

文章编号: 1001-3806(2012)02-0217-04

激光主动侦察作用距离的研究

和 婷, 牛燕雄*, 张 鹏, 王彩丽, 崔云霞, 牛海莎

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: 基于猫眼效应的激光主动侦察技术有效地结合了激光技术、成像传感技术和微弱目标的信息处理技术, 可实现对远距离微弱目标的主动探测和识别, 是光电对抗领域的一项重要技术, 其中作用距离是侦察系统的主要参量之一。为了评估激光主动侦察系统的作用距离, 以猫眼目标的光学窗口所反射的激光回波功率为基础, 分析了影响作用距离的因素, 建立了最大作用距离的数学物理模型。数值模拟了发射激光峰值功率、发射激光束散角、大气能见度、探测器灵敏度以及等效反射面离焦量对最大作用距离的影响。结果表明, 通过减小发射激光束散角, 提高探测器灵敏度可以有效提高系统的作用距离; 为满足不同情况的天气需求, 可选择不同波长的激光光源。这一结果可用于指导激光主动侦察的系统设计或者作为衡量系统性能的标准。

关键词: 激光技术; 激光主动侦察; 猫眼效应; 回波功率; 作用距离

中图分类号: TN247

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.02.018

Study on active laser detection distance

HE Ting, NIU Yan-xiong, ZHANG Peng, WANG Cai-li, CUI Yun-xia, NIU Hai-sha

(Department of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Active laser detection based on cat-eye effect is a key technique in the photoelectric field. This technique combines the laser technique, image sensing technology and information processing technology on weak signals. There are many parameters that affect the active laser detection. The detection distance is one of the most important. Based on the retro-reflection power of the cat-eye system, several factors including the peak power of the transmit laser, the divergent angle of transmitting laser beam, atmospheric visibility, sensitivity of the detectors and the defocusing were analyzed to provide the mathematical model of the maximum detection distance. The results show that the following methods can increase the detection distance: decreasing the laser divergent angle, improving the sensitivity of the detection, choosing different laser lights according to different weather. The result is helpful to system design or measurement of active laser detection.

Key words: laser technique; active laser detection; cat-eye effect; echo power; detection distance

引 言

随着光电技术的不断发展, 光电领域的对抗技术日益成为研究的热点。“被发现就意味着被摧毁”已成为高技术战争的显著特点, 因此, 如何及时发现并有效抑制敌方光电系统及相应武器系统的功能是光电对抗领域的一项核心内容。

目前, 光电对抗中的侦察手段主要有主动侦察和被动侦察。相比被动侦察技术, 主动侦察技术具有更高的回波功率、更高的定位精度和更快的探测速率。作用距离是制约侦察技术的主要因素之一, 如何提高系统的最大作用距离, 对于提高系统的性能具有重要

的意义。

作者对影响作用距离的因素: 发射激光峰值功率、发射激光束散角、大气能见度、离焦量、探测器灵敏度进行了理论分析, 建立了最大作用距离的数学物理模型, 并对作用距离与其影响因素间的关系进行了数值模拟。通过理论分析及数值模拟, 提出了提高最大作用距离的可行性方法, 用于指导激光主动侦察系统的设计或衡量系统性能的标准。

1 激光主动侦察技术

目前, 军事上常用的光电系统主要包括光电侦察系统、光电跟踪系统、光电搜索系统、光电制导系统、光电火控系统以及光电测距系统等^[1]。这些光电设备的光学窗口有一个共同的特性, 就是对入射光有较强的按原光路返回的特性, 相比漫反射目标而言, 它的回波强度要高出 10^2 倍~ 10^4 倍, 这就是光学窗口的猫眼效应^[2]。具有猫眼效应的光学系统可以等效为一个

作者简介: 和 婷(1989-), 女, 硕士研究生, 主要从事激光主动侦察方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: niuyx@buaa.edu.cn

收稿日期: 2011-06-13; 收到修改稿日期: 2011-09-06

理想透镜与一个位于其焦平面(或附近)的反射元件的组合^[3]。

激光主动侦察技术就是利用光学窗口的猫眼效应,通过发射激光束对空间区域进行扫描,如果扫描区域内存在作为攻击目标的敌方光学设备,那么我方就可以接收到比背景强许多的回波信号,进而与相应的强激光武器相结合,实现对敌方光电系统及相应武器系统的抑制和破坏^[4]。其原理如图1所示。

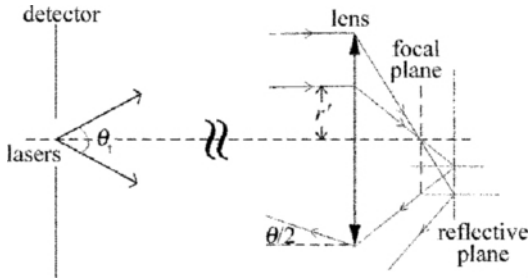


Fig. 1 Schematic drawing of an active laser detection system

通常由于装配误差等原因,探测激光束不一定会完全聚焦到等效反射面上,因此部分反射光会溢出透镜^[5]。假定发射激光束散角为 θ_1 ,等效透镜的半径为 r ,离焦量为 δ ,离焦造成的激光束散角(全角)为 θ ,透镜焦距为 $f(f \gg \delta)$ 。利用几何关系可得有效半径:

$$r' = rf / (f + 2\delta) \quad (1)$$

因此,猫眼目标的等效面积:

$$A_c = \pi [rf / (f + 2\delta)]^2 \quad (2)$$

同样,利用几何关系,可以得到:

$$\theta = 2 \arctan\{2r\delta / [(f + 2\delta)f]\} \approx 4r\delta / f^2 \quad (3)$$

所以回波束散角为:

$$\theta_c = \theta_1 + \theta = \theta_1 + 4r\delta / f^2 \quad (4)$$

2 作用距离的评估

2.1 猫眼目标反射的回波功率

由图1可得,激光光源发射的激光经大气的传输后到达猫眼目标,经猫眼目标反射后,再次经大气传输到达探测器。为了便于计算,将主动侦察的示意图简化为图2,分别计算激光从发射、传输、反射、再次传输和接收各个阶段的光功率,最终得到猫眼目标反射的回波功率。

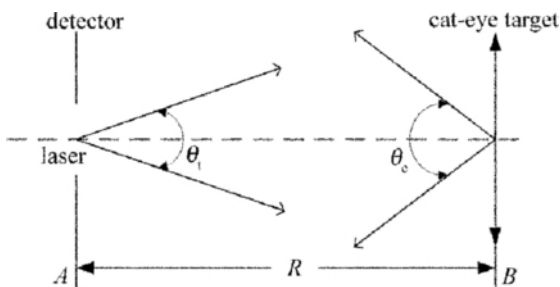


Fig. 2 Calculative drawing of the echo power

图2中A处为主动侦察系统的探测器,B处为猫眼目标的光学窗口, θ_1 为发射激光束散角, θ_c 为回波束散角, R 为探测系统与目标之间的距离。为了方便分析,假设激光从探测器光学系统的中心发射,并且只考虑大气衰减对激光传输的影响,不考虑大气扰动的影响^[6]。

根据几何光学原理,A处激光到达B处所形成的光斑面积为:

$$S_B = \pi [R \tan(\theta_1/2)]^2 \approx \pi R^2 \theta_1^2 / 4 \quad (5)$$

那么,发射激光在大气中首次传输到达B处后,光学窗口所接收的光功率为:

$$P_{c1} = P_t A_c \tau_t \tau / S_B \quad (6)$$

式中 P_t 为发射激光峰值功率, τ_t 为发射系统的光学透过率, τ 为激光单程水平大气透过率。

B处光学窗口发射的光功率为:

$$P_{c2} = P_{c1} \tau_c \rho_c \tau_c \quad (7)$$

式中 τ_c 为猫眼目标的镜头透过率, ρ_c 为等效反射元件的反射率。

B处反射的激光到达A处所形成的光斑面积为:

$$S_A = \pi [R \tan(\theta_c/2)]^2 \approx \pi R^2 \theta_c^2 / 4 \quad (8)$$

激光经猫眼目标反射后,在大气中再次传输到达A处后,探测器所接收的回波功率:

$$P = P_{c2} \tau_d A_d / S_A = 16 P_t A_c \tau_t \tau^2 \tau_c^2 \rho_c \tau_d A_d / (\pi^2 R^4 \theta_1^2 \theta_c^2) \quad (9)$$

式中 τ_d 为探测光学镜头的透过率, A_d 为CCD的光敏面积, τ^2 为激光双程水平大气透过率, $\tau^2 = \exp[-3.912 \times (\lambda/0.55)^{-1.3-1.6} \times 2R/V]$, λ 为波长, V 为大气能见度。

2.2 最大作用距离的数学模型

通过对回波功率的理论分析可以看出,影响作用距离的主要因素为:发射激光的峰值功率、发射激光的束散角、等效反射元件的离焦以及大气能见度等。

在实际侦察过程中,限制最大作用距离的两个主要条件见下。

(1) 为了能探测到猫眼目标,必须满足猫眼目标的回波功率应不小于主动探测系统CCD的最小可探测功率^[7]。即:

$$P \geq P_{\min} \quad (10)$$

由于CCD的灵敏度通常用光照度表示,光能量通常用光通量表示,所以(10)式可转化为:

$$P \geq EA_d/k \quad (11)$$

式中 k 为光视效能因子,值为683lm/W, E 为CCD的灵敏度。取(11)式中的等号,可解得一个最大作用距离 R_{\max} 。

(2) 为了能区分猫眼目标与背景,必须满足在相

同距离条件下,猫眼目标相对于背景的回波功率对比度应大于1^[8]。即:

$$P/P_b > 1 \quad (12)$$

假设背景为朗伯反射体,根据背景与激光探测光斑的大小关系,可以将背景分为漫反射小目标和漫反射大目标两种。

对于漫反射小目标而言,其回波功率为^[9]:

$$P_{b1} = 4P_t A_d A_{b1} \tau_t \tau_d \tau^2 \rho_1 / (\pi^2 \theta_t^2 R^4) \quad (13)$$

式中, A_{b1} 为漫反射小目标的有效反射面积, ρ_1 为漫反射小目标的反射率。故:

$$P/P_{b1} = 4A_e \tau_c^2 \rho_c / (A_{b1} \rho_1 \theta_e^2) \quad (14)$$

由(14)式可以看出,两者之比与距离无关。因此,当背景为漫反射小目标时,最大作用距离主要受 CCD 探测灵敏度的影响。

对于漫反射大目标而言,其回波功率为^[6]:

$$P_{b2} = P_t \tau_t \tau_d \tau^2 \rho_2 A_d / (\pi R^2) \quad (15)$$

式中, ρ_2 为漫反射大目标的反射率。故:

$$P/P_{b2} = 16\tau_c^2 \rho_c A_e / (\pi R^2 \rho_2 \theta_t^2 \theta_e^2) \quad (16)$$

令 $P/P_{b2} = 1$, 可得到另一个最大作用距离 R_{m2} 。

根据以上两个限制条件,可以求出两个探测值,因此最大作用距离应为:

$$R_{\max} = \min(R_{m1}, R_{m2}) \quad (17)$$

3 数值模拟

根据以上理论分析可以看出,影响最大作用距离的因素主要有发射激光峰值功率、发射激光束散角、大气能见度、等效反射面的离焦量以及 CCD 灵敏度,为此对这些影响因素进行数值模拟研究。

假设系统的各项参量如下:(1)假设发射接收部分取值:发射激光峰值功率 $P = 30\text{W}$,发射激光束散角 $\theta_t = 1\text{mrad}$,发射系统光学透过率 $\tau_t = 0.7$,探测光学镜头透过率 $\tau_d = 0.8$,CCD 灵敏度 $E = 0.05\text{lx}$;(2)假设猫眼目标取值:透镜半径 $r = 20\text{cm}$,焦距 $f = 50\text{cm}$,镜头透过率 $\tau_c = 0.8$,反射面的反射率 $\rho_c = 0.05$,离焦量 $\delta = 2\text{cm}$;(3)假设背景及大气取值:漫反射大目标的反射率 $\rho_2 = 0.03$,大气能见度 $V = 800\text{m}$ 。

3.1 发射激光峰值功率对作用距离的影响

观察(16)式,改变发射激光峰值功率的值,并不改变 R_{m2} 的值,在系统参量给定的条件下, R_{m2} 的值为 48.79km 。经估算,目前激光器的发射功率范围内,得到的 R_{m1} 总是比 R_{m2} 小,因此最大作用距离为 R_{m1} 。下面通过改变假设(1)中 P_t 的取值,数值模拟研究发射激光峰值功率对 R_{m1} 的影响。

如图3所示, R_{m1} 随着发射激光峰值功率的增大而增大,峰值功率未到达千瓦级别时, R_{m1} 的变化是非常

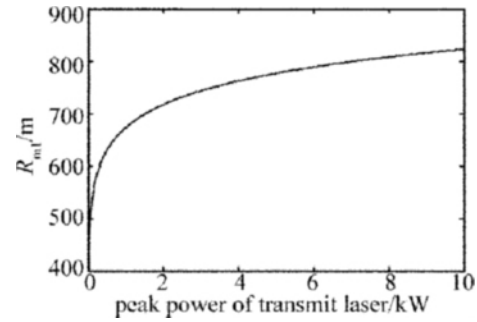


Fig. 3 Detection distance affected by peak power of transmit laser

显著的。当峰值功率达到千瓦级别以后, R_{m1} 的增加则变得较为平缓。当 $P_t = 1000\text{W}$ 时,最大作用距离为 673.8m ; 当 $P_t = 6000\text{W}$ 时,最大作用距离为 789.5m 。可见,提高发射激光峰值功率可以提高系统的最大作用距离,但其效果不是很理想,而且在千瓦级别提高激光器的功率会大大增加成本,因此,通过提高发射激光峰值功率来提高最大作用距离的方法不太切合实际应用。

3.2 发射激光束散角对作用距离的影响

通过改变假设(1)中 θ_t 的取值,分别模拟研究发射激光束散角对 R_{m1} 及 R_{m2} 的影响。

由图4看出, R_{m1} 与 R_{m2} 均与发射激光束散角 θ_t 呈负相关关系。当 $\theta_t < 1\text{mrad}$ 时, R_{m1} 与 R_{m2} 均迅速下降,但是 R_{m2} 的下降幅度较 R_{m1} 更为严重; 当 $\theta_t > 1\text{mrad}$ 时, R_{m1} 与 R_{m2} 的下降均变得较为平缓,相比 R_{m1} , R_{m2} 的下降几乎观察不到。观察图4,当 θ_t 一定时, R_{m1} 总是比 R_{m2} 小很多。因此,最大作用距离应取 R_{m1} 。当 $\theta_t = 0.1\text{mrad}$ 时,最大作用距离为 3.123km ; 当 $\theta_t = 1\text{mrad}$ 时,最大作用距离为 2.696km 。可见,选用发射束散角

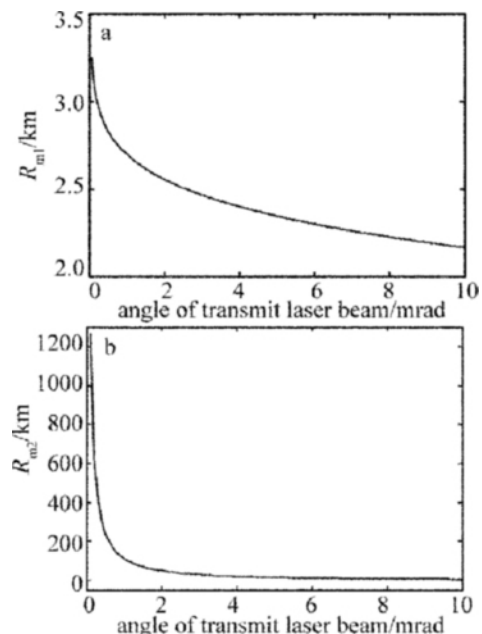


Fig. 4 Detection distance affected by the divergent angle of transmitting laser beam

小的激光源,可以大大提高系统的最大作用距离。

3.3 大气能见度对作用距离的影响

观察(16)式,改变大气能见度的取值,并不改变 R_{m2} 的值,在系统参量给定的条件下, R_{m2} 的值为110.77km。在空气特别干净的北极或者山区,大气能见度能达到70km~100km,取最大能见度100km计算得到的 $R_{m1} = 1.64km$ 。 R_{m1} 总是比 R_{m2} 小,所以最大作用距离应为 R_{m1} 。

通过改变假设(3)中 V 的取值,数值模拟研究大气能见度对 R_{m1} 的影响。

从图5可以看到,随着大气能见度的不断增大, R_{m1} 也不断增大,只是增大速率不断变慢。当 $V = 1000m$ 时,最大作用距离为637km;当 $V = 8000m$ 时,最大作用距离为1547km。可见,天气状况对最大作用距离的影响是非常大的,在不同的天气状况下,选择不同波长的激光源可以提高系统的最大作用距离。

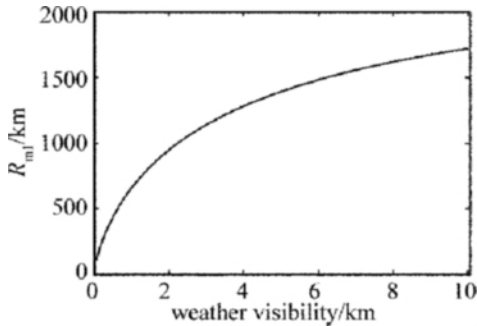


Fig. 5 Detection distance affected by the weather visibility

3.4 反射面离焦量对作用距离的影响

通过改变假设(2)中 δ 的取值,数值模拟研究反射面离焦量对作用距离的影响。

由图6可以看出 R_{m1} 与 R_{m2} 都随着等效反射面离

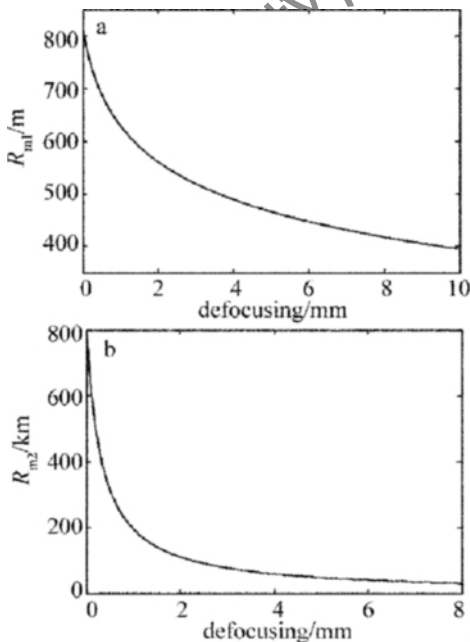


Fig. 6 Detection distance affected by the defocusing

焦量的增大而减小。当 $\delta < 1mm$ 时, R_{m1} 与 R_{m2} 均迅速下降,但是 R_{m2} 的下降幅度较 R_{m1} 更为严重;当 $\delta > 2.5mm$ 时, R_{m1} 与 R_{m2} 的下降均变得较为平缓,相比 R_{m1} 的变化, R_{m2} 变化得更为缓和。观察图6中坐标,当 δ 一定时, R_{m1} 总是比 R_{m2} 小。因此,最大作用距离应取 R_{m1} 。当 $\delta = 1mm$ 时,最大作用距离为628.8m;当 $\delta = 9mm$ 时,最大作用距离为405.8m。由此可见,反射面离焦量一定程度上制约了最大作用距离,但是实际侦察过程中,等效反射面的离焦量都是固定的,并不能通过减小离焦量来提高最大作用距离,这里只是对其影响进行分析。

3.5 CCD灵敏度对作用距离的影响

观察(16)式,改变大气能见度的取值,并不改变 R_{m2} 的值,在系统参量给定的条件下, R_{m2} 的值为110.77km。经估算,目前CCD的灵敏度范围内求得的 R_{m1} 总比 R_{m2} 小,因此最大作用距离为 R_{m1} 。

通过改变假设(1)中 E 的取值,数值模拟研究CCD灵敏度对 R_{m1} 的影响。

如图7所示,随着CCD可接收最小照度的不断提高(CCD灵敏度的不断降低), R_{m1} 不断减小。当 $E < 0.02lx$ 时, R_{m1} 近似直线下降;当 $E > 0.2lx$ 时, R_{m1} 的下降变得平缓许多。当 E 取值为0.002lx,0.02lx,0.2lx,2lx时, R_{m1} 的值对应为760.5m,615.2m,482.3m,364.2m。由此可见,最大作用距离在很大程度上受到CCD灵敏度的制约,使用高灵敏度CCD甚至增强型CCD,可有效提高系统的最大作用距离。

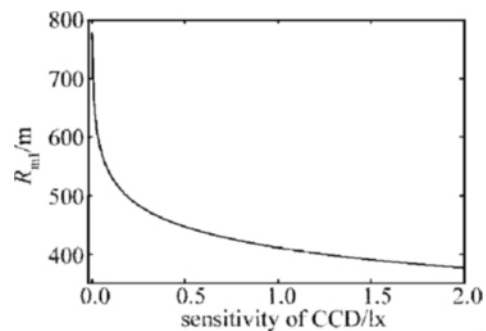


Fig. 7 Detection distance affected by sensitivity of CCD

4 结束语

通过建立激光主动侦察系统最大作用距离的数学物理模型,对影响作用距离的因素进行了数值模拟研究。研究表明:最大作用距离随发射激光峰值功率的增大而增大、随发射激光束散角的增大而减小、随CCD灵敏度的提高而增大、随大气能见度的增强而增大、随反射面离焦量的增大而减小。基于最大作用距离随其影响因素的变化规律,可以得到提高系统最大

(下转第224页)

Table 1 Norm comparison of the two methods

| filtering mean | parameter | Fig. 2 | Fig. 3 |
|---------------------------|------------------------|------------|-----------|
| median filtering | σ_{NMSE} | 0.0023108 | 0.002281 |
| | R_{PSNR} | 21.242 | 7 |
| | M_{MAE} | 33.426 | 25.658 |
| adaptive median filtering | σ_{NMSE} | 0.00055026 | 0.0004944 |
| | R_{PSNR} | 27.474 | 17.699 |
| | M_{MAE} | 3.5192 | 3.8326 |

3 结论

(1) 自适应滤波在数据处理,特别是在数据局部细节保留上,相对于中值滤波有明显的优势。(2) 自适应滤波的客观评价指标上,相对于中值滤波也有明显优势。(3) 对于雷达探测到的云数据,去除噪声点是预处理中一个至关重要的任务,噪声点去除的程度影响到云层微观物理量的反演。

因此,本文中改进的方法主要在于散点噪声的剔除。经实验证明,改进的方法性能优于传统的中值滤波,而且滤波的效果比较好。

参考文献

- [1] ZHONG L Z. Calibration and capability analysis of china new generation of cloud radar-HMBQ and its preliminary application in retrieving cloud microphysics parameters[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2009: 25-43(in Chinese).
- [2] BROWNRING D P K. The weighted median filter[J]. Communications of the Association for Computing Machinery, 1984, 27(8): 807-818.
- [3] KO S J, LEE Y H. Center weighted median filters and their applications to image enhancement[J]. Journal of IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1991, 38(9): 984-993.
- [4] SUN T, NEUVO Y. Detail-preserving median based filters in image processing[J]. Journal of Pattern Recognition Letters, 1994, 15(4): 341-347.
- [5] HU W, FENG W S, LI Zh Sh. An adaptive median filter with double windows for impulsive noises[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2006, 38(4): 131-135(in Chinese).
- [6] ZHANG X M, XU B Sh, DONG Sh Y. Adaptive median filtering for image processing[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(2): 295-299(in Chinese).
- [7] JIANG J, JIAO B L. New median filtering method based on statistic analysis[J]. Laser Technology, 2011, 35(1): 29-31(in Chinese).
- [8] KWAN P, KAMEYAMA K, TORAICHI K. On a relaxation-labeling algorithm for real-time contour-based image similarity retrieval[J]. Journal of Image and Vision Computing, 2003, 21(3): 285-294.
- [9] WANG J H, LIN L D. Improved median filter using min/max algorithm for image processing[J]. Electronics Letters, 1977, 33(16): 1362-1363.
- [10] WEI Y F, DU Zh Ch, YAO Zh Q. Application of median filter in point cloud data pre-processing lidar[J]. Laser Technology, 2009, 33(2): 213-216(in Chinese).
- [11] LIU G H, GUO W M. Application of improved arithmetic of median filtering denoising[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(10): 187-189(in Chinese).
- [12] ZHOU J. The modified algorithms of median filtering applied in image processing[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2007: 19-20(in Chinese).
- [13] WANG X K, LI F. Improved adaptive median filtering[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(3): 175-176(in Chinese).
- (上接第220页)
- 作用距离的可行性方法: 选用发射束散角小的激光光源; 选用高灵敏度的探测器; 对于不同的天气情况, 选用不同波长的激光光源。
- [1] JIANG Zh G, TAN J Ch, LIANG J, et al. Suitability of "cat's eye" effect for reconnaissance by the scanning laser[J]. Laser Technology, 2005, 29(5): 550(in Chinese).
- [2] MIEREMET A L, SCHLEIPEN R M A, POUHELLE P N. Modeling the detection of optical sights using retro-reflection[J]. SPIE, 2008, 6950: 6950E1-6950E2.
- [3] ZHAO H W, WANG J, SONG M, et al. Laser experimental study of "cat-eye" effect[J]. Laser Technology, 2005, 29(1): 62-63(in Chinese).
- [4] CHEN H Zh, ZHENG R Sh, ZHANG Y Y, et al. Application of laser active intelligence technology[J]. Electro-optic Technology Application, 2007, 22(2): 19-20(in Chinese).
- [5] ZHAO X J, GAO Zh Y, ZHANG Y Y, et al. Technique of active laser reconnaissance and the applications in the military[J]. Optical Technique, 2003, 29(4): 415(in Chinese).
- [6] ZHAO M J, HU Y Zh, ZENG X D. Estimation of the operation range of the active laser surveillance[J]. Journal of Xidian University(Natural Science Edition), 2004, 31(1): 73(in Chinese).
- [7] ZHENG R Sh. Analysis of laser detection distance for ground optics lens[J]. Electro-optic Technology Application, 2005, 20(4): 16-19(in Chinese).
- [8] QIN K, HAN Sh K, ZENG Ch H. Analysis of active laser detection distance for "cat's eye" target[J]. Optical Technique, 2009, 35(4): 487(in Chinese).
- [9] SUN H, XIONG F, GU S. Ranging performance of active laser detection[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6344: 63442P.