

利用平凹透镜和标准角锥棱镜实现反射光束发散的方法

戚祖敏 周晓凤 朱建辉 刘长安 罗向前 张 轶 王泽华 訾彦勇 闫 琦

西北核技术研究所, 陕西 西安 710024

摘要 角锥棱镜常被用作光电测距和光电跟踪的合作信标。在一些特殊应用场合中,要求被角锥棱镜反射的光束具有一定的发散角,以实现远场不同位置处激光器和探测器的全覆盖。标准角锥棱镜不具备对光束发散的功能,但是可以利用角锥棱镜中光束出射点与入射点不同的特性,在标准角锥棱镜前加装平凹透镜来实现对反射光束的发散。采用理论分析方法和几何光学追迹模拟方法分析了利用平凹透镜和标准角锥棱镜实现反射光束发散的可行性,同时研究了反射光束发散半角与入射光束参数和平凹透镜几何参数的定量关系。理论和模拟结果都表明,当入射光束半径小于平凹透镜半径时,反射光束的发散半角随入射光束半径准线性增加;平凹透镜曲率半径越小,反射光束发散半角越大。

关键词 光学器件; 棱镜; 反射光束发散方法; 平凹透镜; 发散半角; 光电跟踪

中图分类号 O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1123002

Method to Diverge Reflected Beam Using Planoconcave Len and Normal Cube-Corner Prism

Qi Zumin Zhou Xiaofeng Zhu Jianhui Liu Chang'an Luo Xiangqian
Zhang Yi Wang Zehua Zi Yanyong Yan Qi

Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China

Abstract Cube-corner prism is often applied as cooperative beacon in electro-optical distance measurement and photoelectric tracking. In some special applications, the beam reflected by the cube-corner prism should be with a divergence angle to fully cover both the laser and detector at different locations of the far field. Due to the fact that normal cube-corner prism cannot diverge a beam, the differences of the beam exit point and the incident point of the cube-corner prism are considered and the divergence of the reflected beam can be realized by installing a planoconcave lens in front of normal cube-corner prism. The feasibility of the divergence of the reflected beam by using planoconcave lens and normal cube-corner prism is analyzed by the theoretical analysis method and the geometrical ray-tracing simulation method. The quantitative relationship between the divergence half angle of reflected beam and the parameters of both the incident beam and planoconcave lens geometry is studied as well. Both the theoretical and simulation results show that the divergence half angle of the reflected beam increases quasi-linearly with the incident beam radius when the incident beam radius is less than the radius of the planoconcave lens. The smaller the curvature of planoconcave radius is, the greater the divergence half angle of the reflected beam will be.

Key words optical devices; prism; divergence method of reflected beam; planoconcave lens; divergence half angle; electro-optical tracking

OCIS codes 220.2740; 230.5480

1 引 言

角锥棱镜,又称角反射器或后向角反射器,是一种高精度的光学元件,其基本功能是实现入射光束的原方向返回。角锥棱镜广泛应用于光电测距、光电跟踪等领域^[1-2]。当激光器发射的光束传输到角锥棱镜时,将被原方向返回至与激光器处于同一位置的探测器,从而实现光电测距或光电跟踪。

收稿日期: 2016-05-24; **收到修改稿日期:** 2016-06-18

作者简介: 戚祖敏(1986—),男,博士,工程师,主要从事应用光学和物理电子学等方面的研究。

E-mail: qizumin@126.com

在一些特殊的应用场合中,角锥棱镜固定在空中运动平台上,激光器和探测器位于地面不同位置处,两者间的距离为 D_0 ,此时,地面激光器发射的光束不能通过空中标准角锥棱镜反射至探测器处。为提高探测概率,需将空中随动角锥棱镜反射的光束发散为半径为 D 的实心光斑(地面位置处),只需满足 $D > D_0$,即可确保探测器能成功接收到反射光束。由于角锥棱镜的优良特性,任意方向入射的光束都能被原方向返回,在存在俯仰、航向、滚转等姿态角误差的空中平台中,很难找到更好的光学元件替代品。因此,有学者对标准角锥棱镜进行了结构改造,实现对反射光束的发散。

研究表明,入射光束经含二面角误差的角锥棱镜反射后,在远场处形成 6 个子光斑^[3-7]。由于反射光束的衍射效应,6 个子光斑能连成一体,形成半径为 d 的光斑,从而实现对反射光束的发散;但该光斑在圆周上存在强度上的差异,可能导致探测器接收反射光强度忽强忽弱,不利于实现对空中运动目标的闭环锁定跟踪。常见的方法是将 N 个相同的带角误差的角锥棱镜进行组阵,每个角锥棱镜的入射面处于同一平面上,组阵形式可以是圆形,也可以是其他不规则图形。在组阵时,以其中任意一个角锥棱镜为基准,将其编号为 1,其他角锥棱镜以入射面的法线为轴旋转角度 $\theta_n = (n-1) \cdot 2\pi/6N$,式中 n 为除基准棱镜 1 外其他角锥棱镜的编号, $n=2,3,\dots,N$,这样可以在远场处得到 $6N$ 个子光束,子光束为等间隔分布。 $6N$ 个子光束因衍射效应能形成圆周较为均匀的实心光斑。利用含角误差的角锥棱镜阵列实现反射光束发散的方法,具有结构复杂、装配难度系数较大等特点。程勇等^[8]将标准角锥棱镜三个反射面中的一个反射面设计成球面,实现了对反射光束的均匀发散,这不失为一种结构简单的方法,但在加工上存在一定的难度。因此,提高远场光斑圆周均匀性及有效降低加工难度是实现稳定的闭环锁定跟踪的重要前提,本文提出一种利用平凹透镜和标准角锥棱镜实现反射光束发散的方法,该方法具有结构简单、远场特性好及加工成本低等特点。

2 标准角锥棱镜的光学特性

为区别于含角误差的角锥棱镜,将三个反射面相互垂直的角锥棱镜称为标准角锥棱镜。利用几何光学追迹法得到单条光线在标准角锥棱镜中的传输轨迹图,如图 1 所示,光线经光源发出后正入射到标准角锥棱镜,在标准角锥棱镜三个反射面依次反射后,离开标准角锥棱镜,被探测器成功探测。从图 1 中可知,单条光线在标准角锥棱镜的出射点与入射点并不是同一点,反射光线并不是沿入射光线原路返回,而是原方向返回,光线在标准角锥棱镜上的出射点与入射点存在一定的水平位移。

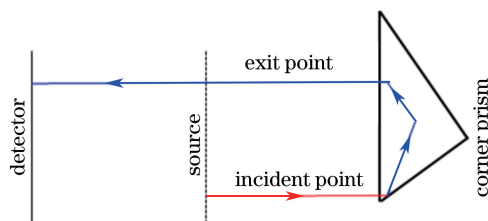


图 1 单条光线在标准角锥棱镜中的传输轨迹

Fig. 1 Transmission tracing of single light in the normal cube-corner prism

为进一步研究光线在标准角锥棱镜内的传输特性,在标准角锥棱镜入射面的正前方放置了 6 个平行光束,如图 2 所示。6 个光束的功率及轴向位置相同,各光束中心处于同一个圆周上且角向均匀分布。6 个光束按逆时针依次编号为 1~6,且光源尺寸依次增加以示区别,因此,6 个光束的功率密度将随着编号的增加而降低。6 个光束入射到标准角锥棱镜前的光斑图如图 3(a)所示,从最小尺寸光斑开始,光斑尺寸按逆时针方向增加至最大尺寸光斑,而功率密度则逐渐降低。6 个光束经过标准角锥棱镜反射后的光斑如图 3(b)所示,可以看到光斑的位置发生了变化,关于入射面中心对称的两个光束的光斑发生了对调。结果表明,当光束正入射到标准角锥棱镜时,反射光束与入射光束关于标准角锥棱镜入射面中心点对称。

结合图 1 与图 3 可以发现,当光束正入射到标准角锥棱镜时,反射光束不沿入射光束原路返回,而是原方向返回;反射光束与入射光束关于标准角锥棱镜入射面中心点对称;同时还可以看到,标准角锥棱镜不具备对反射光束进行发散的功能。

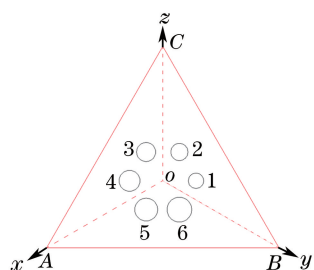


图 2 6 个光束与标准角锥棱镜的相对位置关系
Fig. 2 Relative location relationship between six beams and normal cube-corner prism

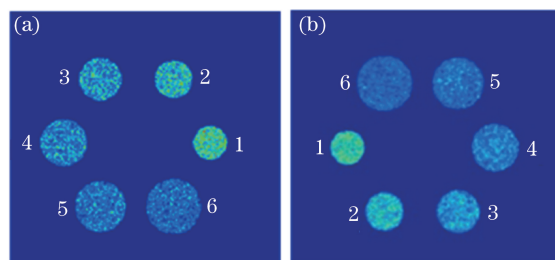


图 3 6 个光束 (a) 入射前和 (b) 反射后的光斑
Fig. 3 Spots of the six beams (a) before and (b) after reflection

3 实现反射光束发散的理论知识

在含有二面角误差的角锥棱镜中,通过改变三个反射面之间的角度,使角锥棱镜在反射的同时完成对光束的发散,该物理思想决定了反射光束会被分解为 6 个子光束。由于 6 个子光束的衍射效应在远场形成角向不均匀的光斑,因此,含二面角误差的角锥棱镜对光束的反射和发散通过一个步骤即可完成。

提出的实现反射光束发散的方法拟将反射和发散分步骤完成,首先利用标准角锥棱镜的优异反射特性,实现对入射光束的完美反射,然后利用额外的光学元件实现对反射光束的发散。作为最常见的光学元件之一,平凹透镜具有对光束进行发散的功能。因此,让反射光束经过平凹透镜,即可实现对光束的发散。然而,由于通过标准角锥棱镜的反射光束沿入射光束原方向返回,将平凹透镜置入光路时,入射光束和反射光束都将通过平凹透镜。由光路可逆原理可知,若反射光束与入射光束经过相同的平凹透镜结构,将不能实现对反射光束的发散。因此,若要实现对反射光束的发散,必须使入射光束和反射光束经过不同的光学结构。利用标准角锥棱镜中的光学特性,使入射光束和反射光束经过平凹透镜的不同部位,实现对反射光束的发散。实现反射光束发散的原理示意图如图 4 所示,平凹透镜一面为曲面,另一面为平面。平凹透镜平面圆心与标准角锥棱镜入射面中心的连线垂直于平凹透镜平面,且平凹透镜平面与标准角锥棱镜入射平面的间距为 d_0 。图 4 给出光线在角锥棱镜中的具体传输过程,用虚线表示,由标准角锥棱镜的特性给出了离开角锥棱镜后的光线。

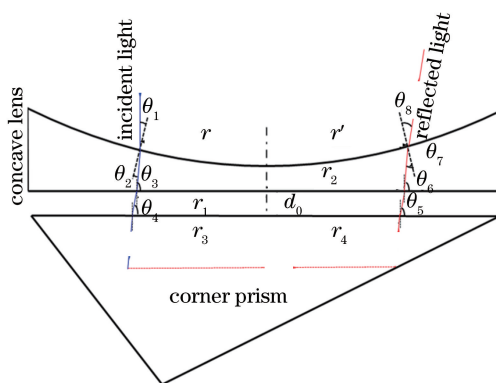


图 4 光束反射与发散原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the reflection and divergence of beam

设平凹透镜曲率半径为 R ,入射光束半径为 r ,用一条光线代表入射光束的边缘光线,入射光束与平凹透镜底平面垂直,光束中心轴穿过平凹透镜底平面圆心。当入射光从空气进入平凹透镜时,边缘入射角 θ_1 满足:

$$\sin \theta_1 = r/R, \tag{1}$$

设空气折射率为 n_0 ,平凹透镜的折射率为 n_1 ,则入射光进入平凹透镜后的折射角 θ_2 满足:

$$\sin \theta_2 = \frac{n_0 \sin \theta_1}{n_1}. \tag{2}$$

设平凹透镜最薄处的厚度为 t , 则入射光线离开平凹透镜时距离平凹透镜中心轴的距离为:

$$r_1 = r + \frac{n_0}{n_1} \frac{t}{R} r. \quad (3)$$

入射光线与平凹透镜平面的夹角 θ_3 满足:

$$\theta_3 = \frac{\pi}{2} - (\theta_1 - \theta_2). \quad (4)$$

忽略平凹透镜对正入射光线的偏转, 由光线正入射到标准角锥棱镜时的特性, 出射点与入射点关于角锥棱镜入射面中心对称:

$$r_4 \approx r_3, \quad (5)$$

$$\theta_5 = \theta_4, \quad (6)$$

式中 r_3 为入射点与角锥棱镜入射面中心的距离, θ_4 为入射光线与标准角锥入射平面的夹角; r_4 为出射点与角锥棱镜入射面中心的距离, θ_5 为出射光线与标准角锥入射平面的夹角。

由折射定律可知, 反射光线再次进入平凹透镜时满足:

$$r_2 \approx r_1 + 2d_0 \cos(\theta_3) \frac{n_1}{n_0}, \quad (7)$$

$$\theta_6 = \theta_3, \quad (8)$$

式中 r_2 为反射光线再次入射平凹透镜的入射点与平凹透镜底平面圆心的距离, θ_6 为反射光线进入平凹透镜后与平凹透镜底平面的夹角。

设反射光线在平凹透镜的出射点距离平凹透镜中心的长度为 r' , 由(6)式和(8)式可得:

$$r' \approx r_1 + r_2 - r = r + 2 \frac{n_0}{n_1} \frac{t}{R} r + 2d_0 \cos(\theta_3) \frac{n_1}{n_0}. \quad (9)$$

则反射光线离开平凹透镜时的入射角 θ_7 和出射角 θ_8 满足:

$$\theta_7 \approx \frac{\pi}{2} - \theta_6 + \arcsin \frac{r'}{R}, \quad (10)$$

$$\sin \theta_8 \approx \frac{n_1 \sin \theta_7}{n_0}. \quad (11)$$

则反射光束的发散半角 θ 为

$$\theta \approx \theta_8 - \arcsin \frac{r'}{R}. \quad (12)$$

4 模拟研究

利用光学模拟软件 Zemax 非序列模式^[9]建立如图 5 所示的模拟结构图, 为实现与平凹透镜共形, 采用圆切割的标准角锥棱镜, 切割后入射面口径与平凹透镜口径同为 15 mm。标准角锥棱镜和平凹透镜采用 BK7 材料, 其折射率 $n_1 = 1.5163$ 。标准角锥棱镜入射面圆心 O 与平凹透镜平面圆心 O' 的连线 OO' 垂直于

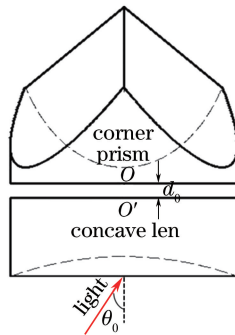


图 5 标准角锥棱镜和平凹透镜模拟模型

Fig. 5 Simulation models of normal cube-corner prism and planoconcave lens

角锥棱镜入射面,标准角锥棱镜入射面平行于平凹透镜平面,两者距离为 d_0 。

平凹透镜的曲率半径 $R=100$ mm,最薄处厚度 $t=2$ mm。入射光波长为 1.064 μm ,平行均匀光正入射,即入射角度 $\theta_0=0$,入射光束半径 $r=5$ mm,入射光轴经过直线 OO' 。光线传输的轨迹如图 6 所示,平行光入射通过平凹透镜和标准角锥棱镜后,被反射成发散光。距离平凹透镜 $z=100$ m 处的光斑如图 7(a)所示,可以看到反射光斑为实心圆斑。反射光斑的归一化功率密度沿 x 轴的分布如图 7(b)所示,可以看到功率密度分布曲线存在振荡现象,且边缘变化率为有限值,这是因为在 Zemax 分析中,入射光线数量为有限值,入射光束功率密度非均匀分布。因此,将功率密度值降低为一半时的位置定义为光斑的边缘,并依此获得远场反射光斑的直径为 10.8 m。根据发散半角的定义,计算得到反射光束的发散半角 $\theta\approx 54$ mrad。图 6 和图 7 表明,发散半角为 0 的入射光束经过平凹透镜和标准角锥棱镜的共同作用后,反射光束被成功扩束。

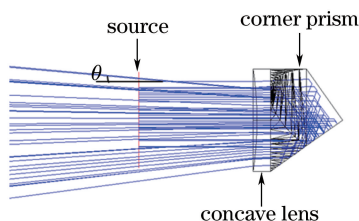


图 6 光线传输轨迹

Fig. 6 Transmission tracing of beam

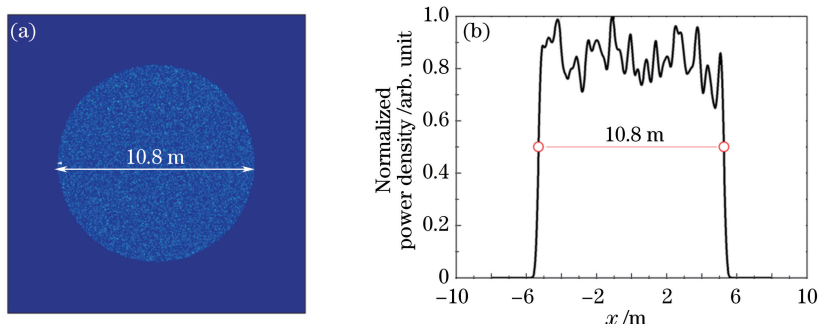


图 7 远场反射光斑。(a) 功率密度在横截面上的分布;(b) 归一化功率密度沿 x 轴的分布

Fig. 7 Reflected spot of far-field. (a) Distribution of power density on cross section;
(b) distribution of normalized power density along x -axis

采用单一变量法改变平凹透镜与标准角锥棱镜的距离 d_0 ,得到的结果如图 8 所示,图中可见,反射光束的发散半角 θ 随间隙的增加缓慢变化,相对变化率小于 0.34% /mm。图 8 同时给出理论分析的结果,可以看到理论结果与模拟结果符合得很好,两者最大的相对偏差小于 3.6% 。改变入射光束半径 r ,得到反射光束的发散半角 θ 的变化趋势如图 9 所示,可以看到反射光束的发散半角随入射光束半径 r 的增加而准线性增加,当 r 大于 8 mm 时, θ 不再增加。结合图 4 可知,当入射光束半径小于平凹透镜及标准角锥棱镜的半径时,不同半径处的光线相对于平凹透镜曲面的入射角 θ_1 不同,且满足(1)式,由于 $R\gg r$, $\theta_1\approx r/R$,因此,反射光束发散半角 θ 随半径 r 准线性变化;当入射光束半径大于平凹透镜及标准角锥棱镜的半径时,超过角锥棱镜部分的光不能被标准角锥棱镜反射,因此反射光斑的半径不再增加。图 9 同时给出理论分析的结果,可以看到理论结果与模拟结果符合得很好,两者最大的相对偏差小于 2% 。

不同平凹透镜曲率半径 R 下,反射光束的发散半角 θ 的变化以及理论分析结果如图 10 所示,可以看到理论分析结果和模拟结果符合得很好。当平凹透镜的曲率半径从 0 增加时,反射光束的发散半角 θ 迅速下降,且 θ 随 R 的变化率绝对值逐渐减小。当入射光束固定时,或入射光束半径较大且要求平凹透镜尺寸较小时,可以通过改变平凹透镜的曲率半径来调整反射光束的发散半角。

由理论分析可知,反射光束的发散半角与平凹透镜的厚度 t 有关。不同平凹透镜厚度下的反射光束发散半角变化如图 11 所示,可以看到反射光束的发散半角随厚度 t 的增加而缓慢增加。结果表明,平凹透镜

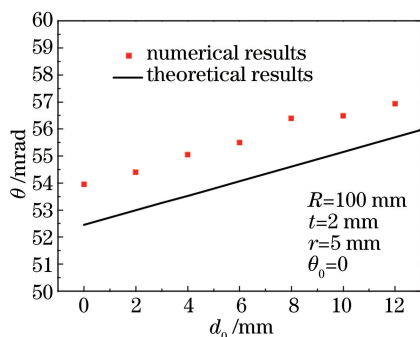


图 8 不同间隙 d_0 下的反射光束发散半角
Fig. 8 Divergence half angle of the reflected beam with different gap lengths d_0

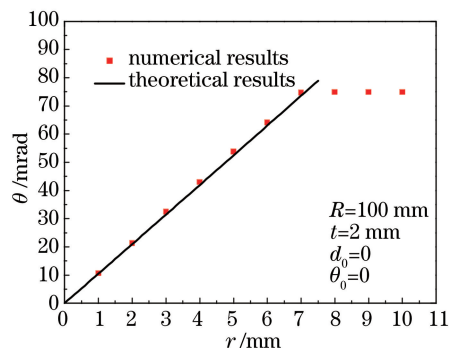


图 9 不同入射光束半径 r 下的反射光束发散半角
Fig. 9 Divergence half angle of the reflected beam with different incident beam radii r

厚度不会显著影响反射光束的发散半角。图 8~图 11 的结果表明,理论分析与模拟结果符合得很好,说明利用平凹透镜和标准角锥棱镜组合的方法可以实现对反射光束的发散。

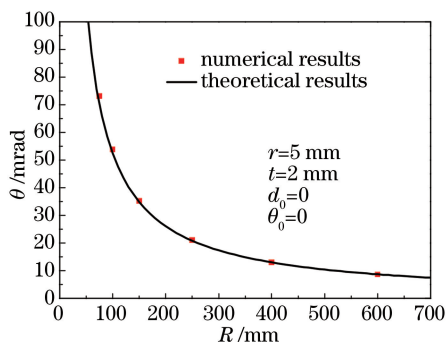


图 10 不同平凹透镜曲率半径 R 下的反射光束发散半角
Fig. 10 Divergence half angle of the reflected beam with different planoconcave lens radii of curvature R

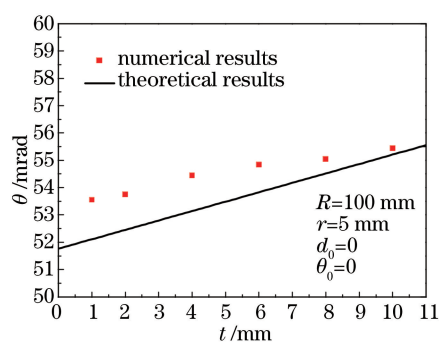


图 11 不同平凹透镜厚度 t 下的反射光束发散半角
Fig. 11 Divergence half angle of the reflected beam with different planoconcave lens thicknesses t

当光束斜入射到平凹透镜和标准角锥棱镜时($\theta_0 \neq 0$),入射光源与探测器平面平行。由于平凹透镜曲面为球面,任意入射角度的光束在球面的光学特性相同,且标准角锥棱镜也能对斜入射的光束原方向返回。因此,斜入射不会改变平凹透镜和标准角锥棱镜对反射光束的发散作用。若入射角度较大时,反射光束为非圆形,这主要取决于标准角锥棱镜的反射特性^[10-11],这里不再赘述。

5 结 论

一束光入射到标准角锥棱镜,经角锥棱镜反射后,反射光束不沿入射光束原路返回,而是原方向返回;反射光束与入射光束关于标准角锥棱镜入射面中心点对称。利用上述标准角锥棱镜的光学特性,在标准角锥棱镜前加装平凹透镜,使反射光线和入射光线经过平凹透镜的不同结构,实现对反射光束的发散作用。利用几何光学法,理论分析了利用平凹透镜和标准角锥棱镜实现反射光束发散的可行性。利用理论分析结果和几何光学追迹模拟方法,获得了反射发散半角与平凹透镜与角锥棱镜的距离、入射光束半径、平凹透镜厚度和曲率半径等参数的依赖关系,理论和模拟结果都表明,平凹透镜与角锥棱镜的距离、平凹透镜的厚度对反射光束的影响不显著;当入射光束半径小于平凹透镜半径时,反射光束的发散半角随入射光束半径准线性增加;平凹透镜曲率半径越小,反射光束发散半角越大。实际应用中,可以通过改变平凹透镜的曲率半径来改变反射光束的发散半角。

参 考 文 献

1 Wang Zhenxi, Zhang Qiang. Research of basic character on corner reflector [J]. Computer Measurement & Control, 2012, 20(8): 2273-2277.

- 王振西, 张 强. 激光测距角反射器的特性研究[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(8): 2273-2277.
- 2 Hou Honglu, Chen Jie, Li Ningniao, *et al.* Study on airborne corner reflector for airborne target tracking[J]. Optical Instruments, 2011, 33(6): 77-81.
侯宏录, 陈 杰, 李宁鸟, 等. 用于空中目标跟踪的机载角反射器研究[J]. 光学仪器, 2011, 33(6): 77-81.
- 3 Ye Yidong, Peng Yong, Chen Tianjiang, *et al.* Numerical simulating of cube corner retroreflector[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(4): 485-490.
叶一东, 彭 勇, 陈天江, 等. 角锥后向反射器的数值模拟研究[J]. 光学学报, 2003, 23(4): 485-490.
- 4 Nie Hui, Weng Xingtao, Li Song, *et al.* The far-field diffractive characteristics of cube-corner prism[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(12): 1470-1474.
聂 辉, 翁兴涛, 李 松, 等. 角锥棱镜的远场衍射特性[J]. 光学学报, 2003, 23(12): 1470-1474.
- 5 Zhou Hui, Li Song, Zheng Guoxing, *et al.* Influence of satellite retroreflector precision on far-field diffraction pattern[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 60-66.
周 辉, 李 松, 郑国兴, 等. 卫星角反射器精度对远场衍射模式的影响[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 60-66.
- 6 Zhong Shengyuan, Xu Guangping, Wu Jian. Study of the diffraction light intensity in the far-field on the satellite laser cube corner reflector[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(2): 128-136.
钟声远, 徐广平, 吴 键. 卫星激光角反射器的远场衍射光强研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(2): 128-136.
- 7 Huang Jian, Xian Hao, Jiang Wenhan, *et al.* The reflected beam's phase aberration induced by the fabrication errors of corner cube retroreflector[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(7): 1951-1955.
黄 健, 鲜 浩, 姜文汉, 等. 角锥棱镜的误差引起的反射光束相位误差分析[J]. 光学学报, 2009, 29(7): 1951-1955.
- 8 Cheng Yong, Liu Yang, Xu Lixin, *et al.* Mutual-injection phase-locking fiber laser with corner-cube cavity[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(1): 77-81.
程 勇, 刘 洋, 许立新, 等. 角锥腔互注入锁相光纤激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(1): 77-81.
- 9 Yang Yuchuan, Luo Hui. Backward diffractive characteristics analysis of cube-corner prism by Zemax[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(3): 492-495.
杨雨川, 罗 晖. 角锥棱镜后向衍射特性的 Zemax 分析[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(3): 492-495.
- 10 Zhou Bin, Liu Bingqi, Zhang Yu. Analysis of optical characteristics of cube corner retro-reflector with oblique incident angle[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(11): 1231-1234.
周 斌, 刘秉琦, 张 瑜. 斜入射条件下角锥棱镜光学特性分析[J]. 激光与红外, 2011, 41(11): 1231-1234.
- 11 Zhou Hui, Li Song, Zheng Guoxing, *et al.* Effective diffraction region for satellite retroreflector[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(8): 1920-1925.
周 辉, 李 松, 郑国兴, 等. 卫星角反射器有效衍射区域的研究[J]. 光子学报, 2009, 38(8): 1920-1925.