

光学整流罩对机载激光通信光束远场发散角的影响

王超^{1,2}, 江伦^{1,2}, 佟首峰^{1,2}, 李英超^{1,2}, 刘壮^{1,2}

¹长春理工大学光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022;

²长春理工大学空地激光通信技术重点学科实验室, 吉林 长春 130022

摘要 分析了同心球面光学整流罩内、外表面的球心与机载激光通信发射天线的万向节点不重合时,非对称的光学整流罩对通信光束远场发散角的影响。结果表明,在最大通信光束远场发射角约为 54° 的条件下,外部口径为200 mm、厚度为5 mm的K9球冠整流罩使口径为30 mm的通信光束远场发散角由 $126\ \mu\text{rad}$ 扩展到 $5.27\sim 6.46\ \text{mrad}$,而仅由整流罩面形加工精度引起的通信光束远场发散角变化相比由整流罩光焦度引起的通信光束远场发散角变化十分微小,可以忽略不计。利用球面透镜补偿通信光束远场发散角的变化,可使通信光束在整个发射角范围内的远场发散角均小于 $600\ \mu\text{rad}$ 。

关键词 光通信; 机载激光通信; 远场发散角; 光学设计; 整流罩

中图分类号 TH74 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.040604

Influence of Optical Dome on Airborne Laser Communication Beam Far-Field Divergence Angle

Wang Chao^{1,2}, Jiang Lun^{1,2}, Tong Shoufeng^{1,2}, Li Yingchao^{1,2}, Liu Zhuang^{1,2}

¹Key Laboratory of Optoelectronics Measurement & Control and Optical Information Transfer Technology, Education of Ministry Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

²Fundamental Science on Space-Ground Laser Communication Technology Laboratory, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract When the centers of inner and outer surfaces of the concentric spherical surface dome and the gimbal joint of the airborne laser communication transmitting antenna are not coincidence, the influence of the asymmetry optical dome on communication beam far-field divergence angle is analyzed. The results show that, at a maximal communication beam far-field divergence angle of 54° , a K9 spherical dome with the external diameter of 200 mm and the thickness of 5 mm makes the communication beam far-field divergence angle expand to $5.27\sim 6.46\ \text{mrad}$ from $126\ \mu\text{rad}$. The communication beam far-field divergence angle variation purely introduced by the dome surface manufacturing precision is very tiny, and can be ignored compared with the variation introduced by the dome optical power. A lens with spherical surfaces is used to compensate the communication beam far-field divergence angle change, and the communication beam far-field divergence angle of the whole transmitting angle range is smaller than $600\ \mu\text{rad}$.

Key words optical communications; airborne laser communication; far-field divergence angle; optical design; dome

OCIS codes 060.4510; 050.1960

1 引言

与传统的微波通信相比,自由空间激光通信具有传输带宽大、安全保密性强、终端体积功耗小、便于传送

收稿日期: 2016-11-01; **收到修改稿日期:** 2016-12-21

基金项目: 国家自然科学基金(91338116,91438204)、吉林省教育厅基金([2016]369,[2016]366)、长春理工大学青年科学基金(WQNJJ-2016-15)

作者简介: 王超(1986—),女,博士,讲师,主要从事空间激光通信中光学设计方面的研究。

E-mail: nicklo19992009@163.com

海量数据等特点,近年来受到研究人员的广泛关注^[4-5]。作为激光通信发展的一个重要方向,机载激光通信也得到了充分的重视。相对于地面平台,机载平台具有移动速度快、振动大、环境恶劣、安装方式较为特殊等特点,对载荷有严格的尺寸、重量和功耗要求。因此,为实现机载激光通信系统的实用化,必须首先解决这些难题^[6-9]。

机载平台前端通常覆盖有半球形或球冠形光学整流罩,可在兼顾平台气动性能的同时起到保护后方设备的作用^[10]。为了与不同位置的目标进行信息互通,机载激光通信光学系统绕其万向节点旋转。当该旋转节点与同心球形整流罩内、外表面的球心不重合时,整流罩将会对非零扫描视场的光束引入非对称像差^[11],使通信发射天线出射的通信光束远场发散角增大,且光束变得更为发散,从而导致可通信距离减小。因此,有必要对整流罩引起的光束远场发散角变化加以分析,并采取合理的手段将光束远场发散角修正到接近无整流罩时的水平。

本文根据整流罩的几何参数计算内部通信光束的最大发射角,之后选取发射角特征点,对各个特征点处光束透过整流罩后的远场发散角进行分析,并考虑了整流罩加工误差对光束远场发散角的影响,提出一种利用光学手段对整流罩引起的光束远场发散角扩大进行修正的方法。

2 整流罩参数及最大发射角计算

整流罩及通信光束的参数为:整流罩为半球形,最大外口径为 200 mm,厚度为 5 mm;整流罩内、外表面为同心球面,材料为 H-K9,最大通光口径约为 120 mm;通信发射光学系统的口径为 30 mm,通信光波长(λ)为 1550 nm;整流罩加工精度的均方根(RMS)为 0.05λ 。图 1 为整流罩结构示意图,其中罩体虚线部分用于固定安装或连接等,罩体实线部分可通过光束, O 为内、外球面的球心。为满足通信距离的要求,通信光束远场发散角需小于 $600 \mu\text{rad}$ 。通信发射光学系统的旋转节点放置在整流罩的中轴线上,与整流罩内表面的距离 l 为 64.5 mm。由图 1 可知,等厚整流罩的内、外曲率半径 r_1 、 r_2 满足

$$r_1 = D/2, \quad (1)$$

$$r_2 = r_1 - d, \quad (2)$$

式中 D 为整流罩外口径, d 为整流罩厚度。内部的通信系统向单边扫描的最大发射角可表示为

$$\theta = \arctan[h/(2s_2)], \quad (3)$$

式中 h 为最大通光口径, $s_2 = s_1 - (r_2 - l)$, $s_1 = \sqrt{r_2^2 - (h/2)^2}$,其余参数的含义如图 1 所示。

将整流罩及通信光束的参数取值代入(1)~(3)式,得到整流罩外表面曲率半径 $r_1 = 100 \text{ mm}$,内表面曲率半径 $r_2 = 95 \text{ mm}$,最大发射角为 54.27° 。

对不同发散角处通信光学系统的发射光束经过整流罩后的光束远场发散角进行仿真计算。分别选取 0° 、 20.00° 、 40.00° 、 54.27° 作为采样点。图 2 为各个发射角采样点发射的通信光束示意图。

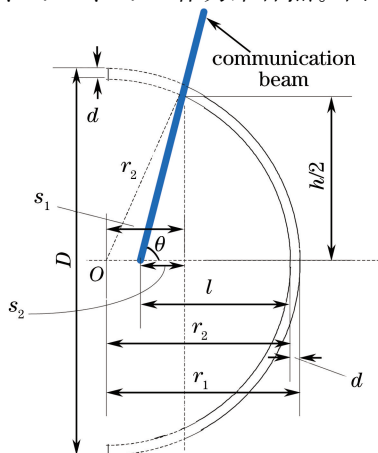


图 1 整流罩示意图
Fig. 1 Schematic of dome

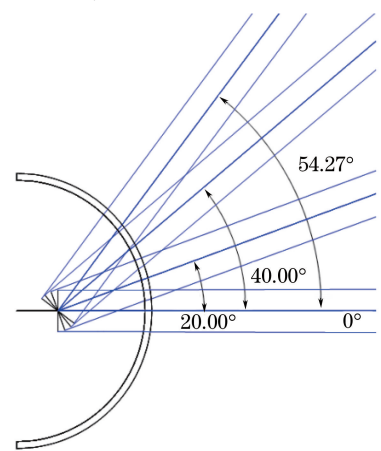


图 2 各个发射角采样点发射的通信光束示意图
Fig. 2 Schematic of communication beams of different transmitting angle sample points

3 整流罩对通信光束远场发散角的影响

通信发射系统一般采用单模光源,发射光束可近似认为是高斯光束^[12]。为简化问题,将通信发射天线视为薄透镜,此时激光束被天线变换前后的束腰位置关系可表示为

$$s' = f' \frac{s(f' + s) + (\pi\omega_0^2/\lambda)^2}{(f' + s) + (\pi\omega_0^2/\lambda)^2}, \quad (4)$$

式中 s 和 s' 分别为束腰在变换前、后距天线发射面的位置, f' 为天线焦距, ω_0 为束腰半径, λ 为光波长。

为了达到最佳准直效果,通常令初始入射的束腰位于天线前焦面处,即 $s = -f'$, 此时经过变换后的光束有最大束腰半径,即最接近平行光,束腰位置刚好在天线后焦平面上,与发射面的距离为 f' ^[12-13]。束腰半径为 15 mm,与光学系统的半口径相同,天线 F 数取 5(其中 F 数为光学天线的焦距和通光口径的比值),此时束腰与发射面的距离为 150 mm。

在无整流罩的情况下(忽略大气影响),空间光通信天线发射光束的远场发散角可估算为^[14]

$$\delta_0 = 2.44\lambda/D_0 = 2.44 \times 150 \text{ nm}/30 \text{ mm} \approx 126 \mu\text{rad}, \quad (5)$$

式中 λ 为发射光束的波长, D_0 为通信发射光学系统口径。

由于整流罩的影响,各发射角采样点的光束受整流罩影响后的远场发散角有所不同。由于光学系统发射的光束为准平行光束,因此选择在透过罩体后光束的光路中增加一个焦距为 100 mm 的理想透镜,如图 3 所示,透镜的作用为会聚光束,以便观察焦平面上的点斑形状,从而估计整流罩不同部位给光束带来的不同影响。光束远场发散角越小,越接近平行光束,焦平面上的点斑越小。加入整流罩后,各采样点的发射光束在理想透镜焦面上所成的光斑大小与形状如图 4 所示。

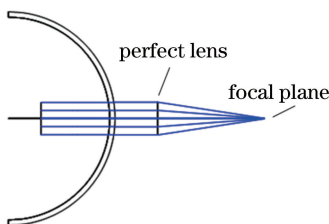


图 3 加入理想透镜后的光路示意图(发射角为 0°)

Fig. 3 Schematic of optical path including a perfect lens (transmitting angle is 0°)

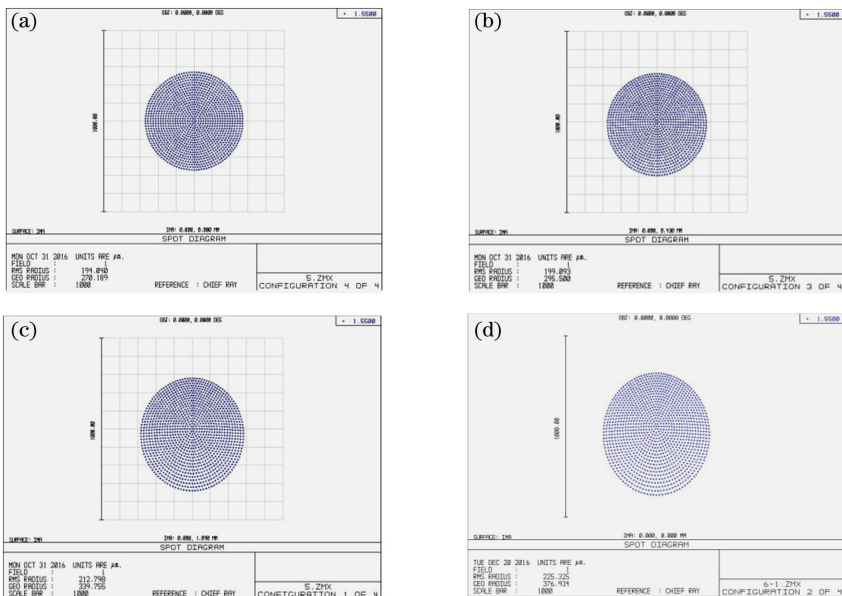


图 4 不同发射角时的点斑形状。(a) 0° ; (b) 20.00° ; (c) 40.00° ; (d) 54.27°

Fig. 4 Spot shapes with different transmitting angles. (a) 0° ; (b) 20.00° ; (c) 40.00° ; (d) 54.27°

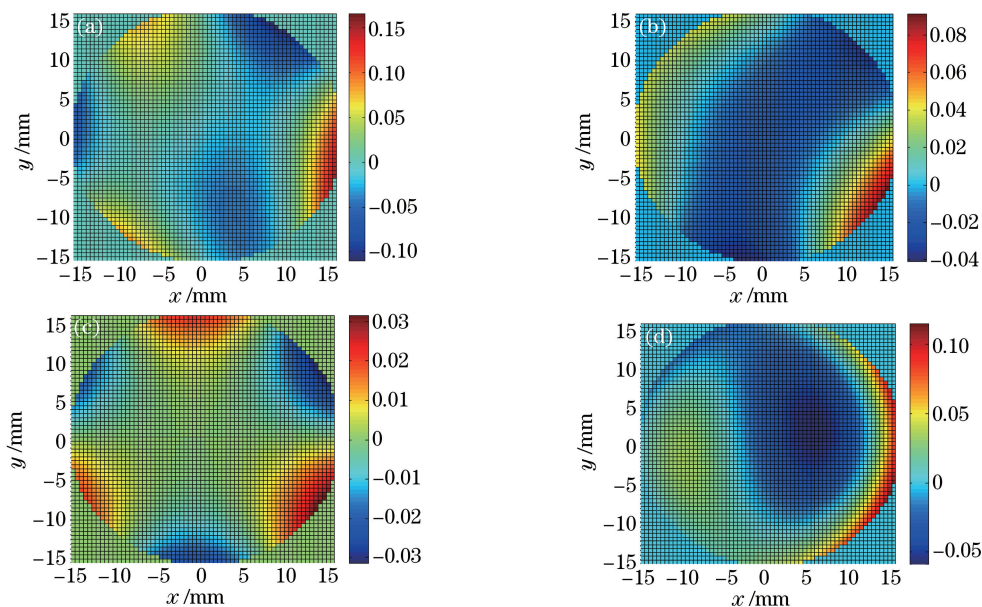
从图 4 可以看出,发射角为 0° 时点斑为圆形,此时整流罩给光束引入对称的球差。随着发射角逐渐增大,光斑变成了椭圆形,证明整流罩给光束引入了一定的像散。点斑半径的 RMS 约为 $194\sim 225\ \mu\text{m}$ 。此时,不同发射角下通信光束远场发散角可由高斯光束光线追迹^[15]的方法求得,其值如表 1 所示。可见,即使光束的发射角为 0° ,光束远场发散角也远超过了 $600\ \mu\text{rad}$ 的指标要求。

表 1 不同发射角下通信光束的远场发散角

Table 1 Far-field divergence angles of communication beams with different transmitting angles

Transmitting angle / ($^\circ$)	Far-field divergence angle / mrad
0	5.2694
20.00	5.4640
40.00	5.9892
54.27	6.4634

除了整流罩的光焦度使通信发射光束的远场发散角扩大以外,整流罩有限的加工精度造成的面形误差是引起光束远场发散角变化的另一个原因。该整流罩的面形精度 RMS 为 0.05λ ($\lambda=1550\ \text{nm}$),由于是透射式元件,相当于引入面形精度 RMS 为 0.05λ 的波前像差。由于波前像差可以近似分解为若干泽尼克多项式之和,因此在系统光瞳处加入面形精度 RMS 为 0.05λ 的随机泽尼克多项式相位屏以模拟加工精度给光束远场发散角带来的影响。图 5 为 4 幅由前 10 项泽尼克多项式拟合而成的波前相位图,每项多项式的系数是随机生成的,但总体面形精度 RMS 均为 0.05λ 。表 2 为同时考虑整流罩的光焦度和整流罩面形误差影响的光束远场发散角,分别对应图 5 中的 4 幅不同相位屏。

图 5 利用泽尼克多项式拟合得到的波前相位图(RMS 为 0.05λ , $\lambda=1550\ \text{nm}$)。

(a)相位屏 1;(b)相位屏 2;(c)相位屏 3;(d)相位屏 4

Fig. 5 Wavefront phase maps fitted by Zernike polynomials (RMS is 0.05λ , $\lambda=1550\ \text{nm}$).

(a) Phase screen 1; (b) phase screen 2; (c) phase screen 3; (d) phase screen 4

表 2 同时考虑整流罩的光焦度和面形误差影响的通信光束远场发散角

Table 2 Far-field divergence angles of communication beams with optical power and surface error of dome considered

Transmitting angle / ($^\circ$)	Divergence angle			
	1 / mrad	2 / mrad	3 / mrad	4 / mrad
0	5.2692	5.2694	5.2693	5.2693
20.00	5.4636	5.4642	5.4640	5.4640
40.00	5.9884	5.9892	5.9890	5.9891
54.27	6.4625	6.4634	6.4632	6.4632

比较表 1、2 可知,整流罩的光焦度引起的远场发散角变化较大,而仅由整流罩面形误差所引起的远场发散角变化与光焦度所引起的变化相比微不足道,可以忽略。

4 通信光束远场发散角的修正

为对整流罩引起的光束远场发散角的扩大进行修正,考虑在整流罩与发射系统之间增加一块补偿透镜,该透镜应同时满足不同发射角采样点的光束远场发散角修正的需求。为了使该透镜的曲率半径尽量大以减小高级像差的影响,该补偿透镜的材料选择折射率较大的玻璃材料(H-ZF7,成都光明公司)。为减小加工难度,透镜内、外表面均为球面。带有补偿透镜的各发射角采样点的光束通过整流罩的示意图如图 6 所示。

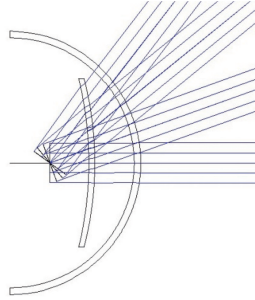


图 6 带有补偿透镜的 54.27°发射角的通信光束通过整流罩的示意图

Fig. 6 Diagram of communication beams passing through dome with compensation lens at transmitting angle of 54.27°

该补偿透镜为弯月形,前、后表面曲率半径相近,带有轻微的正光焦度,能够抵消绝大部分整流罩引起的负光焦度。加入补偿透镜后,焦面处的点斑比未加入补偿透镜时小,在不同发射角范围内,点斑半径的 RMS 为 2.678~25.445 μm ,如图 7 所示。加入补偿透镜后,各采样点的光束远场发散角如表 3 所示。

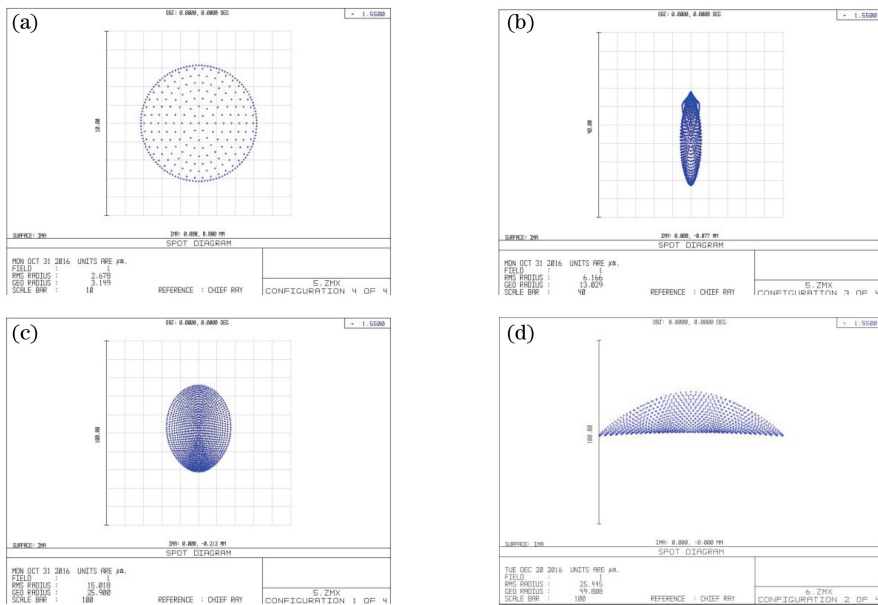


图 7 加入补偿透镜后的焦面点斑。(a) 0°;(b) 20.00°;(c) 40.00°;(d) 54.27°

Fig. 7 Focal plane spots when compensating lens is added. (a) 0°; (b) 20.00°; (c) 40.00°; (d) 54.27°

表 3 加入补偿透镜后各采样点的通信光束远场发散角

Table 3 Far-field divergence angles of communication beams of sample points after adding compensation lens

Transmitting angle / (°)	Far-field divergence angle / mrad
0	0.1955
20.00	0.3201
40.00	0.5800
54.27	0.0620

由表 3 可以看出,该补偿透镜成功修正了通信光束的远场发散角,达到了发射角范围内远场光束发散角均小于 $600 \mu\text{rad}$ 的指标要求。

5 结 论

在机载激光通信发射光束的转动中心不与其光电平台的同心球形光学整流罩内、外表面球心重合的情况下,整流罩将对不同发射角度的光束带来不同远场光束发散角扩大的影响;发射角越大,远场光束发散角扩大情况越严重。理论和仿真分析表明,在发射角不超过 54.27° 的条件下,当外部口径为 200 mm 、厚度为 5 mm 时,K9 玻璃球冠整流罩会使内部口径为 30 mm 的光束远场发散角由 $126 \mu\text{rad}$ 扩大到 $5.27 \sim 6.46 \text{ mrad}$,而整流罩面形精度 RMS 为 0.05λ 的加工误差引起的远场发散角变化与整流罩光焦度本身引起的远场发散角变化相比几乎微不足道。在整流罩之前加入一片补偿透镜,可补偿罩体引起的负光焦度。表面面形为球面的补偿透镜在整个发射角度范围内很好地修正了整流罩引起的远场光束发散角扩大,最终发射角度范围内光束远场发散角不超过 $600 \mu\text{rad}$ 。该研究能够为机载激光通信系统的实用化提供理论依据。

参 考 文 献

- [1] Alonso A, Reyes M, Sodnik Z. Performance of satellite-to-ground communications link between ARTEMIS and the optical ground station[C]. SPIE, 2004, 5572: 372-383.
- [2] Marshalek R G, Mecherle G S, Jordan P R. System-level comparison of optical and RF technologies for space-to-space and space-to-ground communication links[C]. SPIE, 1996, 2699: 134-145.
- [3] Song Yansong, Chang Shuai, Tong Shoufeng, *et al.* Feature analysis of airborne laser communication system and airborne laser communication experiment[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(12): 1206004.
宋延嵩, 常 帅, 佟首峰, 等. 航空激光通信系统的特性分析及机载激光通信实验[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1206004.
- [4] Jiang Lun, Wang Chao, An Yan, *et al.* Polarization transfer characteristic analysis of Coude type laser communication terminal[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(11): 110603.
江 伦, 王 超, 安 岩, 等. 库德式激光通信终端偏振态传输特性分析[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(11): 110603.
- [5] Jiang Lun, Hu Yuan, Wang Chao, *et al.* Optical system in one-point to multi-point simultaneous space laser communication[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0506001.
江 伦, 胡 源, 王 超, 等. 一点对多点同时空间激光通信光学系统研究[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0506001.
- [6] Jiang Huilin, Liu Zhigang, Tong Shoufeng, *et al.* Analysis for the environmental adaptation and key technologies of airborne laser communication system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(s1): 299-302.
姜会林, 刘志刚, 佟首峰, 等. 机载激光通信环境适应性及关键技术分析[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(s1): 299-302.
- [7] Gao Tianyuan, Hu yuan, Jiang Huilin, *et al.* Effect of atmosphere boundary layer on airborne space laser communication and its compensation technology[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(12): 2278-2283.
高天元, 胡 源, 姜会林, 等. 机载空间激光通信大气附面层影响及补偿技术研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(12): 2278-2283.
- [8] Yan Lusheng, Wang Feng, Wu Wei, *et al.* Current status and key technologies of unmanned aerial vehicle laser communication payloads[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 080005.
闫鲁生, 王 峰, 吴 畏, 等. 无人机激光通信载荷发展现状与关键技术[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 080005.
- [9] Peter G, William R, Rita M, *et al.* Modulating retro-reflector lasercomp systems at the naval research laboratory[C]. Proceedings of the 2010 Military Communications Conference (MILCOM), 2010: 1601-1606.
- [10] Zhao Hongwei, Hou Tianjin, Zhu Bin, *et al.* Design analysis for optical dome and scanning mirror[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(6): 898-903.
赵洪卫, 侯天晋, 朱 斌, 等. 机载光学整流罩与扫描反射镜尺寸及渐晕的设计分析[J]. 应用光学, 2010, 31(6): 898-903.

- [11] Wang C, Zhang X, Qu H M, *et al.* Sphere-cone-polynomial special window with good aberration characteristic[J]. Chinese Physics B, 2013, 22(7): 074212.
- [12] Wang Chao, Jiang Lun, Dong Keyan, *et al.* Research of far-field divergence for collimated Gaussian beam diffracted by a circular aperture[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(11): 1105001.
王 超, 江 伦, 董科研, 等. 准直圆孔衍射高斯光束远场发散度[J]. 光子学报, 2015, 44(11): 1105001.
- [13] Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 169-170.
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 169-170.
- [14] Jiang Huilin, Tong shoufeng, Zhang Lizhong, *et al.* The technologies and systems of space laser communication[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2010: 3.
姜会林, 佟首峰, 张立中, 等. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 3.
- [15] ZEMAX Development Corporation. Zemax optical design program guide[M]. Redmond: ZEMAX Development Corporation Press, 2009: 215-219.