

## 非成像式激光告警系统的光学设计及优化

李冰<sup>1</sup>, 赵跃进<sup>1</sup>, 张超<sup>2</sup>, 郭小虎<sup>1</sup>, 张镜水<sup>1</sup>, 孔令琴<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学光电学院, 北京 100081;  
2. 中国环境管理干部学院现代化教学中心, 河北秦皇岛 066000)

**摘要:** 针对非成像式激光告警系统的工作特点与要求, 提出并设计了一种双片式柱透镜光学结构。对柱面光线追迹以及柱透镜成像进行了深入分析, 提出了一种新型像差优化方法, 使其在子午方向各个视场的调制传递函数得到最大幅度的优化。此光学系统由两片硒化锌柱透镜组成, 满足了 1.0~4.0  $\mu\text{m}$  工作波长范围, 并且克服了传统单片式柱透镜和柱面反射镜视场通常小于  $1^\circ$  且聚焦线斑不理想的缺点, 其视场达到  $20^\circ$ , 在 7 lp/mm 空间分辨率条件下, 边缘视场子午方向的调制传递函数值优于 0.7, 达到了非成像式激光告警系统的要求。

**关键词:** 光学设计; 激光告警; 柱透镜; 线聚焦; 光线追迹

**中图分类号:** O439 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)05-1511-06

## Optical design and optimization for laser warning system with non-imaging mode

Li Bing<sup>1</sup>, Zhao Yuejin<sup>1</sup>, Zhang Chao<sup>2</sup>, Guo Xiaohu<sup>1</sup>, Zhang Jingshui<sup>1</sup>, Kong Lingqin<sup>1</sup>

(1. School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;  
2. Modernization Teaching Center, Environmental Management College of China, Qinhuangdao 066000, China)

**Abstract:** Based on the characteristic of laser warning system with non-imaging imaging mode, a double cylindrical lens system was presented. A new optimization method, based on the ray tracing of cylindrical lens, was introduced in this paper. Traditional single-cylindrical lens and cylindrical reflector systems were limited by FOV, less than  $1^\circ$ , and low-quality line spot. This optical system, composed by two ZnSe cylindrical lenses, meets the operating wavelength of 1.0 - 4.0  $\mu\text{m}$  and achieves a  $20^\circ$  FOV and the modulation transfer function(MTF) is better than 0.7 at 7 lp/mm on the edge of FOV. This optical system achieves the requirement of laser warning system with non-imaging mode.

**Key words:** optical design; laser warning; cylindrical lens; linear focusing; ray tracing

收稿日期: 2013-09-20; 修订日期: 2013-10-03

基金项目: 2010 北京市优博指导教师科研项目(YB20101000701)

作者简介: 李冰(1984-), 男, 博士生, 主要从事电子对抗方面研究。Email: linuocao@163.com

导师简介: 赵跃进(1958-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事电子稳像、THz 成像技术、基于 MEMS 的红外成像技术等方面研究。Email: yjzhao@bit.edu.cn

### 0 引言

激光告警是用来实时告知激光袭击,判断激光入射方向和识别入射光波长等信息的光电系统。成像型的激光告警系统研发比较早,技术比较成熟。例如:AIL 系统公司的 HALWR 高精度激光接收机、哈尔滨工业大学设计的星载激光告警系统、石家庄军械工程学院所设计的基于鱼镜头的告警系统等<sup>[1-5]</sup>。但是,成像型告警系统无法实现多波长告警并且对 CCD 的性能要求很高。上述缺点严重限制了成像型激光告警系统在实际中的应用<sup>[6-7]</sup>。利用线阵非制冷探测器的非成像式激光告警系统不仅可以很好地解决上述问题,在保证定向精度的同时,大大降低了成本。

传统的非成像式的激光告警系统一般都采用单片柱透镜或柱面反射式的光学结构。单片式的结构简单,造价低,但是其线聚焦不理想,严重影响了告警精度。如:北京航空航天大学研制的基于单片柱透镜的正弦光栅激光告警系统的定向精度只有 1°<sup>[8]</sup>;柱面反射式的虽然会得到比较理想的聚焦线斑,但是其结构复杂,体积较大,视场很小,北京理工大学梁敏勇所设计的三反射式柱面光学系统的子午视场角只有 3°<sup>[9]</sup>。为了解决上述问题,结合非成像式激光告警系统的特点,文中从柱面平行光理想线聚焦原理出发,进行了适用于非成像式激光告警光学系统的设计。与传统的柱面光学结构相比,此光学系统探测视场比以往大大提高,子午方向的线斑接近衍射极限,满足了非制冷红外焦平面阵列对空间分辨率的要求。

### 1 柱透镜光线追迹分析

对单面为圆柱面的柱透镜进行光线追迹。此种面型的透镜可以看做是圆柱体的一部分,将圆柱体对称轴上一点 O<sub>1</sub> 作为坐标原点并以此点建立右手坐标系,使得其母线与 X<sub>1</sub> 轴平行,以 Y<sub>1</sub>O<sub>1</sub>Z<sub>1</sub> 为坐标面的子午截面,如图 1 所示。

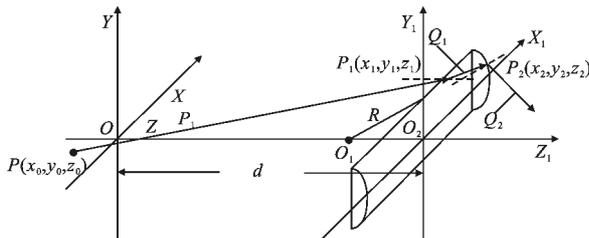


图 1 柱面折射光线矢量追迹图

Fig.1 Vector ray tracing of cylindrical refraction

假设物面 XOY 与 O<sub>1</sub> 点的距离为 d,物点 P 的空间坐标为(x<sub>0</sub>,y<sub>0</sub>,z<sub>0</sub>)。入射光线为单位向量 P(α<sub>0</sub>,β<sub>0</sub>,γ<sub>0</sub>),入射到柱透镜第一面时发生折射,其折射方向为单位向量 Q<sub>1</sub>(α<sub>1</sub>,β<sub>1</sub>,γ<sub>1</sub>)。在 XYZ 坐标系内根据折射定律可得公式(1)。

$$P \times N = n(Q_1 \times N) \tag{1}$$

式中:N(0,0,1)为第一面的单位法向量;n为柱透镜的折射率。将 Q<sub>1</sub> 写成分量形式,如公式(2)所示。

$$\begin{cases} \alpha_0 - n\alpha_1 = 0 \\ \beta_0 - n\beta_1 = 0 \\ \gamma_0 - n\gamma_1 = \lambda_1 \end{cases} \tag{2}$$

根据公式(1)可得 λ<sub>1</sub> 表达式,如公式(3)所示。

$$\lambda_1 = PN - nQ_1N \tag{3}$$

设光线的入射角为 I,折射角为 I',得公式(4)。

$$PN = \cos I, Q_1N = \cos I' \tag{4}$$

由于 PN=(α<sub>0</sub>,β<sub>0</sub>,γ<sub>0</sub>)(0,0,1)=γ<sub>0</sub>,可算出 λ<sub>1</sub>,由此便推导出向量 Q<sub>1</sub> 的表达式(5)。

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{\alpha_0}{n} \\ \beta_1 = \frac{\beta_0}{n} \\ \gamma_1 = \frac{\sqrt{n^2 + \gamma_0^2} - 1}{n} \end{cases} \tag{5}$$

沿 Z 轴方向所截得的柱透镜的截面如图 2 所示,其中 R 为圆弧的半径,d<sub>1</sub> 为第一面到圆弧顶点的距离,P<sub>1</sub> 为入射点,P<sub>2</sub> 为出射点。

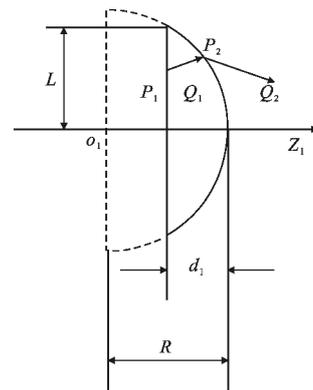


图 2 柱透镜截面示意图

Fig.2 Cross section of cylindrical lens

在 X<sub>1</sub>Y<sub>1</sub>Z<sub>1</sub> 坐标系下的柱面表达式为:

$$\begin{cases} X = C \\ Y^2 + Z^2 = R^2 \end{cases} \tag{6}$$

式中:  $C$  为常数。  $0 \leq Y \leq L, R-d \leq Z \leq R$ 。

直线  $P_1P_2$  与柱面交于  $P_2$  点, 因此联立柱面方程与直线方程, 如公式(7)所示。

$$\begin{cases} \frac{x-x_1}{\alpha_1} = \frac{y-y_1}{\beta_1} = \frac{z-z_1'}{\gamma_1} \\ X=C \\ y^2+z^2=R^2 \end{cases}, z_1'=R-d_1 \quad (7)$$

由此可得出  $P_2$  点在  $X_1Y_1Z_1$  坐标系下的坐标为:

$$\begin{cases} x_2 = \frac{\alpha_1(y_2-y_1)}{\beta_1} + x_1 \\ y_2 = \frac{-\beta_1 y_1 - \gamma_1 z_1' + \sqrt{(\beta_1 y_1 + \gamma_1 z_1')^2 - 4(\beta_1^2 + \gamma_1^2)(y_1^2 + z_1'^2 - R^2)}}{2(\beta_1^2 + \gamma_1^2)} \cdot \beta_1 + y_1 \\ z_2' = \frac{-\beta_1 y_1 - \gamma_1 z_1' + \sqrt{(\beta_1 y_1 + \gamma_1 z_1')^2 - 4(\beta_1^2 + \gamma_1^2)(y_1^2 + z_1'^2 - R^2)}}{2(\beta_1^2 + \gamma_1^2)} \cdot \gamma_1 + z_1' \end{cases} \quad (8)$$

通过坐标转换, 则  $x_1, y_1, z_1, z_2$  在  $XYZ$  坐标系中的坐标为公式(9)所示。

$$\begin{cases} x_1 = x_0 + \frac{d-z_0}{\gamma_0} \cdot \alpha_0 \\ y_1 = y_0 + \frac{d-z_0}{\gamma_0} \cdot \beta_0 \\ z_1 = z_0 + \frac{d-z_0}{\gamma_0} \cdot \gamma_0 = d \\ z_2 = z_2' + [d - (R-d_1)] \end{cases} \quad (9)$$

柱面在  $P_2(x_2, y_2, z_2)$  点的单位法向量为  $N_2(\alpha_N, \beta_N, \gamma_N)$ , 其表达式如公式(10)所示。

$$\begin{cases} \alpha_N = 0 \\ \beta_N = \frac{2y_2}{\sqrt{4y_2^2 + 4z_2^2}} \\ \gamma_N = \frac{2z_2}{\sqrt{4y_2^2 + 4z_2^2}} \end{cases} \quad (10)$$

根据折射定律求得出射光的方向向量  $O_2(\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)$ , 其中  $n$  为柱透镜折射率。

$$\begin{cases} n\alpha_1 - \alpha_2 = \lambda_2 \alpha_N = 0 \\ n\beta_1 - \beta_2 = \lambda_2 \beta_N \\ n\gamma_1 - \gamma_2 = \lambda_2 \gamma_N \end{cases} \quad (11)$$

与上面  $\lambda_1$  的求解相同, 可以推出  $\lambda_2$  表达式为:

$$\lambda_2 = n(\alpha_1 \alpha_N + \beta_1 \beta_N + \gamma_1 \gamma_N) - \sqrt{1 - n^2 [1 - (\alpha_1 \alpha_N + \beta_1 \beta_N + \gamma_1 \gamma_N)^2]} \quad (12)$$

将所有坐标值转化到  $XYZ$  坐标系后, 结合公式(11)、(12), 得到从柱透镜出射的光线方向向量表达式:

$$\begin{cases} \alpha_2 = n\alpha_1 \\ \beta_2 = n\beta_1 - \{n(\alpha_1 \alpha_N + \beta_1 \beta_N + \gamma_1 \gamma_N) - \sqrt{1 - n^2 [1 - (\alpha_1 \alpha_N + \beta_1 \beta_N + \gamma_1 \gamma_N)^2]}\} \cdot \beta_N \\ \gamma_2 = n\gamma_1 - \{n(\alpha_1 \alpha_N + \beta_1 \beta_N + \gamma_1 \gamma_N) - \sqrt{1 - n^2 [1 - (\alpha_1 \alpha_N + \beta_1 \beta_N + \gamma_1 \gamma_N)^2]}\} \cdot \gamma_N \end{cases} \quad (13)$$

至此, 完成了对柱透镜实际光线的追迹。当柱面方程为其他二次曲面时, 即公式(7)有不同的表达式。如果系统由多片柱透镜组成, 也可按此法依次计算每一面的入射与出射情况进行光线追迹。

## 2 系统设计分析

### 2.1 光学结构的选型

首先对光学系统的结构类型进行选择。反射式的光学系统由于其接受辐射波段非常宽、无色差、孔径大等优点普遍应用于红外光学系统中, 尤其是望远系统中应用更为广泛。但是, 对于激光告警系统来说, 其所探测的辐射波段比较窄, 只针对  $1.0 \sim 4.0 \mu\text{m}$  波段进行探测, 色差比较容易控制, 并且由于是对强激光探测, 口径不宜很大, 以免由于口径过大导致激光辐射对探测器造成损伤。告警系统的体积要尽量小, 重量要尽量轻。因此, 从告警系统的特点出发, 宜选用折射式的光学系统。

光学系统设计的原则之一就是在保证一定成像质量的同时, 还应该具有最简单的形式和最少数量的光学元件。首先考虑过去常用的单片式柱透镜系统, 它结构简单, 造价较低。但系统的自变量少, 视场非常小通常不超过  $1^\circ \times 1^\circ$ , 并且无论是单片的反射还是透射系统都不能产生理想的线聚焦, 通常由于像差优化不良的原因而产生“船形”光斑而降低系统的分辨率<sup>[10-11]</sup>。因此文中采用双片式透射系统, 其结构也比较简单, 并且有一个间距、四个曲率半径共五个可变参量, 完全可以满足焦距、球差、彗差等条件的要求。

## 2.2 设计要求

光学系统的焦距、 $F/\#$  和后工作距等参数与探测装置的各项指标、探测器的类型、性能参数密切相关。根据告警系统的探测器件以及探测分辨率确定焦距的大小。首先,激光告警系统采用非制冷红外焦平面阵列(IRFPA),典型的 IRFPA 的像素通常大于 CCD 或 CMOS 器件的像素尺寸,一般在  $30\sim 80\ \mu\text{m}$ <sup>[12]</sup>。其次,对入射角的分辨率要达到  $0.2^\circ$ ,由于目标距离光学系统非常远,因此入射光可以看做是平行光入射,如图 3 所示。

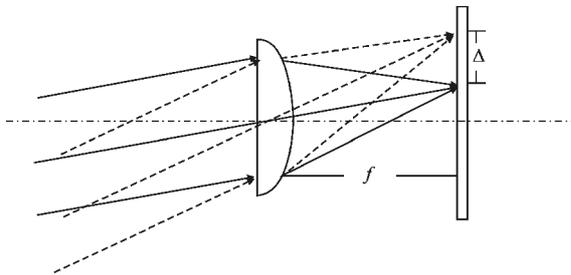


图 3 偏移量与入射角之间的关系图

Fig.3 Relationship between offset and incident angle

通过这两个参数便可以确定光学系统的焦距。当像元尺寸为  $60\ \mu\text{m}$ , 间距为  $10\ \mu\text{m}$  时,通过公式(14)可以得到系统的焦距  $f > 25\ \text{mm}$ 。

$$\begin{cases} \Delta > a + b \\ [\tan(\theta + 0.2) - \tan\theta] \cdot f = \Delta \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\Delta$  为两线斑之间的间距; $f$  为焦距; $\theta$  为入射角度; $a$  为像素尺寸; $b$  为像素间距。

光学镜头的  $F/\#$  影响光学系统的通光能力、传递特性和像差校正的难易等等。非制冷红外焦平面阵列各像元之间的热串扰很小,适用于高分辨率的告警系统。从探测器的几何线度来说,为了充分发挥探测器的分辨能力,像平面内的瑞利距离  $d$  应小于像元尺寸大小,即:

$$d = 1.22\lambda \cdot F/\# < a \quad (15)$$

式中: $\lambda$  和  $a$  分别是辐射波长和像元尺寸。值得注意的是,由于柱透镜只在一个维度上有曲率,因此  $F/\#$  中的  $D$  值是子午方向上的宽度,而不是圆的直径。通过上式可以计算出光学系统的  $F/\#$ 。另外,由于在 IRFPA 前加装带通滤光片进行滤波,因此后工作距要大于  $10\ \text{mm}$ ,这样就确定了后工作距的大小。根据以上分析,选用硒化锌(ZnSe)作为透镜材料,其在  $1.0\sim 4.0\ \mu\text{m}$  范围内有

良好的透射率,折射率在  $1.315\ \mu\text{m}$ 、 $2.7\ \mu\text{m}$ 、 $3.8\ \mu\text{m}$  三个常见的强激光波长处分别为  $2.4609$ 、 $2.4401$ 、 $2.4339$ ,随波长变化很小,有利于对色差的校正。

## 3 基于柱透镜优化方法

柱面光学系统与传统的球面共轴系统不同,只在一个方向上有曲率,另外一个方向上没有曲率,这就造成了柱面镜会在不同方向上产生不同的光焦度。由于它的这种非对称特点,就导致了在优化理论与技术上流行的阻尼最小二乘法和适应法在应用于柱面光学系统时出现了严重困难,在选择像差基点、像面位置和方向都需要重新考虑。因此,针对柱透镜的成像特点,提出一种柱面镜优化方法。首先,确定系统的有效焦距(ZEMAX 中操作数 EFFL)与系统的后工作距离。其次,通过柱面光线追迹的方法对弧矢方向的像差和子午方向上的像差设置不同的权重进行优化。在优化的过程中,尽量保证透镜的间距不变,否则,相差平衡的结果会使其大幅度增加,使系统的总长度变得很大。最后,通过手动调整进一步达到理想的效果。

光学设计结果如下。

根据设计要求和指标参数,该光学系统满足以下要求:

(1) 焦距  $f > 40\ \text{mm}$ , 光阑宽度  $D > 4.5\ \text{mm}$ , 后工作距  $L > 10\ \text{mm}$ ; (2) 视场角为  $20^\circ$ ; (3) 工作波段为  $1.0\sim 4.0\ \mu\text{m}$ ;

根据前文所述的设计步骤与优化方法得到焦距  $f = 45.803\ \text{mm}$ , 光阑宽度  $D = 6\ \text{mm}$ , 后工作距  $L = 13.273\ \text{mm}$ , 其他结构参数如表 1 所示。

表 1 光学系统的参数

Tab.1 Parameters of optical system

Number	Surface type	Radius/mm	Thickness/mm	Diameter/mm
1	Biconic	55.876	5.000	20
2	Biconic	104.123	14.733	20
STP	Rectangular aperture	Infinity	32.109	X=20, Y=6
4	Biconic	40.389	5.000	31
5	Biconic	126.659	13.273	31

入射光在弧矢方向上的斜入射会导致线斑在此方向上有一定的偏移量,如果后面透镜的口径设计不合理会导致线斑的长度被“截断”,因此后面透镜的口径要比前面透镜大,其值可根据入射最大角度

所产生偏移量来确定。

经过优化后,系统的三维结构如图 4 所示。

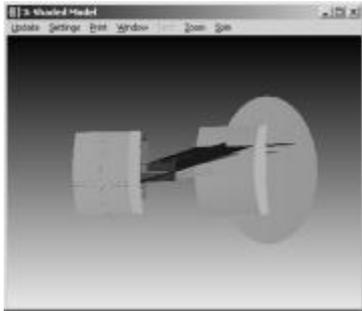


图 4 系统三维结构图

Fig.4 System 3D layout

为了对系统的像质进行评价,采用了具有代表性的 3 个边缘视场,图 5 为各个视场的点列图。

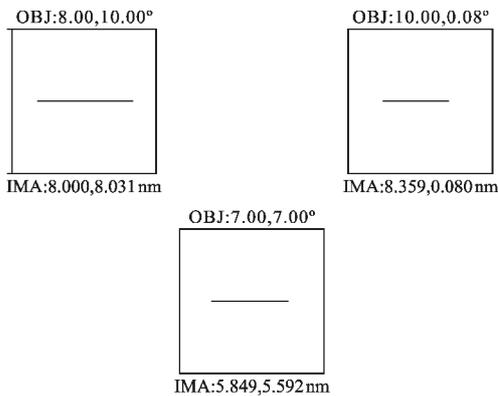


图 5 各视场点列图

Fig.5 Spot diagram

在图 6 中,三条 MTF 曲线为子午面内三个不同

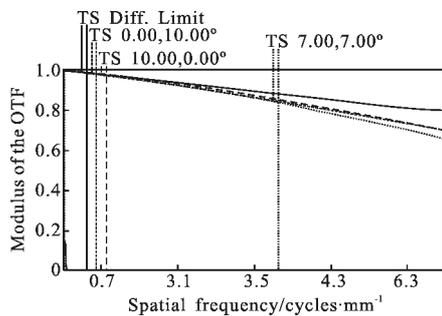


图 6 子午方向上的 MTF 曲线

Fig.6 MTF (tangential) of every field

边缘视场的传递函数。其中,当空间斜入射为  $10^\circ$  时,在 ZEMAX 中将 X 轴与 Y 轴的偏移角度分别设置为  $7^\circ$  来进行模拟。对柱面系统优化其子午方向的 MTF,优化后的双柱面结构的视场达到  $10^\circ \times 10^\circ$ ,在

子午方向上的传递函数曲线为  $7 \text{ lp/mm}$  时达到  $0.7$  (衍射极限是  $0.8$ )。弧矢方向由于是一条直线,因此不作考虑和评价。

通过实验发现,在对柱透镜进行光线追迹时,由于柱面镜会产生很大的光瞳像差,尤其是在视场比较大时像差更为严重,因此需要使用实际参考光线进行定位,从而得到准确的计算和评价。从各个图中可以看出,系统在整个波段和视场内成像质量接近衍射极限,并且结构合理,适用于告警系统。

## 4 结 论

文中对基于柱透镜激光告警系统的光学设计的设计思想、设计结果、像质评价进行了深入分析。对柱面光线追迹以及柱透镜成像规律进行了详尽的推导,具体讨论了柱透镜系统的结构设计和优化方法。结果表明,所设计的双片柱透镜光学系统在子午方向各个视场调制传递函数得到了理想的优化结果,达到了激光告警系统对子午方向上空间分辨率的要求。该光学系统可与非制冷微测辐射计、氧化钒等非制冷红外器件相匹配,构成新型激光告警装置,为卫星、汽车、船舶等军用民用设施躲避激光攻击、定位激光光源提供有力保障。

## 参考文献:

- [1] Yi Ming, Wang Xiao, Wang Long. Status quo and trend of American army of electro-optic countermeasure technology and equipment [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(5): 601-607. (in Chinese)  
易明, 王晓, 王龙. 美军光电对抗技术、装备现状与发展趋势初探[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(5): 601-607.
- [2] Hilland D H, Phipps G S, Jingle C M, et al. Satellite threat warning and attack reporting[C]//IEEE Proceeding, 1998, 2: 207-217.
- [3] Qiu Yue, Huang Hongyi, Fan Dianyuan, et al. A uniform line focus system using a varr focal cylinder lenses array[J]. Acta Optica Sinica, 1994, 14(11): 1198-1202. (in Chinese)  
丘悦, 黄宏一, 范滇元, 等. 可变焦列阵柱面透镜均匀线聚焦系统[J]. 光学学报, 1994, 14(11): 1198-1202.
- [4] Xu Yuannan, Zhao Yuan, Jin Chenfei, et al. Design of the imaging satellite-borne laser warning system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(s): 357-360. (in Chinese)  
许元男, 赵远, 靳辰飞, 等. 一种成像型星载激光告警系统

- 的设计[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(s): 357-360.
- [5] Ying Jiaju. Research on key technology of fish-eye imaging laser warning system [D]. Shijiazhuang: Ordnance Engineering College, 2009: 43-47. (in Chinese)  
应家驹. 鱼眼成像型激光告警关键技术研究[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2009: 43-47.
- [6] Wang Tingfeng, Guo Jin. Method for measuring laser radiation source direction based on one-dimension array detector with non-imaging mode [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(9): 1650-1652. (in Chinese)  
王挺峰, 郭劲. 线阵非成像式激光辐射源定向方法 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1650-1652.
- [7] Hilland D H, Phipps G S, Jingle C M, et al. Satellite threat warning and attack reporting [C]//IEEE Proceeding, 1998, 2: 207-217.
- [8] Zhang Chao, Niu Yanxiong, Su Ping, et al. Design and realization of staring laser detecting and warning system based on sinusoidal grating [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(10): 1-5. (in Chinese)  
张超, 牛燕雄, 苏平, 等. 基于正弦光栅的凝视型激光探测告警系统的设计与实现[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1-5.
- [9] Liang Minyong, Liao Ningfang, Feng Jie, et al. Design and optimization of three cylindrical reflectors optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(7): 1359-1363. (in Chinese)  
梁敏勇, 廖宁放, 冯洁, 等. 三反射式柱面光学系统设计及优化[J]. 光学学报, 2008, 28(7): 1359-1363.
- [10] Patrick Tam, Ken Gross, Jim Bogan. Interferometric testing of cylinder optics using computer generated hologram (CGH) [C]//SPIE, 2004, 3134: 162-166.
- [11] Sun Guillin, Zhang Xiaoxing, Du Ling. Geometrical optical design of a spherical-cylinder integrated lens used in line beam transformation from Gaussian laser beam [J]. Laser Technology, 1999, 23(1): 26-29. (in Chinese)  
孙桂林, 张小星, 杜玲. 一种球柱面一体化透镜的几何光学设计[J]. 激光技术, 1999, 23(1): 26-29.
- [12] Chen Yongping, Liu Qiang, Shi Yongming, et al. Development of monolithic 128×1 un-cooled vanadium oxide micro-bolometer focal plan array [J]. J Infrared Millim Waves, 2007, 26(5): 336-339. (in Chinese)  
陈永平, 刘强, 施永明, 等. 单片式 128×1 氧化钒微测辐射热计非制冷焦平面的研制 [J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(5): 336-339.