

基于 DSP 的光栅衍射型激光告警系统设计与实现

苏平¹, 牛燕雄¹, 李大乾¹, 赵建君², 李易难¹, 张超¹, 牛海莎¹, 阎石²

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083;

2. 解放军军械工程学院 基础部, 河北 石家庄 050003)

摘要: 激光告警系统是一种可对来袭激光性能参数进行实时探测的光电对抗设备。基于光栅衍射效应以及 DSP 信号采集及处理系统, 设计并实现了激光告警系统, 可对激光的波长、方位进行探测、告警。对激光告警系统的硬件和软件的设计与实现进行了研究, 建立了入射激光波长以及方位的数学模型, 推导了激光波长以及方位角与激光衍射点的数学表达式, 并对激光告警系统进行了实验研究。实验结果表明: 该系统能有效探测来袭激光波长及其方位, 可测波长范围为 500~1 100 nm, 方位角为 $\pm 13^\circ$, 波长最大偏差 10 nm, 方位角最大误差 1° 。

关键词: 激光告警; 光栅衍射; DSP; 线阵 CCD

中图分类号: TN247 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)03-0643-05

Design and implementation of grating diffraction laser warning system based on DSP

Su Ping¹, Niu Yanxiong¹, Li Daqian¹, Zhao Jianjun², Li Yinan¹, Zhang Chao¹, Niu Haisha¹, Yan Shi²

(1. Department of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China;

2. Department of Basic Course, Ordnance Engineering College, PLA, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Laser warning system is a type of electro-optic countermeasure equipment, which can detect the wavelength and azimuth of the incident laser. Based on the principle of the grating diffraction, DSP signal acquirement and processing system, a laser warning system was designed and realized, which could detect the wavelength and the azimuth of the incident laser, and send out alarms. The design of hardware and software were studied in the paper, the math model of the grating diffraction was built, the math expression of the calculation of the wavelength and azimuth was deduced, then, the laser system experiment was studied. Experimental results showed that it can detect the laser and send alarms immediately, and measure laser wavelength and incident direction, the range of the wavelength and the incident is 500 - 1 100 nm and $\pm 13^\circ$ respectively, the maximal error of wavelength is 10 nm, and the maximal error of incident direction is 1° .

Key words: laser warning; grating diffraction; DSP; linear CCD

收稿日期: 2012-07-11; 修订日期: 2012-08-12

基金项目: 国家自然科学基金(40905011)

作者简介: 苏平(1986-), 男, 硕士生, 主要从事激光告警、DSP 嵌入式系统、光电图像处理方面的研究。Email: supingo@hotmail.com

导师简介: 牛燕雄(1967-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光电对抗、新型光电仪器设计等方面的研究。

Email: niuyx@buaa.edu.cn

0 引言

随着激光制导、激光测距以及激光武器等在军事上的广泛运用,对重要的军事目标及武器平台构成了日趋严重的威胁^[1]。激光告警系统是用来截获、测量、识别敌方来袭激光信号并实现告警的侦查设备,在现代化战场上,可对敌方激光源进行实时告警,并准确识别来袭激光波长和入射方位角,世界各军事强国都在都十分重视激光告警系统的研究及应用,因此开展激光告警技术具有重要意义^[2]。

激光告警系统根据工作原理主要分为成像型、散射探测型、光谱识别型和相干识别型等几种类型。不同类型的激光告警系统具有不同优缺点^[3],如成像型不能测量激光波长;散射探测型不能测定方位角;光谱识别型只能识别特定波长的激光、方位角分辨率低;相干识别型能够同时测量波长和方位角。相干识别型又可分为法布里-珀罗型、迈克尔逊型、光栅衍射型。法布里-珀罗型需要机械扫描,迈克尔逊型工艺复杂、成本高,而光栅衍射型则避免了这些缺陷^[4-5]。因此,光栅衍射型激光告警系统是一种较为有效的激光告警系统。

DSP 是一种集成度高、运算速度快、使用灵活的微处理器,在嵌入式信号处理系统中发挥着越来越重要的作用^[6]。基于 DSP 设计的信号处理系统研制的激光告警系统具有实时性好、体积小、功耗低等特点。文中以光栅为相干元件、以线阵 CCD 为光电探测器研制了激光探测接收系统,以 TI 的 DSP TMS320DM642 为核心处理器设计了信号处理系统,在此基础上,实现了基于 DSP 的光栅衍射型激光告警系统。

1 激光告警系统工作原理

激光告警系统的基本工作原理是光栅衍射原理,该原理框图如图 1 所示,当激光以入射角 α 射入,

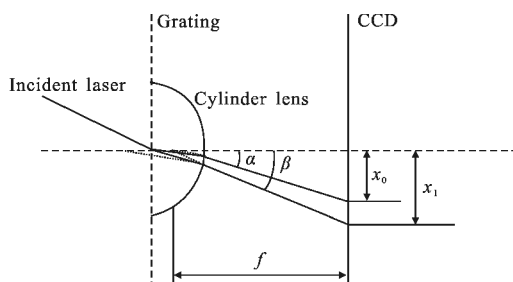


图 1 光栅衍射原理框图

Fig.1 Principle of grating diffraction

经正弦光栅形成衍射零级和一级衍射光斑,经过柱面镜会聚于光接收器 CCD 上。由于不同波长的激光衍射后其零级和一级衍射斑距离不同,而不同入射方向其零级位置也不同^[7-8],利用 CCD 对零级、一级衍射斑位置进行探测,经过 DSP 信号处理系统采集、计算,实现激光波长和入射方位角的探测。

激光衍射零级衍射光斑位置为 x_0 ,一级衍射光斑位置为 x_1 ,并根据光栅衍射理论^[9-10]:

$$x_0 = f \tan \alpha \quad (1)$$

$$x_1 = f \tan \beta \quad (2)$$

$$d(\sin \beta - \sin \alpha) = \lambda \quad (3)$$

式中: d 为光栅常数; f 为柱面镜焦距; λ 为入射激光波长。由公式(1)、(2)可求出入射角 α 和衍射角 β ,再由公式(3)可求出入射激光波长 λ 。另外,根据零级衍射光斑的位置 x_0 由公式(1)可以反演出激光光源的入射方位角 α 。

2 系统设计

2.1 硬件设计

激光告警系统主要由激光探测接收系统、线阵 CCD 和 DSP 信号处理系统、显示告警等部分组成,如图 2 所示。

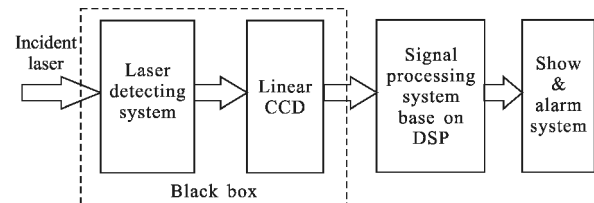


图 2 系统结构框图

Fig.2 Hardware structure of the system

探测接收系统主要包括光栅、平凸柱面镜。其中,光栅部分采用正弦光栅,主要有两方面的优点:一方面激光通过正弦光栅衍射后只有零级和一级衍射,这样可简化后续光电信号的提取和处理过程,另一方面可以使衍射后光能量集中,提高灵敏度。平凸柱面镜紧贴光栅,把激光的光栅衍射光斑汇聚到线阵 CCD 上。CCD 完成激光衍射斑的光电转换。系统采用德国的 ALPHALAS 的 CCD-2000 M^[11]。探测接受系统和线阵 CCD 采用暗箱覆盖,可有效地避免外界太阳光等的干扰,黑盒机械设计框图如图 3 所示。

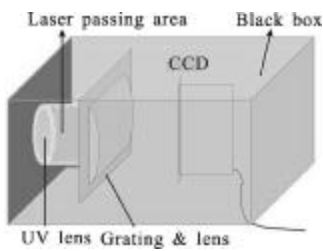


图 3 探测接收系统结构示意图
Fig.3 Structure of the detecting system

信号处理系统采用美国了 TI 的 DSP TMS320DM642 处理器^[12],该 DSP 具有极强的单核处理能力以及高度的灵活性和可编程性,其主频高达 600 MHz,对应指令执行速度可达 4 800 MIPS,通过扩容 SDRAM、FLASH,AD 采样技术的结合,满足激光告警系统的信号采集处理要求。如图 4 所示。



图 4 DSP 信号处理系统
Fig.4 Signal processing system based on DSP

显示部分采用 LCD,实时显示探测入射激光的波长和方位角信息。告警利用蜂鸣器,当探测到激光时驱动蜂鸣器工作发出告警。

2.2 软件设计

系统的软件主要包括系统的初始化、信号的采集以及算法的设计。首先对系统进行初始化设置,然后通过 GPIO 口读取 CCD 的输出同步脉冲,当探测到信号后,对信号进行滤波,并通过判定算法判断是否为激光衍射斑,如果确定为衍射斑,随即发出告警,同时计算入射激光波长和方位角。软件流程图如图 5 所示。

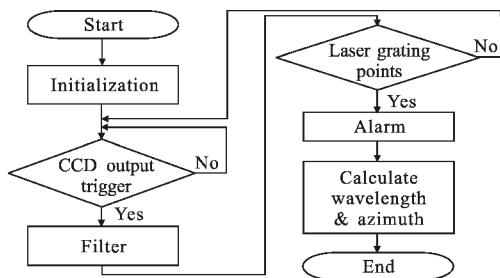


图 5 软件流程图
Fig.5 Flow diagram of the software

2.2.1 系统初始化

对系统初始化设置,包括对 CSL,EMIF,GPIO,中断初始化和相关寄存器配置,为信号采集处理做好系统准备。

2.2.2 信号处理

(1) 信号采集

将 CCD 采集的模拟信号通过 GPIO 口输入 DSP 信号处理系统,利用 AD 采样技术^[13],将模拟信号转换为数字信号。AD 采样率为 96 kHz,CCD 驱动频率为 1 MHz,因此每帧 2 048 个像素点可采集的有效数据有 192 个,由于光斑具有一定大小,因此不会漏掉衍射点。示波器显示 CCD 采集的信号如图 6 所示。

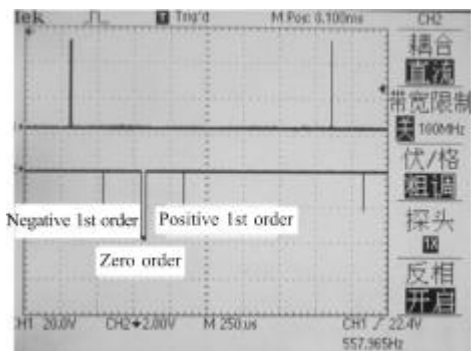


图 6 CCD 采集的信号
Fig.6 Signals of the CCD

(2) 信号滤波

信号在采集、转换和传输过程中,常常受到成像设备、传输设备以及外部环境干扰等的影响,使实际获得的信号含有噪声。为了抑制噪声,改善信号质量,也为了便于信号的后续处理,系统对采集的图像加入相应的平滑滤波处理。采用 chricho 算子进行平滑滤波^[14],信号原图和滤波后的波形图分别如图 7、图 8 所示。

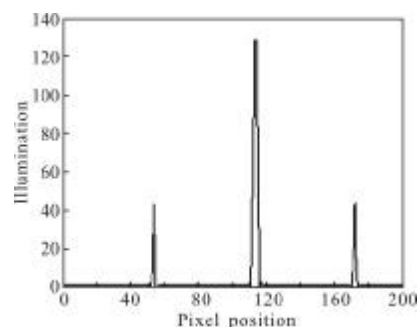


图 7 CCD 输出原信号
Fig.7 Original CCD output signals

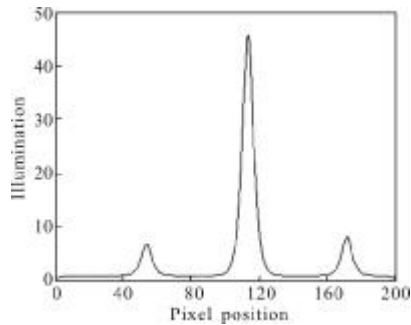


图 8 滤波结果

Fig.8 Filter results

滤波结果和原信号相比可以看出,经过滤波的信号去掉了毛刺,更加平滑,有利于下一步的数据处理。

(3) 信号识别

激光光栅衍射斑识别、计算流程图如图 9 所示。

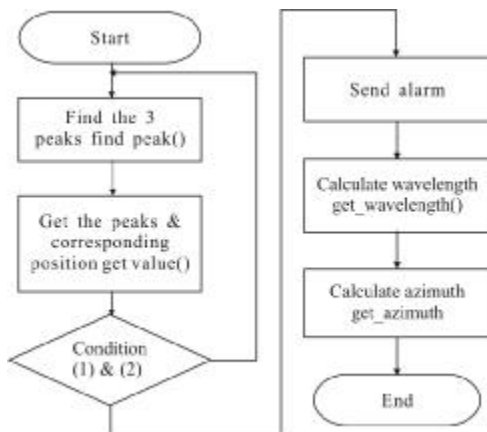


图 9 算法流程图

Fig.9 Flow diagram of algorithms

首先利用 `findPeak()` 对滤波后的数据进行处理,该函数的思想是遍历每帧数据,利用中间数据比两侧数据大的特点筛选。然后通过 `getvalue()` 提取的三个有效点峰值和对应所在位置。最后判定筛选的数据是否有效,根据激光衍射点的特征来判定是否有激光存在,基于两个方面:(1) 零级衍射点的强度最大,并且零级与正负一级衍射点的峰值之比在一定范围内;(2) 零级到正负一级衍射点的距离基本相等。根据以上两个准则,便可以判定是否是激光来袭。通过以上的判定,已经确定衍射光斑峰值和峰值所在的位置,于是通过保存的位置参数调用计算波长和方位角的函数 `Get_Wavelength()` 和 `Get_azimuth()` 计算,便可以得到激光波长和方位角。

3 实验

3.1 实验装置

根据系统工作原理,搭建了如图 10 所示的激光接收系统实验样机。激光器发出激光,经衰减片调节至适当的强度,然后透过光栅、柱面镜汇聚于线阵 CCD 上,最后由 DSP 信号采集处理系统进行信号采集、处理和显示及告警。实验采用正弦光栅,对入射光波的振幅按正弦函数变化规律进行调制,只产生 $0, \pm 1$ 级衍射光斑,其光栅常数为 300 mm^{-1} ;柱面镜焦距为 60 mm ;线阵 CCD 驱动频率 1 MHz ,具有 2 048 个像元,像元大小为 $14 \mu\text{m}$,整个接收系统放置于暗箱中,并在室内进行实验。

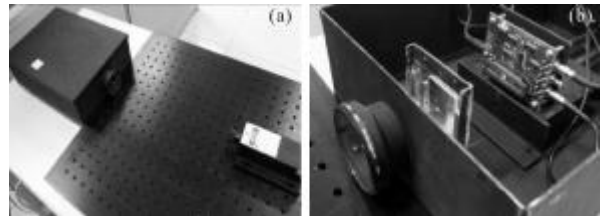


图 10 激光接收系统实验样机

Fig.10 Model machine of the receiving system

3.2 实验数据和结果

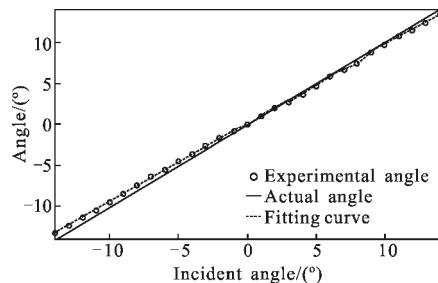
用波长为 532 nm 的连续激光从不同方向入射进行实验验证,测得部分数据如表 1 所示。

表 1 部分实验数据

Tab.1 Part of experimental results

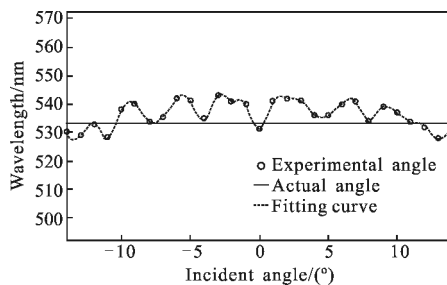
Actual azimuth/(°)	Experimental azimuth / (°)	experimental wavelength/nm
13	12.5	528
11	10.8	534
10	9.8	537
9	8.9	539
7	6.7	542
6	5.9	542
4	3.7	536
2	2.1	542
1	1.1	541
0	0	531
-1	-0.7	540
-2	-1.7	541
-4	-3.6	535
-6	-5.5	541
-7	-6.3	535
-9	-8.4	540
-11	-10.4	528
-13	-12.2	529

利用三次样条插值^[15]拟合,如图11所示,其中,图11(a)为波长测量结果拟合曲线,图11(b)为方位角测量结果拟合曲线。



(a) 方位角测量拟合曲线

(a) Angle fitting curve



(b) 波长测量拟合曲线

(b) Wavelength fitting curve

图11 实验结果曲线拟合图

Fig.11 Experiment results fitting curve

实验结果表明,基于DSP的光栅衍射型激光告警系统能够对来袭激光作出快速反应并发出告警,对激光波长及入射方位角能够正确计算。激光波长误差小于10 nm,方位角识别误差小于1°,实现了波长测量最大偏差10 nm、方位角识别误差为1°的设计要求。

4 结论

为了稳定、高速获取来袭激光的波长、方位角性能参数,依据光栅衍射效应,利用线阵CCD实现对激光衍射光斑的光电转换,基于DSP设计了信号处理系统完成对CCD获取信号的处理,设计并实现了一种基于DSP和线阵CCD的光栅衍射型激光告警系统,系统处理速度快、可靠性好、精度高,并满足了小型化、便携式的要求。

参考文献:

- [1] Fu Wei. Development of laser reconnaissance warning technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1999, 28(2): 8-11. (in Chinese)
- [2] Li Wei. New type laser attack and countermeasure weapons [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40 (10): 1944-1948. (in Chinese)
- [3] Yang Zaifu, Qian Huanwen, Gao Guanghuang. Development of laser warning technology [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(1): 98-102. (in Chinese)
- [4] Manasson V A, Sadovnik L S, Parker Jack H, et al. Laser warning receiver based on coherence discrimination [C]// *Aerospace and Electronics Conference*, 1996(2): 869-873.
- [5] Crane, Jr. Laser detection by coherence discrimination [J]. *Optical Engineering*, 1989, 8(2): 212-217.
- [6] Ren Lixiang, Ma Shufen, Li Fanghui. DSPs Principle and Application of TMS320C6000 [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2000. (in Chinese)
- [7] Zhao Jianjun, Song Chunrong, Chen Hongye. Theoretical study of detect laser information by sinusoidal grating [J]. *Laser & Infrared*, 2010(9): 889-992. (in Chinese)
- [8] Fu Lin, Hong Zhigang. Design of laser warning receiver based on DSP [C]// *Proc Asia Pacific Conference on Postgraduate Research in Microelectronics & Electronics*, 2009: 325-328.
- [9] Shi Shunxiang, Wang Xue'en, Liu Jinsong. Physical optics and Applied Optics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2008. (in Chinese)
- [10] Zhang Jilong, Tian Erming, Wang Zhibin. Laser warning receiver based on sinusoidal transmission grating [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(3): 326-330. (in Chinese)
- [11] Instructions for using the CCD-2000M array. [2011-03-01]. <http://www.alphas.com>
- [12] Texas Instruments. TMS320DM642 Data Sheet (Rev.G). [2004-08-01]. <http://www.ti.com>.
- [13] Li Weimin, Xing Xiaozheng, Dai Lirong. Application of DSP in the linear CCD measuring system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2002, 23(2): 128-130.
- [14] You Suya, Liu Jian, Xu Guangyou. An edge detection approach via IIR exponential smoothing filtering and nonlinear laplacian operator [J]. *Chinese Journal of Computers*, 1997, 20(7): 667-672.
- [15] Wang Zhenlin, Liu Ming. Proficient in MATLAB7 [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2007.