

基于 CCD 图像智能分析的激光主动规避飞行物系统

熊俊^{1,2}, 夏媛^{1,2}, 杨勇¹, 程学武¹, 李发泉¹

- (1. 中国科学院武汉物理与数学研究所 波谱与原子分子物理国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 激光雷达是地球大气探测的有利工具, 但其向空中发射的强激光束会对空域飞行物存在潜在威胁。为保障激光雷达上空飞行物的飞行安全, 提出了一种基于 CCD 成像探测的激光智能主动规避飞行物的方法, 并搭建了一套实验装置。该装置通过触发同步控制 CCD 实时采集激光雷达激光束方向一定范围的空域图像, 再对图像进行降噪、差值和二值化等处理, 并判断是否有飞行物在空域范围内, 根据处理结果控制激光发射光路中的机械开关打开或者关闭, 有效保证了激光雷达的安全运行以及飞行物的安全。

关键词: 飞行物规避; 激光雷达; 图像采集; CCD

中图分类号: TN954+.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.S106005

System of laser actively evading flying objects based on image acquisition using CCD

Xiong Jun^{1,2}, Xia Yuan^{1,2}, Yang Yong¹, Cheng Xuewu¹, Li Faquan¹

- (1. State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Wuhan Institute of Physics And Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Lidars emit high intensity of laser beam to the sky, which has a potential threat to the flyers. For the flight safety and the safe operation of lidar, a method was proposed for laser actively evading flying objects and an experimental setup was built up. The system utilized a CCD to achieve image acquisition of the airspace around the lidar emitting beam in real time. The images were transmitted to the PC and processed by the control software. Finally the shutter in the lidar emitting path was controlled to turn on or turn off according to the results of the imaging process. When flyers fly into the field of view of the CCD, the shutter can be turned off automatically to cut off the laser emission path so that to ensure the flight safety and the safe operation of lidar.

Key words: flying objects evading; lidar; image acquisition; CCD

收稿日期: 2016-02-02; 修订日期: 2016-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(41127901, 11403085)

作者简介: 熊俊(1990-), 男, 硕士生, 主要从事激光雷达大气探测方面的研究。Email: xiongjun1990@foxmail.com

导师简介: 李发泉(1970-), 男, 研究员, 博士, 主要从事原子滤光及其应用方面的研究。Email: lifaquan@wipm.ac.cn

0 引言

激光是一种单色性好、相干性好、亮度高、方向性好的光束,已被广泛应用于激光医疗、激光通信、激光雷达等领域。激光按照其潜在危害性分为四级,通常认为只有在等级要求最低的一级激光(功率小于 0.4 mW)是安全的。当激光功率超过 1 mW 时可能对眼睛造成伤害,而四级激光(平均功率超过 500 mW)足以使人的眼睛瞬间致盲或皮肤受到伤害^[1-2]。

激光雷达利用强激光与大气物质相互作用,可获得从近地面到 120 km 左右大气温度、密度、波动等信息,已成为大气探测的有利工具。在激光雷达系统中,发射的激光功率一般在瓦级,因此对于激光的安全防护更加不容忽视。激光雷达,尤其是探测目标在高空区域的激光雷达,其向高空发射的激光束对空中飞行器存在潜在的威胁^[3]。因此,在向高空发射激光时,有必要探明激光器上空是否有飞行器,并在飞行器经过激光器上空时采取主动规避措施,避免激光束击中飞行器,对飞行器造成伤害。

探测空中目标飞行器主要有两种方式:一种是使用微波雷达,对探测区域发射电磁波束进行探测^[4],另一种是使用 CCD 成像进行探测^[5]。微波雷达发展较为成熟,探测速度快,稳定性好,且可实现全天候检测。但该系统需向空中发射大功率无线电波,这可能会干扰正常的无线电通讯。此外,微波雷达一般根据回波强度来衡量目标是否存在^[6],不能对目标成像,易使系统出现虚警和漏警现象。

文中提出了一种基于 CCD 图像采集的激光智能主动规避飞行器技术。通过 CCD 探测器和望远镜采集激光雷达工作光束周围空域的图像,当飞行器进入视场时利用系统软件控制机械开关主动截断激光发射光路,实现激光主动规避飞行器。CCD 具有精度高、响应时间快、抗干扰能力强等优点^[7],且 CCD 功耗极低,只需通过 CCD 上的 USB 接口供电即可,该接口同时可向电脑传输采集的图像数据,方便进行实时处理。此外,与使用微波雷达方式相比,该方法通过光学成像手段探测避免了对无线电通讯的影响。

1 系统设计

1.1 系统组成

激光智能主动规避飞行器装置的系统框图,如

图 1 所示,主要包括图像采集和控制输出两个部分。图像采集通过 CCD 图像传感器(Thorlabs)实现,具有输出噪声低、灵敏度高、空间分辨率高等特点。同时,使用一个望远镜作为 CCD 图像传感器的镜头,望远镜的型号参数根据实验需要严格计算之后得到。控制单元由采集卡、机械开关及其控制器组成。

CCD 和采集卡均通过 USB 口与计算机通讯。所采用的 CCD 可通过外部信号同步触发图像采集。该系统中通过信号发生器设置激光脉冲信号的延时信号作为 CCD 采集图像的外部触发信号,使图像采集的时间在激光雷达两个脉冲触发之间,可有效降低脉冲激光闪烁对采集图像强度的影响,从而防止误判。CCD 采集激光雷达工作激光束周围空域的图像并转换成数字图像后存储于控制计算机上,利用 Labview 软件及其图像采集驱动函数编写控制程序,对采集到的相邻几幅图像进行比较,分析图像的变化,从而判断出激光器上空是否有飞行器^[8]。采集卡根据计算机的判断结果输出 TTL 电平给控制器控制机械开关打开或关闭(高电平为开启,低电平为关闭),使在有飞行器时发射激光光路被自动隔断,无飞行器时激光正常向空中发射。

系统有自动和手动两种工作模式。选择自动模式时,控制器根据软件判断结果输出的 TTL 电平自动控制机械开关的开闭;当系统处于手动模式时,可以手动控制机械开关的开闭,使系统控制更加灵活方便。

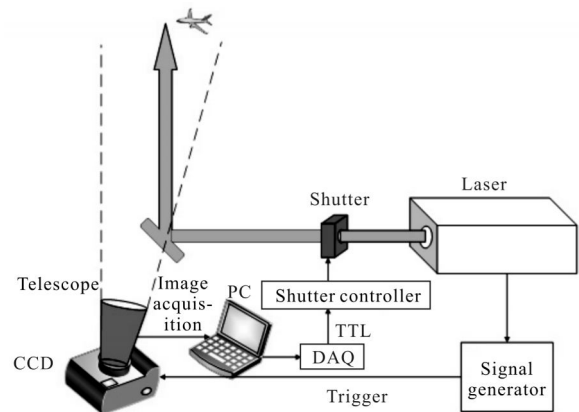


图 1 系统实验装置图

Fig.1 System experimental setup

1.2 参数分析计算

CCD 需要选择合适的区域进行探测,才能保证在飞行器经过激光器正上方之前做出有效判断和动

作。因此,需要对望远镜的参数进行计算。

一般客机长度为 70 m 左右,翼展约为 60 m,飞行在海拔高度 H 约为 10 km 的平流层中。此外,一般客机的飞行速度 v 约为 800 km/h,即约 220 m/s。因此,选择激光器正上方 10 km 高度处直径 $D=2000\text{m}$ 的空间为观察区域,如图 2 所示。由图 2 可得 CCD 探测视场角 θ 与飞行高度 H 和观察区域直径 D 之间的关系为:

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{D/2}{H} \quad (1)$$

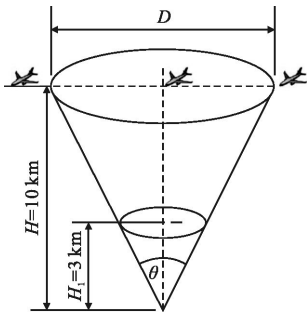


图 2 探测视场计算示意图

Fig.2 Diagram of calculating detection field-of-view

计算可得视场角 θ 约为 11.4° 。此次实验所用的 CCD 图像传感器大小为 $1/3\text{ in}$ (CCD 长宽比 4:3, $1\text{ in}=2.54\text{ cm}$),根据公式

$$f=L\frac{d}{D} \quad (2)$$

式中: f 为焦距; L 为被摄物体到镜头之间的距离; d 为被摄物体在 CCD 靶面上的成像宽度; D 为被摄物体宽度。该实验中 $D=2000\text{m}$, $L=H=10\text{km}$, $d=\frac{3}{5}\times\frac{1}{3}\text{ in}=5.08\text{ mm}$,计算可得需要采用的镜头焦距为 25.4 mm。一架飞机从进入 CCD 视场开始到完全离开 CCD 视场总共需要大约 9.4 s。假设 CCD 每秒拍摄 M 张图像,计算机通过前后 P 张图像进行比较,计算机处理耗时 t_p ,计算机控制机械开关关闭耗时 t_c ,则当 P 满足公式

$$\frac{P-1}{M} < \frac{H \times \tan \frac{\theta}{2}}{v} - t_c - t_p \quad (3)$$

时,该装置能够及时判断并关闭机械开关。

计算机处理耗时 t_p 大约 0.1 s,计算机控制机械开关关闭耗时 t_c 大约 0.1 s,CCD 每秒采集图像约为

$M=10$ 张,计算得到 $P < 44.5$ 。因此,当图像处理循环次数 $P < 44.5$ 时,能够有效进行规避。选择合适的循环次数 P 可以减少误报警,根据经验取 $2 \leq P \leq 10$ 较为合适。

除了要考虑正常飞行的飞行物之外,还需要考虑到城市上空起飞或者降落的飞行物,它们的飞行高度较低,飞行速度也较慢。假设起飞或者降落的飞行物飞行速度 $v'=400\text{ km/h}$,即大约 110 m/s,根据公式(3)计算得到的 $H'=0.66\text{ km}$ 。而一般飞机的起飞速度小于 300 km/h ^[9],并且除非机场附近,正常情况下飞机不会在低于 1 km 的高度飞行,因此该装置对于起飞或者降落的飞行物同样有效。

为了消除因为云层、天气(日落日出)等的缓慢变化(云层的移动速度一般在 $10\sim 20\text{ m/s}$,在 CCD 上面的变化不超过两个像素点),程序中图像处理的判断阈值将根据前两次图像处理中的计算结果累加平均后得到,以减少误判。

1.3 软件实现

图 3 所示为系统实施的主程序流程图。程序实时读取由外部触发信号同步采集到的 CCD 图像,将前后相邻时刻的几幅图像进行比较并将结果与设置的阈值进行比较。当有飞行物进入工作激光束周围空域,前后相邻时刻采集到的图像结果将有显著差异。程序根据结果判断此时工作激光束周围空域存在飞行物,计算机将通过采集卡输出报警信号并结合控制时序输出低电平给机械开关控制器的外部触

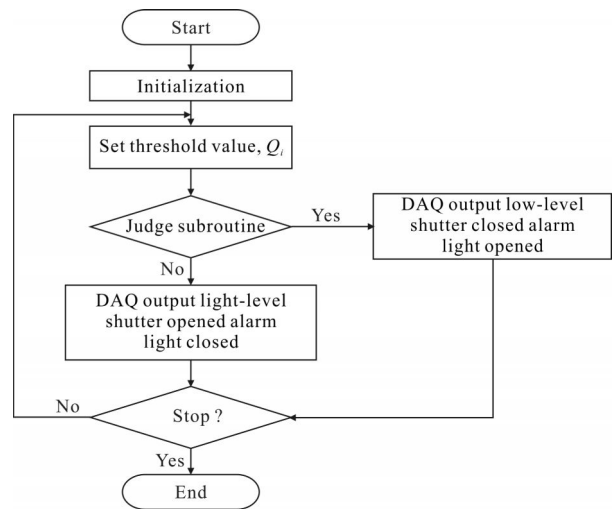


图 3 控制主流程图

Fig.3 Flow chart of main program

发输入端口,触发激光束路径中的机械开关关闭,实现发射激光束的截断。此后程序继续读取实时采集的图像,当飞行物完全飞离 CCD 采集视场,采集到的相邻几个时刻的图像将基本不再发生变化,程序通过采集卡输出高电平信号触发机械开关开启,使工作激光束恢复发射并关闭报警灯。

图 4 所示为判断是否有飞行物的算法流程图。程序利用 Labview 的图像采集驱动函数实时读取 CCD 图像,将读取到的图像 N_i 与相邻时刻的图像 N_{i+1} 相减之后得到的差值图像转化为便于比较的二维数组(1 024×768),即得到相减图像的每一个像素点的强度值,再将该数组每一个元素取绝对值并求和,即可得到两幅图差异的量化值 S_i 。根据具体情况

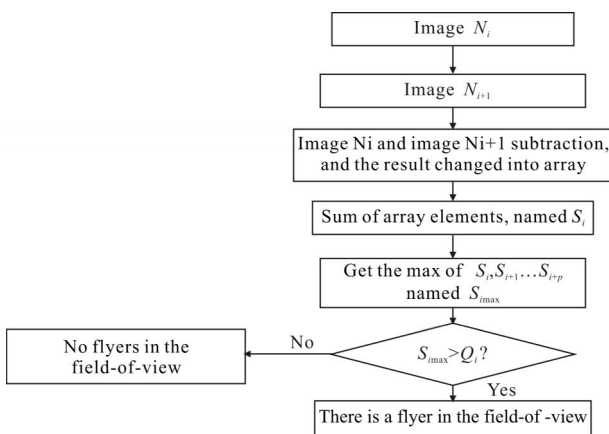


图 4 飞行物是否存在判断子程序流程图

Fig.4 Sub flow chart of determination if flyers appeared

设置循环次数 P ,使程序继续循环读取 CCD 采集图像并将每次读取的图像按以上方式进行处理,可得到 $S_i, S_{i+1}, \dots, S_{i+p}$,最后比较此次判断中的所有 S_i ,求得最大的量化值 S_{\max} 。若 S_{\max} 大于设定阈值 Q_i ,程序就认为有飞行物进入激光器正上方空域,使计算机发布预警。计算机继续读取采集图像并对图像进行处理,当其中任意两幅图像比较的结果均小于阈值 Q_i ,则认为飞行物飞离工作激光器的上空,计算机关闭报警并开启机械开关使激光重新发射。

阈值 Q_i 的设置直接影响控制系统判断的准确度,为了排除缓慢变化的天气对实时采集图像结果的影响,防止产生误判断,使用动态阈值方法,即

$$Q_i = S_{\max-1} \times \eta \quad (4)$$

式中: η 为一可调系数。

2 试验过程与结果

2.1 试验验证

图 2 示意了飞行物从进入到离开 CCD 视场的整个过程。此试验中循环次数 P 设定为 5 次,飞行物进入视场开始时间 t 为 0 s,采集耗时加上处理耗时 0.2 s,因此前面 0.2 s 电平维持高电平不变,机械开关保持打开。从 $t=0.2$ s 开始,采集卡输出电平变为低电平,当 $t=0.3$ s 时,控制机械开关完成关闭。当飞行物进入视场正中心时,耗时 4.5 s。而整套装置反应时间为 0.3 s,因此不会出现飞行物达到视场中心时机械开关还未关闭的情况。即使是在飞机起飞或者降落的情况下,飞机也需要 3.4 s 才能到达视场正中心。当 $t=9.1$ s 时,飞行物开始离开视场, $t=9.4$ s 时,飞行物完全离开视场。此后再过 0.4 s,循环中不再出现该时刻的图像信息,再加上计算机处理和机械开关打开的耗时,因此,当 $t=9.9$ s 时,计算机判定飞行物离开视场,采集卡输出高电平,当 $t=10$ s 时,控制器控制机械开关打开。

2.2 试验结果

图 5 所示为图像采集与初步处理实验结果,其中图 5(a)为飞机进入 CCD 视场中的第 $n+1$ 张图像,图 5(b)为飞机进入 CCD 视场中的第 $n(n \geq 0)$ 张图像,图 5(c)为图 5(a)减去图 5(b)后所得图像,图 5(d)为对图 5(c)进行二值化后所得图像。可以看出,进行二值化之后,图像的对比度更好,也更利于软件进行判断。

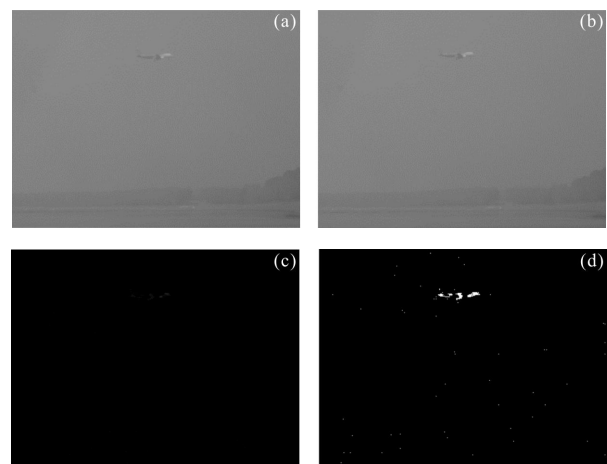


图 5 图像采集与处理结果

Fig.5 Results of image acquisition and processing

如图 6 所示为飞机进入视场整个过程中前后两张图像相减之后所有像元像素值累加得到的结果, 表征了相邻图像强度的相对变化幅值。其中图 6(a)中的曲线代表的是未经过二值化后累加结果, 图 6(b)中的曲线代表的是经过二值化后的结果。可以看出飞行器进入视场之后, 图像强度的相对变化幅值明显提高, 且经过二值化处理之后的结果信噪比高于未经过二值化处理的结果^[10]。从图 6(a)可以看到, 在飞机进入视场前后, 强度的变化幅值会出现接近或者重叠的情况, 例如阈值设为 305 000 (如图中直线所示), 在飞机进入视场之后, 有部分值小于 305 000 甚至 300 000, 飞机进入视场和未进入视场两种情况下图像的强度变化幅值没有一个明显的界限区分开, 阈值不易设置并且容易出现漏判误判的情况。而图 6(b)中飞机进入视场和未进入视场强度的变化幅值结果差异明显, 阈值设为 200 000 或者 300 000 均可, 阈值选取更为容易, 并且不会发生漏判和误判。

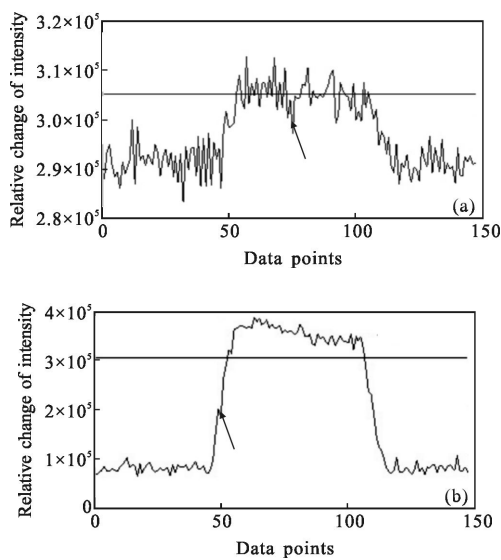


图 6 像元累加结果

Fig.6 Results of pixels accumulation

为了更好地测试该装置判断的可靠性, 对鸟类进入 CCD 视场的情况进行了测试。图 7 所示为小鸟从进入视场到飞出视场的全过程。处理方法和飞机类似, 采用两张图像相减得到的图像, 并经过二值化处理之后, 所有像元像素值累加, 表征了相邻图像强度的相对变化幅值。可以看出, 鸟类进入视场之后信号强度发生明显变化, 信号强度极大提高, 有利于快速判断空中有无飞行物的情况。需要特别指出的是, 由

于小鸟在空中的飞行姿态不同, 导致 CCD 上成像大小不同, 图像处理后就出现尖峰信号, 但这些尖峰信号的强度均远高于本底噪声, 因此不会出现小鸟因飞行姿态的差异而出现误判的情况。

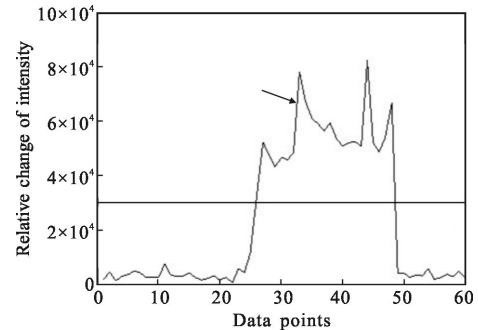


图 7 鸟类进入视场的像元累加结果

Fig.7 Results of pixels accumulation when the birds fly into the field-of-view

为了精确测量系统的信噪比, 在飞机进入视场过程中, 原始数据(图 6(a))处理之后计算得到的信噪比为 1.54 dB。若经过二值化处理(图 6(b)), 计算得到的信噪比提高到 12.16 dB。同理, 二值化处理鸟类进入视场期间的信噪比为 24.23 dB。通常认为, 当信噪比大于 1 dB 时信号和本底噪声就容易分辨出。因此, 二值化之后大大提高系统的信噪比, 使得有飞行物时的信号和无飞行物时的天空本底噪声更易分辨。只需合理设置控制激光打开/关断的阈值, 即可实现对天空飞行物的有效避障, 系统虚警和漏警概率低。

3 结论

文中通过 CCD 成像探测结合基于 Labview 的软件控制设计了一种用于激光智能主动规避飞行物的系统, 详细介绍了系统实现的硬件组成和软件控制方法。该技术原理简单, 实现方便, 成本低。实验表明系统检测的准确率高, 工作稳定可靠, 虚警和漏警概率低。不足之处在于该技术基于被动探测方式, 针对白天观测效果很好, 如需要晚上使用则需要对其进行改进, 如可使用基于红外激光器的主动探测方式^[11], 将红外激光器输出的光发射到空中并与工作激光器的发射方向平行, 利用望远镜和红外 CCD 接收选定范围内反射回来的红外激光和其他背景光, 并利用滤光器提高探测信号信噪比, 最终通过软件判断是否存在飞行物。

参考文献:

- [1] Meng Xianfeng, Lu Chunhua, Ni Yaru, et al. Application and protection of laser technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(2): 136–141. (in Chinese)
孟献丰, 陆春华, 倪亚茹, 等. 激光技术的应用与防护[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(2): 136–141.
- [2] Sun Rong, Luo Zhengkun, Liu Haifeng. Progress on protection and treatment of laser-induced injuries[J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(8): 705–708. (in Chinese)
孙嵘, 罗振坤, 刘海峰. 激光损伤防治研究进展[J]. 激光与红外, 2007, 37(8): 705–708.
- [3] Nakagawara V B, Wood K J, Montgomery R W. A review of recent laser illumination events in the aviation environment [R]. US: Federal Aviation Administration Oklahoma City OK Civil Aeromedical Inst, 2006.
- [4] Wang Xiaodan, Wang Jiqin. A survey of radar target recognition technique[J]. *Modern Radar*, 2003, 25(5): 22–26. (in Chinese)
王晓丹, 王积勤. 雷达目标识别技术综述 [J]. 现代雷达, 2003, 25(5): 22–26.
- [5] 李勇杰, 李发泉, 杨勇, 等. 激光智能主动规避飞行物装置及其规避飞行物的方法: 中国, CN 101850846 B[P]. 2012.
- [6] Weng Ningquan, Xiao Liming, Gong Zhiben, et al. The theory and experimental verification of 915 M Microwave Radar [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2001, 18(1): 92–96. (in Chinese)
翁宁泉, 肖黎明, 龚知本, 等. 915M 微波测风雷达原理及实验对比[J]. 量子电子学报, 2001, 18(1): 92–96.
- [7] Ma Yan, Hu Jun, Wu Weiping. Real-time realization based on simulation and testing system of CCD imaging unit [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2008, 23(2): 200–204. (in Chinese)
马岩, 胡君, 吴伟平. 基于 CCD 成像单元仿真测试系统的实时性实现[J]. 液晶与显示, 2008, 23(2): 200–204.
- [8] Chen Zhipeng, Deng Peng, Zhong Jinsong, et al. Application of Textural Features to Change Detection in SAR Image [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2002, 17(3): 162–166. (in Chinese)
陈志鹏, 邓鹏, 种劲松, 等. 纹理特征在 SAR 图像变化检测中的应用[J]. 遥感技术与应用, 2002, 17(3): 162–166.
- [9] Liu Xiaoming, Chen Hongying. A calculated method of takeoff decision speed of civil aircraft [J]. *Flight Dynamics*, 2005, 23(3): 79–81. (in Chinese)
刘晓明, 陈红英. 民航飞机起飞决断速度的一种计算方法 [J]. 飞行力学, 2005, 23(3): 79–81.
- [10] Ouyang Qing. Study on license plate binarization method under nonuniform illumination [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2006, 39(4): 143–146. (in Chinese)
欧阳庆. 不均匀光照下车牌图像二值化研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2006, 39(4): 143–146.
- [11] Wang Souzen, Sun Feng, Zhang Xin. Development of laser illuminating range-gated imaging technique [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 95–99. (in Chinese)
王寿增, 孙峰, 张鑫. 激光照明距离选通成像技术研究进展[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 95–99.