

文章编号: 1001-3806(2005)05-0538-03

一种新的激光方位探测系统设计

程玉宝^{1,2}, 李 庆¹, 刘上乾^{1*}

(1. 西安电子科技大学 技术物理学院, 西安 710071; 2. 合肥电子工程学院, 合肥 230031)

摘要: 通过对平行激光在光学劈尖上产生等厚干涉条纹的分析, 提出了一种新的激光方位探测方案。介绍了本方案的数学建模原理, 给出了其实现系统, 它由 6 个光学劈尖构成的激光方位探测光学窗口和探测电路组成, 通过测量光学劈尖上干涉条纹的间距精确地探测出入射激光方位和波长。测试结果表明, 该方案具有探测精度高、反应速度快等优点。

关键词: 激光技术; 激光告警; 激光方位; 光学设计; 光学劈尖

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A

A novel design for laser orientation detection system

CHENG Yu-bao^{1,2}, LI Qing¹, LIU Shang-qian¹

(1. School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. Hefei Electronic Engineering Institute, Hefei 230031, China)

Abstract: Based on the analysis of interference stripes of equal thickness generated by the parallel laser on optical wedge, a new scheme for laser orientation detection system is presented. The mathematic model of the scheme is introduced in detail, and its realization is provided. The system is composed of six optical wedges for orientation detection and the corresponding detection circuits. The orientation and wavelength of the incident laser are determined by measuring the space between interference stripes on optical wedges. The experimental data are given, which indicate that the system has some advantages such as high location precision and fast response.

Key words: laser technology; laser warning; laser orientation; optical design; optical wedge

引 言

目前, 激光方位测量系统设计方案^[1~7]可分 3 种类型: 一类是成像型; 一类是掩模编码型; 一类是多窗口探测型。

成像型的基本原理是将一个具有较高空间分辨率的探测器 (如面阵 CCD) 放在一个透镜的焦面上, 此透镜将入射的角度信息转变为探测器的空间坐标, 各探测单元与激光入射方位一一对应。通过读取各个单元的信号, 可以判别有无激光入射信号以及激光源的相应方位。该设计方案的优点是可以实现高分辨率的方位测量, 测量精度可达 0.06° 。其缺点也很明显, 因为使用面阵探测器, 探测单元太多, 反应速度慢, 而且受到探测器非均匀性制约。

掩模编码型的原理是将一组长而细的探测单元阵列放置在一条长狭缝的模板之后, 狭缝与探测器平行, 且对准探测器的中心。当入射激光的角度不同时, 狭

缝的投影便落在不同的探测器上, 探测器后的处理电路则对入射信号做出二元判决, 实现方位角测量, 测量精度可达 1.4° , 但易受大气闪烁影响。

多窗口探测型的原理是使用探测视场互相重叠的多个分立的光学窗口和探测器来探测入射激光的方位。为了提高方位分辨精度, 必须使用足够多的光学窗口和探测器, 使得体积大, 信号处理复杂。后来采用光纤替代分立光学元件的光纤前端技术, 才简化了光路设计。德国 MBB 公司的 COLDS 激光告警系统^[8,9]就是采用这种方案, 并改用反馈单元代替延迟光纤。但窗口多导致系统较复杂, 且测量精度不高, 约为 3° 。

目前, 对波长在 $0.4\mu\text{m} \sim 1.1\mu\text{m}$ 范围的激光, 大多数激光探测系统的方位测量精度优于 1° 。在分析现有的激光侦察技术基础上, 作者提出了一种系统结构简单、测量精度高的激光方位测量设计方案^[11], 该方案是基于测量激光在光学劈尖上产生干涉条纹的间距来实现激光方位探测的。

1 光学劈尖的多光束干涉条纹

设劈尖由两个具有高反射率为 R 的平面相夹于一小角度而构成, 当一束相干平行激光入射到劈尖上

作者简介: 程玉宝 (1966-), 男, 副教授, 博士研究生, 主要从事光电对抗、光电探测技术研究。

* 通讯联系人。E-mail: shqliu@xidian.edu.cn

收稿日期: 2004-06-25; 收到修改稿日期: 2004-09-09

时,如图 1 所示,其透射光束在第二面上将产生多束干

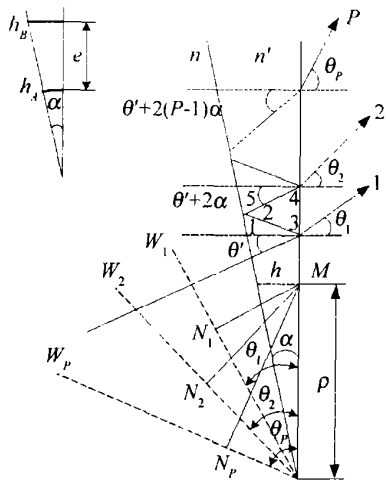


Fig 1 The transmission figure of incident laser reflected by a optical wedge 涉条纹。为简单起见,假定入射平面波的传播方向与劈棱垂直。入射平行光束经劈尖的多次反射,透射光成为一组传播方向不同的平面波,由折射定律和反射定律可知,透射光中第 P 个波的出射角 θ_p 满足:

$$n \sin \theta_p = n' \sin [\theta' + 2(P - 1)\alpha] \quad (1)$$

式中, α 为劈尖的楔角, θ 是入射光在第 2 劈面的入射角, n 是劈尖的折射率, n' 是周围介质的折射率。

因为直接计算相邻两束透射光的光程差比较困难,不妨通过劈棱作各透射波的虚波阵面 $W_1, W_2 \dots W_p \dots$, 且不考虑反射相变。则在第 2 面的 M 点处,第 P 个透射波和直接透射波 ($P=1$) 的光程差等效为^[10]:

$$\Delta_p = n(MN_p - MN_1) = n\rho(\sin \theta_p - \sin \theta_1) \quad (2)$$

式中, N_p, N_1 分别为 M 点到 W_p 和 W_1 的垂足, ρ 是 M 点离劈尖的距离,且 $\rho = h / \tan \alpha$, h 为 M 点处劈尖的厚度。

当入射光经多次反射后,第 P 束透射光与第 1 束透射光的能量之比为 $R^{2(P-1)}$,取 $R = 0.4$,则当 $P = 5$ 时, $R^{2(P-1)} = 6.55 \times 10^{-4}$,即第 5 束透射光与第 1 束透射光相比已经很小,因而,对于 $P > 5$ 以上的透射光可忽略不计。出于实际考虑,取劈尖夹角 $\alpha = 0.15^\circ = 9' = 2.6 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 。这样,再由参考文献 [10] 可得,相邻两束透射光的光程差为:

$$\delta \Delta = \Delta_{p+1} - \Delta_p = 2n'h[\cos \theta' - (2P - 1)\alpha \cdot \sin \theta'] \quad (3)$$

一般 $\theta \leq 80^\circ$, 上式括号中第 1 项的最小值为 0.17, 而

第 2 项的最大值为 0.02, 与第 1 项相比亦可不计, 因而得到相邻两光束的光程差为:

$$\delta \Delta = 2n'h \cos \theta' \quad (4)$$

当 $2n'h \cos \theta' = m\lambda, m = 0, 1, 2, \dots$ (5) 时, P 点光强极大, 产生明条纹, 式中, λ 为激光波长。

设在劈尖的 A 和 B 处有相邻的两条明条纹, 其厚度分别为 h_A 和 h_B , 则:

$$\Delta h = h_A - h_B = \frac{\lambda}{2n' \cos \theta'} \quad (6)$$

由此可以得出劈尖上的条纹间距 e 为:

$$e = (h_A - h_B) / \sin \alpha = \Delta h / \sin \alpha \quad (7)$$

因为 $\alpha \ll 1$, 所以: $e = \frac{\lambda}{2n' \alpha \cos \theta'}$ (8)

从 (8) 式中可看出, 条纹间距 e 与入射倾角 θ 和劈尖厚度 h 有关。当劈尖厚度 h 不变而激光入射倾角 θ 变化时, 劈尖上的条纹为等倾干涉条纹。因光学劈尖只有两个多厘米, 它相对于所探测的激光束从几公里甚至十几公里外射来的距离可忽略不计。故入射在光学劈尖上的激光可认为是一组平行光, θ 可看成是一个常数。当激光入射倾角 θ 不变而劈尖厚度 h 变化时, 劈尖上的条纹则是等宽干涉条纹。因反射率 R 较大, 故透射光的干涉条纹强度分布变化强烈, 干涉图样呈现为黑背景上一组很细的亮条纹, 其便于工程上探测。

2 激光方位测量系统的构成与工作机理

该系统基于对透射光干涉条纹的探测。由于在激光波长 λ 和入射角 θ 都未知的情况下, 仅测一个劈尖上的条纹间距, 由 (8) 式是无法求得激光波长 λ 和方位角 ϕ 的。因此, 系统采用将两个劈尖互成一定角度放置联合探测的方案, 令入射激光同时照射到两个劈尖上, 并使其入射角 θ_1 和 θ_2 不同, 则条纹间距 e_1 和 e_2 也不同, 通过联解如下方程可得激光入射方位角 ϕ :

$$\begin{cases} \frac{e_1}{e_2} = \frac{\cos \theta_2'}{\cos \theta_1'} \\ \theta_2' = |\theta_1' - \theta_0| \\ \phi = \theta_1' + \phi_1 \end{cases} \quad (9)$$

式中, θ_0 为两劈尖的法线夹角, ϕ_1 为劈尖 1 的法线方位角。当然, 还可用 (8) 式计算激光波长。因此, 文中提出的激光方位测量系统设计的具体功能框图如图 2 所示^[11]。

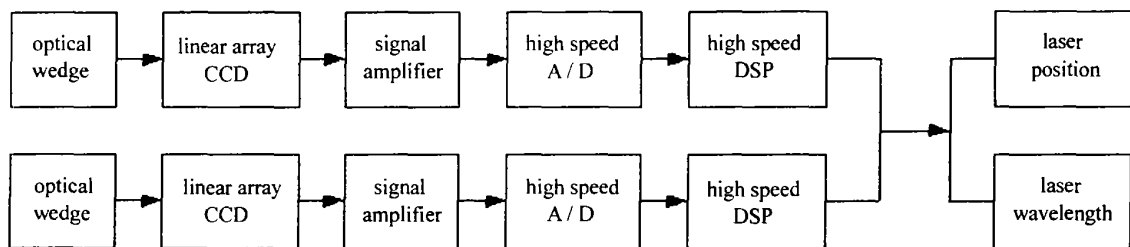


Fig 2 Block diagram of device for detecting laser and determining its wavelength

线阵电荷耦合器件 (CCD) 紧贴光学劈尖的第 2 面, 可将激光在劈尖表面上产生的明暗相间的干涉条纹变换为相应的时域周期信号。线阵 CCD 输出的电信号经过线性放大后, 进行模数 (A/D) 转换变为离散周期序列 $x(n)$ 。由数字信号处理器 (DSP) 对其预处理后, 进行快速傅里叶变换 (FFT)。采用 FFT 算法, 可有效地消除干涉条纹的畸变, 而能准确地求出信号的时域周期^[12,13], 由时域周期再映射到空间周期 (即条纹间距 e)。利用 (9) 式求解两路并行信号, 便可得知入射激光的方位角。

3 测量激光方位的窗口模型

为了满足 360° 视场的测量要求, 采用 6 块完全相同的光学劈尖, 互成一定的角度构成 360° 视场, 系统的光学窗口设计模型如图 3 所示。每个光学劈尖的透

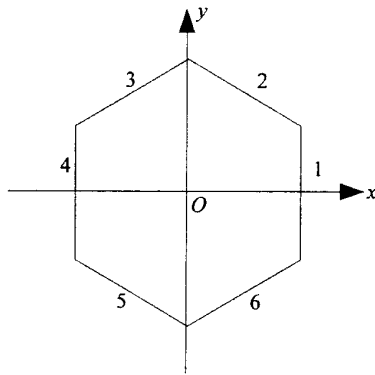


Fig 3 The window model for measuring laser orientation

射面都紧贴一个线阵 CCD 和相应的信号处理电路, 为提高系统的反应速度, 6 路信号采用并行处理方式。

在图 3 所示的光学窗口模型中, 定义激光方位角以 x 轴方向逆时针旋转为正。光学劈尖 1 的法线与 x 轴的夹角为 0° , 其余依次为 60° , 120° , 180° , 240° , 300° , 相邻两光学劈尖的法线夹角为 60° 。当一束激光从某一个方向入射到该模型的光学窗口上时, 至少在两块光学劈尖的透射面上产生干涉条纹, 通过信号处理和联解方程, 可求出入射激光的方位和波长。

4 实验结果

令入射激光方位角在 $0^\circ \leq \phi < 30^\circ$, 则激光在劈尖 1, 2 和 6 上产生干涉条纹。对劈尖 1, 入射角 $\theta_1' = \phi$; 对劈尖 2, 入射角 $\theta_2' = 60^\circ - \phi$; 对劈尖 6, 入射角 $\theta_6' = 60^\circ + \phi$; 所以, 劈尖 6 上的条纹间距 e_6 大于劈尖 2 上的条纹间距 e_2 , 将劈尖 1, 2 上的条纹间距 e_1 和 e_2 代入 (9) 式, 求出方位角的精确值。用 $\lambda_0 = 0.6328\mu\text{m}$ 的激光对该窗口模型进行试验, 改变入射角 ϕ_0 , 得实验数据如表 1 所示。若入射激光的方位角为其它值时, 可如此类推实验。

Table 1 Testing data

ϕ_0	$e_1/\mu\text{m}$	$e_2/\mu\text{m}$	$e_6/\mu\text{m}$	ϕ	$\Delta\phi = \phi - \phi_0 $	$\lambda/\mu\text{m}$	$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 $
0.0°	119	238	238	0.0°	0.0°	0.6188	0.0140
5.0°	119	210	287	4.4°	0.6°	0.6169	0.0159
10.0°	126	189	350	10.8°	0.8°	0.6435	0.0107
15.0°	126	168	469	15.8°	0.8°	0.6297	0.0031
20.0°	126	154	700	20.2°	0.2°	0.6148	0.0180
25.0°	133	147	too big	25.1°	0.1°	0.6262	0.0066

条纹间距的测量误差是产生 $\Delta\phi$ 的主要因素。因为 CCD 像元间距 ($7\mu\text{m}$) 固定不变, 是系统测量条纹间距的最小单位, 必然导致 $\Delta\phi$ 的产生。在参考文献 [13] 中提出的改进算法, 同样可用于方位角测量精度的提高。

5 结论

提出的激光方位测量方案使用线阵 CCD 探测器, 和第 1 类成像型系统使用面阵 CCD 探测器相比, 测量精度稍低, 但反应速度快; 与第 2 类和第 3 类使用多元分立式探测器并行处理系统相比, 反应速度要慢些, 但测量精度高。更重要的是, 这种系统能将波长和方位探测有效地结合在一起, 且结构相对简单, 技术上易于实现, 具有工程实用价值。

参考文献

- [1] CANTN A, GRAVEL M, DUBO IS J. Analog high resolution laser irradiation detector (HARLD) [P]. U S Patent 5604695, 1997-02-18.
- [2] DUBO IS J, CANTN A, GRAVEL M. Digital high angular resolution laser irradiation detector (HARLD) [P]. U S Patent 5428215, 1995-06-27.
- [3] NESTED S, BOHM M. Device for determining to direction of incident optical radiation [P]. U S Patent 4625108, 1986-11-25.
- [4] HALLDORSSON T, MANHART S, SEIFFARTH E A. Laser detection device [P]. U S Patent 4674874, 1987-06-23.
- [5] HALLDORSSON T, SEIFFARTH E A. Laser radiation warning sensor utilizing polarization [P]. U S Patent 4682024, 1987-07-21.
- [6] LBMA R J M, BEL ISSANTA, FAUCHARD J P. Light pulse detecting system with highly reduced false alarm rate usable for laser detection [P]. U S Patent 4897538, 1990-01-30.
- [7] JANNSON J, JANNSON T, WOLF E. Spatial coherence discrimination in scattering [J]. Opt Lett, 1988, 13 (25): 1060~1062.
- [8] 付伟. 光纤前端的激光告警系统 [J]. 红外与激光技术, 1995, 24(2): 17~23.
- [9] 付伟. 对德国 MBB 公司激光告警系统的技术分析 [J]. 红外与激光工程, 1996, 25(1): 2~7.
- [10] 波恩 M, 沃耳夫 E. 光学原理 [M]. 北京: 科学出版社, 1987. 372~379, 458~465.
- [11] 程玉宝, 周慧鑫, 刘上乾. 一种激光探测与波长测定装置的研究 [J]. 光电工程, 2002, 29(6): 25~27.
- [12] 程玉宝, 何宗平, 刘瀚. 用快速傅里叶变换精确测定激光波长 [J]. 红外与激光工程, 1998, 27(5): 52~54.
- [13] 程玉宝, 王炳健, 刘上乾. 一种提高激光波长测量精度的改进算法 [J]. 光子学报, 2003, 32(9): 1041~1044.