

固态面阵激光雷达接收光学系统设计

魏雨 蒋世磊 孙国斌 张兴星 王玉宁

Design of solid-state array laser radar receiving optical system

WEI Yu, JIANG Shi-lei, SUN Guo-bin, ZHANG Xing-xing, WANG Yu-ning

引用本文:

魏雨, 蒋世磊, 孙国斌, 张兴星, 王玉宁. 固态面阵激光雷达接收光学系统设计[J]. *中国光学*, 2020, 13(3): 517–526. doi: 10.3788/CO.2019–0166

WEI Yu, JIANG Shi-lei, SUN Guo-bin, ZHANG Xing-xing, WANG Yu-ning. Design of solid-state array laser radar receiving optical system[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(3): 517–526. doi: 10.3788/CO.2019–0166

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/CO.2019–0166>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大相对孔径紫外成像仪光学系统设计

Design of large aperture ultraviolet optical system for ultraviolet camera

中国光学. 2018, 11(2): 212 <https://doi.org/10.3788/CO.20181102.0212>

分孔径红外偏振成像仪光学系统设计

Design of decentered aperture-divided optical system of infrared polarization imager

中国光学. 2018, 11(1): 92 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0092>

多角度耦合分幅相机光学系统设计

Optical system design of multi-angle coupled framing camera

中国光学. 2018, 11(4): 615 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0615>

大随机相位误差下条带模式合成孔径激光雷达成像实验

Stripmap mode synthetic aperture ladar imaging under large random phase errors condition

中国光学. 2019, 12(1): 130 <https://doi.org/10.3788/CO.20191201.0130>

激光位移传感器传感探头微小型光学系统设计

Design of micro-optical system for laser displacement sensor sensing probe

中国光学. 2018, 11(6): 1001 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.1001>

傅立叶变换型线偏振干涉成像系统分析与设计

Analysis and design of Fourier transform polarization interference imaging system

中国光学. 2019, 12(3): 638 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0638>

固态面阵激光雷达接收光学系统设计

魏雨, 蒋世磊*, 孙国斌, 张兴星, 王玉宁
(西安工业大学光电工程学院, 陕西西安710021)

摘要:在确保固态面阵激光雷达安全性的前提下,为了提高光学系统的像面能量均匀度以及增加光学系统所接收到的能量,保证在探测过程中的低信噪比以及对目标的可探测性,本文通过对发射激光能量和接收能量进行建模,给出了光学参数,研究了影响接收光学系统像面照度的因素。指出大视场大相对孔径高照度均匀性光学系统的设计要素,并通过ZEMAX优化分析给出了具体的实施过程。最终设计了 $\lambda=905(\pm 5)\text{nm}$,焦距为15 mm,相对孔径为1/1.4,视场角为 $2\omega=76^\circ$ 的激光雷达接收镜头,系统总长小于77 mm,在空间频率为20 lp/mm处MTF值大于0.5,在0.85视场内的相对畸变小于8%,像面照度不均匀性小于7.2%。满足激光雷达的探测要求。

关键词:激光雷达;能量分析;光学设计;大相对孔径;相对照度

中图分类号:O439 文献标志码:A doi:10.3788/CO.2019-0166

Design of solid-state array laser radar receiving optical system

WEI Yu, JIANG Shi-lei*, SUN Guo-bin, ZHANG Xing-xing, WANG Yu-ning
(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

* Corresponding author, E-mail: 2429765449@qq.com

Abstract: With regards to the safety of solid-state area array lidars, in order to improve the energy uniformity of imaging plane and increase the energy received by the optical system, this paper works to ensure a low signal-to-noise ratio and the detectability of a target. The optical parameters are given by modeling the emitted and received laser energy. The factors affecting the image plane's illumination in the optical receiver are studied and the design elements of optical systems with large fields of view, large relative aperture, and high illumination uniformity are described. Through ZEMAX optimization analysis, a detailed implementation process is then provided. A lidar receiving lens with $\lambda = 905 (\pm 5) \text{ nm}$, a focal length of 15 mm, a relative aperture of 1/1.4, and a field of view $2\omega = 76^\circ$ was designed. The total system length was less than 77 mm, and the MTF value at the spatial frequency of 20 lp/mm was greater than 0.5. The relative distortion at the 0.85 field of view was less than 8% and the unevenness of the image plane illumination was less than 7.2%. This design meets the requirements for lidar detection.

收稿日期:2019-08-13; 修订日期:2019-10-12

基金项目:陕西省教育厅重点实验室科研计划(No. 18JS053);陕西省科技厅重点实验室项目(No. 2013SZS14-P01)

Supported by Research Program of Key Laboratory of Education Department of Shaanxi Province (No. 18JS053); Key Laboratory Project of Shaanxi Provincial Department of Science and Technology (No. 2013SZS14-P01)

Key words: laser lidar; energy analysis; optical design; large relative aperture; relative intensity of illumination

1 引言

面阵固态激光雷达与传统的扫描激光雷达相比,因为其具有数据点采样均匀准确、体积小方便集成、成本低等优点,可将固态激光雷达作为传感模块,这对于未来自动驾驶提供了无限可能^[1]。通常,固态激光雷达探测器有 Geiger APD,线性模式的 APD,波长小于 1 000 nm 的应用中可以利用可见光摄像头,可以使用硅基传感器,而介于 1 000~2 000 nm 之间时则需要使用 Ge 或者 In-GaAs 做探测器,由于硅光电二极管对光谱的响应为 400~1 100 nm,其峰值响应为 900 nm,同时,近红外波段处于大气窗口。这为研制 905 nm 近红外激光雷达芯片带来了可能。此次选用的探测器中心工作波长为 905 nm,其量子效率为 25%,单位像元面积为 35 $\mu\text{m}\times 45 \mu\text{m}$,感光面阵列为 512 \times 256,整个像面尺寸为 19.5 mm \times 11.5 mm。

在激光雷达的工作过程中,考虑到人眼安全的限制,根据 IEC60825-1-2014 标准规定,已知激光器波长 $\lambda=905(\pm 5)\text{nm}$,人眼瞳直径为 7 mm,设人眼安全距离为 L_{safe} ,人眼安全阈值为 0.4 mW/cm²,光学系统需保证在较低的能量密度下接收到足够的能量,并使像面相对照度均匀^[2]。固态面阵激光雷达光学系统要具有同扫描激光雷达同样的性能,光学系统的要求将随之增高,大视场大相对孔径,均匀照度的接收镜头成为了光学系统的主要指标要求。

因此,对于 905 nm 波长的激光雷达的安全发射与接收的研究具有重要意义。本文基于某公司研制的近红外 905 nm 固态激光雷达芯片对激光雷达的发射接收系统进行光场能量计算,并根据理论计算要求和工程需要给出镜头设计参数,最终完成了光场数据建模,并设计了焦距为 15 mm,相对孔径为 1/1.4,视场角为 75°的激光接收镜头。

2 光学系统指标确定

为了实现空间 360°的完全覆盖以及每个激光雷达之间的连贯连接,同时避免在通过陡峭的弯桥时产生的盲区,整个激光雷达系统采用 6 组分立雷达,其单个雷达的视场角为 65°,垂直视场角为 30°。作为在车的正前方的主探测激光雷达在对目标物实现 65°探测的同时还要实现 200 m 的探测距离。选用 905QCW 激光器作为发射源,该激光器的峰值功率为 100 W,占空比为 10%。

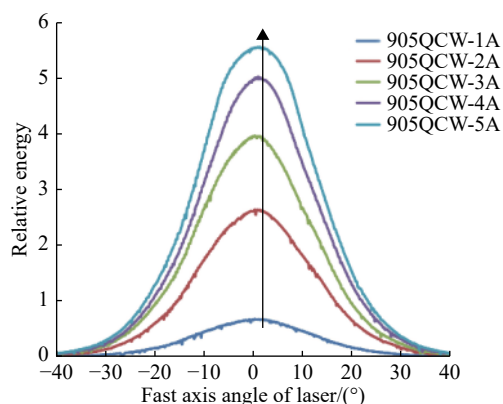


图 1 快轴功率密度分布

Fig. 1 Power density distribution of fast axis

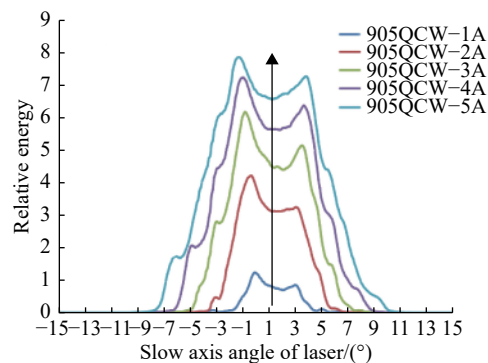


图 2 慢轴功率密度分布

Fig. 2 Power density distribution of slow axis

根据以上要求最终确定激光器经过光束整形系统后的快轴发散角需达到 65°,慢轴发散角需达到 30°(图 1,图 2)。通过对激光器光场能量测

试数据进行拟合计算, 得到两个轴向上的功率概率密度函数, 如下^[3]:

$$\begin{cases} f_x = a_x \times \exp\left[-\left(\frac{\theta_x - b_x}{c_x}\right)^2\right] \\ f_y = a_{y1} \times \exp\left[-\left(\frac{\theta_y - b_{y1}}{c_y}\right)^2\right] \times \left[1 - a_{y2} \times \left(\frac{\theta_y - b_{y2}}{c_y}\right) + a_{y3} \times \left(\frac{\theta_y - b_{y2}}{c_y}\right)^2 + a_{y4} \times \left(\frac{\theta_y - b_{y2}}{c_y}\right)^4\right] \end{cases} \quad (1)$$

式中各参数值如表 1 所示。

表 1 概率密度函数参数

Tab. 1 Parameters of probability density function

参数	a_x	b_x	c_x	a_{y1}	a_{y2}
数值	5.58	0.820 7	16.91	9.508	-0.562
参数	a_{y3}	a_{y4}	b_{y1}	b_{y2}	c_y
数值	0.144 5	0.237 8	-0.181 6	-2.311	3.626

由两个轴向功率密度函数, 即可得到激光器的发射功率:

$$P(\theta_{x1}, \theta_{x2}, \theta_{x3}, \theta_{x4}) = P_0 \times \frac{\int_{\theta_{x1}}^{\theta_{x2}} f_x d\theta_x \int_{\theta_{y1}}^{\theta_{y2}} f_y d\theta_y}{\iint f_x f_y d\theta_x d\theta_y} \quad (2)$$

式中: $P_0 = 100 \text{ W}$, $\iint f_x f_y dx dy = \int_{-40}^{40} f_x dx \int_{-20}^{20} f_y dy = 1.271 3 \times 10^4$ 。

激光器发射功率分布情况如图 3 所示。

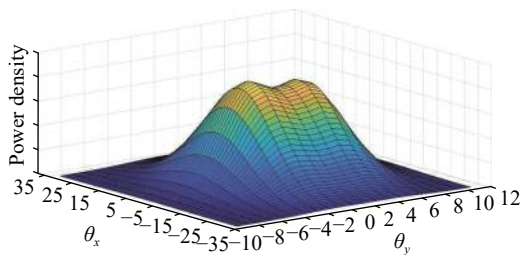


图 3 激光器光场能量拟合的概率密度函数图

Fig. 3 Probability density function of laser field energy fitting

可以看到, 高斯光束中心的光场能量有所凹陷, 分布不是均匀的。

先假设接收光学系统在对物体成像的过程中, 每一个物点的发光强度都相同, 接收系统所接

收到的光能量则取决于这个物点相对于接收镜头的接收立体角大小^[4-5]。

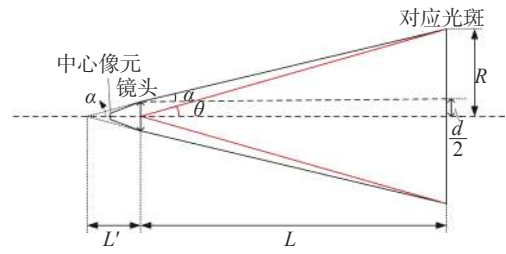


图 4 中心单位像元接收功率示意图

Fig. 4 Schematic diagram of receiving power of central unit pixel

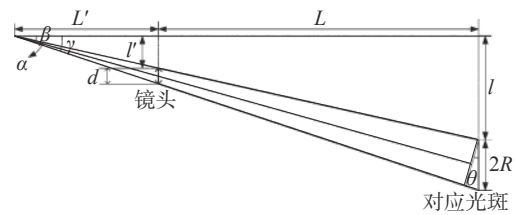


图 5 边缘单位像元接收功率示意图

Fig. 5 Schematic diagram of receiving power of edge unit pixel

在目标物体返回能量的计算中将物体表面作为 Lambert 面。主激光器在 65° 视场内的发射功率不均匀, 假设在每个视场内, 镜头所接收到的通光口径均为 $15/1.4$, 不考虑各种像差, 现选取中心 (图 4)、快轴、慢轴边缘 (图 5) 视场单个像元计算接收功率。可算出中心像元上接收到的光功率为:

$$p' = \frac{\Omega_A}{2\pi} \times p \times \eta_r \quad (3)$$

其中 Ω 为物体上光斑对应的立体角, p 为立体角内激光器的发射功率; η_r 为量子效率。

$$\Omega_1 = \frac{\pi R^2}{L + L'} \quad (4)$$

$$\Omega_{2,3} = \frac{\pi R^2 \cos \theta}{\left(\sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \sqrt{L^2 + (L + L')^2}\right)^2} \quad (5)$$

通过求得的三点的接收功率 P , 可计算出接收面的填充因子为 26.067%, 由此可以求得光子数为:

$$\mu_p = 5.034 \times 10^{24} P \lambda t \times 26.067\% \quad (6)$$

量子效率设置为 20%, 将其转换为电子数:

$$\mu_c = \mu_p \times 20\%, \quad (7)$$

则电压为:

$$U = q \times \mu_c / C, \quad (8)$$

最终计算结果如表 2~3 所示。

表 2 积分时间为 1.2×10^{-6} s 单像元接收光能量的光电转换值

Tab. 2 Photoelectric conversion value of single pixel receiving light energy when integration time is 1.2×10^{-6} s

项目	光子数	电子数	电压 / V
中心	3.024×10^3	604.796 8	6.451×10^{-4}
快轴边缘	26.157 0	5.231 4	5.580×10^{-6}
慢轴边缘	26.157 0	4.761 1	5.078×10^{-6}

表 3 积分时间为 2×10^{-2} s 单像元接收光能量的光电转换值

Tab. 3 Photoelectric conversion value of single pixel receiving light energy when integration time is 2×10^{-2} s

项目	光子数	电子数	电压 / V
中心	5.040×10^7	1.008×10^7	2×10^{-2}
快轴边缘	$4.359 5 \times 10^5$	$8.719 0 \times 10^4$	10.751 9
慢轴边缘	$3.967 6 \times 10^5$	$7.935 2 \times 10^4$	0.093 0

根据以上的结果分析,快慢轴边缘接收到的能量只有中心视场像元上的 1%,差值在两个数量级以上。因此,为了保证边缘接收能量损失尽量小,镜头相对孔径尽可能大,要尽可能地提高边缘的相对照度,最终确定的光学参数如表 4 所示。

表 4 光学参数表

Tab. 4 Optical parameter table

Items	Requirement
Field of view(FOV)/(°)	76
Relative aperture	1/1.4
Focal length/mm	15
Spectral range/ μm	0.895~0.910
Relative distortion @ 0.8 FOV	<10%
Llumination uniformity	<10%
Dispersion spot radius/ μm	20
MTF@20 lp/mm	>0.5

3 光学系统分析

3.1 结构选型分析

作为一款大相对孔径,大视场的激光接收镜头,光学系统结构选择对保证像面相对照度的均匀性以及球差、彗差、色差的校正极为关键。

全塑非球面镜头一般用于手机成像,如图 6 所示,其相对孔径为 1/2~2.8 等,视场为 $65^\circ \sim 75^\circ$,在结合曲面感光器件情况下,相对孔径能够达到 1/1.2。此结构的相对孔径和视场均可满足设计要求,但由于塑胶材料的镜片口径不宜做的太大,且其边缘视场的相对照度一般为 0.4~0.6,因此不能满足要求。

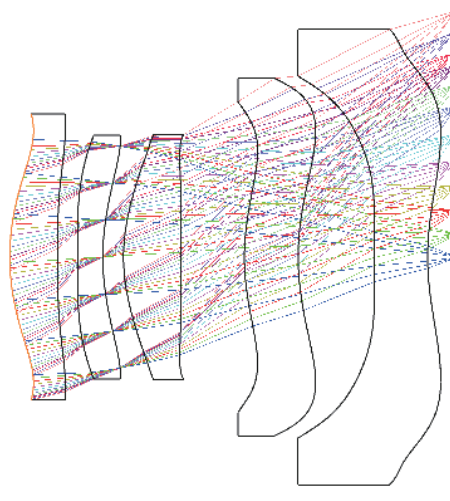


图 6 全塑非球面光学镜组

Fig. 6 All plastic aspheric lens group

对称式的双高斯结构无论对球差还是色差都能很容易校正,但是随着轴外光线入射角的增大,会有较大的像散,同时受到轴外球差与高级像散的制约,对于本文设计的光学系统的 76° 视场,进行轴外像差校正很难。其相对孔径一般推进到 1/2,并在大相对孔径大视场下会采取边缘视场渐晕^[6]以提高成像质量,如图 7 所示。

望远距广角物方远心镜组的前负镜组具有较大的视场,同时对较大视场情况下的场曲和畸变进行校正,后正镜组具有较大的相对孔径,如图 8 所示,对大孔径的边缘光线使用后透镜组进行像

差修正,并通过合理放置光阑形成物方远心,以提高边缘视场的相对照度。综上所述,使用反远距广角物方远心结构更有利于实现本次设计指标。

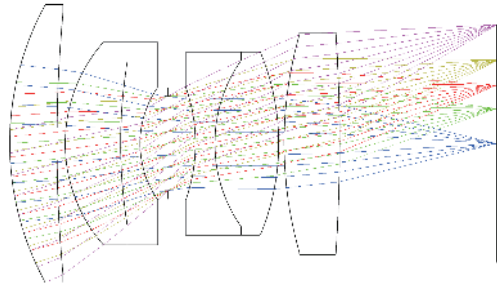


图7 双高斯光学镜组

Fig. 7 Double gaussian optical lens group

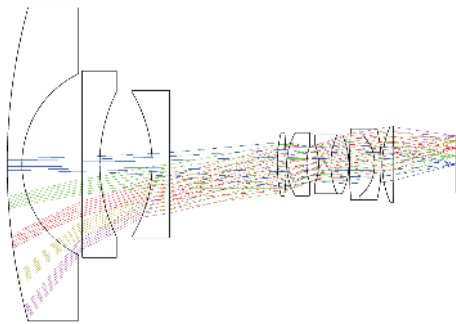


图8 反远距光学镜组

Fig. 8 Reflective telephoto optical mirror group

3.2 设计理论分析

对于大相对口径大视场的激光能量接收镜头,如果为了提高成像质量而使大视场的边缘视场渐晕或者使用变密度中性滤光片均是不可取的,因为这两种方法不利于照度的均匀性和光照度的提升,像面照度公式为:

$$E'_\omega = \pi \xi \eta_\omega \left(\frac{n'}{n}\right)^2 K_{1\omega} K_{2\omega} \sin^2 U' \cos^4 \omega', \quad (9)$$

式中: ξ 为物面亮度, η_ω 为系统各视场的透射率, $K_{1\omega}$ 、 $K_{2\omega}$ 为不同视场的渐晕系数和像差渐晕系数^[7-8], U' 为轴上物点成像光束的像方孔径角的最大值, ω' 为轴外像点所对应的像方半视场角,可以引入像差渐晕,使 $K_{2\omega}$ 大于 1 以提高轴外像面的相对照度。

图9为反远距物镜结构图。设 φ_1 、 φ_2 为前后组的光焦度, d_1 、 d_2 分别为前组到光阑的距离和光阑到后组的距离, h_1 、 h_2 为第一近轴光线在前

后组的入射高度, h_{p1} 、 h_{p2} 分别为第二近轴光线在前后组的入射高度, u'_2 为第一近轴光线在后组的入射角; u_{p1} 、 u'_{p2} 分别为第二近轴光线在前组入射角和后组的出射角。在归一化条件下令 $\varphi_1=1$, $h_1=1$, $u_{p1}=-1$ 。

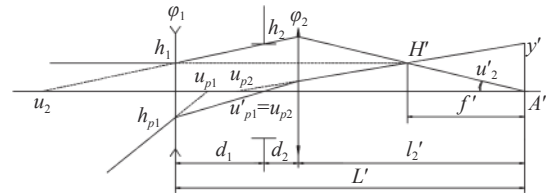


图9 反远距物镜结构图

Fig. 9 Reflective telephoto objective structure

假设光阑在前组与后组之间,设前组主光线角放大率的倒数为 γ_1 ,经推导有:

$$\frac{1}{\gamma_1} = \frac{u_{p1}}{u'_{p1}} = 1 - d_1 \varphi_1. \quad (10)$$

系统的主光线角放大率为 γ :

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{u_{p1}}{u'_{p2}} = \frac{1 - d_1 \varphi_1}{d_2 \varphi_2 - 1}. \quad (11)$$

由式(10)可知,前后组的间距 d_1 是影响 γ_1 的重要参数。由式(11)可知,系统的主光线角放大率由 d_2 和 φ_2 决定,当前组的放大率确定后,后组的放大率也随之确定,同时增大 φ_1 、 φ_2 ,则 d_1+d_2 会减小,这有利于减小镜头的整体尺寸,而 d_1 和 d_2 的大小决定了光阑位置,本系统中,前组要具有大的视场,后组要具有大的相对孔径。为了使整个光学系统结构紧凑,在保证光阑合理放置的同时还要兼顾前组与后组的结构,以对像差进行校正,见图10。

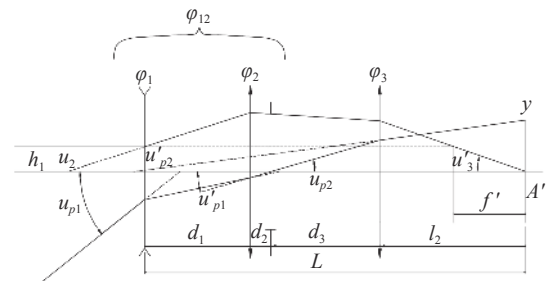


图10 复杂前组及后组结构图

Fig. 10 Complex pre-group and post-group structure diagram

假设光阑同样在前组与后组之间, 设前组主光线角放大率的倒数 γ'_1 为:

$$\frac{1}{\gamma'_1} = \frac{u_{p1}}{u'_{p2}} = 1 - d_2\varphi_2 = 1 - (d_1 + d_2) + d_2(\varphi_{12} - \varphi_1), \quad (12)$$

而系统的主光线角放大率为 γ' :

$$\frac{1}{\gamma'} = \frac{u_{p1}}{u'_{p3}} = \frac{1 - d_2\varphi_2}{d_3\varphi_3 - 1}. \quad (13)$$

由式 (12) 可知, 当 $\varphi_{12} > \varphi_1$ 时, $1/\gamma'_1$ 能取得最大值, 当保持 φ_{12} 不变增加 φ_1 、 φ_2 , 则可以使 d_1+d_2 减小, 这样有利于减小小镜片口径和结构总长。

若主光线和高斯像面交点的高度不等于理想像高时就会产生畸变, 其随视场的变化而变化, 各折射面所产生的畸变^[9]可以表示为:

$$\begin{aligned} \sum_i^k S_V &= 2n'_k u'_k \cos U'_{pk} DT'_k - 2n_i u_i \cos U_{pi} DT_i \\ &= \sum_i^k \{l_p u_p n_i (i'_p - u_p)(i_p - i'_p) + j(u_p^2 - u'_p{}^2)\}. \end{aligned} \quad (14)$$

畸变以 U_p 的三次方的速度增大, 高级畸变则与视场角 U_p 的五次、七次...幂成正比, 当视场角增大时主光线与球面法线夹角 U 的余弦 $\cos U$ 与 $1 - 1/2U^2$ 的差值增大是产生高级畸变的主要原因。因此设计过程中复杂前组结构、增加前组空气间隔、增大前组的口径与半径将有利于减小边缘视场主光线与光学系统第一面 R_1 之间的夹角, 降低高级畸变, 同时也可以提高边缘视场照度。在大视场大相对孔径光学系统中, 前组口径以及视场的增大所带来的球差、彗差、像散等则需要通过后组复杂化或者拼接镜头进行校正。

前组的放大率倒数决定着光阑彗差的大小, 但光阑彗差只是增加像面照度的其中一种方法, 从光学系统的整体要求来看, 系统的结构形式以及光阑的位置等因素对系统的成像质量才是决定性的。

4 设计实例

4.1 设计过程

初始结构为美国专利库 1 569 号专利, 其视

场为 160° 、相对孔径为 $1/3.5$ 、焦距为 15 mm , 相对照度为 0.75 , 如图 11 所示。

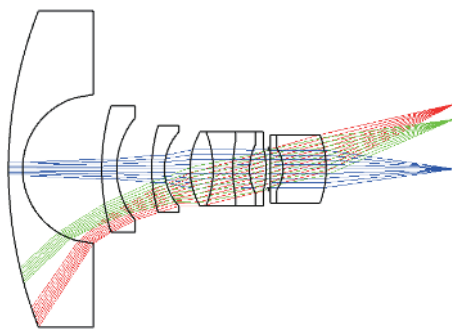


图 11 广角反摄远光学系统初始结构图

Fig. 11 Initial structure of wide-angle inverse telephoto optical system

首先将初始结构的视场设置到需要大小, 并进行初步优化, 同时在确保像差合理的基础上减少四胶合镜镜片的数目, 分化后双胶合镜组, 之后将光阑放置于第三片透镜之后, 经后正透镜组而形成物方远心, 以减小边缘视场光线在每个面上的入射和出射角度。同时在优化过程中适时选择第八面并严格控制其光线出射角在 $\pm 15^\circ$ 以内, 用于保证 905 nm 窄带滤波片在 $\pm 15^\circ$ 内的高透过率特性, 将窄带滤波膜层镀于第八面以减少光学元件, 简化镜头结构。同时严格控制其他各面的入射和出射光角度不大于 50° , 以满足各种膜系的入射角度。

在对高级像差进行校正过程中可以采用玻璃混合形式, 引入的偶次非球面方程为:

$$Z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6 + \dots + A_7 r^{16}. \quad (15)$$

适当引入非球面用以校正大孔径带来的球差和大视场的彗差^[10-12], 可以简化系统结构以降低成本。此外, 还可以提升系统的相对孔径和视场, 用于减小光线在每个光学面的入射角度, 提升公差宽松度。最后, 引入偶次非球面用以校正大孔径带来的球差和彗差以及倍率色差, 同时引入一定的桶形畸变, 用以提高边缘视场的相对照度, 同时也在第三面引入非球面用于校正大孔径大视场带来的场曲。

如果将成像系统的第一面镜片和最后一面镜片之间考虑为一个黑盒,在 ZEMAX 中以无限远物距设计时,相对照度可以定义为边缘视场光线在垂直于主光线方向的横截面积相对于中心视场的截面积之比,即为照度之比^[1],则通过像方孔径角可以计算出在第一面镜片入射面的通光面积,提高边缘视场通光面积也是增强像面照度的手段。

在优化过程中,相对于中间视场,边缘视场在第一面 R_1 面上的有效面积不再是圆形,而是以子午方向的截距为短轴,弧矢方向为相等长轴的椭圆。根据椭圆面积公式,可以把边缘视场光线在第一面 R_1 的子午平面内垂直于主光线方向的相对于轴上光线的边缘光线宽度作为第一面上有效面积的等效值而作为优化目标,以提高在边缘视场的光通量,从而提高边缘视场的相对照度。

最终设计的反远距广角物方远心镜头的前组由两片弯曲的负透镜组和一片正透镜组成,两片负透镜组间隔一定距离以对大视场光线进行聚拢,将光阑放置于第三片透镜之后,用于对大视场角的光线进行汇聚,从而引入光阑彗差以提高边缘视场光束的通光口径。

材料方面,前端镜片和和后镜组使用折射率 n_d 大,色度系数 ν_d 小的重镧火石玻璃,用于解决大视场光线入射角大但不能提供足够大光焦度的问题,同时也减小光线的入射和出射角度,提升系统公差宽松度。中间镜组使用折射率 n_d 小,色度系数 ν_d 大的轻火石玻璃并配以空气层厚度对光线进行精细调制。

设计结果如表 5 所示,其中 12、13 面的偶次非球面高次项系数如表 6 所示。

表 5 光学结构参数

Tab. 5 Parameters of optical structure

Surface	Radius/mm	Thickness/mm	Glass	Conic
1OBJECT	37.384	2	H-ZLAF53B	0
2	15.434	8		0
3	36.146	3	EP8000	-3.241
4	17.647	15		-0.111
5	32.146	6	H-QF3	0
6	-45.553	1		0
7STOP	Infinity	8.394		0
8	-58.153	3	H-ZLAF92	0
9	-124.417	0.957		0
10	95.702	4.927	H-ZLAF90	0
11	-53.595	0.723		0
12	2 848.534	4	EP8000	39.972
13	-67.378	28.409		9.173
14IMACE	Infinity			

表 6 非球面高次项数据表

Tab. 6 High-order data of aspheric mirror

Surface	2nd	4th	6th	8th
12	0	-1.573×10^{-5}	2.001×10^{-8}	-9.333×10^{-10}
13	0	1.065×10^{-5}	-7.026×10^{-8}	3.473×10^{-10}
Surface	10th	12th	14th	16th
12	4.642×10^{-12}	-1.225×10^{-14}	-1.047×10^{-17}	9.050×10^{-20}
13	-2.131×10^{-12}	-1.311×10^{-14}	3.658×10^{-17}	-6.123×10^{-20}

4.2 像质评价

光学系统各视场的点列图如图 12 所示,各视场的弥散斑点列图如图 13 所示。

最大弥散斑 RMS 半径为 $12.2 \mu\text{m}$, 小于一个像元半径,满足要求。

图 14 为光学系统 MTF 曲线图,其奈奎斯特频率为 15 lp/mm , 查看 20 lp/mm 的 MTF 值发现其平均值大于 0.63, 最边沿视场大于 0.58, 满足成像质量要求。

图 15 为光学系统相对照度图。

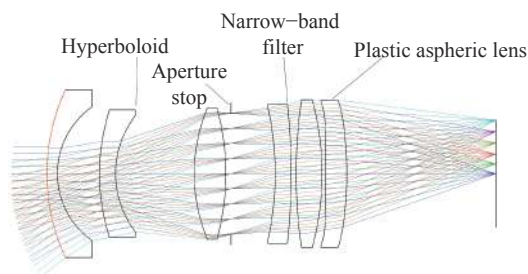


图 12 采用本文设计结果的光学系统结构图

Fig. 12 Structure diagram of optical system applied the design results in this paper

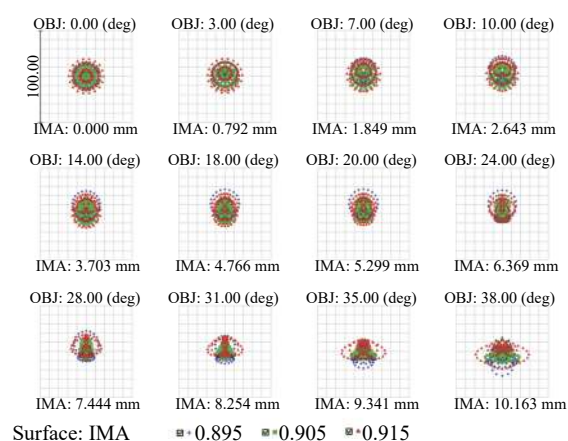


图 13 光学系统弥散斑点列图

Fig. 13 Dispersion speckle pattern of optical system

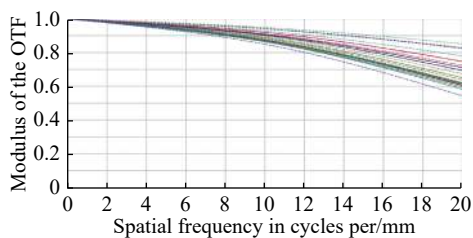


图 14 光学系统 MTF 曲线图

Fig. 14 MTF curves of optical system

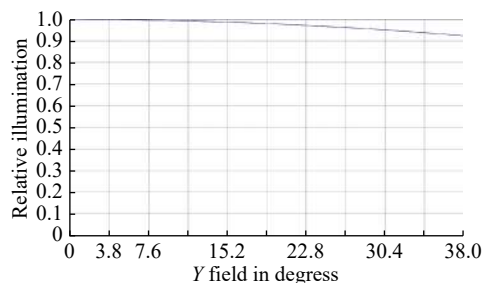


图 15 光学系统相对照度曲线图

Fig. 15 Relative illumination curve of optical system

从图 15 可以看出,其相对照度在边缘视场的不均匀性小于 7.2%,像面照度分布均匀。

图 16 为光学系统场曲畸变图。可见,在 0.85° 视场下,其相对畸变小于 8%。

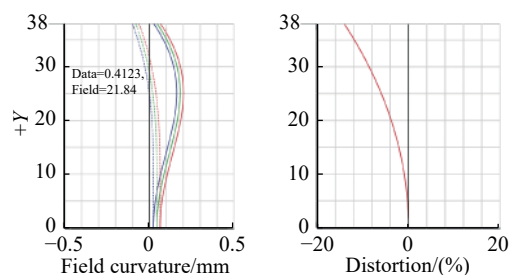


图 16 光学系统场曲畸变图

Fig. 16 Field distortion diagram of optical system

5 公差分析

大相对孔径镜头在装调时仅靠空气间隔去补偿加工装调误差是不够的,应该通过补偿器去补偿同心误差和离焦误差,通过灵敏度仪器分析系统的加工误差和装调误差,如表 7 所示。

表 7 公差参数表

Tab. 7 Tolerance parameters

Items	Value
Fringe power/ λ	3~5
Surface irregular/ λ	0.2~0.3
Thickness/mm	0.05~0.08
Airspace/mm	0.01~0.02
Tilt/($^\circ$)	0.5~0.9
Decenter&Roll/mm	0.05~0.07
Refractive index	0.000 5~0.000 7
Abbe number	0.005~0.007

在进行公差分析时,通常先给出比较宽松的初始值,通过反复的灵敏度分析去放松或收紧相对影响较小或较大的某几项公差值,在像差等相关设计指标可接受的下降范围内力求使公差值取最大,便于加工装调,减小生产成本,提升物镜的经济性。图 17 为系统衍射圆包围能量图。

在经过 80 次 Monte Carlo 灵敏度分析后的 MTF 曲线如图 18 所示。可见,其 MTF 值在 20 lp/mm 处为 0.5,满足公差分析要求。

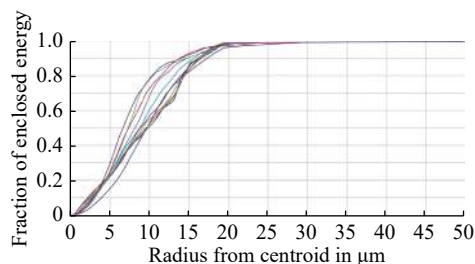


图17 系统衍射圆包围能量图

Fig. 17 Energy diagram of diffraction circle surrounded system

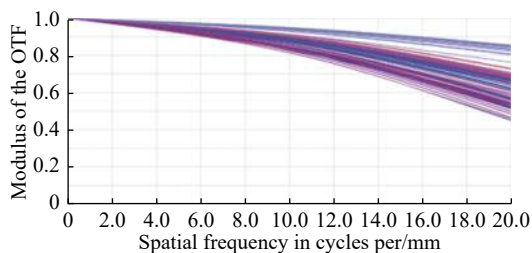


图18 80次 Monte Carlo 灵敏度分析后 MTF 曲线

Fig. 18 MTF curves after 80 Monte Carlo sensitivity analyses

6 结论

针对固态面阵激光雷达光学系统具有大相对孔径及照度均匀的特点,通过对发射激光器进行光场能量拟合和光学建模,计算快慢轴边缘像元接收能量,指导给出光学参数,最终通过分析光学系统结构,指出在大相对孔径和大视场光学系统下,使用反射远结构对前组的复杂化以及扩大口径及半径,同时合理放置光阑引入光阑像差以提升边缘视场照度,对后组的复杂化以降低像面光线入射角是提高成像质量和增强像面均匀的关键。

最终所设计的系统结构采用6个镜片,其中一个是高次非球面,实现了在大视场大相对孔径下的均匀像面照度,整个系统结构简单,利于装配。

系统工作波长 $\lambda = 905(\pm 5)$ nm, 焦距为 $f' = 15$ mm, 相对孔径为 $1/1.4$, 视场为 $2\omega = 76^\circ$, 系统总长小于77 mm, MTF 值在20 lp/mm 大于0.5, 在 0.85° 视场相对畸变小于8%, 像面照度不均匀性小于7.2%, 满足激光雷达探测要求。

参考文献:

- [1] 孙明阳. 自动驾驶汽车模块化设计研究[J]. *工业设计*, 2019(9): 47-48.
SUN M Y. Research on the modular design of self-driving car[J]. *Industrial Design*, 2019(9): 47-48. (in Chinese)
- [2] 陈琛, 胡春海, 李维善, 等. 物镜像面相对照度计算方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(11): 1108001.
CHEN CH, HU CH H, LI W SH, *et al.*. Calculation method of relative illumination of lens image plane[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 1108001. (in Chinese)
- [3] 罗萍萍, 桑思晗, 史文宗, 等. 基于FFT算法的激光有源非稳腔光场分布数值计算方法[J]. *航天返回与遥感*, 2019, 40(4): 86-94.
LUO P P, SANG S H, SHI W Z, *et al.*. Numerical calculation method of light field distribution for active unstable cavity resonator based on FFT algorithm[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2019, 40(4): 86-94. (in Chinese)
- [4] 梁效文, 石磊. 一种便携式干涉仪动镜系统的设计[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(10): 3255-3259.
LIANG X W, SHI L. Design of a moving mirror scanning system for portable interferometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(10): 3255-3259. (in Chinese)
- [5] 吴春婷, 姜研, 戴通宇, 等. $2\mu\text{m}$ 掺钛固体激光器研究进展[J]. *发光学报*, 2018, 39(11): 1584-1597.
WU CH T, JIANG Y, DAI T Y, *et al.*. Research progress of $2\mu\text{m}$ Ho-doped solid-state laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(11): 1584-1597. (in Chinese)
- [6] 丁莹, 范静涛, 权巍, 等. 视觉系统光学渐晕效应非线性补偿方法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2017, 57(7): 702-706.
DING Y, FAN J T, QUAN W, *et al.*. Nonlinear compensation for optical vignetting in vision systems[J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2017, 57(7): 702-706. (in Chinese)
- [7] 薛庆生. 星载超广角气溶胶探测仪均匀像面性光学设计[J]. *光子学报*, 2012, 41(1): 15-20.
XUE Q SH. Optical design of spaceborne low-distortion and super-wide-angle aerosol imager[J]. *Acta Photonica*

- Sinica*, 2012, 41(1): 15-20. (in Chinese)
- [8] 王永仲, 周金鹏, 宫武鹏. 超大空域凝视光学系统的光阑像差[J]. *应用激光*, 1998, 18(5): 200-202.
WANG Y ZH, ZHOU J P, GONG W P. The stop aberrations and aberration vignetting of fish-eye lenses or extreme wide-angle objectives[J]. *Applied Laser*, 1998, 18(5): 200-202. (in Chinese)
- [9] 王之江. 光学设计理论基础[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 1985: 103-110.
WANG ZH J. *Theoretical Basis of Optical Design* [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 1985: 103-110. (in Chinese)
- [10] GAJ M. Fifth-order field aberration coefficients for an optical surface of rotational symmetry[J]. *Applied Optics*, 1971, 10(7): 1642-1647.
- [11] 赵肇雄, 刘勇. 初级慧差对圆偏振涡旋贝塞尔-高斯光束聚焦场的影响[J]. *中国激光*, 2010, 37(3): 739-742.
ZHAO ZH X, LIU Y. Effect of primary coma aberration on focusing of a circularly polarized vortex Bessel-Gaussian beams[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(3): 739-742. (in Chinese)
- [12] 李维善, 陈琛, 刘宵婵, 等. 球幕投影数字鱼镜头的光学设计[J]. *应用光学*, 2016, 37(1): 39-44.
LI W SH, CHEN CH, LIU X CH, *et al.*. Optical design of digital fish-eye lens for dome-screen projector[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(1): 39-44. (in Chinese)

作者简介:



魏 雨 (1992—), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 主要从事光学系统设计、光学精密仪器设计方面的研究工作。
E-mail: 544874529@qq.com



蒋世磊 (1963—), 男, 河北石家庄人, 教授, 主要从事光学精密仪器设计, 光电检测与校正技术方面的研究工作。
E-mail: 2429765449@qq.com