

文章编号: 1001-3806(2014)05-0586-04

基于棱镜的激光周视接收系统的设计

谢洪波,姚丽娟,李 勇,祝世民

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 光电信息工程系,天津 300072)

摘要: 为了实现对目标全向探测和精确定位,采用成像光学与非成像光学相结合的方法,设计了一种可用于周视探测的非对称激光回波接收光学系统。由于子午和弧矢两方向视场差异很大,需加入特殊的非对称结构来平衡两方向的视场差异,该系统采用阶梯棱镜和倒置柱面望远镜对弧矢方向大视场进行角度压缩,后经过对称聚焦子系统将光能量收集到直径为 1.5mm 的圆形探测器上。系统由 1 块阶梯棱镜、1 片非球面镜、2 片柱面镜和 2 片球面镜组成,其光圈数达到 0.56。结果表明,单套接收系统完成 $\pm 30^\circ$ 视场探测,6 套接收系统组合起来可实现 360° 周视无盲点探测。整体系统体积小、结构简单,有良好的适用性。

关键词: 光学设计;激光回波接收;阶梯棱镜;倒置望远系统;非对称

中图分类号: TN249

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.05.002

Design of panoramic laser receiving optical system based on prism

XIE Hongbo, YAO Lijuan, LI Yong, ZHU Shimin

(Department of Opto-electronics Information Engineering, College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to realize omnidirectional detection and precise positioning of a target, a solution of the nonsymmetrical receiving optical system used for laser panoramic detection was presented based on imaging optics and non-imaging optics theory. Due to the significant difference between the meridional and sagittal field, it was necessary to join the special asymmetric system to balance the big difference. Therefore the prism system and the inverted telescopic system were adopted to condense the field of sagittal direction. Then, the optical energy can be collected to the circular detector with a diameter of 1.5mm after the focusing system. The system was composed by an echelon prism, a aspheric lens, two cylindrical lens and two lenses, with the F -number of 0.56. The results show that a single set of system can complete the detection of $\pm 30^\circ$ field of view and six sets of receiving systems constitute a 360° field of view to complete panorama detection. This result is helpful for realizing no blind spot detection. The practical system has small volume, compact structure and good applicability.

Key words: optical design; laser echo receiving; echelon prism; inverted telescopic system; asymmetric

引 言

主动激光探测在激光测距、通信、跟踪、制导、雷达等研究和应用中具有重要的作用,其发射系统不断地向目标发射连续或脉冲的激光光束,并由接收系统接收目标反射的回波光束,通过分析回波所携带的信息,提取出所需要的目标特征^[1-2]。由于空中目标会以各种不同的情况高速交会,因此许多场合要求接收系统具备全向探测、快速识别、精确定位的

功能^[3]。

激光周视探测接收系统一般采用分区方案:一套系统负责一个扇区(弧矢方向覆盖大视场,子午方向对应于激光发散角),多套系统协作完成周视探测。考虑到子午和弧矢视场的不对称性,目前国内通常采用矩形探测器来匹配矩形探测视场来减小设计难度。南京理工大学 CHANG 和 GU 等人^[4-5]采用简单的单透镜结构以减小接收系统的体积和重量,但是为了保证大视场,探测器的尺寸较大,一般大于光学系统的焦距;天津大学 HAN 等人^[6]采用 4 片式球面对称结构将能量收集到矩形阵列探测器上;LI^[7]采用棱镜结合 5 片式对称球面结构将能量会聚到矩形探测器上,以较复杂的光学系

作者简介:谢洪波(1969-),男,博士,副教授,主要从事光学成像与显示技术方面的研究。

E-mail: hbxie@tju.edu.cn

收稿日期:2013-09-24;收到修改稿日期:2013-10-28

统实现了相对较小的矩形探测器对能量的收集。然而,矩形探测器光敏面积越大,其响应时间越长,等效噪声越大,因此,减小探测器尺寸对提高系统响应速度具有重要作用。

针对以上问题,本文中以响应时间短、等效噪声功率小的 $\varnothing 1.5\text{mm}$ 雪崩光电二极管(avalanche photo diode, APD)为基础来设计接收光学系统。当使用圆形探测器时,系统两个方向的焦距和放大率差异并未得到平衡,设计难度极大,作者采用阶梯棱镜和倒置望远镜相结合的方法来平衡两方向的视场差异,提出了一种新的非对称接收光学系统设计方法。

1 系统设计思路

1.1 系统结构分析

如图1所示,本文中所设计的周视探测接收系统以6个扇区接收激光回波实现 360° 探测,单套接收系统按弧矢视场 $\pm 30^\circ$,子午视场 $\pm 2^\circ$ 来设计,其等效通光孔径为 $\varnothing 7\text{mm}$ 。由于接收系统为能量探测系统,对像质要求不高,因此本文中以非成像方式设计单套接收系统以减小其体积和成本。另外,由于系统体积和成本的限制,接收系统还应满足结构简单、体积小、成本低等特点。

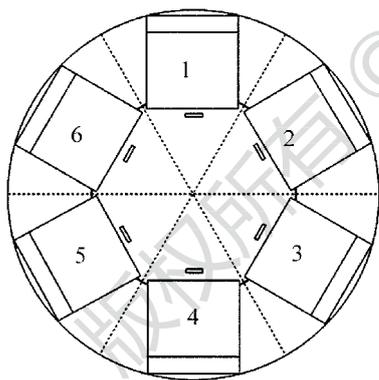


Fig. 1 360° detection range covered by six sets of systems

子午和弧矢两视场差异在15倍左右,若采用柱面镜^[8]来平衡子午、弧矢两个方向的差距,会产生较大的像散,很难用较小的探测器收集其光能,因此,必须加入特殊的非对称结构对弧矢方向的视场进行压缩,以平衡两个方向的视场差异。

依据上述分析,接收系统由弧矢光束压缩子系统、聚焦子系统两部分组成。入射光线先经过弧矢压缩光束子系统将弧矢 $\pm 30^\circ$ 视场压缩到 $\pm 2^\circ$,得到可与圆形探测器相匹配的对称视场,然后再经过对称聚焦子系统将 $(\pm 2^\circ) \times (\pm 2^\circ)$ 视场的光能收集

到圆形探测器上。其中如何实现弧矢方向角度的压缩是本文中的重点和难点。

1.2 压缩方式分析

压缩角度通常采用倒置望远镜来实现,若仅采用倒置望远镜将弧矢方向光束压缩到 $\pm 2^\circ$,压缩比 $\Gamma = \frac{\tan \omega'}{\tan \omega_0} = \frac{\tan 30^\circ}{\tan 2^\circ} = 16.5 \times \gg 1 \times$ (ω' , ω_0 分别为入射角、出射角),因其压缩比太大导致系统长度很长,不满足小型化的要求。

棱镜可以使光束偏折或者改变方向^[9-10],其偏向角公式:

$$\delta = i_1 - \alpha - \arcsin \{ n \sin [\arcsin (i_1/n) - \alpha] \} \quad (1)$$

式中, δ 为棱镜的偏向角; i_1 为入射角; α 为棱镜顶角; n 为棱镜的折射率。根据棱镜的工作原理,参考文献[7]中给出了一种利用如图2所示的棱镜偏折光线角度的方法,系统利用此棱镜将视场从 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 偏折到 $-16^\circ \sim 16^\circ$ 以实现与后面系统的匹配,其中 $0^\circ \sim 30^\circ$ 光线由于经过棱镜 EF 边出射角度会变大或在棱镜中发生全反射不予被利用,而经过棱镜 DE 出射后角度在 $-16^\circ \sim 16^\circ$,可被后面系统接收;同理, $0^\circ \sim -30^\circ$ 光线只能被有效利用经过棱镜 EF 的光线。在此基础上,对棱镜进行多阶设计可以使 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 偏折到更小的角度范围。

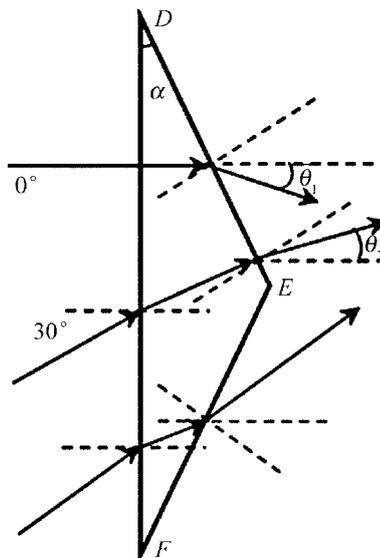


Fig. 2 Light refracted by prism

由以上分析可知:单独的倒置望远镜和普通棱镜都不能满足系统设计的要求,因此考虑采用棱镜偏折光线并结合倒置望远镜压缩角度的方法来对弧矢方向的视场进行压缩。棱镜可偏折到的角度越小,棱镜阶数越多越复杂,加工难度越大。在兼顾棱镜加工难度

和系统体积的条件下,合理选择棱镜的阶数以及倒置望远镜承担的压缩比(角放大率)是非常重要的。经过综合分析,选择先采用棱镜将视场从 $\pm 30^\circ$ 偏折到 $\pm 5^\circ$,再经倒置望远镜进行进一步的压缩。

2 接收系统整体结构设计

本文中设计的激光回波接收光学系统结构如图3所示,其中压缩光路子系统由阶梯棱镜1和倒置望远镜(由2、3两个柱面镜构成)组成,4~6透镜则组成了聚焦子系统。

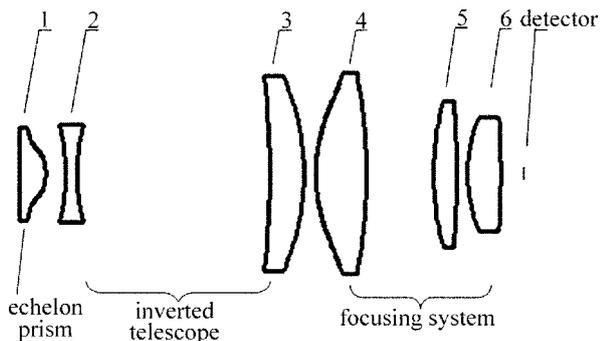


Fig. 3 Layout of the optical system

2.1 阶梯棱镜设计

要实现视场从 $\pm 30^\circ$ 偏折到 $\pm 5^\circ$,经分析计算可知需将棱镜设为6阶。阶梯棱镜模型如图4所示。由6阶不同顶角的棱镜组成一个阶梯棱镜,各阶不同顶角的棱镜分别只能有效利用 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 中某一段范围视场的光能量,且将其偏折到 $-5^\circ \sim 5^\circ$,而其余视场的光线由于经棱镜后出射角度会变大或在棱镜中发生全反射,不予利用,这样由6阶棱镜组成的阶梯棱镜就可以将 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 偏折到 $-5^\circ \sim 5^\circ$ 。

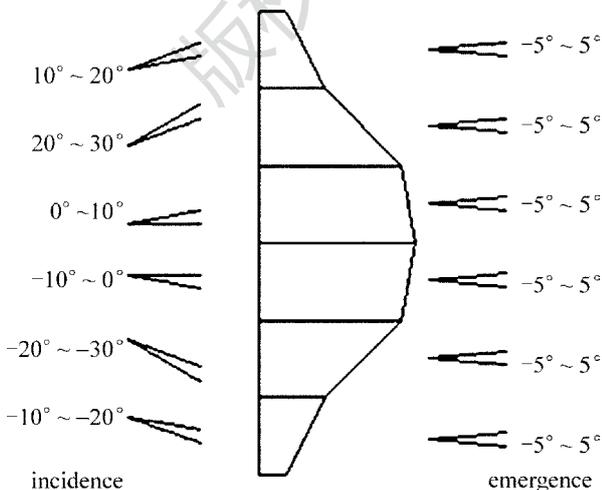


Fig. 4 The model of the echelon prism

图5为各阶棱镜对光线的偏折作用示意图,它

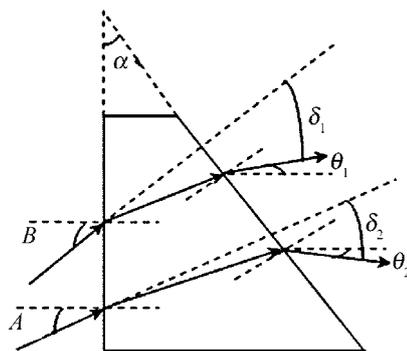


Fig. 5 Light refracted by a period of the prism

需将 $[A, B]$ 角度范围的光线偏折到 $-5^\circ \sim 5^\circ$ 。A, B角经过棱镜后的偏转角分别为 δ_2 和 δ_1 ,经棱镜折射后出射光线与水平方向的夹角分别为 θ_2 和 θ_1 。

$$\text{令: } \theta_1 = -\theta_2 \quad (2)$$

$$\text{则: } B - \delta_1 = -(A - \delta_2) \quad (3)$$

根据棱镜偏向角公式:

$$\delta_1 = B - \alpha - \arcsin\left\{n \sin\left[\arcsin\left(\frac{B}{n}\right) - \alpha\right]\right\} \quad (4)$$

$$\delta_2 = A - \alpha - \arcsin\left\{n \sin\left[\arcsin\left(\frac{A}{n}\right) - \alpha\right]\right\} \quad (5)$$

整理(3)式~(5)式可得:

$$2\alpha + \arcsin\left\{n \sin\left[\arcsin\left(\frac{\sin A}{n}\right) - \alpha\right]\right\} + \arcsin\left\{n \sin\left[\arcsin\left(\frac{\sin B}{n}\right) - \alpha\right]\right\} = 0 \quad (6)$$

选取BK7玻璃,由(6)式可得,从上到下各阶棱镜对应的顶角分别为 $27.4^\circ, 42.2^\circ, 9.5^\circ, 9.5^\circ, 42.2^\circ, 27.4^\circ$ 。

拉赫不变量是表征光学系统性能的一个重要参量,由拉赫不变量公式 $J = n y \tan u = n' y' \tan u'$ 可知,实际光学系统在物像共轭面内,物体大小 y 、成像光束孔径角 u 和物体所在介质的折射率 n 为一常数。若要减小光线的角度,需要增大实际通光口径才能满足系统对能量的要求,经过分析计算将系统的通光口径设为 $26\text{mm} \times 12\text{mm}$ 。

2.2 倒置望远镜设计

倒置望远镜^[11]需要将棱镜偏折后的视场进一步压缩到 $-2^\circ \sim 2^\circ$ 。为简化结构,本文中以无焦系统^[12]设计方法得到一个如图3所示的2片柱面镜式的倒置望远镜,其通光口径 $D = 26\text{mm}$,长度在32mm以内,压缩比 $\Gamma = \tan \omega' / \tan \omega_0 = \tan 5^\circ / \tan 2^\circ = 2.5 \times$ 。由于柱面镜子午方向的焦距 f_t 为无限远,弧矢方向的焦距 f_s 为有限远,因此可使子午方向光束角度不变,弧矢方向光束得到压缩。

2.3 聚焦子系统设计

图 3 中由 4 ~ 6 透镜组成的聚焦子系统将角度压缩后的光线收集到探测器 $\varnothing 1.5\text{mm}$ 光敏面上。由于为非成像系统,因此聚焦子系统不以成像质量作为评价标准,而是以能量接收率(即由探测器接收到的能量与进入对应系统的总能量的比值)作为主要评价标准。聚焦子系统为大相对孔径系统,由公式 $y' = f' \times \tan\omega$ 可知,其中 y' 为像高, f' 为焦距, ω 为视场角,则 $f' = (1.45/2) \times \tan 2\sqrt{2} = 14.6\text{mm}$;由通光口径 $D = 26\text{mm}$,可得光圈数为 0.56,设计难度较大。该系统虽然为非成像系统,理论上可以不考虑成像质量,但由于靶面较小,若像差太大很难将大部分光线收集到探测器上,因此需要对大视场像差予以控制。在设计过程中,系统光圈数太小导致部分镜片曲率过大,加工难度大,可采用高折射率的玻璃来减小设计及加工难度。另外,由于畸变只改变轴外物点在

理想像面上的成像位置,适当引入桶形畸变可以减小像面大小。设计结果表明:聚焦子系统采用 1 片非球面透镜,2 片球面透镜将对称视场的能量高效收集到圆形探测器上 $\varnothing 1.45\text{mm}$ 的区域内。

3 系统能量接收率模拟与分析

该激光回波接收光学系统是根据阈值来判断是否有目标出现,系统要求当等效为 $\varnothing 7\text{mm}$ 通光口径时能量接收率大于 50% 即可。将 2.1 节中计算出的各阶棱镜等比例组成阶梯棱镜导入 LIGHTTOOLS 中进行模拟,发现通过边缘两阶棱镜的光线由于后面系统口径的限制到达探测器上能量较低,因此,需要增加边缘两阶棱镜的长度比例来提高能量接收率,通过不断调整各阶棱镜的长度比例且微调各阶棱镜角度对系统进行优化设计,得到最佳的系统能量接收率,如表 1 所示。

Table 1 Results of the energy receiving efficiency in various field equivalent to $\varnothing 7\text{mm}$ aperture

sagittal field/($^{\circ}$)	0	5	10	15	20	25	30
efficiency in meridional 0° field/%	173.80	86.65	82.06	80.10	132.92	82.79	64.68
efficiency in meridional 1° field/%	170.07	85.24	81.65	79.83	131.66	82.51	60.01

由表 1 可知,中心视场的能量等效接收率最高可达到 173%,最大视场能量等效接收率为最低,也大于 60%,满足设计阈值要求。

4 结论

基于成像和非成像相结合的方式,设计了一种激光回波非对称接收系统,系统采用阶梯棱镜和倒置柱面望远镜对弧矢方向的光线进行压缩,再由一个对称聚焦子系统将光能量会聚到 $\varnothing 1.5\text{mm}$ 的探测器上,经过软件模拟可知,系统各视场的能量接收率在等效为 $\varnothing 7\text{mm}$ 通光口径时都达到 50% 以上,满足设计要求。该系统仅由 5 片透镜和 1 块阶梯棱镜组成,与通常采用矩形探测器的接收系统相比,提高了整体系统的响应速度;虽然设计难度加大不少,但系统光学结构并未复杂化,且对应的机械结构简单、装调方便,具有一定的实用性。然而,阶梯棱镜相比于普通棱镜,加工难度有所增加,因此对加工工艺有较高的要求。另外,系统为非旋转对称系统,在使用时要注意方向性。

参 考 文 献

[1] XIE H B, ZHU X Ch, LÜ E Y, *et al.* An emitting optical system design for laser panorama detection[J]. Laser Technology, 2013, 37(2):191-194(in Chinese).

[2] SUN Zh H, DENG J H, YAN X W. Linear array push-broom method in laser imaging fuze detection technology[J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(3): 16-21(in Chinese).

[3] GAN L, ZHANG H, ZHANG X J, *et al.* Single-beam pulse circumferential detection technology of laser proximity fuze [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(1): 84-89 (in Chinese).

[4] CHANG R. The design of panoramic optical system for the dynamic short-range detection of air targets[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008:14-24(in Chinese).

[5] GU B. Panoramic optical system for laser short-range dection[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010:8-27(in Chinese).

[6] HAN L. The design of nonsymmetrical optical system for the detection of laser echo[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010: 1-10(in Chinese).

[7] LI F L. The study on the design of nonsymmetrical optical system of large aperture[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011: 7-28(in Chinese).

[8] WANG T. A novel optical system for laser panoramic fuze[J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(5): 412-414 (in Chinese).

[9] SMITH W J. Modern optical engineering[M]. 4th ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 98-102(in Chinese).

[10] NEELY A, ADAMS C, CROWE P. The performance prism in practice[J]. Measuring Business Excellence, 2001, 5(2):6-13.

[11] ATWOOD W B, ABDO A A, ACKERMANN M, *et al.* The large area telescope on the fermi gamma-ray space telescope mission[J]. The American Astronomical Journal, 2009, 697(2):1071-1102.

[12] LAIKIN M. Lens design[M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2011: 143-155(in Chinese).