

采用衍射主镜的大口径激光雷达接收光学系统

朱进一^{1,2}, 谢永军¹

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 衍射光学系统在大口径激光雷达接收器应用方面很有潜力。分析了衍射主镜引入的负色散对激光雷达成像质量的影响。讨论了插入高色散玻璃和基于 Schupmann 原理的两种消色差方案的优劣。基于 Schupmann 原理的消色差系统质量轻、像质好, 系统光透过率在 60% 以上。设计了 1 m 口径、 $f/8$ 、最大视场角 1 mrad 的激光雷达接收光学系统。成像质量接近衍射极限。

关键词: 光学设计; 激光雷达; 衍射透镜; 消色差

中图分类号: O43 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0518001

Large aperture lidar receiver optical system based on diffractive primary lens

Zhu Jinyi^{1,2}, Xie Yongjun¹

(1. State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Diffractive optical systems are promising in large aperture lidar receiver applications. The negative dispersion effect on lidar image quality caused by the diffractive primary lens was analyzed. Two chromatic aberration correcting methods, inserting high dispersion glass and adopting Schupmann theory, were discussed. An achromatic system based on Schupmann theory was lightweight, and provided perfect image quality. And the system light transmittance was over 60%. A design of lidar receiver optical system with 1m aperture and 1 mrad max FOV was demonstrated, and the system $f/\#$ was 8. The image quality attained diffraction limit approximately.

Key words: optical design; lidar; diffractive lens; achromatic

收稿日期: 2016-09-11; 修订日期: 2016-10-20

作者简介: 朱进一(1991-), 男, 硕士生, 主要从事衍射光学系统设计方面的研究。Email: zhujinyi@opt.cn

导师简介: 谢永军(1974-), 男, 研究员, 博士, 主要从事二元光学元件与应用方面的研究。Email: yjxie@opt.ac.cn

0 引言

星载激光雷达因其探测距离远、范围大、精度高等优势,在森林调查、环境监测、地形测绘、大气与气象探测、空间探测和行星探索等领域有着广泛应用^[1-4]。为了适应实际应用中不断提出的扩大激光雷达探测范围、提升探测精度和灵敏度的需求,研制大口径的激光雷达接收光学系统的重要性显得越发突出。Simonetti 等在欧洲空间局的“先进激光雷达概念”(Advanced Lidar Concepts)下研究了 4 m 口径反射式激光接收望远镜的设计^[5]。一些通用的星载大口径光学系统也在研制当中,远期目标达到 10 m 以上^[6-7]。

然而,大口径光学系统的实现正越发受到系统质量和面形精度两大因素的制约。折射系统由于质量面密度过大($\times 10^3 \text{ kg/m}^2$ 量级),目前已很少用于大口径光学系统^[8]。新型反射系统的质量面密度已大幅减小,达到 $\times 10 \text{ kg/m}^2$ 量级^[9]。但是,反射镜对面形精度有着较高要求($\sim \lambda/20$ 量级)。当反射主镜,特别是非球面反射主镜的口径增大时,对面形精度的高要求会增加加工和检测等方面的难度,大幅提升系统研制成本。

采用新型的衍射光学系统可以很好地解决这两个问题。在系统质量方面,衍射主镜由于不依靠光学材料和球面结构会聚光束,因此对光学材料的需求量很少。不考虑支撑结构,衍射主镜质量面密度低至 $\times 10^{-1} \text{ kg/m}^2$ 量级^[10]。在面形精度方面,衍射透镜作为透射式元件,其面形误差对出射光程的影响较小,因此其面形误差容忍度很高^[10-11]。此外,衍射透镜的平板形状使其在实现拼接、折叠、展开等技术方面与曲面形状光学元件相比存在更大便利。因此,衍射光学系统成为发展大口径光学系统极具潜力的选项之一。

目前,对衍射光学系统的研究主要集中在成像系统方面。Hyde 等提出的 Eyeglass 设想,以 20 m 直径衍射主镜构成的系统长度达到 2 km^[6]。Raksataya 等报道了用边长 200 mm 的非涅耳阵列透镜作主镜的衍射望远镜,系统长度为 18 m^[12-13]。其中,过长的系统长度是衍射光学系统设计中的一个有待解决的问题。美国国防部先进研究计划局(DARPA)支持的薄膜光学实时成像系统(MOIRE)项目正在进行 f 数 6.5 的大口径(最终将达到 10 m)衍射主镜的制造^[14],并

计划由其组成大口径衍射光学系统。然而,对于将大口径衍射光学系统用于星载激光雷达的研究还不多见。

文中在讨论衍射主镜大口径激光雷达接收光学系统的原理和可行性的基础上,分析了衍射光学系统中的色差和色差校正问题。基于 Schupmann 原理的简化消色差系统质量轻、像质好,光透过率高于 60%。设计了 1 m 口径,1 mrad 最大视场角,系统 f 数为 8 的光学系统。像质接近衍射极限,系统总长度不超过 10 m。

1 原理

如图 1 所示,理想衍射透镜的截面具有锯齿形的连续表面结构。入射光在经过表面微结构时被衍射到设计的工作级次上,实现衍射透镜会聚光束的目的。



图 1 连续表面结构的衍射透镜

Fig.1 Diffractive lens with continuous surface

对于设计波长的一级衍射而言,衍射透镜表面相邻锯齿间存在 2π 的相位差。各锯齿环深度一致。锯齿环的宽度随着其远离透镜中心而逐渐变窄,至最外环达到最小值:

$$w_{\min} = \frac{2\lambda_0 f_1}{D} = 2\lambda_0 f_{\#} \quad (1)$$

式中: λ_0 为设计的工作波长; f_1 为一级衍射焦距; D 为透镜直径。 w_{\min} 被称为最小特征尺寸。工作波长一定时,透镜 f 数越大,最小特征尺寸越大。小 f 数的主镜有利于缩短系统长度,但会导致最小特征尺寸的减小。在实际加工中,衍射透镜的加工工艺应当胜任对最小特征尺寸的加工。

若一级衍射下加工工艺不能满足对最小特征尺寸的加工,可以采用高级次衍射。由于衍射透镜 m 级衍射焦距为:

$$f_m = \frac{f_1}{m} \quad (2)$$

因此最小特征尺寸又可以表示为:

$$w_{\min} = \frac{2\lambda_0 m f_m}{D} \quad (3)$$

这就意味着,若采用 m 级衍射的同时,保持衍射透镜焦距不变,则最小特征尺寸扩大为原来的 m 倍。这为衍射透镜的加工和衍射光学系统的实现带来了便利。

衍射效率是评价衍射透镜的一个重要指标。在采用特定的衍射级次作为工作级次时,需要保证在该级次上有尽量高的衍射效率。根据标量衍射理论,连续表面结构衍射透镜的衍射效率为^[15]:

$$\eta_m = \text{sinc}^2(m - \kappa) \quad (4)$$

式中: $\kappa = \frac{(n-1)d}{\lambda_0}$, n 为透镜材料折射率, d 为锯齿深度。当 $d = \frac{m\lambda_0}{n-1}$ 时,波长 λ_0 的 m 级衍射效率可以达到 100%。公式(4)也说明,对锯齿深度 d 的控制是选择工作衍射级次的关键。

当入射光波长偏离设计波长时,衍射效率会随着其偏离量的增大而下降。对于宽波段成像而言,可以通过采用多层衍射元件等方式提升设计波段内的衍射效率^[16]。而对于激光雷达而言,由于工作波段极窄,衍射效率下降的影响可以忽略不计,因此激光雷达主镜可以采用单层衍射光学元件。

在实际应用中,由于加工连续表面结构在工艺上较为困难,因此,衍射透镜通常使用多次套刻形成的阶梯状二元浮雕结构来逼近连续表面结构,如图 2 所示。

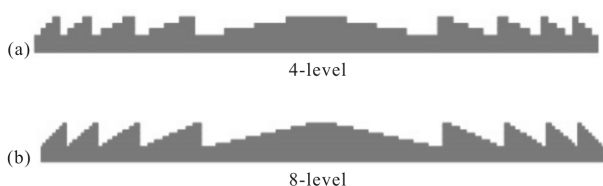


图 2 多台阶结构的衍射透镜
Fig.2 Multilevel diffractive lens

根据标量衍射理论,理想情况下 N 台阶二元浮雕结构的衍射效率为:

$$\eta_1 = \text{sinc}^2\left(\frac{1}{N}\right) \quad (5)$$

由公式(5)可知,3 次套刻形成的 8 台阶浮雕结构的衍射效率为 95%,4 次套刻形成的 16 台阶浮雕结构的衍射效率为 98.7%,接近连续表面结构理论上 100% 的衍射效率。

衍射透镜的自重变形误差、热变形误差以及镜

框与衍射透镜间的应力导致的镜面变形等因素构成了衍射透镜的面形误差。通常,大口径衍射透镜具有平板状的结构,其浮雕结构表面为工作面,另一表面为普通平面。因此,由面形误差引起的一个表面形变带来的入射光路径延迟被另一表面相同形变带来的相反延迟所补偿。在入射角较小时,衍射透镜的面形误差容忍度为反射镜的 $16f_{\#}^2$ 倍^[10]。因此,当衍射透镜 f 数大于 8 时,其面形误差容忍度将比反射镜提高 3 个数量级,达到 $\times 10 \mu\text{m}$ 量级^[11]。

衍射透镜在加工中受到刻蚀深度误差、校准误差、线宽误差和侧壁误差的影响^[17]。其中刻蚀深度误差和校准误差的影响较为重要。刻蚀深度误差达到 10% 时,衍射效率下降约 3%。而校准误差会影响到浮雕结构对应的相位信息。其精度一般认为应达到 $0.1 \mu\text{m}$ 。一般地,校准误差长度越小,或者衍射透镜 f 数越大,衍射效率下降越小。

目前,通过多次套刻加工衍射透镜的工艺已经基本成熟,并且可以达到较高的加工精度,以满足衍射透镜加工的需求。Jerald 等人公开报道了 4 台阶、 $f/3.1$ 的衍射透镜的加工^[18],在 633 nm 波长得到了大于 60% 的衍射效率。其加工的 800 mm 直径衍射透镜波前误差可达 30.4 nm RMS ^[6]。在国内,中国科学院西安光学精密机械研究所也具备同类衍射元件的加工能力^[19]。

衍射透镜仅依靠其表面浮雕微结构来改变光线传播,因此,其有效工作深度等于浮雕结构深度,通常在 $\times 10 \mu\text{m}$ 量级。所以,衍射透镜可以做到厚度小、质量轻。根据 MOIRE 项目的测算,考虑包括支撑和控制结构在内的整个光学系统, 10 m 口径衍射光学系统的质量约为 1.8 t ,而 6.5 m 口径的詹姆斯·韦伯太空望远镜采用反射光学系统,其光学系统质量约为 2.5 t ^[6]。

衍射透镜有着与普通折射透镜不同的热特性。普通透镜的光热膨胀系数由材料的线膨胀系数和折射率温度系数共同决定。而衍射透镜的光热膨胀系数主要与材料的线膨胀系数有关,而与其折射率特性关系较小^[20]。因此,在考虑衍射透镜热设计时,可以采用线膨胀系数较小的材料。例如熔融石英,其线膨胀系数约 $0.51 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 。此外,一些新型光学材料也因其较低的线膨胀系数而被用于衍射透镜加工^[6]。

衍射透镜的成像原理使其天然地引入了大的负

色散。以可见光波段为例,普通透镜的阿贝数通常在 30~60 之间。而衍射透镜的等效阿贝数根据公式

$$v_d = -\frac{\lambda_d}{\lambda_c - \lambda_r} \quad (6)$$

可以得到大约为-3.453 4。因此,衍射光学系统普遍面临色差校正的工作。

即使是对工作波段极窄的激光雷达,为了提高接收光信号的能量集中度,也不得不考虑色差校正的问题。衍射透镜非设计波长的焦距可以表示为:

$$f_m = \frac{\lambda_0 f_1}{m \lambda} \quad (7)$$

以口径为 1 m、焦距 10 m、工作波长为 1 064±0.1 nm 的衍射单透镜为例,其焦距将存在±1 mm 的偏移。如图 3 所示,该衍射透镜弥散斑直径为约 100 μm。而纵向像差图显示,此时的纵向色差达到±1 mm。可以发现,色差是影响像质的主要因素。

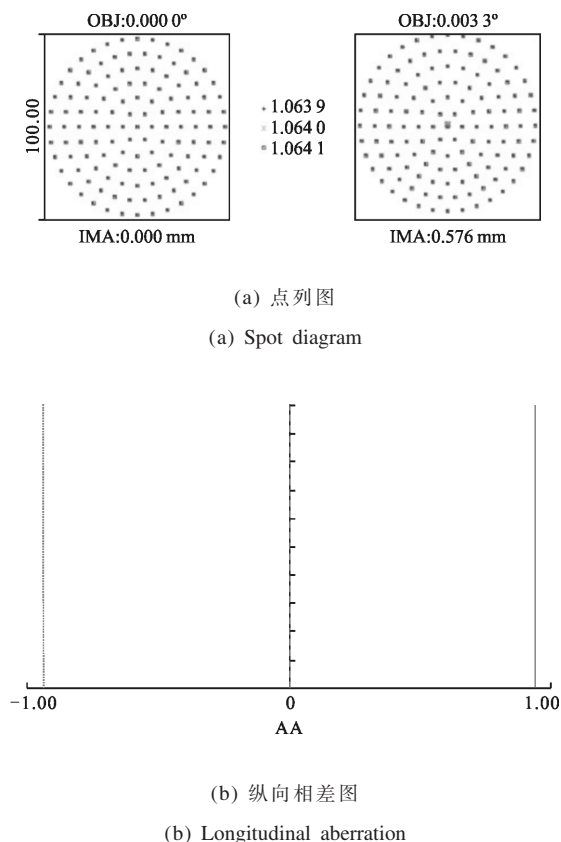


图 3 1 m 直径,10 m 焦距的衍射透镜
Fig.3 Diffractive lens with 1 m diameter, 10 m focal length

未来,随着激光雷达口径的进一步增大,色差的影响还会进一步凸显出来。消除大的负色差,有两条相对成熟的途径:一是在光路中插入高色散玻璃进

行色差补偿;二是采用 Schupmann 消色差原理校正色差。下面将以 1 m 直径、10 m 焦距的衍射主镜,1 064±0.1 nm 的工作波段为例,对这两种途径作具体介绍。

2 基于色散材料的色差校正

在衍射光学系统的光路中插入正色散材料,可以补偿主镜引入的负色散。用作色散补偿的玻璃应当具有小的阿贝数,以便用较少的材料引入较大的正色散。目前在产的玻璃中,高色散玻璃的阿贝数通常在 20~30 之间,部分玻璃阿贝数可到 20 以下。在选择高色散玻璃时,应当同时注意工作波长的透过率,避免光在高色散玻璃中产生过大的损耗。

如图 4 所示,高色散玻璃的使用使得系统色差降到了可以接受的范围。弥散斑直径大约为 20 μm。光学系统系统 f 数为 2、总长度 9.24 m。其中,两片透镜采用了高色散玻璃,且均为普通球面镜。

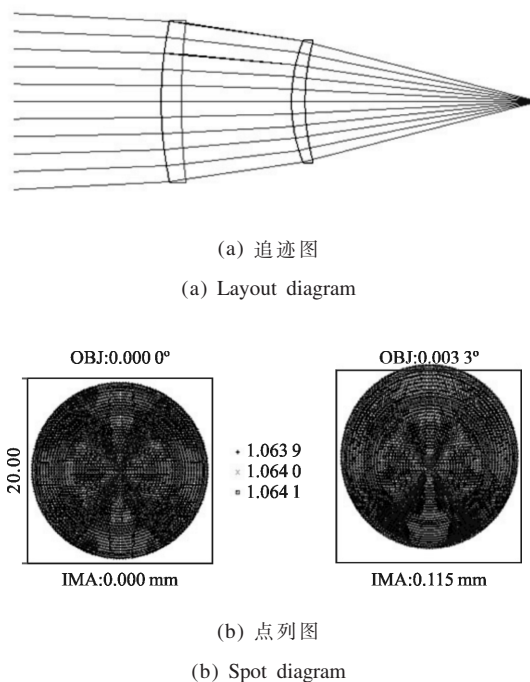


图 4 基于高色散玻璃的结构
Fig.4 Structure based on high dispersion glass

考虑系统光透过率。许多玻璃材料在 1 064 nm 都具有较高的透过率,其 10 mm 厚度的内透射比 τ_{10} 高于 99%。界面反射也会影响系统光透过率,但对于激光接收应用而言,镀增透膜可以降低设计波长的界面反射,达到 99% 以上的透过率。因此,高色散玻

璃的引入不会导致过大的损耗。主镜的衍射效率是决定系统透过率的关键因素。以 16 级台阶浮雕结构为例,其衍射效率理论上可达 98.7%。充分考虑加工、装调等过程中各种误差导致的衍射效率恶化,假设一片衍射透镜的衍射效率为 85%,那么系统光透过率可以达到 80%。

该途径面临的问题在于:尽管弥散斑尺寸已经大幅减小,但在本质上,高色散玻璃只在很小的程度上补偿了色散。图 4(a)所示结构中,弥散斑尺寸的减小更多地与光焦度有关。例如,采用与图 4(a)类似的结构,当系统 f 数等于 4 时,弥散斑直径约为 $40\ \mu\text{m}$ 。色差仍然显著影响了像质。因此,通过引入色散材料来校正色差,其适用范围有限。

3 基于 Schupmann 原理的色差校正

Schupmann 消色差原理指出,光学元件引入的色差,可以由位于该元件共轭像位置处相同色散、相反光焦度的光学元件来校正。Hyde 由此提出由衍射主镜、中继系统、校正镜和聚焦系统 4 部分组成的消色差结构^[21](图 5),以实现在较宽的光谱(如可见光)范围内校正色差。入射光在主镜上发生色散,不同频率的光以各自的衍射角出射。经中继光学元件会聚后,各频率光在空间上聚于一点,再经过校正镜引入正色散,使其以相同出射角出射,实现色差校正。最后经聚焦元件会聚到探测器上。

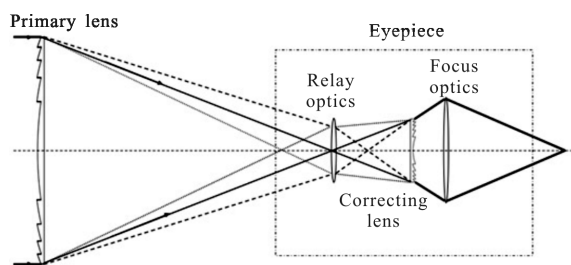


图 5 消色差衍射光学系统

Fig.5 Achromatic diffractive optical system

对于激光雷达,中继系统的存在使得上述针对宽光谱应用场景的结构显得过于复杂。一方面,根据 Schupmann 原理,中继系统的功能是将主镜成像到校正镜位置。它需要将主镜表面同一点出射的、因不同波长衍射角不同而产生的发散光重新会聚到一点。对激光而言,其发散角很小,在中继系统位置形

成的光斑也很小(在示例中只有约 $100\ \mu\text{m}$)。因此中继系统透镜的有效工作尺寸也很小,与光斑尺寸接近。另一方面,如果去掉中继系统,主镜出射的发散斑在校正镜表面也大约为 $100\ \mu\text{m}$ 。此后经过校正镜的色散补偿,同样可以实现色差校正的目的。因此,中继系统的存在对于工作波段较窄的激光而言意义不大,反而增加了系统复杂程度。

因此,对于激光雷达接收光学系统,可以采用由 3 个部分组成的消色差结构:主镜、色差校正部分和聚焦部分。主镜会聚入射光,使其进入口径较小的色差校正镜。色差校正镜利用负的衍射透镜将色差校正至可接受的水平。由于色差校正镜的 f 数绝对值较小,出射光线快速发散,因此,需要紧接或者胶合正透镜控制出射光轨迹。聚焦部分则用于校正单色像差,将光束聚焦到探测器上。

对于只有一片色差校正镜的系统而言,完成色差校正的条件是主镜和校正镜在光焦度上满足如下要求^[21]:

$$\Phi_{FC} = -\frac{1}{\eta^2} \Phi_{MG} \quad (8)$$

式中: Φ_{MG} 为主镜光焦度; Φ_{FC} 为校正镜光焦度; η 为垂轴放大率,即两者直径之比:

$$\eta = \frac{D_{FC}}{D_{MG}} \quad (9)$$

主镜和校正镜在焦距上应满足:

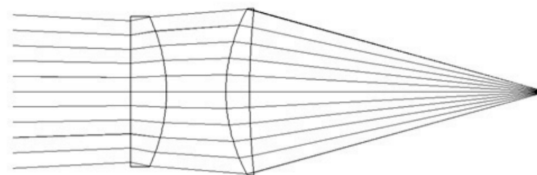
$$F_{FC} = \eta^2 F_{MG} \quad (10)$$

则在 f 数上应满足:

$$f_{FC} = \eta f_{MG} \quad (11)$$

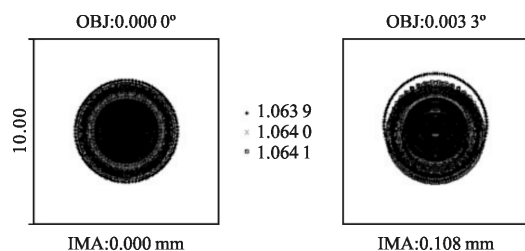
这就意味着,直径 1 m、焦距 10 m 的衍射主镜引入的负色散,理论上可以被例如直径 0.1 m、焦距 0.1 m 的负衍射透镜,或直径 0.15 m、焦距 0.225 m 的负衍射透镜引入的正色散完全抵消。为减小后续透镜序列尺寸,校正镜尺寸通常较小,因而其 f 数也较小,加工精度要求高于衍射主镜。

如图 6 所示,经过色差校正镜的校正,弥散斑直



(a) 追迹图

(a) Layout



(b) 弥散斑

(b) Spot diagram

图 6 基于色差校正镜的结构

Fig.6 Structure based on chromatic aberration corrector

径小于 $10\ \mu\text{m}$ 。追迹图中的第 1 面为衍射面,用于色差校正。第 2、3 面采用了二次非球面。与高色散玻璃相比,衍射透镜更彻底地校正了色差,因而有更广的适用范围。

在系统光透过率方面,光主要在两个衍射透镜上发生损失。一般而言,对激光雷达系统透过率的最低要求在 60%~80%。与前面的讨论相同,仍然假设一片衍射透镜的衍射效率为 85%,同时假设经镀膜处理后的玻璃通过率为 99%。可以得到系统光透过率为 70.1%,满足对激光雷达接收光学系统的一般要求。进一步地,当衍射效率下降到 80%时,系统透过率仍能达到 62.1%。因此,采用基于 Schupmann 原理的简化消色差结构设计激光雷达接收光学系统是合理、可行的。

4 设计

上述设计在小 f 数、窄视场的条件下讨论了用色散材料和衍射透镜校正色差的效果。在实际应用中,系统往往需要较大的 f 数,以及更宽的视场。同时,在匹配探测器的前提下,也允许更大的弥散斑尺寸。

给出设计示例,主要系统参数包括:主镜直径 1 m,焦距 10 m,波长范围 $1\ 064\pm 0.1\ \text{nm}$,系统焦距 8 m,最大视场角 1 mrad,此时爱里斑直径为 $20.8\ \mu\text{m}$ 。采用基于 Schupmann 原理的简化消色差结构。系统环境设置为 $20\ ^\circ\text{C}$, 0 大气压。

设计的系统结构参数如表 1 所示。其中,第 1、3 面分别为主镜和校正镜的衍射表面,衍射级次均为 3 级。衍射透镜均为平板结构。衍射表面的相位系数取前三项。系统中涉及的曲面均采用普通球面,以便于加工和检测。

表 1 系统结构参数

Tab.1 System structure parameters

| Surface | Radius/mm | Thickness/mm | Glass |
|---------|---------------|--------------|----------|
| 1* | Infinity | 5 | F_SILICA |
| 2 | Infinity | 8 683.45 | |
| 3* | Infinity | 5 | F_SILICA |
| 4 | Infinity | 13.152 924 | LASF35 |
| 5 | -321.504 929 | 2.706 288 | |
| 6 | 316.125 345 | 16.530 761 | LAK31 |
| 7 | -2417.530 979 | 523.602 858 | |
| 8 | -89.646 974 | 5.049 076 | ZK1 |
| 9 | -93.675 642 | 528.778 274 | |

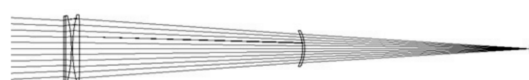
衍射表面的相位系数见表 2。其中第 3 面的相位系数需要根据校正镜与主镜的关系确定初始参数,再结合后续透镜的结构优化得到。此时,第 1 面的最小特征尺寸为 $63.91\ \mu\text{m}$,第 3 面为 $7.68\ \mu\text{m}$ 。可见,对第 1 面可以实现 16 级台阶结构的加工,每台阶宽度约 $4\ \mu\text{m}$ 。而对第 3 面,可采取更高精度进行 8 台阶加工,达到每台阶宽度 $0.96\ \mu\text{m}$;也可以考虑采用更高的工作级次,增大最小特征尺寸。3 级衍射下,两衍射面的锯齿深度均为 $7.19\ \mu\text{m}$ 。

表 2 衍射表面相位系数

Tab.2 Phase coefficients on diffractive surface

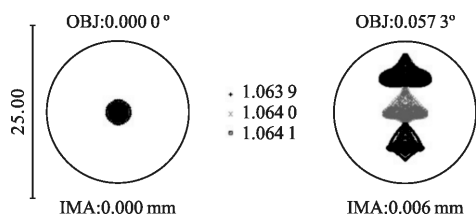
| Surface | 1* | 3* |
|----------------------|------------|-------------|
| Normalized radius/mm | 500 | 75 |
| Coefficient on p^2 | -24 612.83 | 30 442.17 |
| Coefficient on p^4 | 15.387 049 | 102.042 271 |
| Coefficient on p^6 | -0.019 194 | 16.945 114 |

所设计系统的长度为 9.783 m。如图 7 所示,弥散斑直径在全视场范围内小于 $20.8\ \mu\text{m}$ 的爱里斑直径。系统的轴向色差得到了良好的校正。最大视场处传递函数在 35 lp/mm 处下降到约 0.4。同时可以看到:随着视场增大,弥散斑表现出一定的垂轴色差。在星载激光雷达应用中,最大视场角往往小于 1 mrad,因此,垂轴色差影响较小。



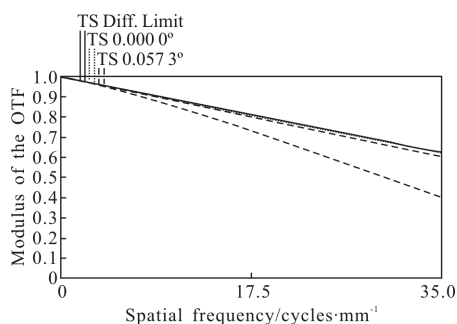
(a) 光路图

(a) Optical path diagram



(b) 点列图

(b) Spot diagram



(c) MTF

(c) MTF

图 7 设计结果

Fig.7 Design result

系统的主要公差分配如表 3 所示。系统对各表

表 3 公差分配表

Tab.3 Tolerances of optical system

| Surface | Radius/mm | Decenter/mm | Tilt/(°) |
|-----------|-----------|-------------|----------|
| 1 | - | - | - |
| 2 | - | 1 | 0.01 |
| 3 | - | - | - |
| 4 | - | 1 | 0.01 |
| 5 | 0.1 | 0.02 | 0.01 |
| 6 | 0.1 | 0.02 | 0.005 |
| 7 | 10 | 0.1 | 0.01 |
| 8 | 0.02 | 0.01 | 0.01 |
| 9 | 0.02 | 0.01 | 0.01 |
| Element 1 | - | 0.2 | 0.01 |
| Element 2 | - | 0.02 | 0.01 |
| Element 3 | - | 0.01 | 0.01 |
| Element 4 | - | 0.02 | 0.01 |

面和元件倾斜的敏感程度较高，是系统装调过程的关键。在此公差分配水平下，预计弥散斑的 RMS 半径为 $9.57 \mu\text{m}$ 。1 000 次蒙特卡洛仿真分析的结果显示，RMS 半径以 90% 的概率小于 $10.53 \mu\text{m}$ ，50% 的概率小于 $7.03 \mu\text{m}$ ，10% 的概率小于 $4.59 \mu\text{m}$ 。可见，系统仍能实现接近衍射极限的成像。

最后对系统进行热分析。空间热环境的剧烈变化会严重影响星载激光雷达的成像质量，需要进行相应的设计。该设计中采用了热膨胀系数较小的熔融石英作为衍射透镜基底材料，减小温度变化对大口径衍射主镜的影响。此外，还应对光学系统进行热控设计，减小工作温度的波动^[22]。目前，对光学系统的温度控制已经可以达到 $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。对该设计以 $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 的范围进行热分析，结果如图 8 所示。可以看到：在温度控制范围内，弥散斑直径在全视场内均小于爱里斑。这表明在一定的温度控制下，系统可以保持良好的成像质量。

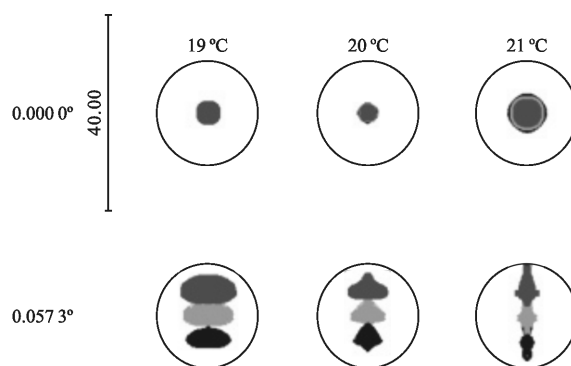


图 8 系统热分析(19~21 °C)

Fig.8 Thermal analysis of system (19~21 °C)

5 结论

针对激光雷达工作波段窄的特点，提出了基于 Schupmann 原理的简化消色差结构。该结构由主镜、色差校正部分和聚焦部分构成。通过色差校正镜补偿大口径衍射主镜引入的负色散，可以较好地实现系统色差校正。

在此基础上设计的 1 m 口径激光雷达接收光学系统结构简单，只涉及平板形的衍射透镜和普通球面镜。目前的大口径衍射光学系统设计中往往采用大 f 数(例如 100)衍射透镜。对于 1 m 口径衍射光学系统而言，其长度可达 $\sim 100 \text{ m}$ 量级。文中设计的系

统长度不超过 10 m, 与现有的设计相比有了大幅度的缩短。

系统在 1 mrad 视场角、8 m 系统焦距下实现了接近衍射极限的成像。对设计结果进行的公差分析和热分析显示: 在给出的公差控制水平和温度控制条件下, 系统可以保持接近衍射极限的成像结果。这显示了采用简化消色差结构的大口径星载激光雷达良好的应用前景。

参考文献:

- [1] Xie Yangyi, Liu Jiqiao, Jiang Jiabin, et al. Wavelengths optimization to decrease error for a space-borne lidar measuring CO₂ concentration [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 88-93. (in Chinese)
- [2] Yu A W, Krainak M, Harding D J, et al. Multi-beam laser altimeter system simulator for the lidar surface topography (LIST) mission [J]. *Laser & Electro-optics*, 2012, 1509(1): 1-3.
- [3] Korhonen T, Keinanen P, Pasanen M, et al. Polishing and testing of the 1.5 m SiC MI mirror of the ALADIN instrument on the ADM-Aeolus satellite of ESA [C]//SPIE, 2008, 7102(4): 317-347.
- [4] HÉLIÉRE A, Gelsthorpe R, Le Hors L, et al. ATLID, the atmospheric lidar on board the EarthCARE satellite [C]// Proceedings of the ICSO, 2012: ICSO-065.
- [5] Simonetti F, Marchi A Z, Gambicorti L, et al. Large aperture telescope for advanced lidar system [J]. *Opt Eng*, 2010, 49(7): 717-720.
- [6] Atcheson P, Stewart C, Domber J, et al. MOIRE-initial demonstration of a transmissive diffractive membrane optic for large light weight optical telescopes [C]//SPIE, 2012, 8442: 10.1117/12.925413.
- [7] Early J, Hyde R, Baron R. Twenty meter space telescope based on diffractive Fresnel lens [C]//SPIE, 2004, 5166: 148-156.
- [8] Yu Qianyang, Qu Hongsong. Realization of high-resolution visible earth observation on geostationary earth orbit [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2008, 1(1): 1-12. (in Chinese)
- [9] Briguglio R, Xompero M, Riccardi A, et al. Development of large aperture telescope technology (LATT): test result on a demonstrator bread-board [C]//ICSO, 2014: 10.13140/2.1.4768.9922.
- [10] Hyde R, Dixit S, Weisberg A, et al. Eyeglass: a very large aperture diffractive space telescope [C]//SPIE, 2002, 4849: 28-39.
- [11] Atcheson P, Domber J, Whiteaker K, et al. MOIRE-ground demonstration of a large aperture diffractive transmissive telescope [C]//SPIE, 2014, 9143: 10.1117/12.2054104.
- [12] Serre D, Deba P, Koechlin L. Fresnel interferometric imager: ground-based prototype [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(15): 2811-2820.
- [13] Raksataya T, Deba P, Rivet J P, et al. Fresnel diffractive imager: instrument for space mission in the visible and UV [C]//SPIE, 2010, 7732: 10.1117/12.857213.
- [14] Waller D, Campbell L, Domber J, et al. MOIRE primary diffractive optical element structure deployment testing [C]// 2nd AIAA Spacecraft Structures Conference, 2015, 1836: 1-10.
- [15] Yan Shuhua. Design of Diffractive Micro-Optics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 137-144. (in Chinese)
- [16] Sun Ting, Jiao Mingyin, Zhang Yuhong. Comparison analysis on the diffractive efficiency of single-layer and double-layer harmonic diffractive optical element [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(4): 622-624. (in Chinese)
- [17] Ferstl M, Kuhlow B, Pawlowski E. Effect of fabrication errors on multilevel Fresnel zone lenses [J]. *Optical Engineering*, 1994, 33(4): 1229-1235.
- [18] Britten J A, Dixit S N, Debruyckere M, et al. Large-aperture fast multilevel Fresnel zone lenses in glass and ultrathin polymer films for visible and near-infrared imaging applications [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(11): 2312-2316.
- [19] Xie Yongjun, Zhao Fuhua, Wei Wei, et al. Fabrication of diffractive grating using HfO₂-SiO₂ Sol-Gel film [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(1): 133-135. (in Chinese)
- [20] Behrmann G P, Bowen J P. Influence of temperature on diffractive lens performance [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(14): 2483-2489.
- [21] Hyde R A. Eyeglass. 1. Very large aperture diffractive telescopes [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(19): 4198-4212.
- [22] Zhang Yue, Wang Chao, Su Yun, et al. Thermal control scheme for ultrahigh resolution imaging system on geosynchronous orbit [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 3116-3121. (in Chinese)