

可见光 CCD 探测单色 LED 信标光功率分析

涂 遗 杨 剑 孙志伟 金 亮

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要 为解决可见光 CCD 对空中飞行器远距离高精度跟踪问题,常常需要在飞行器上安装合作信标,以使探测系统能够尽早探测到目标。以辐射度量为标准,从目标信号、背景信号差值与探测器噪声比值的角度出发,分析了探测单色 LED 信标与可见光 CCD 最小探测功率、探测到光点所占像素数以及大气透射率之间的关系,计算了在一定作用距离下满足探测要求的不同波长单色 LED 信标的光功率,并通过观察地面实验中 CCD 的成像效果,验证了计算结果的正确性。

关键词 物理光学;光功率;光辐射;可见光 CCD;单色 LED 信标

中图分类号 O432 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.s104003

Analysis of Optical Power of Monochromatic LED Beacon Detected by Visible Light CCD

Tu Yi Yang Jian Sun Zhiwei Jin Liang

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

Abstract The cooperating beacons assembled on the aircrafts, can solve the remote high-accuracy tracking problem of the visible light CCD, in order to make the detection system detect the target as soon as possible. Taking radiometry as a standard and embarking on target signal, background signal difference and noise ratio of detector, the relationship between monochrome LED beacons and minimum detection power of visible light CCD, and the relationship between spot size and atmospheric transmissivity are analyzed. Furthermore, the light power of different monochrome LED beacons with fixed operating distance of detector is calculated. And the correctness of the calculation results is validated by observing the effect of ground test of CCD imaging.

Key words physical optics; optical power; optical radiation; visible light CCD; monochromatic LED beacon

OCIS codes 260.2110; 040.1520; 350.6090; 350.5610

1 引 言

CCD 相机探测系统应用在诸多领域,如空间探测、遥感、航空、航海、水下探测和地面测量等^[1]。利用 CCD 探测空中目标上的单色 LED 信标时,确定不同波长单色 LED 灯对应多大的光功率来满足 CCD 相机探测的需要是亟需解决的问题。光电探测系统可以看作是光能的聚集和转换系统,CCD 相机探测系统通过其光学系统收集从被探测目标辐射源发出的辐射能,由 CCD 将辐射能转换为电能,以 CCD 的形式读取、传递数据,通过信号处理系统,最终形成灰度图像进行跟踪^[2]。基于这一原理,本文

以辐射度量为标准,从目标信号、背景信号差值与探测器噪声比值的角度出发,在已知作用距离的条件下计算出满足 CCD 探测跟踪条件的目标辐射亮度,再根据辐射量与光度量的关系,换算出目标的光亮度,从而根据不同波长 LED 灯的发光效率求出所需单色 LED 灯的光功率。

2 LED 辐射亮度计算公式分析

以往关于 CCD 成像系统作用距离的计算是以光度量为标准,求到达焦平面上目标的光照度大于探测器需要的最小照度,以及目标和背景在焦平面

收稿日期: 2012-06-10; 收到修改稿日期: 2012-07-12

作者简介: 涂 遗(1982—),女,硕士,工程师,主要从事激光应用技术和光学系统设计等方面的研究。

E-mail: tuyi2000@sina.com

上照度的对比度大于信号处理要求的最小对比度,并以此作为目标进行探测器的选择及光学系统的设计。这里通过研究从辐射度量角度计算探测系统作用距离的方法,以已知探测距离作为输入条件来分析能够满足系统最小探测功率的目标辐射功率。

最小探测功率 P_{\min} 是指信号处理系统恰好能从噪声中检测出信号时单位靶面接收到的辐射功率。最小跟踪功率 P 是指使系统能够平稳跟踪的最小入射功率。一般来说, $R_{\text{SN}} P_{\min} > P \geq P_{\min}$, R_{SN} 为搜索、跟踪目标时所需要的最小信噪比。只有当背景极其均匀(如无云的天空)并且系统无干扰时,等号才成立;实际中取值时, P_{\min} 比 $R_{\text{SN}} P_{\min}$ 略小。

单个目标像素和背景像素的辐射功率差为^[3]

$$\Delta P = \delta |P_t - P_{\text{bg}}| = \delta \left| \frac{L_t - L_{\text{bg}}}{N_t} \right| \frac{A_t A_o \tau_a(R) \tau_o}{R^2}, \quad (1)$$

式中 R 为信标灯到 CCD 相机探测系统的距离; δ 为信号衰减因子,如果信号以模拟形式传输,由于带宽的影响,信号在传输中会衰减,以数字形式传输时, $\delta=1$; L_t 为目标的辐射亮度,单位为 $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$; L_{bg} 为背景辐射亮度; N_t 为目标在焦平面上所占的像素数,其大小主要取决于目标的成像角和光学系统的焦距, N_t 值太大,会造成目标辐射能量的分散,太小则不利于平稳跟踪,一般要求大于 3×3 ; A_t 为信标灯的有效辐射面积; A_o 为光学系统入瞳面积,表示系统聚集光能的能力; $\tau_a(R)$ 为大气透射率; τ_o 为工作时光学系统的透射率。

根据(1)式,若要使跟踪系统能够探测到信标光,只需要满足 $\Delta P \geq P_{\min} A_d$, A_d 为探测器单个像素面积;系统要能跟踪目标,则要满足 $\Delta P \geq P_{\min} A_d R_{\text{SN}}$ 。根据以上条件,作用距离方程可推导为

$$R^2 \leq \delta \left| \frac{L_t - L_{\text{bg}}}{N_t} \right| \frac{A_t A_o \tau_a(R) \tau_o}{P_{\min} A_d R_{\text{SN}}}, \quad (2)$$

当要求探测概率为 95% 时,目标的信噪比应有 $R_{\text{SN}}=6$ 。

根据(2)式可以推出

$$|L_t - L_{\text{bg}}| \geq \frac{R^2 P_{\min} A_d N_t}{A_t A_o \tau_a(R) \tau_o} R_{\text{SN}}. \quad (3)$$

要得出所需 LED 光源的发光功率,必须求出目标辐射亮度 L_t 。由(3)式可知,与之相关的主要参数包括: CCD 最小可探测功率 P_{\min} 、目标在焦平面上所占的像素数以及大气透射率 $\tau_a(R)$ 。

2.1 CCD 最小可探测功率

由于已知探测系统跟踪电视 CCD 的最低照度,可以把它转换为最小探测功率来计算。单色光见度

$K(\lambda)$ 表示波长为 λ 的辐射通量每瓦(W)可以产生多少流明(lm)的光通量,即同一波长下所测得的光通量与辐射通量的比,单位为 lm/W 。因此,单色光见度可以用公式 $K(\lambda) = \Phi_{\text{v}\lambda} / \Phi_{\text{e}\lambda}$ 来表示, $\Phi_{\text{v}\lambda}$ 为单色光的光通量, $\Phi_{\text{e}\lambda}$ 为单色光的辐射通量。由 CCD 的光谱响应曲线可知,在波长为 555 nm 处, $K(\lambda)$ 出现最大值,以 K_m 表示,其值为 673 lm/W 。

相对光见度(日间视觉) $V(\lambda)$ 为给定波长处的光见度与最大光见度 K_m 的比值,即 $V(\lambda) = K(\lambda) / 673$, 则有

$$\Phi_{\text{e}\lambda} = \Phi_{\text{v}\lambda} / [673V(\lambda)]. \quad (4)$$

由 CCD 的光谱响应曲线可以看出,虽然响应范围宽,其主要响应还是峰值波长处的光,所以采用峰值处的 $V(\lambda)$ 进行计算。探测系统 CCD 的响应峰值在 550 nm 左右,以峰值波长为准,通过查阅《相对光见度数值表》^[4],取 $V(\lambda) = 0.5$ 。采用的 CCD 最低照度为 0.5 lx,即 $\Phi_{\text{v}\lambda} = 0.5 \times 10^{-4} \text{ lm}/\text{cm}^2$,代入(4)式中计算出跟踪电视探测所需的最低辐射功率 $P_{\min} = 1.48 \times 10^{-7} \text{ W}/\text{cm}^2$ 。

2.2 LED 光源成像像素数

对于大功率 LED,灯珠基本采用阵列式排布,为一发光面。但对于探测距离 2.4 km 处的 LED 目标,其发光面积很小,可以视为点目标。其辐射面积在 CCD 上的几何投影小于一个像素,但由于弥散的作用,实际的像往往占有多个像素。小目标对仪器的几何夹角远小于弥散角,因此它的投影夹角近似等于弥散角,在焦平面上所占的像素数为^[5]

$$N_t = [f_{\text{ceil}}(L/D)]^2, \quad (5)$$

$$L = 2f \tan(\sigma_{\Sigma}/2) \approx 2f \tan(\sigma_{\text{diff}}/2),$$

式中 L 为目标像的边长, D 为单个像素的边长, $f_{\text{ceil}}()$ 为将小数部分舍去然后将整数部分加 1 来取整, f 为光学系统焦距, σ_{Σ} 为目标的投影夹角的均方根值, σ_{diff} 为系统的弥散角的均方根值。 σ_{diff} 是目标光经大气湍流、光学衍射和仪器自身的一些因素在像面上引起的角弥散的均方根值。其中,跟踪过程中的随机误差 σ_i 对像点弥散影响最大,一般而言跟踪的随机误差均方根值在 $5'' \sim 10''$ ^[6]。 σ_{diff} 表达式为^[7]

$$\sigma_{\text{diff}} = \sqrt{\sum_{i=1}^4 \sigma_i^2 + \sigma_0^2},$$

$$\sum_{i=1}^4 \sigma_i^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2, \quad (6)$$

式中 σ_1 表示目标对设备张角的均方根值。设目标投影面积为 A ,则目标的等效方形面积的边长为 \sqrt{A} ,

若目标斜距为 R , 则有 $\sigma_1 = \frac{\sqrt{A\rho}}{2\sqrt{3}R}$, $1/(2\sqrt{3})$ 为按等

概率分布的折算值, ρ 为弧度变成角秒的变换系数 (206265''). σ_2 是大气抖动在帧时间内引起的弥散均方根值, 大气抖动引起的弥散在白天一般为 $2'' \sim 3''$ [8]. σ_3 是光学系统的衍射分辨率极限引起的角弥散均方根值. 按高斯正态分布, 则有

$$\sigma_3 = \frac{1}{3} \frac{1.22\lambda}{D} \rho, \quad (7)$$

D 为光学系统通光口径 (mm); λ 为 CCD 光谱灵敏度的峰值波长, 取 $\lambda = 0.55 \times 10^{-3}$ mm. σ_4 是光电经纬仪跟踪系统的跟踪角速度误差在曝光时间内引起的角弥散均方根值. 若按等概率分布考虑, 则有

表 1 LED 光源在 CCD 上的成像像素数

Table 1 Imaging pixel numbers of LED light in CCD

Clear aperture of optical system D /mm	Exposure time t /s	Single pixel dimensions d / μm	$\sigma_{\text{diff}} / (")$	Focal length f /mm	Target picture element N_t
240	1/15	6.45	5.65	700	9
				2000	81

2.3 大气透射率

光在大气中的能量衰减主要由吸收、散射、湍流、色散和折射等引起 [9]. 对单色 LED 而言, 大气散射是其能量衰减的主要因素, 因此大气透射率 $\tau_{a(R)}$ 可通过计算大气散射系数来获得, 可由下面的经验公式进行计算 [10]

$$\tau_{a(R)} = \exp\{-[k_0/(k \sin \theta)][1 - \exp(kR \sin \theta)]\},$$

$$k_0 = (3.912/V)(0.55/\lambda)^P, \quad (9)$$

式中 V 为能见度, P 为经验参数, 其数值为 $0.7 \sim 1.6$, 相当于能见度由最坏变到最好; k 为粒子散射标高的倒数, 其值为 0.83 km^{-1} ; R 为斜程; θ 为光束传输方向与水平方向的夹角.

根据本地典型天气条件, 取 $V = 20 \text{ km}$, $P = 1$, 代入 (9) 式进行计算. 图 1 给出了 LED 光源沿 45° 方向、传输斜程 2.4 km 时, 大气透射率与 LED 波长之间的关系.

由图 1 可知, 选择波长为 625 nm 的红光 LED 时, $\tau_R(R) = 0.82$; 选择波长为 588 nm 的黄光 LED 时, $\tau_Y(R) = 0.81$; 选择波长为 525 nm 的绿光 LED 时, $\tau_G(R) = 0.79$. 可以看出, 不同波长的 LED 光源在大气透射率上没有太大差异.

3 LED 信标最小光功率

以上对各主要参数进行了分析, 下面代入其他参数计算 LED 信标的最小光功率 P_v .

$$\sigma_4 = \frac{1}{2\sqrt{2}} |\dot{\theta}| t \times 3600'', \quad (8)$$

式中 $|\dot{\theta}|$ 为跟踪系统的跟踪角速度误差绝对值 [$(^\circ)/\text{s}$], t 为曝光时间 (s).

采用的探测跟踪系统主要参数包括: 口径 D 为 240 mm , 焦距分别为 700 mm 和 2000 mm , CCD 单个像素尺寸为 $6.45 \mu\text{m}$, 视场 $48' \times 40'$ 、 $17' \times 14'$, 采样频率 15 Hz . 选取典型的 LED 灯, 其边长为 2.4 cm . 将参数代入 (6) 式, 可计算得到 LED 光源成像弥散 σ_{diff} , 继而根据 (5) 式求出在 CCD 上的成像像素数, 如表 1 所示.

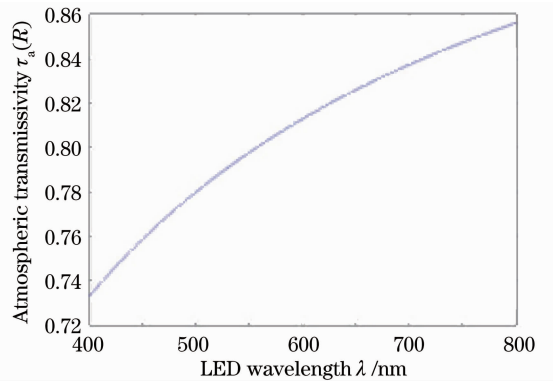


图 1 大气透射率随 LED 波长的变化

Fig. 1 Relation between the atmospheric transmissivity and wavelength

选取典型的 LED 灯, 其有效辐射面积为 $A_t = 2.4 \times 2.4 \text{ cm}^2$; 光学系统入瞳面积 $A_o = \pi(D/2)^2$, $D = 240 \text{ mm}$; 探测器单个像素面积 $A_d = d^2$, $d = 6.45 \mu\text{m}$. 计算得到的最小探测功率 $P_{\text{min}} = 1.48 \times 10^{-7} \text{ W/cm}^2$; 根据跟踪系统的设置参数, 取光学系统透射率 $\tau_o = 0.6$, $R_{\text{SN}} = 6$; 取本地夏季晴空测量的典型天空背景亮度值, 当观测角与太阳夹角小于 30° 时, 天空背景亮度 L_{bg} 为 $0.0003 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$.

按照实际应用需求, 有 $L_t > L_{\text{bg}}$, 将各已知参数代入 (3) 式, 则单色信标灯的辐照亮度 L_t (单位为 $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$) 的计算公式为

$$L_t \geq \frac{R^2 P_{\min} A_d N_t}{A_t A_o \tau_a(R) \tau_o} R_{SN} + L_{bg} = \frac{6 \times 1.48 d^2 R^2 N_t}{0.6 \times (2.4)^2 \times \pi \left(\frac{D}{2}\right) \tau_a(R)} + 0.0003 = \frac{1.48 \times 10^{-6} d^2 R^2 N_t}{1.44 \pi D^2 \tau_a(R)} + 0.0003. \quad (10)$$

根据(10)式计算出 L_t 后,需要将其换算为光度量值,根据光度量与辐射量之间的关系有

$$L_v = K_m \int_{380}^{780} L_t(\lambda) V(\lambda) d\lambda, \quad (11)$$

式中 L_v 为光亮度(单位为 $\text{lm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$); K_m 为明视觉的最大光谱光视效率函数, $K_m = 680 \text{ lm/W}$ 。

按照红光、黄光、绿光 LED 中心波长,查阅《相对光见度数值表》^[4],可得到明视觉相对光谱光视效率函数 $V(\lambda)$,即 $V(625) = 0.323$, $V(588) = 0.814$, $V(525) = 0.786$ 。

根据光亮度的定义,有 $L_v = \frac{\Phi_v}{A_s \Omega}$, Φ_v 为光源光

通量, Ω 为光源立体角,单位为球面度(sr)。则 LED 光源对应的光通量可以用 $\Phi_v = P_v \eta_v = L_v A_s \Omega$ 来计算, η_v 为发光效率。由此得到 LED 灯的最小光功率计算公式为

$$P_v = \frac{L_v A_s \Omega}{\eta_v}, \quad (12)$$

若 LED 光源的发散角 α 为 60° ,则由 $\Omega \approx \pi \sin^2 \frac{\alpha}{2}$ 计算该发散角对应的光源立体角为 $\frac{\pi}{4} \text{ sr}$ 。将以上计算参数代入(12)式,根据不同波长 LED 的发光效率计算得到的结果如表 2 所示。

表 2 不同波长 LED 对应的光功率

Table 2 Optical power of different wavelengths of LED

Target picture element N_t	Monochrome LED illuminance	Monochrome LED wavelength /nm	Target radiation luminance $L_t / (\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1})$	LED luminous efficiency $\eta_v / (\text{lm/W})$	LED optical power P_v / W
9	Red	625	0.0045	30~50	14~24
	Yellow	588	0.0045	30~50	14~24
	Green	525	0.0046	50~80	9~15
81	Red	625	0.0150	30~50	24~40
	Yellow	588	0.0151	30~50	24~40
	Green	525	0.0154	50~80	15~24

4 实验及结果分析

由以上计算结果可以看出,要满足两种不同焦距的探测要求,根据选取 LED 光源波长的不同,对应的最小光功率也不同。红光和黄光的最小光功率需要达到 40 W,绿光的最小光功率需要达到 24 W。目前 LED 的光电转换效率能达到 70%左右,结合市场上成熟产品的指标参数,选取了 3 组不同功率

和波长的 LED 灯开展地面验证实验,包括 50 W 红光 LED、30 W 红光 LED 和 30 W 绿光 LED。考虑到单色光水平传输和斜程传输时,在大气透射率、大气湍流等因素上存在差异,为等效斜程 2.4 km 的探测效果,在地面实验中将 LED 灯水平放置在距离探测跟踪系统 2 km 的平台上。探测跟踪系统探测的 LED 光在 CCD 上的成像情况如图 2 所示。

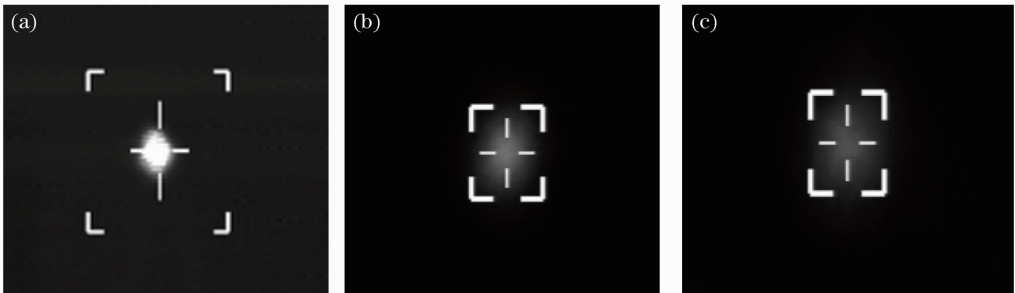


图 2 不同 LED 光源在 CCD 上的成像。(a) 50 W 红光 LED; (b) 30 W 红光 LED; (c) 30 W 绿光 LED

Fig. 2 Imaging of different LED light sources in CCD. (a) 50 W red LED; (b) 30 W red LED; (c) 30 W green LED

从图 2 中的成像效果可以看出,在水平 2 km (等效斜程 2.4 km)距离上,电功率为 30 W 的 LED 光源即可被系统探测,且红色 LED 的光斑亮度略高于同功率的绿色 LED,电功率 50 W LED 的光斑亮度明显高于 30 W LED。实验结果验证了 LED 光功率理论计算结果的正确性。

5 结 论

通过理论分析和实际计算,从辐射度量的角度,推导出可见光 CCD 探测单色 LED 信标光功率的计算方法:在探测距离一定的情况下,从目标信号、背景信号差值与探测器噪声比值满足跟踪探测要求的角度出发,推算出所需单色 LED 光源的目标辐射亮度表达式;在计算 CCD 最小探测功率、成像像素数以及大气透射率等主要参数的基础上,结合探测跟踪系统的主要技术指标,给出了 LED 光源的目标辐射亮度;再将辐射亮度转换为 LED 的光通量表示方式,根据发光效率计算出 LED 光源的最小光功率。在此基础上,结合理论计算结果,利用实际产品开展了 3 组不同波长 LED 的地面实验,通过成像效果的对比,验证了计算方法的正确性。

此外,根据计算公式可以看出,单色 LED 信标的最低光功率与探测距离、CCD 的性能指标、光源占 CCD 靶面像素数、光源发散角等因素之间存在着相互约束关系。因此,在实际应用中解决类似问题时,要结合具体的情况作进一步的分析。

参 考 文 献

1 Liu Xiaojun, Ni Guoqiang, Lu Xin. Analysis of optical power of cooperative targets detected by CCD camera in rendezvous and tracking[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(1): 28~30
刘晓军,倪国强,卢欣. 交会跟踪 CCD 像机探测合作目标光功率分析[J]. *光电工程*, 2006, **33**(1): 28~30

2 Wang Bingxue, Zhang Qiheng, Liu Yuqing *et al.*. Analysis for operating distance of a searching and tracking system based on CCD detector[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(11): 12~15,62
王兵学,张启衡,刘玉清等. CCD 探测器搜索跟踪系统的作用距离分析[J]. *光电工程*, 2004, **31**(11): 12~15,62

3 Wang Bingxue, Zhang Qiheng, Chen Changbin *et al.*. A mathematical model for operating range of a staring IR search and track system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(7): 8~11
王兵学,张启衡,陈昌彬等. 凝视型红外搜索跟踪系统的作用距离模型[J]. *光电工程*, 2004, **31**(7): 8~11

4 Radio Corporation of America. *Electro-Optics Handbook*[OL]. http://www.phy.davidson.edu/FacHome/jny/optics/Burle%20Electro_Optics.pdf, 2012-08-29

5 Wang Bingxue, Zhang Qiheng, Wang Jingru *et al.*. Evaluation of parameters in mathematical model for operation of starring IRST system[J]. *Infrared Technology*, 2004, **26**(4): 6~10
王兵学,张启衡,王敬儒等. 凝视型红外搜索跟踪系统作用距离模型中参数值的确定[J]. *红外技术*, 2004, **26**(4): 6~10

6 Wang Weiguo. *Research of Space Object Detecting under Bright Background*[D]. Changchun: Chanchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005. 29~30
王伟国. 空间目标白天光电探测技术研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005. 29~30

7 Mu Da, Wang Jianli, Chen Tao. Analysis for operating range of IR search & track system[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2006, **27**(S1): 93~95
牟达,王建立,陈涛. 红外搜索跟踪系统作用距离的分析[J]. *仪器仪表学报*, 2006, **27**(S1): 93~95

8 Song Zhengfang. *Atmospheric Optical Application Foundation* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990. 37~46
宋正方. *应用大气光学基础*[M]. 北京:气象出版社, 1990. 37~46

9 An Xiaoqiang, Zhu Bin, Qing Rongsheng. Detective power of photoelectric imaging system on 1.06 μm laser facula[J]. *Laser Technology*, 2001, **25**(6): 441~444
安晓强,朱斌,卿荣生. 光电成像系统对 1.06 μm 激光光斑探测能力研究[J]. *激光技术*, 2001, **25**(6): 441~444

10 Zu Yev, Kurbanov. *The Light Signal Transmission in the Earth's Atmosphere*[M]. Yin Xianxiang transl.. Beijing: Science Press, 1987. 52~54
祖耶夫,卡巴诺夫. 光信号在地球大气中的传输[M]. 殷贤湘译. 北京:科学出版社, 1987. 52~54

栏目编辑:何卓铭