 0 \end{cases} , \tag{6}$$

其中，φ 和 φ_i 分别表示光学系统的光焦度和第 i 个透镜的光焦度，h_i 表示轴上视场在第 i 个透镜上的

入射高度, C_{1i}和C_{2i}分别表示第 i 个透镜在波段 1 和波段 2 的归化色差系数, Δf_{1b} 和 Δf_{2b} 分别表示工作波段范围内最短波长和最长波长与中心波长的后焦距差值。根据方程(6)可知, 位置色差与光学系统内光焦度的分配、归化色差系数和光线入射高度相关, 与透镜的具体形状无关。

综上所述, 基于单传感器的三波段共口径光学系统的详细设计流程如图 2 所示。

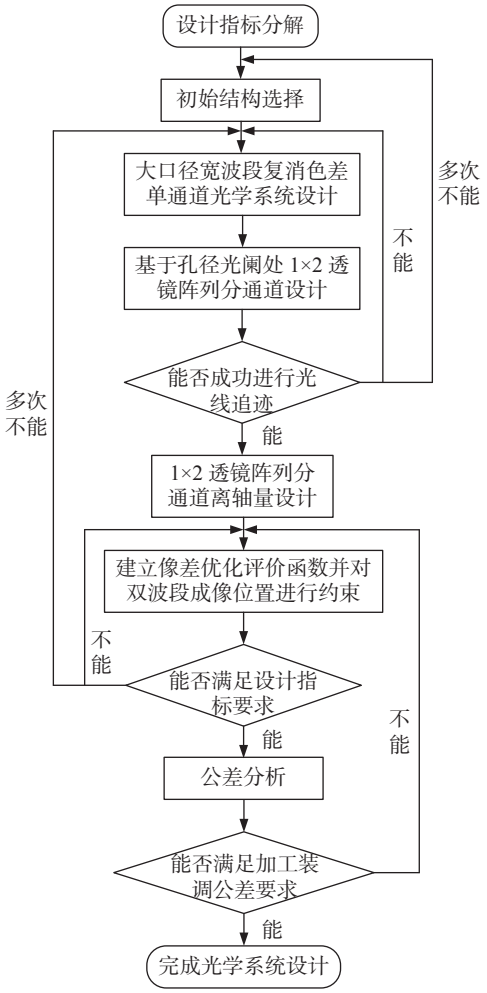


图 2　三波段共口径光学系统设计流程图

Fig. 2　Design flow chart of a three-band co-aperture optical system

3　三波段共口径光学系统设计

3.1　设计要求

本文选用 Camera Link InGaAs 工业相机, 其工作光谱范围为 400~1 700 nm, 相机的分辨率为 1280 pixel×1024 pixel, 像元尺寸大小为 5 μm×5 μm(奈奎斯特频率为 100 lp/mm), 帧频为 120 frame/s。基于单传感器的三波段共口径成像光学系统的成像波段有三种模式, 即 480~900 nm、900~1 700 nm 和 480~1 700 nm。为了充分利用宽光谱相机的分辨率, 通过方程(2)可计算出 480~900 nm 波段的 F 数约为 3.1, 480~900 nm 波段的 F 数约为 6.2, 因此本文把 F 数分别设计为 3.0 和 5.0, 并要求在奈奎斯特频率 100 lp/mm 处的调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)不小于 0.2。基于单传感器的三波段共口径成像光学系统的设计指标如表 1 所示。

表 1　三波段光学系统的设计指标要求

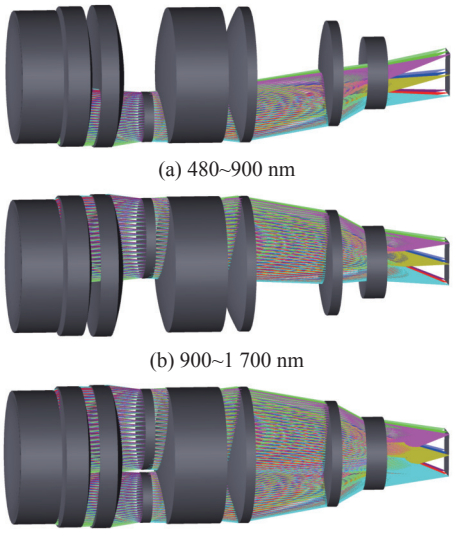
Tab. 1　Design specifications of the three-band optical system

参 数	数 值
焦距/mm	30
工作谱段1/nm	480~900
工作谱段2/nm	900~1 700
工作谱段3/nm	480~1 700
F数 (480~900 nm)	5.0
F数 (900~1 700 nm)	3.0
视场2ω/(°)	16
畸变/%	≤0.8
MTF(@100 lp/mm)	≥0.20

3.2　光学系统设计

采用本文提出的基于单传感器的三波段共口径成像光学系统的设计方法进行光学系统设计。根据表 1 的设计指标要求, 按照图 2 的设计流程进行光学系统设计。选择好光学系统的初始结构后, 先对相同指标的大口径同轴光学系统进行设计, 然后再把光阑和分光透镜一起沿 Y 轴方向移动, 对同轴光学系统进行双通道设计。在双通道设计的过程中需要保证分幅透镜之间留有足够的机械安装空间。经过双通道离轴化设计的非轴对称光学系统的残余像差比较大, 再根据本文提出的离轴像差校正方法, 在分幅透镜后设计补偿透镜组以提高系统的成像质量, 最终设计出的基于单传感器的三波段共口径成像光学系统的三维结构如图 3 所示。1×2 透镜阵列的光学表面均为球面, 两个分通道小透镜的工作谱段分别为 480~900 nm 和 900~1 700 nm, 1×2 透镜阵列后的第一

块透镜为双胶合透镜，光学系统的最大口径为 22 mm，总长为 65 mm。



(a) 480~900 nm

(b) 900~1 700 nm

(c) 480~1 700 nm

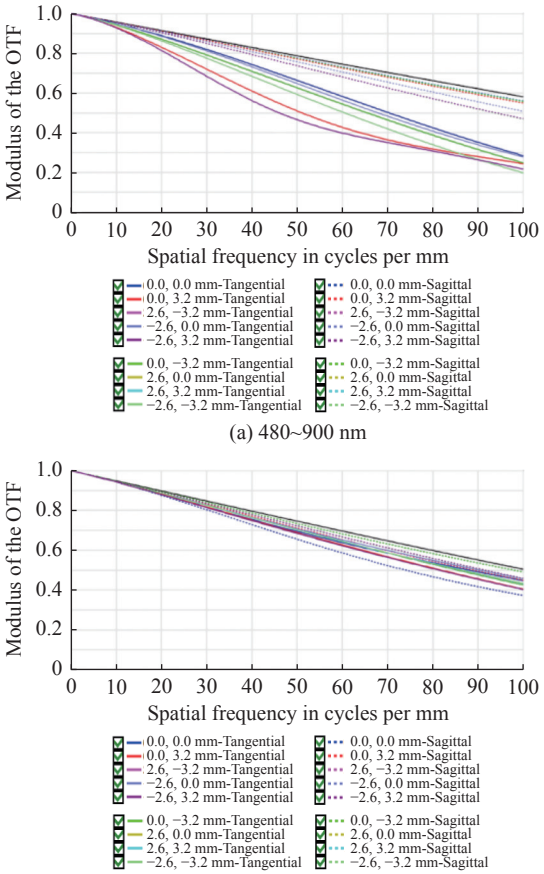
图 3　三波段共口径成像光学系统

Fig. 3　Three-band co-aperture optical system

图 3 中的三波段共口径成像光学系统采用了两个工作波段，并采用口径和大小都不相同的单透镜来进行分光。两个成像通道的光阑都分别位于分幅透镜的前表面上，在分幅透镜前后分别设计两个电动光阑（在闭合的电动光阑上进行开孔）。两个电动光阑闭合后分别能够保证一个光学通道的成像光线通过。因此，当两个电动光阑交替闭合时，即可实现双波段切换成像；当两个电动光阑都处于非闭合状态时，即可实现双波段融合成像。此外，市面上研发的电动光阑的开关时间在毫秒量级，因此，同传统的滤光片轮多波段成像方式相比，本文提出的多波段成像系统具有极高的成像波段切换速度。

3.3　像质评价

光学系统的成像质量评价主要采用调制传递函数、点列图和畸变[16]。调制传递函数可以全面地反映出光学系统的整体成像质量，通常情况下，光学系统的 MTF 越高，其成像质量就越好。图 4（彩图见期刊电子版）为基于单传感器的三波段共口径成像光学系统的 MTF 曲线图。由图 4(a)可知，当成像波段为 480~900 nm 时，全视场在 100 lp/mm 处的调制传递函数都大于 0.2。由图 4(b)可知，当成像波段为 900~1 700 nm 时，全视场在 100 lp/mm 处的调制传递函数都大于 0.37。综上所述，当成像波段为 480~1 700 nm 时，该光学系统具有较好的成像质量。



(a) 480~900 nm

(b) 900~1 700 nm

图 4　调制传递函数曲线图

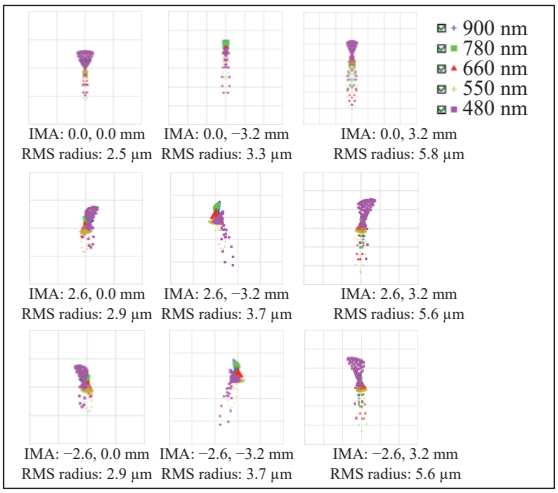
Fig. 4　Modulation transfer function curves

基于单传感器的三波段共口径成像光学系统的点列图如图 5（彩图见期刊电子版）所示。由图 5(a)可知，当成像波段为 480~900 nm 时，除边缘视场外，成像点的弥散斑均方根半径都小于探测器像元的大小。由图 5(b)可知，当成像波段为 900~1 700 nm 时，全视场成像点的弥散斑均方根半径都小于探测器像元的大小。

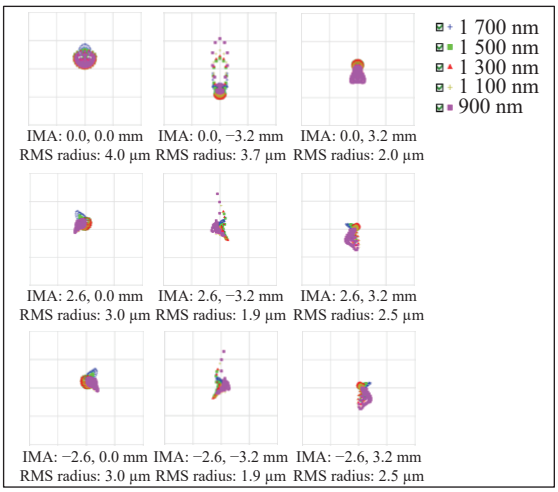
基于单传感器的三波段共口径成像光学系统的畸变曲线如图 6（彩图见期刊电子版）所示。由图 6 可知，当成像波段分别为 480~900 nm 和 900~1 700 nm 时，全视场的最大畸变都小于 0.65%。

当工作波段为 480~1 700 nm 时，480~900 nm 和 900~1 700 nm 波段的成像位置偏差应小于一个像素，才能避免 480~900 nm 波段的成像图像与 900~1 700 nm 波段的成像图像非重叠造成的色差偏移现象，从而避免产生成像模糊的问题。因此，必须考虑双波段中心波长（660 nm、1 300 nm）

在全视场内的成像位置偏差, 如图 7 所示。由图 7 可知, 在全视场范围内, 1 300 nm 波长的成像位置与 660 nm 波长成像位置的最大偏差为 3.54 μm, 小于探测器像元尺寸大小 5 μm, 因此 480~1 700 nm 波段能够进行高清成像。



(a) 480~900 nm



(b) 900~1700 nm

图 5　光学系统的点列图

Fig. 5　Spot diagram of the optical system

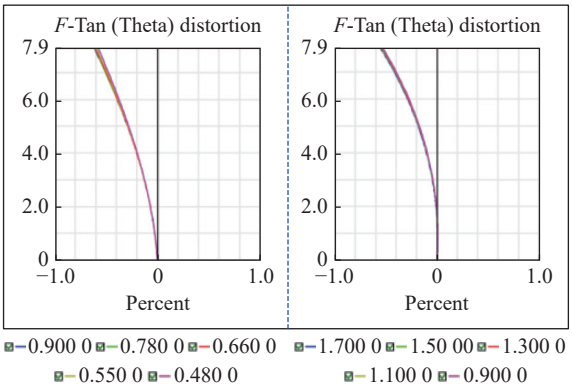


图 6　畸变曲线图

Fig. 6　Diagram of distortion curves

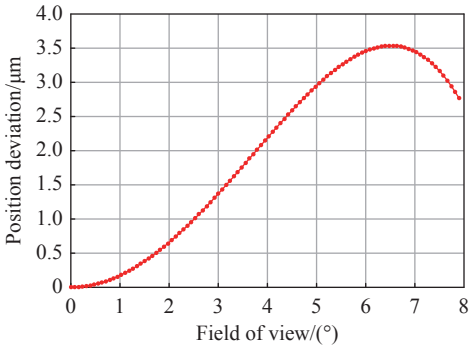


图 7　1 300 nm 与 660 nm 的成像位置偏差图

Fig. 7　Deviation of imaging position at 1 300 nm and 660 nm

3.4　公差分析

公差分析是三波段共口径成像镜头加工装配前的重要分析环节之一, 也是决定光学系统设计成败的关键环节。利用光学设计软件 Zemax 中的 MTF 公差分析功能[17], 可以快速地评估出基于单传感器的三波段共口径成像光学镜头的制造难度。通过公差灵敏度分析后, 给出了三波段光学成像系统的公差分配情况, 如表 2 所示。

表 2　光学系统公差分配表

Tab. 2　Tolerance distribution of optical system

公差项	数值
光圈/fringe	≤2
元件厚度/mm	±0.02
表面偏心/mm	±0.01
元件倾斜/(°)	±0.01
元件偏心/mm	±0.01
表面不规则度/fringe	≤0.2
折射率	±0.001
阿贝数/%	±0.3

经过蒙特卡洛分析可知, 基于单传感器的三波段共口径成像光学系统全视场的平均 MTF 分布规律如图 8 所示。根据图 8 可知, 在蒙特卡洛模拟中, 80% 的系统在 100 lp/mm 处的平均 MTF 大于 0.29。

三波段共口径光学系统的敏感公差对 MTF 的影响情况如表 3 所示(物方第 1 块透镜为透镜 1)。从表 3 可知, 光学系统中最敏感的公差对 MTF 的影响小于 0.05, 由此可知表 2 所分配的公差比较合理。

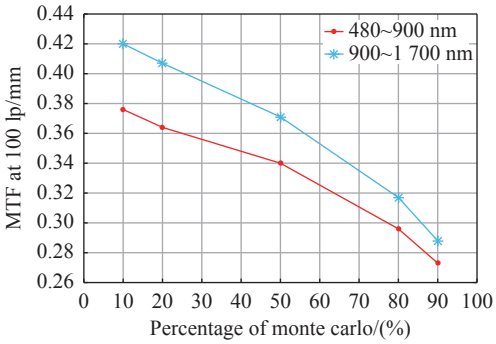


图 8 蒙特卡洛分析概率图

Fig. 8 Probability graph of Monte Carlo analysis

表 3 光学系统的敏感公差

Tab. 3 Sensitivity tolerances of optical system

480~900 nm		900~1 700 nm	
敏感公差项	MTF变化	敏感公差项	MTF变化
透镜6阿贝数	−0.043	透镜6折射率	−0.047
透镜5折射率	−0.043	透镜5折射率	−0.046
透镜6折射率	−0.035	透镜2偏心	−0.046
透镜1与2间隔	−0.031	透镜1与2间隔	−0.046
透镜9与10间隔	−0.030	透镜1偏心	−0.039
透镜1厚度	−0.027	透镜1厚度	−0.038
透镜2阿贝数	−0.026	透镜2表面偏心	−0.037

4 结 论

传统的多波段共口径成像系统一般都是利用多个具有不同响应谱段的传感器去进行成像，采用这种方法设计的成像系统通常具有体积大和功耗高等缺点。针对该问题，本文提出了一种基于单传感器的三波段共口径成像光学系统。通过采用 1×2 双波段透镜阵列把 480~900 nm 和 900~1 700 nm 波段的光成像在同一个传感器上，并对 1×2 双波段透镜阵列的离轴偏移量和通光口径大小进行联合优化设计，以提高短波红外光学系统的成像分辨率。当双波段同时进行成像时，便获得可见光与短波红外光的融合图像。本文设计了一个焦距为 30 mm，成像视场为 16°，工作波段分别为 480~900 nm、900~1 700 nm 和 480~1 700 nm 的三波段共口径光学系统，光学系统的最大口径为 22 mm，总长为 65 mm。该成像系统在无人机光电吊舱、边防预警和飞行器导航等方面具有广阔的应用前景。

参考文献：

[1] 李西杰, 刘钧, 陈阳. 双波段大变倍比连续共变焦光学系统设计[J]. 光子学报, 2016, 45(10): 1022003.
LI X J, LIU J, CHEN Y. Design of dual-band, high zoom ratio and continuous co-focal optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(10): 1022003. (in Chinese).

[2] 刘凯, 陈荣利, 常凌颖, 等. 共口径双通道红外扫描成像光学系统[J]. 应用光学, 2012, 33(2): 395-401.
LIU K, CHEN R L, CHANG L Y, *et al*.. Common-aperture dual-channel infrared scanning imaging optical system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(2): 395-401. (in Chinese).

[3] 吴洪波, 张新, 王灵杰, 等. 单光子激光与中波红外共口径探测光学系统[J]. 光学 精密工程, 2021, 29(6): 1260-1269.
WU H B, ZHANG X, WANG L J, *et al*.. Common aperture optical system of single photon laser and medium wave infrared[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(6): 1260-1269. (in Chinese).

[4] 郭钰琳, 于洵, 蔡珂珺, 等. 可见光/中波红外双波段共口径光学系统设计[J]. 红外技术, 2018, 40(2): 125-132.
GUO Y L, YU X, CAI K J, *et al*.. Optical design of TV/IR dual-band common-aperture system[J]. *Infrared Technology*, 2018, 40(2): 125-132. (in Chinese).

[5] 虞红, 费锦东, 张盈, 等. 共口径多波段复合场景仿真技术[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1629-1633.
YU H, FEI J D, ZHANG Y, *et al*.. Common aperture combination simulation technology for multi-spectral scene[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(9): 1629-1633. (in Chinese).

[6] SMEESTERS L, BELAY G Y, OTTEVAERE H, *et al*.. Two-channel multiresolution refocusing imaging system using a tunable liquid lens[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(18): 4002-4010.

[7] 程志峰, 刘福贺, 荀显超. 双波段共口径成像系统光机设计与分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(11): 3366-3372.
CHENG ZH F, LIU F H, XUN X CH. Opto-mechanical design and analysis of dual-band sharing aperture imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3366-3372. (in Chinese).

[8] 岳宝毅, 刘钧, 郭佳, 等. 折/衍共口径红外双波段位标指示器光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(4): 418003.

YUE B Y, LIU J, GUO J, *et al*.. Optical system design of folded/diffractive co-aperture infrared dual-band beam positioner[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(4): 418003. (in Chinese).

[9] 陈晓阳, 高明. 机载双波段共口径光电瞄准光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(5): 20200322.
CHEN X Y, GAO M. Design of airborne dual-band common aperture photoelectric aiming optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(5): 20200322. (in Chinese).

[10] PARK K W, HAN J Y, BAE J, *et al*.. Novel compact dual-band LOROP camera with telecentricity[J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 10921-10932.

[11] LI R CH, FENG L J, XU K J, *et al*.. Optical design of an integrated imaging system of optical camera and synthetic aperture radar[J]. *Optics Express*, 2021, 29(22): 36796-36812.

[12] 马占鹏, 薛要克, 沈阳, 等. 可见/红外双色共孔径光学系统设计及实现[J]. 光子学报, 2021, 50(5): 24-32.
MA ZH P, XUE Y K, SHEN Y, *et al*.. Design and realization of visible/LWIR dual-color common aperture optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(5): 24-32. (in Chinese).

[13] ZHANG K, QU ZH, ZHONG X, *et al*.. Design of binocular stereo vision optical system based on a single lens and a single sensor[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(23): 6690-6696.

[14] 韩培仙, 任戈, 刘永, 等. 可见/中波双波段共口径光学系统设计[J]. 应用光学, 2020, 41(3): 435-440.
HAN P X, REN G, LIU Y, *et al*.. Optical design of VIS/MWIR dual-band common-aperture system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(3): 435-440. (in Chinese).

[15] YU J, SHEN ZH X, WANG ZH SH. Compact dual band/dual FOV infrared imaging system with freeform prism[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(4): 829-832.

[16] BELAY G Y, OTTEVAERE H, MEURET Y, *et al*.. Demonstration of a multichannel, multiresolution imaging system[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(24): 6081-6089.

[17] ZHANG K, LI J CH, SUN S, *et al*.. Optical system design of double-sided telecentric microscope with high numerical aperture and long working distance[J]. *Optics Express*, 2023, 31(14): 23518-23532.

作者简介：

张　坤(1993—), 男, 四川成都人, 博士, 助理研究员, 2016 年于西华大学获得学士学位, 2021 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得工学博士学位, 现为中国科学院光电技术研究所助理研究员, 主要从事光学遥感成像系统设计方面的研究。E-mail: zhangkciomp@163.com

孙　思(1996—), 女, 四川西充人, 硕士, 助理工程师, 2018 年、2021 年于西南交通大学分别获得学士、硕士学位, 现为中国科学院光电技术研究所助理工程师, 主要从事复杂环境光电技术研究。E-mail: sunsi@ioe.ac.cn