

基于马赫-泽德干涉具的激光光谱探测技术研究

李 晓^{1,2}, 张记龙^{1,2}, 薛尚峰², 田二明^{1,2}, 张 悦², 王志斌²

1. 电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051
2. 仪器科学与动态测试教育部重点实验室(中北大学), 山西 太原 030051

摘 要 实时、可靠地探测敌方来袭激光的类型和特征参数是激光告警的主要任务。相干探测技术依靠激光的相干性探测其信息, 是较有效的探测技术之一。为了探测来袭激光光谱信息, 设计了一种激光探测与光谱实时测量装置。该装置以相干探测技术和傅里叶光学与光信号处理为基础, 使用实心小型静态马赫-泽德干涉具作为相干探测元件, 它能有效地抑制背景光, 无机械扫描部件, 光谱检测速度快, 可探测纳秒级窄脉冲激光信号; 用高速 DSP 芯片和多通道帧减技术进行实时信息处理, 实现背景噪声去除、激光探测和光谱测量。测试结果表明, 运用马赫-泽德干涉具和多通道帧减技术, 能实现脉冲激光探测, 提高测量精度; 可探测激光脉冲宽度为 10 ns, 波长测量误差小于 10 nm。

关键词 傅里叶光学与光信号处理; 马赫-泽德干涉具; 相干探测技术; 光谱测量

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)01-0062-04

引 言

随着激光制导技术的发展和激光技术在军事上的广泛应用, 尤其是新的连续可调谐工作波长的军用窄脉冲激光的逐步应用, 使得实时获取敌方来袭激光的光谱特征等时、空特性和类型, 变得愈加重要^[1-3]。而基于相干探测的空间调制干涉型傅里叶变换光谱仪, 由于具有结构简单、性能稳定和对微弱脉冲信号也能响应的优点^[4-8], 使其成为军事上进行激光光谱测量的重要手段。为此, 我们设计了一种成本低、体积小、便于运载的激光探测与光谱测量装置; 当激光到来时, 该装置既能进行激光探测, 又能快速测量激光光谱特征和波长。

1 光谱测量原理

当一束激光垂直照射到光谱仪的干涉具表面时, 由于激光的相干特性, 在干涉具输出面处会产生明暗相间的干涉条纹, 干涉条纹与其光谱之间的关系是一对傅里叶变换^[9-11]

$$I(x) = \int_{-\infty}^{\infty} B(\sigma) \exp(j2\pi x \sigma) d\sigma \quad (1)$$

$$B(\sigma) = \int_{-\infty}^{\infty} I(x) \exp(-i2\pi x \sigma) dx \quad (2)$$

式中: $I(x)$ 为双光束干涉强度分布; x 为双光束之间的光程差; $B(\sigma)$ 为光源光谱强度分布; σ 为波数。因此, 对干涉条纹进行傅里叶变换就可以得到光源的光谱信息^[12-14]。

干涉具产生的干涉条纹是空间分布的周期信号, 使用电荷耦合器件(CCD), 将这种空间周期信号变换为时域周期信号^[15], 再将时域周期信号经过 A/D 转换后, 运用离散傅里叶变换(DFT), 可求出入射激光的波谱特征和波长。

2 系统构成与工作原理

激光探测与光谱测量装置的系统构成如图 1 所示。该装置中, 线阵 CCD 置于聚焦透镜的焦平面上。入射激光通过输入透镜准直后, 照射到装置的 M-Z 干涉具表面, 在干涉具输出面处产生周期性的空间干涉条纹(如图 1), 经聚焦透镜, 成像在线阵 CCD 上, 通过 CCD 进行光电转换和模数转换

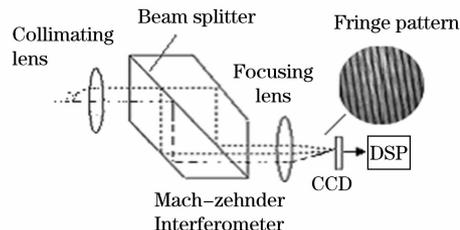


Fig. 1 Laser detecting and spectrum measuring device

收稿日期: 2007-10-18, 修订日期: 2008-01-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(60572019), 山西省青年科技研究基金项目(2007021019)和重点实验室基金项目(9140C1204070709)资助

作者简介: 李 晓, 1972 年生, 中北大学副教授 e-mail: lixiaoydx@nuc.edu.cn

后,运用 TI 公司的 TMS320VC5509 定点型 DSP 进行处理。系统中,将干涉具和 CCD 同固定于一块平钢板上,保证干涉具出射面的纵向垂直于线阵 CCD。

2.1 Mach-Zehnder(M-Z)干涉具

M-Z 干涉具是系统的核心部件,如图 1 中所示,干涉具由两块不等高的梯形四棱镜沿底边粘接而成,在其粘合面镀上半透半反膜,相当于分束镜,起分束作用;入射光在干涉具内,只进行两次反射和一次折射,光能损失比较小。棱镜反射面镀有反射膜,可进一步减少反射面上光能的损失,提高了干涉具的能量利用率。

两棱镜的高度差能够使入射光产生横向剪切,横向剪切量决定产生干涉条纹的条纹间距,剪切量越大,两光束间的错位也越大,形成的条纹密度越大。根据要求的波长探测范围(400~1 100 nm),选择适用于可见-近红外光的 BK-7 玻璃制作棱镜,该波长范围内其折射率为 1.523~1.506。同一探测器上,波长越大感应到的条纹数越少,经实验分析,入射激光波长为 1 100 nm 时,要在 15 mm(1 024×14 μm)的 CCD 探测器上得到 50 个干涉条纹,需要焦距约为 50 mm 的聚焦透镜,此时,波长为 400 nm 的入射光,得到干涉条纹数为 137。线阵 CCD 像元数为 1 024 时,符合文献[14]中对干涉条纹抽样时,每周期最少 5 个点的要求。

干涉具横向剪切量 s 与光程差 opd 的关系为:

$$s = opd \cdot L/nx$$

其中, L 为聚焦透镜焦距, n 为干涉具的折射率, x 与探测器 (CCD) 的长度有关,太阳光的相干长度约为 55 μm,系统中,取 $opd=60 \mu\text{m}$, $n=1.5$, $L=50 \text{ mm}$, x 为 CCD 长度的一半 7.5 mm, $s=opd \cdot L/nx=60 \mu\text{m} \cdot 50 \text{ mm}/1.5 \times 7.5 \text{ mm}=0.267 \text{ mm}$ 。因此,两棱镜高度差设计为 0.27 mm,在探测器两端的光程差最小,为 60 μm,大于太阳光的相干长度。此时,目标光谱范围内的激光能够发生干涉,而太阳光等非激光的宽谱光源不能发生干涉,抑制背景光发生干涉;而且保证了有限长度的探测器上能够探测到足够多的干涉条纹。

2.2 电荷耦合器件(线阵 CCD)

本装置采用 ATMEL 公司生产的的线阵 CCD 相机 AVi-iVA™M2CL,像元数为 1 024;像元尺寸为 14×14 μm²;数据传输率为 60 Mpixel·s⁻¹;数据输出接口: CameraLink;相机光积分时间可自行设置。

线阵 CCD 将干涉图的光信号转换成电信号后移位输出,采用低压差分信号数据(LVDS)格式,保证数据的高速传输。相机的光积分时间设置为 100 μs,这是基于两方面的考虑,一是由于被测信号为窄脉冲信号(10 ns),光积分时间太长,会引入大量噪声;另一个是考虑到与后续 DSP 处理代码的执行时间匹配,达到信号接收与处理的协调进行。

由于得到的条纹是明暗相间的,其变化又具有一定的梯度,经过线阵 CCD,转换为周期性的随着时间变化的电压信号,经过电平转换后,是一种类似于正弦波的电信号,而背景光为无规律噪声,如图 2。转换后的数据为有限长(1 024 点)离散周期序列,为保证精度,我们对 CCD 输出的离散信号,进行 12 位、1 024 点 FFT 运算。

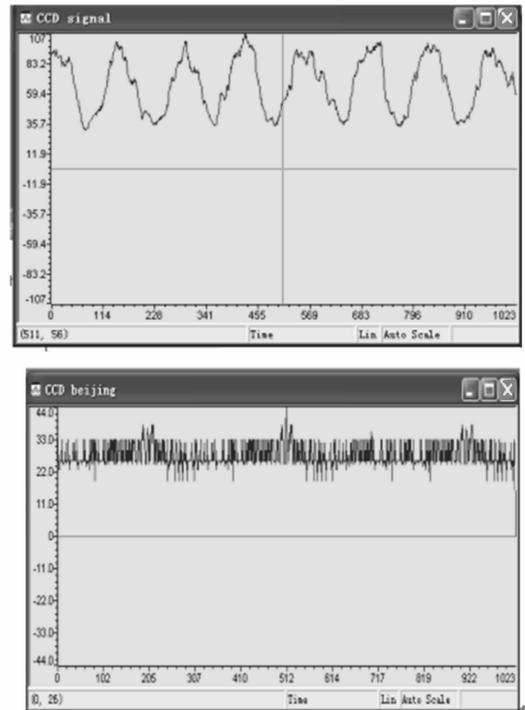


Fig. 2 Fringe pattern and background light collected by CCD

2.3 背景噪声去除

CCD 探测并转换后的数据中总会含有背景光噪声,由于探测的激光信号是窄脉冲信号(10 ns),重复频率低,因而对于探测器连续输出的三帧数据中,最多只有一帧数据有激光,其他的只是背景光信号,并且每帧数据时间相差很短,背景光信号变化不大。因此,在 DSP 片上数据存储器区设立三个交替工作的存储缓冲区(A, B, C),当 DSP 用 A 缓冲区进行接收第 i 帧数据时, B 和 C 缓冲区对前两帧数据进行帧减运算,这样相邻的两帧数据相减,就可以从背景光中提取出激光信号,从而实现脉冲激光的探测。通过帧减确认有激光信号后,执行后续的 FFT 程序,有效地去除了背景噪声。三个存储缓冲区这样交替工作,在识别目标信号的同时实现了数据接收与处理的流水作业。

2.4 软件设计

系统软件采用 C 语言和 DSP 汇编语言混合编程;主程序用 C 语言编写,核心代码由汇编语言实现,既降低了编程难度,又保证了代码的执行效率。软件系统主要完成脉冲激光的探测识别、FFT 运算和波长计算等功能,其流程如图 3 所示。

3 实验结果

测试用北京时代卓易科技发展有限公司生产的脉冲固体 Nd:YAG 激光器,波长为 532 nm,单脉冲激光能量 4 mJ,经透镜衰减与扩束后入射到光谱探测装置。图 4 为随机测试的光谱图;表 1 为系统波长测试结果的部分测试值。在避免太阳光直接照射干涉具时,测量误差小于等于 10 nm。

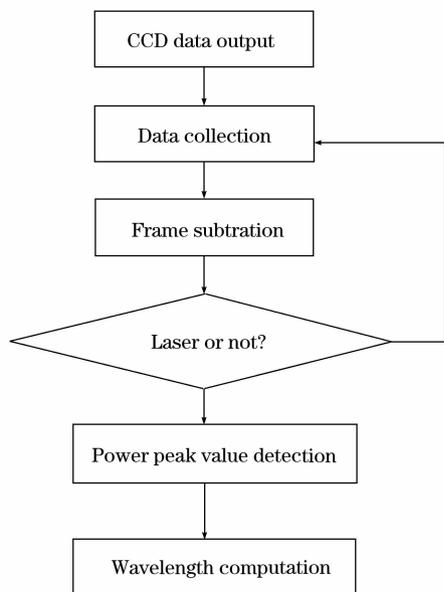


Fig. 3 Flowchart of the system

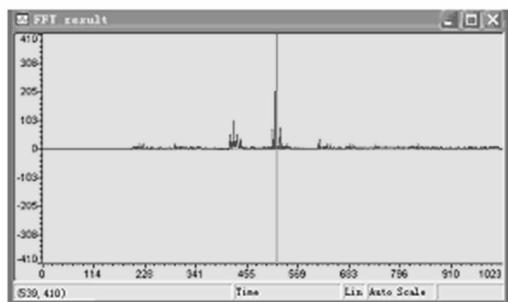


Fig. 4 Laser spectrum measurement result of 532 nm

由于处理程序中进行了取整处理, 测量结果均为整数。分析可得, 波长均值 $\lambda=533.4$ nm, 标准差 $\sigma=4.31$ nm, 最大偏差 $\Delta\lambda_m=6.6$ nm, 平均相对误差 $\delta=0.634\%$ 。引起实验结果与输入波长的误差, 主要有以下几点因素,

(1) 由于干涉条纹的畸变和疏密不均匀, 以及畸变后的条纹与 CCD 不垂直会引起测量误差。由于畸变的随机性, 系统

Table 1 Measuring result of wavelength

| 输入波长/nm | 测量波长/nm | 相对误差/% |
|---------|---------|--------|
| 532 | 530 | -0.38 |
| | 530 | -0.38 |
| | 539 | 1.3 |
| | 540 | 1.5 |
| | 530 | -0.38 |
| | 530 | -0.38 |
| | 532 | 0 |
| | 536 | 0.75 |

只能保证干涉具出射端的纵向与 CCD 垂直, 无法保证每条干涉条纹都垂直于 CCD。

(2) 使用定点 DSP 信号处理器实现 FFT 会引起舍入误差。虽然通过调整 Q 值可以实现对浮点数运算, 但是数值范围与精度是一对矛盾, 数值范围越大, Q 值越小, 计数精度越小。

(3) 虽然理论上运用多通道帧减法可以去除背景光, 但毕竟相机采集的两帧数据之间会有一定的时间间隔 (100 μ s), 背景光会有一定变化, 相减后不能完全消除其影响, 这也是引入测量误差的一个原因。

针对性地对以上各方面加以改进, 则可以进一步降低测量误差, 提高精度; 例如, 提高干涉具制作精度、选用浮点型 DSP 芯片、降低积分时间等。

4 结 论

理论上, 激光在干涉具上产生条纹是均匀的, 但实际上由于干涉具在加工和粘合时的技术误差、表面光洁度存在的差异, 以及经过扩束后输入装置的激光不能够达到远场激光的平行度等因素, 都会引起干涉条纹的畸变和疏密不均匀, 从而影响测量结果。由图 2 可以看出, CCD 采集的干涉条纹信号并非理想的正弦波, 但是运用快速傅里叶变换可显著地减少这些因素的影响, 有效地提高测量精度; 同时由图 4 可以看出, 系统运用 M-Z 干涉具和多通道帧减技术, 能有效地抑制和去除背景光影响。

参 考 文 献

- [1] WANG Zhi-bin, HE Sen, ZHANG Ji-long(王志斌, 何 森, 张记龙). Journal of Basic Science and Engineering(应用基础与工程科学学报), 2006, 14(2): 302.
- [2] XU Jian-cheng, SHI Qi-kai, CHAI Li-qun, et al(徐建程, 石琦凯, 柴立群, 等). Chinese Journal of Lasers(中国激光), 2006, 33(9): 1260.
- [3] DONG Ying, XIANG Li-bin, ZHAO Bao-chang(董 瑛, 相里斌, 赵葆常). Acta Optica Sinica(光学学报), 2001, 21(3): 330.
- [4] Zeev Zalevsky, Amir Shemer, Mendlovic David, et al. Optics Express, 2006, 14(18): 8367.
- [5] FU Lin, ZHANG Ji-long, WANG Zhi-bin(付 林, 张记龙, 王志斌). Opto-Electronic Engineering(光电工程), 2005, 32(7): 67.
- [6] XIANG Li-bin(相里斌). Opto-Electronic Engineering(光电工程), 1998, 25(6): 116.
- [7] ZHANG Ji-long, TIAN Er-ming, WANG Zhi-bin(张记龙, 田二明, 王志斌). Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程), 2006, 35(3): 327.
- [8] ZHANG Ji-long, WANG Zhi-bin, LI Xiao, et al(张记龙, 王志斌, 李 晓, 等). Journal of Test and Measurement Technology(测试技术学报), 2006, 20(2): 95.
- [9] DU Xiao-qing, WEN Zhi-yu, XIANG Xian-yi, et al(杜晓晴, 温志渝, 向贤毅, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分

- 析), 2007, 27(3): 619.
- [10] Collins S D, Smith R L, Gonzales C. Optics Letters, 1999, 24(12): 844.
- [11] Solf C, Mohr J, Wallrabe U. Proceedings of IEEE, 2003, 3(3): 773.
- [12] ZHANG Ji-long, TIAN Er-ming, WANG Zhi-bin. Wseas Transactions on Circuits and Systems, 2006, 5(9): 1403.
- [13] SUN Dong-song, YANG Zhao, FANG Jian-xing(孙东松, 杨 昭, 方建兴). Chinese Journal of Lasers(中国激光), 2003, 30(10): 943.
- [14] ZHANG Tian-shu, LIU Wen-qing, GAO Min-guang, et al(张天舒, 刘文清, 高闽光, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2006, 26(3): 430.
- [15] CHEN Wen-jing, SU Xian-yu, CAO Yi-ping, et al(陈文静, 苏显渝, 曹益平, 等). Journal of Optoelectronic • Laser(光电子 • 激光), 2004, 15(5): 6044.

Research on Laser Spectrum Detecting Technology Based on Static Mach-Zehnder Interferometer

LI Xiao^{1,2}, ZHANG Ji-long^{1,2}, XUE Shang-feng², TIAN Er-ming^{1,2}, ZHANG Yue², WANG Zhi-bin²

1. National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, Taiyuan 030051, China

2. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement (North University of China), Ministry of Education, Taiyuan 030051, China

Abstract It is the key content of laser warning to reliably and real-time detect the type and characteristic parameters of incident laser. Coherent detection technology detects the information based on the coherence of laser, and is a kind of effective detection technology. In order to detect the incident laser's spectrum, a kind of device for laser detecting and real time spectrum measurement was designed, which measures the laser spectrum on the bases of coherent detecting technology, Fourier optics and optical signal processing. Using compact and static Mach-Zehnder interferometer as the coherent detection components, it can restrain the background light efficiently. The non-scanning mechanical parts allow fast spectrum detection, and narrow laser pulse can be detected. The real-time signal processing is realized by DSP and multi-channel frame subtraction technology to wipe off the background light, detect the laser and measure its spectrum. The result indicates that, using Mach-Zehnder interferometer and multi-channel frame subtraction technology can realize the laser pulse detection, and improve the measuring precision efficiently; 10 ns laser pulse can be detected and the wavelength measuring error is less than 10 nm.

Keywords Fourier optics and optical signal processing; Mach-Zehnder interferometer; Coherent detecting technology; Spectrum measuring

(Received Oct. 18, 2007; accepted Jan. 22, 2008)