中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

基于阵列光学的快速多维度成像制导光学系统设计

史浩东 卢琦 赵义武 王稼禹 赵晓 李英超 付强

Design of a fast multi-dimensional imaging guidance optical system based on array optics

SHI Hao-dong, LU Qi, ZHAO Yi-wu, WANG Jia-yu, ZHAO Xiao, LI Ying-chao, FU Qiang

引用本文:
史浩东, 卢琦, 赵义武, 王稼禹, 赵晓, 李英超, 付强. 基于阵列光学的快速多维度成像制导光学系统设计[J]. 中国光学, 2024, 17(6): 1418-1430. doi: 10.37188/CO.2023-0206
SHI Hao-dong, LU Qi, ZHAO Yi-wu, WANG Jia-yu, ZHAO Xiao, LI Ying-chao, FU Qiang. Design of a fast multi-dimensional imaging guidance optical system based on array optics[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(6): 1418-1430. doi: 10.37188/CO.2023-0206

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2023-0206

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

微透镜阵列衍射效应对夏克—哈特曼波前探测器的影响分析

Analysis of influence of diffraction effect of microlens array on Shack-Hartmann wavefront sensor

中国光学（中英文）. 2023, 16(1): 94 https://doi.org/10.37188/CO.2022-0176

压缩光谱成像系统中物理实现架构研究综述

Review of physical implementation architecture in compressive spectral imaging system

中国光学（中英文）. 2022, 15(5): 929 https://doi.org/10.37188/CO.2022-0104

手机嵌入式快照成像光谱仪的研制

Snapshot imaging spectrometer for mobile phone

中国光学（中英文）. 2022, 15(4): 770 https://doi.org/10.37188/CO.2021-0209

天基平台宽谱段成像光学系统设计

Optical design of visual and infrared imaging system based on space-based platform

中国光学（中英文）. 2021, 14(6): 1495 https://doi.org/10.37188/CO.2019-0255

分孔径紫外多波段成像光学系统设计

Aperture-divided ultraviolet multiband imaging optical system

中国光学（中英文）. 2021, 14(6): 1476 https://doi.org/10.37188/CO.2021-0052

面向偏振成像的超构表面研究进展

Recent advances in metasurfaces for polarization imaging

中国光学（中英文）. 2023, 16(5): 973 https://doi.org/10.37188/CO.2022-0234

文章编号　2097-1842(2024)06-1418-13

基于阵列光学的快速多维度成像制导光学系统设计

史浩东[1*], 卢　琦[1,2], 赵义武[1], 王稼禹[1,2], 赵　晓[3], 李英超[1], 付　强[1]
（1. 长春理工大学 吉林省空间光电技术重点实验室, 吉林 长春 130022;
2. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;
3. 东北工业集团有限公司, 吉林 长春 130103）

摘要: 针对传统偏振光谱成像方法难以适用于弹载平台的难题, 本文提出了一种基于阵列光学的快速多维度成像制导光学方案。构建了通道分辨率与望远放大倍率的关联模型, 实现了微透镜阵列、光谱滤光阵列和微纳偏振阵列探测器参数的精准匹配和高效利用。基于常规导引头和工业偏振探测器, 设计了包含球形整流罩的多维度成像制导光学系统。系统采用 4×4 光场分割布局, 在可见光波段内形成 16 个光谱通道, 光谱分辨率为 16 nm, 实现了单光路、单探测器条件下同时高效获取 0°、45°、90°、135° 4 个偏振方向偏振光谱图像数据。系统整体焦距为 150 mm, 筒长为 145 mm。仿真结果表明, 系统 16 个通道下全视场调制传递函数在奈奎斯特频率处均接近衍射极限, 成像质量良好, 满足弹载目标多维度探测与识别需求。

关　键　词: 亚像素成像系统; 微透镜阵列; 偏振光谱成像; 孔径分割
中图分类号: O435.1;O435.2;O436.3　**文献标志码:** A　**doi:** 10.37188/CO.2023-0206　**CSTR:** 32171.14.CO.2023-0206

Design of a fast multi-dimensional imaging guidance optical system based on array optics

SHI Hao-dong[1*], LU Qi[1,2], ZHAO Yi-wu[1], WANG Jia-yu[1,2], ZHAO Xiao[3], LI Ying-chao[1], FU Qiang[1]
(1. *Jilin Provincial Key Laboratory of Space Optoelectronics Technology*, *Changchun University of Science and Technology*, *Changchun* 130022, *China*;
2. *School of Opto-Electronic Engineering*, *Changchun University of Science and Technology*, *Changchun* 130022, *China*;
3. *Northeast Industries Group Co.*, *Ltd. Changchun* 130103, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *shihaodong*08@163.*com*

Abstract: To address the bottleneck that makes the conventional polarization spectral imaging method difficult to apply to the ballistic platform, a fast multi-dimensional imaging guidance optical system based on array optics is proposed. The correlation model between channel resolution and telescopic magnification is constructed. The precise matching and efficient utilization of the parameters of the microlens array, spectral filter array, and micro-nano-polarization array detector are realized. Based on the conventional guidance head

收稿日期: 2023-11-14; **修订日期:** 2023-12-11
基金项目: 吉林省教育厅科学技术研究项目(No. JJKH20230813KJ)
Supported by Jilin Provincial Department of Education Science and Technology Research Project (No. JJKH20230813KJ)

and commercial polarization detector, a multi-dimensional imaging guidance optical system with spherical dome is designed. The system adopts a 4×4 optical field segmentation layout, forming 16 spectral channels through the visible light band with a spectral resolution of 16 nm. A polarization spectral data cube in four polarization directions, such as 0°, 45°, 90°, and 135° is acquired efficiently under the conditions of a single optical path and a single detector. The system has an effective focal length of 150 mm and a structure length of 145 mm. Simulation results show that the full-field modulation transfer function of the system is close to the diffraction limit at the Nyquist frequency for 16 channels. The imaging quality meets the requirements of bullet-loaded target multi-dimensional detection and identification.

Key words: subpixel imaging system; microlens array; polarization spectral imaging; division of aperture

1　引　言

现代化新型武器系统的主要任务是对目标进行精准打击, 而导引头的制导方式决定了制导武器的制导精度。光学制导是重要的制导手段, 具有重要的研究意义[1]。现有光学制导方式还是以单模制导为主, 如红外制导、激光制导等。然而, 受烟尘、雾霾、耀斑、伪装等复杂战场环境的影响, 单模光学制导方式虚警率高、跟踪识别率低, 严重影响制导武器作战效能的发挥[2-3]。多模制导技术如红外/激光、多光谱/偏振等, 克服了单一制导的不足, 将成为光学制导的主要发展方向。多维度成像技术同时获取目标光谱和偏振等特殊光学维度信息, 充分利用目标和背景在不同波段下的偏振特性差异, 可以显著提升复杂环境下的目标对比度和识别精度, 在制导领域具有非常大的应用价值和潜力[4]。

光学导引头方面, 国外目前已经出现了多光谱导引头, 如美国地基拦截弹 GBI、以色列箭-3 等。目前国内也已经出现将偏振多光谱探测技术应用于制导平台的想法[5], 而适用于制导平台的偏振光谱成像方法与光学系统设计还有待研究。近年来, 国内外先后提出了多种能够同时获取偏振光谱信息的成像方法[6-10]。2022 年, Sattar 等利用两台分辨率均为 2448×2048 的 RGB 彩色偏振相机同时获取目标 6 个光谱通道的偏振信息。值得注意的是其在两相机物镜前端各放置了一片滤光片。这种方法通过将 RGB 相机与滤光片工作波段进行叠加从而扩展了系统的光谱通道数。缺点是使用两个探测器的共口径系统光路复杂, 并且 RGB 相机的光谱分辨率较低[11]。同年, El-Habashi 在四台分辨率为 4872×3248 相机前分别放置了 0°、45°、90°、135°的线偏振器并将 4 片滤光片以转轮的形式设置在线偏振器前, 通过转动滤光片转轮使其与线偏振器同轴, 从而获取目标的高分辨率偏振光谱信息。但是该方法光学系统体积庞大, 且利用滤光片转轮等运动部件会降低光学系统的稳定性[12]。2022 年, LV X B 等提出了一种基于微透镜的多通道成像光谱仪系统设计方法, 利用微透镜阵列进行通道划分, 在微透镜阵列之后放置两个高阶双折射晶体延迟器, 延迟器的快轴相对 y 轴取向分别为 45°与 90°, 其后端放置两片 45°线偏振器, 并在线偏振器中间放置两个诺马斯基棱镜和一个半波片。整个系统通过棱镜的双折射与干涉方式获取目标的偏振光谱信息。但通过这种方法得到的偏振光谱信息需要繁琐的解算过程[13]。2022 年, CHEN Z Y 等通过可旋转延迟器与可旋转偏振器将目标信息调制成 3D 数据立方体, 之后通过物镜聚焦在数字微镜 DMD 上并控制每个微镜的状态, 从而对目标信息进行空间调制。将带通滤波器与双阿米西棱镜放置在数字微镜之后用于限制分散的光谱信息。最后在 CCD 上获取目标的偏振光谱信息。这种方法存在运动部件, 获取目标信息效率较低, 不适合高速运动的制导平台[14]。2023 年, 王稼禹等提出了一种快照式偏振光谱成像方法。他们利用数字微镜 DMD 对目标信息进行编码, 经棱镜-光栅-棱镜产生色散, 最后在偏振探测器上获得光谱偏振数据立方体。这种方式提高了光学系统的工作效率, 但系统光路比较复杂[15]。

综上所述, 现有偏振光谱多维度成像方法存在系统光路庞杂、获取信息效率低、解算过程繁琐等问题, 难以适用于空间和计算资源极其有限

的成像制导系统。

因此，本文提出一种基于阵列光学的快速多维度光学成像制导方法。该方法将微透镜阵列、光谱滤光阵列和微纳偏振阵列进行精确匹配，避免了繁杂的信息解算过程，同时能够在有限的制导平台内快速获取目标的多维度光学信息。此外，还可以随时更改光谱滤光阵列的参数指标，从而实现光谱的自主选择性。通过构建多阵列器件通道的关联模型，通过有针对性地进行器件选型和系统优化设计，有望实现单光路、单探测器偏振光谱多维信息高精度配准和高时效获取。建立了多通道全视场成像评估方法，对设计结果进行全面评价。

2 设计思路与原理

2.1 光学系统构架搭建

针对光学制导在高速运动状态下的实时多维度成像需求，提出基于整流罩、望远单元、准直镜组、微透镜阵列、光谱滤光阵列和微纳偏振阵列探测器等串联的多维度快速成像制导光学系统架构。其中：整流罩为球型整流罩，以保证弹头气动布局；望远单元采用卡式系统，将大口径光束按比例压缩，可在获取尽量多目标信息的同时缩小系统筒长；准直镜组将望远单元出射的光束做进一步准直，以确保入射到微透镜阵列的光线角度一致，从而有效控制轴外像差；微透镜阵列由 16 个完全一致的微小透镜规则排列而成，利用其多重成像的特点实现对目标光束的口径分割；给光谱滤光阵列每个子单元镀不同谱段的滤光膜，与透镜阵列平行放置，对经微透镜阵列分割的子口径光束分别进行滤光，从而实现光谱通道分离，这不仅避免了后期繁琐的光谱解算与重构，并且可以根据需求定制光谱通道数和光谱分辨率；最后，将多个通道的光束分别聚焦到集成微纳偏振阵列的偏振探测器靶面对应区域上，对目标 4 个角度的线偏振信息进行同时快速采集，从而实现偏振光谱图像同时刻、同视场、同探测器快速获取。光学系统总体架构如图 1 所示。

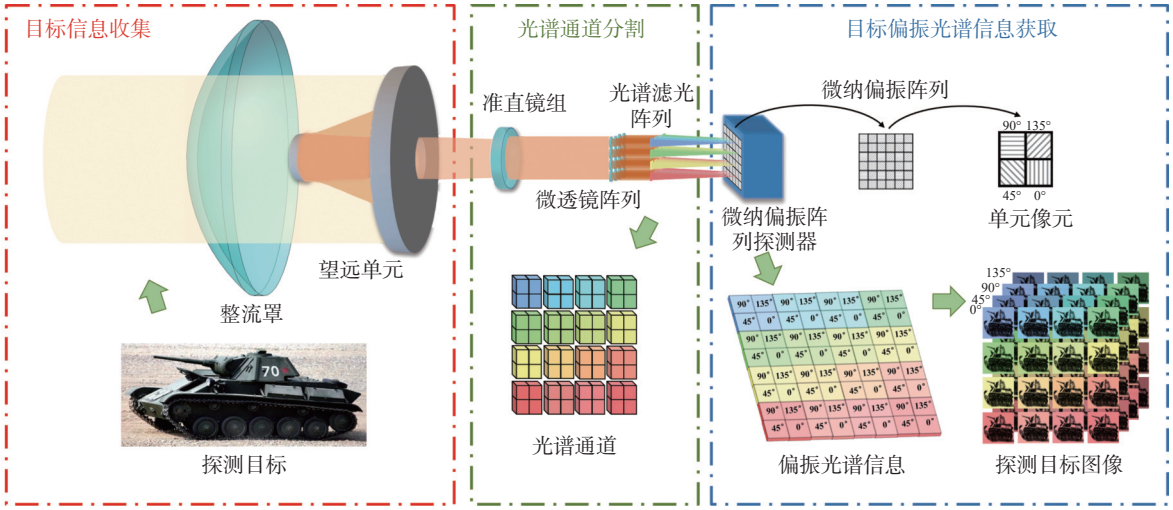


图 1 本文所提多维度快速成像制导光学系统组成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the proposed fast multi-dimensional imaging guidance optical system

相比于传统偏振光谱多维度成像，该系统具有结构紧凑、内部无需运动部件，且系统可靠性和稳定性较高等优点。该系统仅利用单个探测器获取目标的多维度信息，有效避免了多维信息解混叠，能够高效获取目标物的多维度信息。与光场成像原理不同，该系统中的微透镜阵列用于孔径分割，各个子孔径单独成像，同一物点经过不同子孔径的像点时都有对应坐标关系，不存在光场成像中的视差。系统中光谱滤光阵列可以根据使用场景，制定不同的光谱滤光方案。由此可知，该光学系统方案更加适合体积、重量、功耗要求苛刻的高速运动弹载平台。

2.2 核心器件工作原理

系统中的核心器件包括微透镜阵列、光谱滤光阵列、微纳偏振阵列探测器等 3 部分组成的阵列组。微纳偏振阵列探测器的靶面大小限制了微透镜阵列的尺寸与排布方式，而微透镜阵列的排布方式又决定了光谱滤光阵列的排布方式和前端入

射光的口径。需要注意的是, 由于系统采用的是光谱分通道成像方式, 因此, 为了避免不同光谱通道间的成像混叠以及边缘通道缺失等问题, 需要采用远心光路设计。另外, 每个光谱通道的通道成像分辨率需与望远单元的放大倍率进行匹配: 放大倍率过大会导致入射光无法覆盖整个微透镜阵列, 从而出现通道缺失的问题; 放大倍率过小又会导致入射光能量利用率低, 因此, 需要通过分析光在阵列组里的传输方式以及边界条件, 得出光学系统中各个核心器件的参数。

2.2.1　微透镜阵列建模

微透镜阵列作为串联前端望远单元与后端微纳偏振阵列探测器的关键元件, 决定了望远单元的放大倍率与通道成像像元数, 故需要对其进行建模分析并得出具体设计指标。为保证各个光谱通道分辨率满足成像要求, 要建立微透镜阵列通道的分辨率与望远单元放大倍率的关联模型。首先, 分析微透镜阵列的物像关系与坐标变化方式, 再根据微纳偏振阵列探测器成像区域的边界条件计算出微透镜阵列具体的排布方式, 从而实现放大倍率与通道成像分辨率的匹配。

光轴平行型微透镜阵列中的各个单元透镜的光轴彼此平行, 可以通过坐标变换的方式来描述微透镜阵列的光学性质[16]。设光学元件阵列系统光轴为 z 轴, 选取 z 轴为微透镜阵列的中心轴和光学系统的坐标轴。单元透镜 i 的光轴为z_i, 以光轴z_i建立单元透镜 i 自身的坐标系, 并确定该单元透镜 i 在空间中的坐标位置。取x, y和x', y'分别为光学系统物面与像面上的坐标, x_i, y_i和x_i', y_i'分别为单元透镜 i 坐标系中物面与像面的坐标。图 2 为光学系统符号图示。

将单透镜的物像关系与坐标变换相结合可以表示出阵列系统单元透镜 i 在像面上的成像情况。经坐标变换后, 单透镜 i 用透镜阵列系统坐标系表示, 单元透镜 i 经过坐标变换后的物面坐标与像面坐标如下:

$$\begin{aligned} x_i &= x_{i0} - x \\ y_i &= y_{i0} - y \\ x_i' &= x_{i0} - x' \\ y_i' &= y_{i0} - y' \quad , \end{aligned} \tag{1}$$

式中, x_{i0}和y_{i0}分别是单元透镜 i 的透镜第一和第二面中心在透镜阵列系统坐标系中的坐标。由式 (1) 可知, 对同一个物点来说, 经过由 I 个透镜组成的微透镜阵列成像, 在像面上就有 I 个像点, 且微透镜阵列每个子单元的成像特性一致, 那么, 利用微透镜阵列多重成像的特性就可以实现单个探测器接收多幅目标图像的目的[17]。

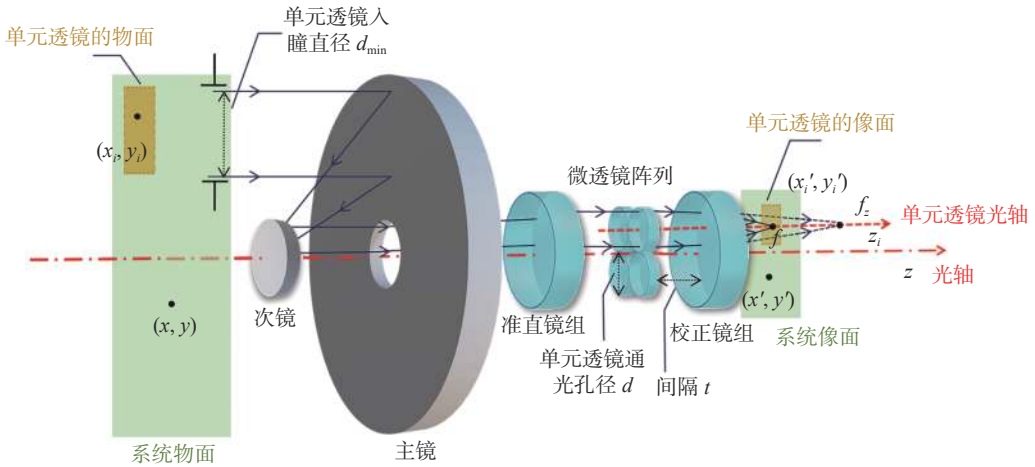


图 2　光学系统符号示意图

Fig. 2　Symbolic diagram of the optical system

微透镜阵列上每个子单元的通光孔径尺寸决定了望远单元的放大倍率与微纳偏振阵列探测器的区域划分, 因此只需分析微透镜阵列子单元通光孔径的尺寸与望远单元放大倍率的关系即可得出光学系统的主要设计参数。根据成像距离与成像分辨率的关系可以得出系统的焦距 f, 再根据探测器分辨率与光学系统分辨率的匹配关系可以推导出光学系统的 F 数。由 F 数可计算得出微透镜阵列单元透镜入瞳直径d_{min}, 其表达式如式 (2) 所示:

$$d_{\min} = \frac{f}{F} \quad , \tag{2}$$

式中，$d_{\min}$是微透镜阵列单元透镜通光孔径d经过前端望远单元放大后的孔径，d 与探测器成像区域的像元数有关，其关系式如式 (3) 所示：

$$d = mn \quad , \tag{3}$$

式中，m为微纳偏振阵列探测器的像元尺寸，n为对应微透镜阵列子单元通光孔径成像区域内的像元数。根据式 (3) 可以得出望远单元放大倍率与微纳偏振阵列探测器单一探测区域像元数的关系式，即望远单元放大倍率Γ与微透镜阵列通光孔径的关系式，如式 (4) 所示：

$$\Gamma = \frac{1.22\lambda_c}{2mn\Delta} L \quad , \tag{4}$$

式中，L为探测距离，Δ为空间分辨率，λ_c为系统工作中心波长。通过分析式 (4) 可以得出光学系统的主要设计参数。图 3(彩图见期刊电子版)为不同空间分辨率下，微透镜阵列子单元通光孔径成像区域内的像元数与望远单元放大倍率的关系式曲线图。由式 (4) 可知，光学系统的分辨率受波长的影响，波长越长分辨率越低，而系统中通道 12 至通道 16 的工作波段为红色波段，因此，λ_c选取红色光谱通道 14 的中心波长 666 nm 作为整个光学系统的工作中心波长，m为 3.45 μm; L为 10 km。由图 3 可知，当空间分辨率固定时，随着像元数的增加，望远单元所需的放大倍率越低；当像元数固定时，随着空间分辨率的升高，望远单元所需的放大倍率越高。

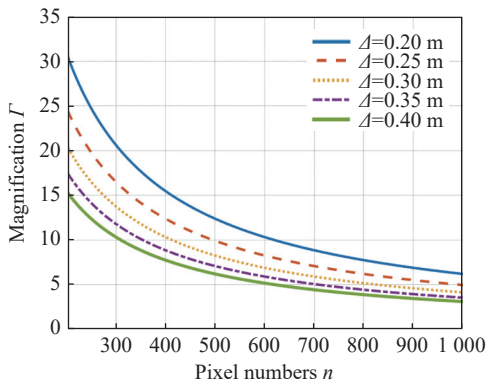


图 3 不同空间分辨率下微透镜阵列子单元通光孔径与望远单元放大倍率关系曲线

Fig. 3 The relationship between the aperture of the sub-unit of the microlens array and the telescope unit magnification at different spatial resolutions

根据式 (4) 可构建出阵列组的初始结构。由系统焦距和望远单元放大倍率可以得出阵列组的焦距f_Z：

$$f_Z = \frac{2mn\Delta f}{1.22\lambda_c L} \quad . \tag{5}$$

光焦度分配是设计光学系统初始结构的一个重要步骤，因此，需要构建阵列组内部的光焦度分配关系。对于多光谱光学系统而言，工作波长细致多样，且对光学系统的色差有较高要求，在阵列组设计中需要加入透镜进行色差校正，而阵列组中的透镜会影响微透镜阵列的光焦度，因此要分析阵列组内光焦度的分配关系：

$$\Phi_1 = \frac{1.22\lambda_c L\Phi - 2mn\Delta\Phi_2}{2mn\Delta(1 - t\Phi_2)} \quad , \tag{6}$$

式中，Φ为光学系统总光焦度，Φ_1为微透镜阵列的光焦度，Φ_2为透镜的光焦度，t为微透镜阵列与透镜之间的间隔。根据探测距离 L 以及在探测距离 L 处的目标分辨率等探测条件，利用式 (4)、式 (6) 可得出系统望远单元与阵列组参数精准匹配的光焦度分配方法。

2.2.2 光谱滤光阵列及微纳偏振阵列探测器

光谱滤光阵列与微透镜阵列的排布方式相对应，光谱覆盖可见光波段，每个光谱通道宽度一致，可同时获取多个不同谱段的光谱图像。多通道窄带滤光片的研制主要采取纳米压印与镀膜相结合的方法，镀膜方式为真空蒸发镀膜，通过加热薄膜材料使材料分子或原子逸出至基底表面上，沉积形成多层薄膜[18]。图 4(彩图见期刊电子版)为光谱滤光阵列的透过率曲线，经测试光谱滤光阵列各个通道的透过率均大于 92%，图中右侧为光谱滤光阵列实物。

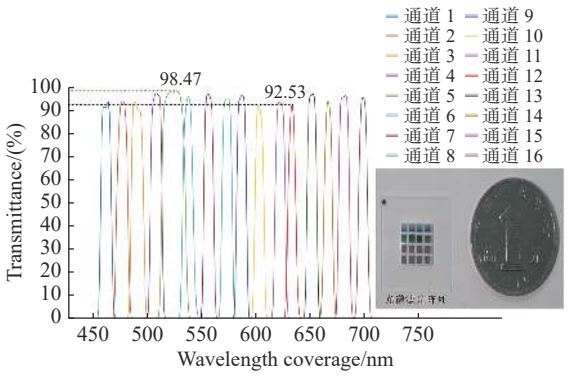


图 4 光谱滤光阵列透过率曲线

Fig. 4 Transmittance curves of spectral filter array channel

光谱滤光阵列的设计需要满足微透镜阵列的排布以及其子单元通光孔径尺寸。由于每个光谱通道设计波段不同导致微透镜阵列每个子单元的光学分辨率不一致, 而光学分辨率与系统工作中心波长有关, 因此系统需要选定一个中心波长, 以保证每个光谱通道的光学分辨率与探测器分辨率相匹配, 否则会出现部分光谱通道的光学分辨率达不到探测分辨率要求的情况。

根据系统总体需求, 要对微纳偏振阵列探测器的探测区域进行光谱通道划分, 且要保证每个光谱通道的空间分辨率。微纳偏振阵列探测器以纳米压印光刻工艺和金属沉积工艺实现微偏振阵列与焦平面的集成[19]。其基本周期单元由 4 个像元组成, 这 4 个像元彼此不等价, 每个像元代表一种偏振方向[20]。利用微纳偏振阵列探测器获取偏振信息虽然直接高效, 但是会损失空间分辨率。为解决分辨率下降的问题可以采用卷积插值的方法进行图像恢复, 从而得到全分辨率的偏振图像。

选好微纳偏振阵列探测器后, 探测器的探测靶面与像元尺寸已经固定, 这时通过每个光谱通道的探测器像元数就可以得出微透镜阵列子单元的设计参数。由于微透镜阵列每个子单元的设计参数一致, 因此, 每个光谱通道的像元数要求相同。微透镜阵列子单元的通光孔径大小直接影响了光学系统的光学分辨率, 故在进行探测区域划分时要保证光学系统达到探测分辨率的要求, 通道与通道之间要预留空间避免出现光谱混叠。图 5(彩图见期刊电子版)为探测器区域划分示意图。

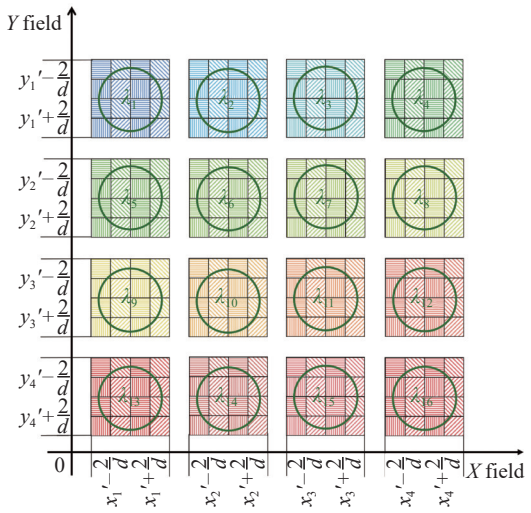


图 5　探测器区域划分示意图

Fig. 5　Schematic diagram of detector's area division

3　设计实例

3.1　设计结果

基于本文的设计思路与初始结构搭建方法设计了一个多维度成像制导光学系统, 以证明此方法的可行性。系统选用的微纳偏振阵列探测器型号为 HR-12000-S-PC, 靶面大小为 4 096×3 000, 像元尺寸为 3.45 μm, 最大帧频为 80 fps。系统的具体光学技术指标如表 1 所示。

表 1　光学系统技术指标

Tab. 1　Technical index of the optical system

参数	数值
有效焦距/mm	150
入瞳孔径/mm	17.25
空间分辨率/m	0.25@10 km
视场/mrad	5.34×5.34
工作波长/nm	450~706
光谱分辨率/nm	16
探测器靶面	4 096×3 000
像元尺寸/μm	3.45

光学系统采用分段设计, 根据图 3 确定微透镜阵列子单元的通光孔径所对应探测器接收区域的像元数为 500 个, 隔离区域的像元数为 250 个, 再通过式 (3) 与式 (4) 确定出微透镜阵列子单元通光孔径大小, 并计算得出前端卡式系统的放大倍率为 10 倍。探测器不同光谱通道的探测区域划分受限于探测器靶面大小, 探测区域划分方式可以为 3×3、4×4、5×5 等。为了使探测器靶面得到最大限度利用, 要求在保证系统光学分辨率和探测器分辨率匹配的同时还要尽可能地将光谱通道进行细化。最终确定靶面的划分方式为 4×4 最佳, 此时, 光谱通道个数为 16 个, 每个通道的光谱宽度为 16 nm。通过每个通道的成像区域可以计算出光学系统的工作视场, 根据探测区域像元数算出实际像高, 并通过三角关系计算得出工作视场角。由于用第一块微透镜阵列作为系统光阑时, 前端望远单元的视场角限制较大, 并且考虑到系统公差中的阵列元件同轴度, 若不留视场余量可能出现边缘视场渐晕、边缘通道丢失、两通道边缘视场混叠等问题, 因此需要给视场留足余量。图 6 为微透镜阵列像方远心光路原理图。

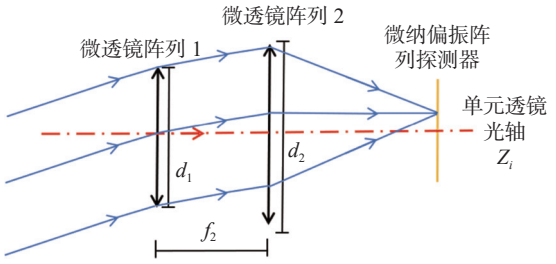


图 6　微透镜阵列像方远心光路示意图

Fig. 6　Schematic diagram of telecentric imaging optical path of microlens array

系统中两块微透镜阵列构成像方远心光路，由像方远心光路的特性可知，第一块微透镜阵列与第二块微透镜阵列的间距为第二块微透镜阵列的焦距，第二块微透镜阵列的口径大小受探测器分辨率最短边与每个光谱通道的光轴间距限制。以竖直方向边缘视场为例，为了防止出现通道边缘视场渐晕的情况，第一块微透镜阵列边缘视场的边缘光线应该入射至第二块微透镜阵列的边缘口径处，再利用实际像高与望远单元放大倍率的关系推导出极限实际半像高p，如式 (7) 所示：

$$p = f \cdot \tan\left(\frac{2mn\Delta \cdot \arctan\left(\frac{d_2 - d_1}{2f_2}\right)}{1.22\lambda_c L}\right) \quad , \qquad (7)$$

式中，p为实际半像高，d_1为第一块微透镜阵列的孔径，d_2为第二块微透镜阵列的孔径，f_2为第二块微透镜阵列的焦距。经计算得出光学系统实际半像高为 0.4 mm，因此光学系统的视场角为 5.34 mrad×5.34 mrad。

为满足探测距离为 10 km，目标物不小于 2 m 的探测需求，根据目标探测识别对像元数的要求知，至少需要 8 个像元，由此可知空间分辨率为 0.25 m。确定光谱通道个数之后，需要计算微透镜阵列子单元通光孔径大小，每个光谱通道所对应的工作中心波长不同，需要选择其中一个光谱通道的中心波长作为光学系统计算时的参考波长。工作中心波长λ_c选定会影响各个光谱通道的截止频率，而奈奎斯特频率在探测器选定后即为固定值。由光学系统截止频率公式可知，F 数确定后，系统分辨率与工作波长成反比，当最大波长对应的分辨率满足要求时，其他波长下所对应的分辨率也满足要求，因此将红光波段的中心波长作为光学系统的中心波长并通过系统参数计算出系统的光学分辨率Δ_g，如式 (8) 所示：

$$\Delta_g = \frac{1}{1.22\lambda_c F} = 145\ \mathrm{lp/mm} \quad , \qquad (8)$$

式中，F为光学系统的 F 数。从计算结果可以得出光学系统的光学分辨率与探测分辨率匹配，设计参数合理。

得到具体的设计参数后，利用光学设计软件进行建模优化，使用多重结构构造出微透镜阵列并控制通过每个透镜单元的工作波段。最终设计结果如图 7 所示。

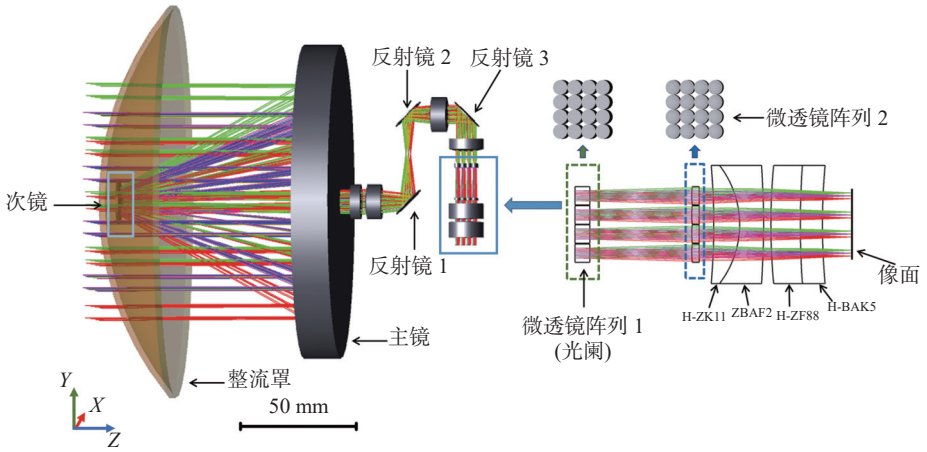


图 7　光学系统设计三维图

Fig. 7　Three-dimensional diagram of the designed optical system

在最终设计结果中：前端是直径为 180 mm 的球型整流罩，材料为 MgF_2[21]；卡式系统主镜与次镜的面型均为双曲面；由卡式系统出射的光经过准直镜组进行光束准直，并利用平面反射镜使

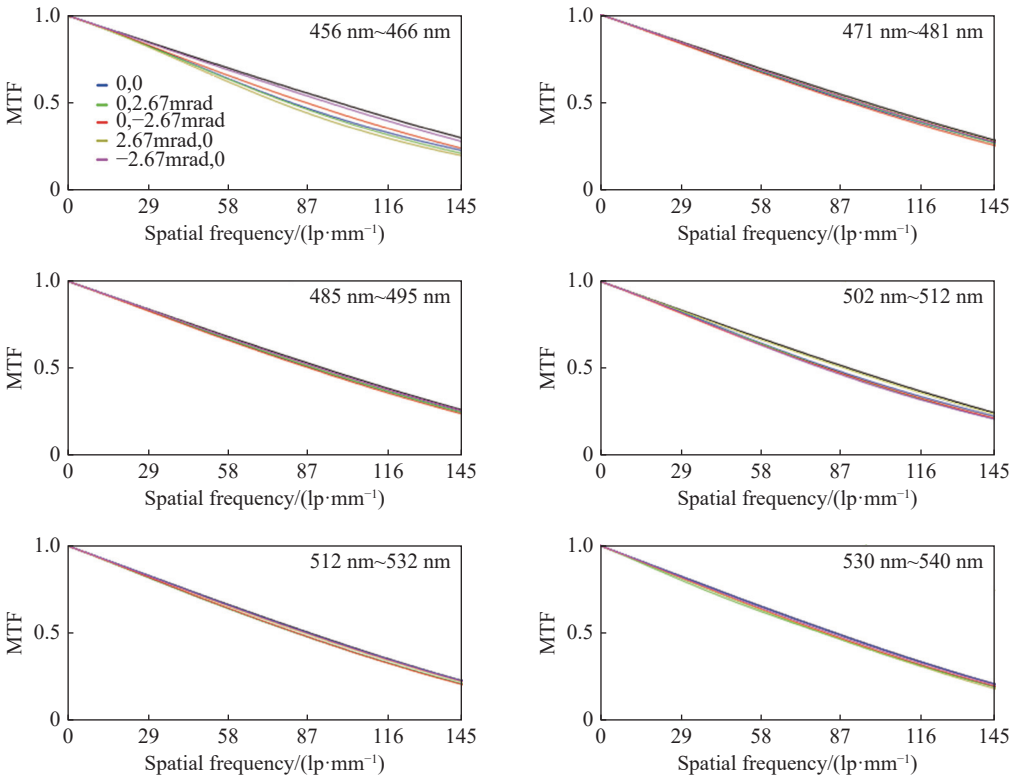
光路折转, 以进一步缩小筒长, 最终系统整体筒长为 145 mm; 第一块微透镜阵列作为整个系统的光阑对入射的平行光束进行口径分割, 每个子孔径的口径大小与微纳偏振阵列探测器单一通道成像像元数对应, 且与前端望远单元放大倍率匹配; 第二块微透镜阵列的作用是与第一块微透镜阵列形成像方远心光路, 避免通道之间出现成像混叠, 之后通过两块双胶合透镜进行像差校正, 最终在微纳偏振阵列探测器上成像。

光学系统中的透镜面型均为球面, 系统单通道的入瞳孔径为 17.25 mm, 阵列组焦距为 15 mm。成像系统的信噪比可以用R_{SN}进行评价[22]。根据信噪比R_{SN}的定义, 光学系统的信噪比为系统探测器收集到的信号与系统所有噪声等效噪声信号之比, 如式 (9) 所示:

$$R_{SN}=\frac{N_S}{n_n}=\frac{\dfrac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\pi L_e(\lambda)\tau_g(\lambda)\tau_a(\lambda)\eta(\lambda)\rho(\lambda)\lambda A_{\mathrm{pix}}T}{F^2hc}\mathrm{d}\lambda}{\sqrt{\left(\dfrac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\pi L_e(\lambda)\tau_g(\lambda)\tau_a(\lambda)\eta(\lambda)\rho(\lambda)\lambda A_{\mathrm{pix}}T}{F^2hc}\mathrm{d}\lambda+N_d+n_c{}^2\right)}}\ , \tag{9}$$

式中, $L_e(\lambda)$为照射到探测区域的太阳辐亮度, 值为 1 367 W/m^2, $\tau_g(\lambda)$为光学系统的光能利用率, 约为 70%, $\tau_a(\lambda)$为大气对可见光的透过率, 约为 85%, $\eta(\lambda)$为探测器的量子效率, 大小为 0.4, $\rho(\lambda)$为目标反射率, A_{pix}为探测器像元的面积, T为探测器积分时间, F为光学系统的 F 数, N_d为探测器暗电流电子数, n_c为探测器噪声电子数, λ_1和λ_2为系统光学系统工作波段的截止波长, h和c分别是普朗克常数和真空光速。对于导引头等快速目标成像应用而言, 相机工作帧频通常不低于 50 Hz[23], 将相机的曝光时间设置为 20 ms, 利用光学系统视场覆盖的探测器像元数可计算出成像像元面积, 再根据探测区域平均反射率计算得出光学系统的信噪比, 值为 5.5。以上结果表明该光学系统能够满足探测需求。在未来随着探测器件灵敏度的提升, 信噪比还有望进一步提升。

利用调制传递函数(MTF)曲线、畸变等对光学系统的设计结果进行评价, 系统中 16 个光谱通道的 MTF 结果如图 8(彩图见期刊电子版)所示。



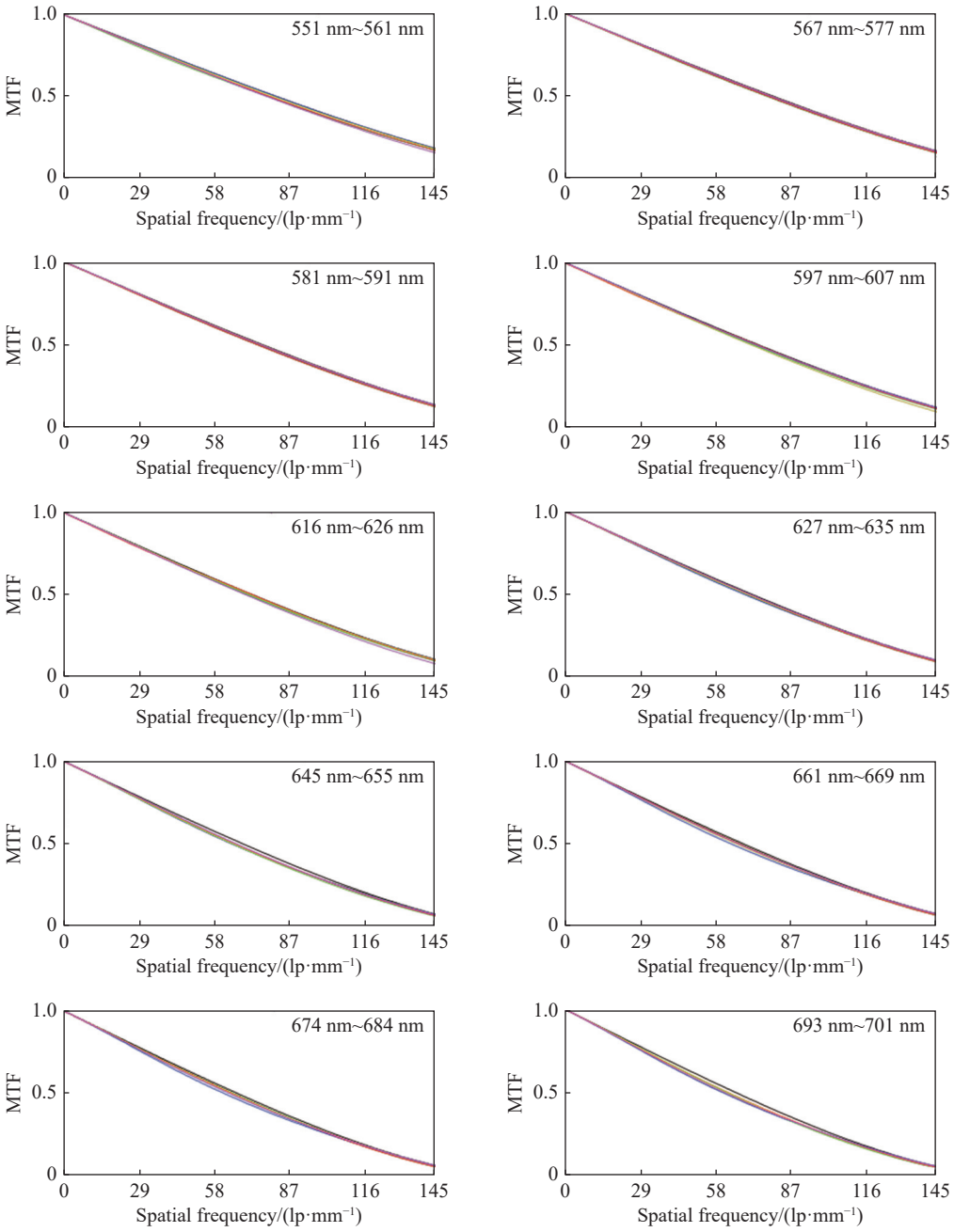


图 8　光学系统 16 个光谱通道的 MTF

Fig. 8　MTF of 16 spectral channels of the optical system

由图 8 可以看出，整个光学系统的截止频率随波长的增加而降低，全波段、全视场条件下 MTF 均接近衍射极限，成像质量良好。由于畸变会导致光谱通道间出现光谱混叠的现象，因此应对畸变所产生的影响进行约束。图 9(彩图见期刊电子版)为系统 16 个光谱通道全视场下的视场归一化畸变图。由畸变图可以看出光学系统整个像面的畸变呈左右对称分布，靠近像面中心的光谱通道畸变较小，远离像面中心的光谱通道畸变较大，整个光学系统全通道、全视场畸变绝对值小于 0.528%，对应到像面上的最大畸变量为 2.1 μm，小于 1 个像元尺寸，各个光谱通道成像区域错位较小，系统对分孔径成像视差的校正效果较好[24]。图 10(彩图见期刊电子版)为光学系统 16 个光谱通道能量集中度曲线，根据光学分辨率的定义可知艾里斑半径大约占用两个像元，因此辐射半径为 6.9 μm，所有光谱通道的能量集中度都高于 81.1%，能量利用率较高，能满足系统远距离探测成像的能量要求。由于轴向色散的原因，不同光谱通道的成像是空间不对齐的，这种现象会导致

各个通道成像质量不一致, 因此需要分析光学系统的轴向色散球差。由图 10 可知, 每个光谱通道的能量集中度曲线非常接近理想曲线, 光学系统的点列图小于艾里斑, 轴向色散球差得到校正。综上所述, 光学系统像质较好, 满足设计要求。

与现有偏振光谱系统相比, 该系统利用阵列组的方式实现偏振光谱一体化, 空间利用率高。系统划分为 16 个光谱通道, 光谱分辨率达到 16 nm, 能够快速获取目标的偏振多光谱图像。此外, 其通过对比多幅偏振光谱图像识别出复杂背景中的目标, 适合体积、重量、成像速度要求苛刻的弹载平台。

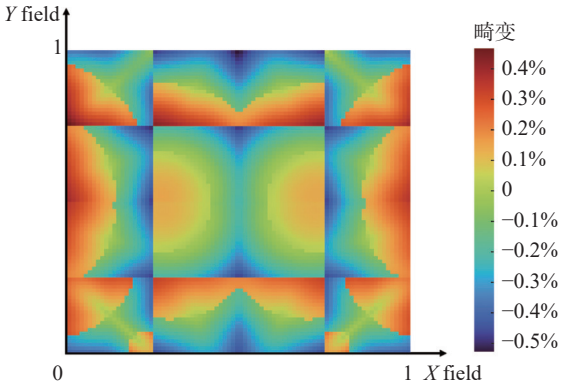


图 9　光学系统 16 个光谱通道归一化视场下的畸变图

Fig. 9　Distortion map of 16 spectral channels in the normalized field of view of the optical system

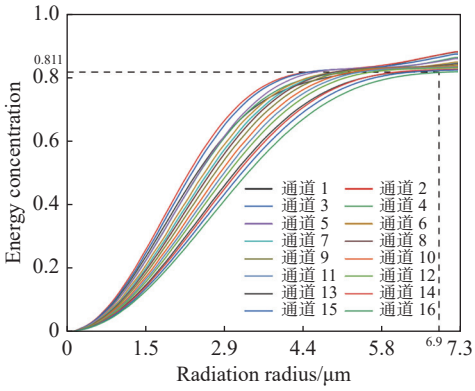


图 10　光学系统 16 个光谱通道能量集中度曲线

Fig. 10　The energy concentration curves of 16 spectral channels of the optical system

3.2　公差分析

与常规光学系统公差分析不同, 该系统中存在特殊元件, 应对每个特殊元件进行分析公差。望远单元由卡式系统主镜与次镜组成, 面型加工精度与装调误差是主要影响因素[25]。微透镜阵列的每个子单元孔径都非常小, 且每个孔径的间距误差直接影响每个通道的成像质量, 因此对于微透镜阵列而言, 子孔径的曲率半径、位置精度偏心与倾斜是影响成像质量的关键因素[26]。光谱滤光阵列与微透镜阵列的同轴度是影响核心元件配准的重要参数, 而单一光谱通道的透过率是评价光谱滤光阵列的核心指标。系统中的常规透镜采用加工常用的公差等级表设置公差量。表 2 为光学系统公差设置表。用 RMS 光斑半径评价系统的性能, 各个通道的 RMS 光斑半径分析结果如表 3 所示。结果表明: 500 次蒙特卡罗公差分析中有 90% 以上的概率所有通道的 RMS 光斑半径小于 5.94 μm, 故装调后的系统可以满足成像质量的要求, 公差分配合理。

表 2　光学系统公差设置

Tab. 2　Optical system tolerance settings

对象	公差类型	数值	
		主镜	次镜
望远单元	*X*、*Y*方向偏心/mm	±0.08	±0.08
	*Z*方向厚度/mm	±0.025	±0.025
	X、*Y*方向倾斜/(°)	±0.1	±0.1
	二次曲率系数	±0.001	±0.001
	曲率半径/mm	±0.001	±0.001
微透镜阵列	位置精度偏心/mm	±0.005	
	厚度/mm	±0.025	
	单元透镜倾斜/(′)	±0.3	
	不规则度	±0.2	
	曲率半径/mm	±0.01	
光谱滤光阵列	位置精度偏心/mm	±0.005	
	光谱通道倾斜/(′)	±0.3	
	不规则度	±0.2	
	厚度/mm	±0.01	
常规透镜	折射率	±0.0008	
	光圈数	±2	
	厚度/mm	±0.025	
	不规则度	±0.25	
	阿贝数/%	0.08	
	元件倾斜/(′)	±0.8	
	表面倾斜/(′)	±0.8	
	元件偏心/mm	±0.008	
	表面偏心/mm	±0.008	

表 3 蒙特卡罗公差分析结果

Tab. 3 Monte Carlo tolerance analysis results

通道	RMS光斑半径/μm	通道	RMS光斑半径/μm
	90%		90%
通道1	5.936	通道9	4.737
通道2	4.927	通道10	2.899
通道3	4.786	通道11	2.994
通道4	5.723	通道12	4.938
通道5	4.880	通道13	5.885
通道6	3.087	通道 14	5.047
通道7	3.007	通道15	5.296
通道8	4.895	通道16	5.821

4 结 论

针对现有偏振光谱成像方法难以适用于弹载平台的问题，提出一种基于阵列光学的多维度成像制导光学方案。该方案将阵列光学与偏振光谱成像相结合，利用微透镜阵列结合光谱滤光阵列得到多个光谱通道，再利用微纳偏振阵列探测器实现目标偏振光谱信息获取。设计结果表明，该系统大多数光谱通道的 MTF 都接近衍射极限，最大弥散斑半径小于 5.94 μm，最大畸变绝对值小于 0.528%，所有光谱通道的能量集中度都高于 81.1%，光学系统 16 个光谱通道的成像质量均良好，可对 10 km 处 2 m 以上的目标物进行偏振多光谱成像。系统公差分配合理，符合现有的加工装调技术。

本文提出的偏振多光谱成像方法实现了单光路单探测器成像并且无需复杂的信息解算过程。该项研究为弹载偏振光谱一体化成像提供了新的思路，有望对打赢未来信息化战争提供一定的支撑作用。

未来，该偏振光谱多维度成像光学系统有望进一步提高成像分辨率、扩大成像视场、提升精确制导能力。

参考文献：

[1] 谢亚峰，朴明旭，唐金力，等. 激光/红外双模环形孔径导引头光学系统设计[J]. 红外与激光工程，2023，52(2)：20220442.
XIE Y F, PIAO M X, TANG J L, *et al*.. Optical system design of laser/infrared dual-mode annular aperture seeker[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(2): 20220442. (in Chinese).

[2] 于俊庭，李少毅，张平，等. 光电成像末制导智能化技术研究与展望[J]. 红外与激光工程，2023，52(5)：20220725.
YU J T, LI SH Y, ZHANG P, *et al*.. Research and prospect of intelligent technology of optoelectronic imaging terminal guidance[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(5): 20220725. (in Chinese).

[3] 刘箴，张宁，吴馨远. 多模复合导引头发展现状及趋势[J]. 飞航导弹，2019，(10): 90-96.
LIU ZH, ZHANG N, WU X Y. Multimode composite guide head development status and trends[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2019, (10): 90-96. (in Chinese).

[4] 史浩东，王稼禹，李英超，等. 复杂海况下海洋生态环境多维度光学监测方法[J]. 光学学报，2022，42(6)：0600004.
SHI H D, WANG J Y, LI Y CH, *et al*.. Multi-dimensional optical monitoring method of marine ecological environment under complex sea conditions[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(6): 0600004. (in Chinese).

[5] 胡福东. 地面复杂背景下隐身目标多波段偏振检测及对制导律的影响特性分析[D]. 南京：南京理工大学，2017.
HU F D. Multi-spectral polarization detection of stealth targets under complex ground background with analysis of influence to guidance law[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2017. (in Chinese).

[6] FOUGNIE B, MARBACH T, LACAN A, *et al*.. The multi-viewing multi-channel multi-polarisation imager–Overview of the 3MI polarimetric mission for aerosol and cloud characterization[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2018, 219: 23-32.

[7] 李辉，薛庆生，白皓轩，等. 基于强度调制的偏振光谱测量技术[J]. 光子学报，2023，52(4)：0430001.
LI H, XUE Q SH, BAI H X, *et al*.. Polarization spectrum measurement technology based on intensity modulation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2023, 52(4): 0430001. (in Chinese).

[8] GU N T, YAO B X, HUANG L H, *et al*.. Design and analysis of a novel compact and simultaneous polarimeter for complete stokes polarization imaging with a piece of encoded birefringent crystal and a micropolarizer array[J]. *IEEE*

Photonics Journal, 2018, 10(2): 6801312.

[9] 石晶晶, 李孟凡, 胡亚东, 等. 紫外可见偏振成像光谱仪的光谱定标与匹配方法[J]. 光学学报, 2022, 42(9): 0930002.
SHI J J, LI M F, HU Y D, *et al*.. Spectral calibration and matching method for ultraviolet-visible polarization imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(9): 0930002. (in Chinese).

[10] 赵义武, 段云, 李英超, 等. 基于双 Wollaston 棱镜的静态光谱偏振成像系统设计[J]. 兵工学报, 2019, 40(8): 1658-1664.
ZHAO Y W, DUAN Y, LI Y CH, *et al*.. Design of static spectral polarization imaging system with double wollaston prism[J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(8): 1658-1664. (in Chinese).

[11] SATTAR S, LAPRAY P J, AKSAS L, *et al*.. Snapshot spectropolarimetric imaging using a pair of filter array cameras[J]. *Optical Engineering*, 2022, 61(4): 043104.

[12] EL-HABASHI A, BOWLES J, FOSTER R, *et al*.. Polarized observations for advanced atmosphere-ocean algorithms using airborne multi-spectral hyper-angular polarimetric imager[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2021, 262: 107515.

[13] LV X B, YANG ZH H, LI Y W, *et al*.. Lenslet-based snapshot full-Stokes imaging spectropolarimeter[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 148: 107758.

[14] CHEN Z Y, ZHANG CH M, MU T K, *et al*.. Coded aperture full-stokes imaging spectropolarimeter[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 150: 107946.

[15] WANG J Y, SHI H D, LIU J N, *et al*.. Compressive space-dimensional dual-coded hyperspectral polarimeter (CSDHP) and interactive design method[J]. *Optics Express*, 2023, 31(6): 9886-9903.

[16] 王丹艺, 薛常喜, 李闯, 等. 基于微透镜阵列的电子内窥镜光学系统设计[J]. 光学学报, 2018, 38(2): 0222003.
WANG D Y, XUE CH X, LI CH, *et al*.. Design of electronic endoscope optical system based on microlens array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 0222003. (in Chinese).

[17] 刘德森. 微小光学与微透镜阵列[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 319-322.
LIU D S. *Micro Optics and Microlens Arrays*[M]. Beijing: Science Press, 2013: 319-322. (in Chinese).

[18] 段营部. 多通道窄带滤光片的设计与制备技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2020.
DUAN Y B. *Design and preparation technology of multi-channel narrow band filter*[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2020. (in Chinese).

[19] CHU J K, WANG ZH W, GUAN L, *et al*.. Integrated polarization dependent photodetector and its application for polarization navigation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(5): 469-472.

[20] 梁宛玉, 许洁, 戴放, 等. 固态微光实时偏振成像集成技术[J]. 中国光学, 2021, 14(3): 578-586.
LIANG W Y, XU J, DAI F, *et al*.. Real-time polarization imaging integrated technology for solid-state low-light imaging[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 578-586. (in Chinese).

[21] 赵洪卫, 侯天晋, 朱斌. 军用光学整流罩技术研究的进展[J]. 激光与红外, 2010, 40(9): 926-931.
ZHAO H W, HOU T J, ZHU B. Military optical domes techniques researchful developments[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(9): 926-931. (in Chinese).

[22] 张元涛, 孙德新, 刘银年. 基于 CMOS 图像传感器的微光成像系统信噪比研究[J]. 红外, 2018, 39(7): 1-7.
ZHANG Y T, SUN D X, LIU Y N. Study of SNR of low light level imaging system based on CMOS image sensor[J]. *Infrared*, 2018, 39(7): 1-7. (in Chinese).

[23] 李静, 宋广, 董珊, 等. 非制冷红外焦平面探测器研究进展与趋势[J]. 红外, 2020, 41(10): 1-14,24.
LI J, SONG G, DONG SH, *et al*.. Research progress and trend of uncooled infrared focal plane detectors[J]. *Infrared*, 2020, 41(10): 1-14,24. (in Chinese).

[24] 王琪, 梁静秋, 梁中翥, 等. 分孔径红外偏振成像仪光学系统设计[J]. 中国光学, 2018, 11(1): 92-99.
WANG Q, LIANG J Q, LIANG ZH ZH, *et al*.. Design of decentered aperture-divided optical system of infrared polarization imager[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(1): 92-99. (in Chinese).

[25] 李美萱, 王美娇, 王丽, 等. 光刻照明系统中复眼透镜的设计及公差分析[J]. 激光与红外, 2017, 47(7): 842-847.
LI M X, WANG M J, WANG L, *et al*.. Design and tolerance analysis of compound eye lens in lithography lighting system[J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(7): 842-847. (in Chinese).

[26] 孙昇, 王超, 史浩东, 等. 分孔径离轴同时偏振超分辨率成像光学系统像差校正[J]. 物理学报, 2022, 71(21):

214201.

SUN SH, WANG CH, SHI H D, *et al*.. Aberration correction of aperture-divided off-axis simultaneous polarization super-resolution imaging optical system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(21): 214201. (in Chinese).

作者简介：

史浩东(1989—)，男，吉林长春人，博士，副研究员，博士生导师，主要从事先进光学系统设计及多维度探测方面的研究。E-mail: shihaodong08@163.com

《中国光学(中英文)》征稿启事

《中国光学(中英文)》为双月刊，A4 开本；刊号：ISSN 2097-1842/CN 22-1431/O4；国内外公开发行，邮发代号：国内 12-140，国外 BM6782。

- ★ 荷兰 Scopus 数据库
- ★ 美国《乌利希国际期刊指南》
- ★ 美国《化学文献》
- ★ 波兰《哥白尼索引》
- ★ 俄罗斯《文摘杂志》
- ★ 美国工程索引(Ei)数据库
- ★ 美国 ESCI 数据库
- ★ 中国精品科技期刊
- ★ 中国科技核心期刊
- ★ 中国光学学会会刊
- ★ 中国科技论文与引文数据库
- ★ 中国期刊全文数据库
- ★ 万方数字化期刊全文数据库
- ★ 中国科技期刊数据库
- ★ 中国光学期刊网数据库

主要栏目：微纳光学、信息光学、集成光电子、光谱学和光谱仪器、激光技术与应用、光学功能材料、光学设计与工艺、大气与空间光学、光学仪器与测试、综述、前沿动态、产业资讯、科普教学、实验室介绍、自然科学基金项目进展、前沿热点访谈、热点论文等。

发稿类型：学术价值显著、实验数据完整的原创性论文；研究前景广阔，具有实用、推广价值的技术报告；有创新意识，能够反映当前先进水平的阶段性研究简报；对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告；以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿。

主管单位：中国科学院
主办单位：中国科学院长春光学精密机械与物理研究所
协办单位：激光与物质相互作用国家重点实验室
编辑出版：《中国光学(中英文)》编辑部
投稿网址：http://chineseoptics.net.cn
邮件地址：chineseoptics@ciomp.ac.cn
联系电话：0431-84627061　　传　真：0431-84627061
编辑部地址：长春市东南湖大路 3888 号(130033)