

以半导体激光器线性频率调制为基础的距离测量

吴义芳

(北京大学电子学系,北京,100871)

摘要: 给出一种以频率调制连续波(FMCW)技术为基础的进行无接触、无累加误差和较大动态范围距离测量方法。由可调谐半导体激光器产生一个啁啾信号,通过测量拍信号频率计算距离。用商用 GaAlAs 激光器组成的测量系统的动态范围为 1m,测距精度达 10^{-3} 。

关键词: 频率调制连续波 啁啾信号

Distance measurement using a linear frequency modulation diode laser

Wu Yifang

(Department of Electronics, Peking University, Beijing, 100871)

Abstract: Based on linear frequency modulation continuous wave (FMCW) technique, we have developed a distance measurement method for non-contact and non-integrating error measurement. A tunable GaAlAs diode laser is used as a chirp signal source, the distance is detected by calculating the beat frequency. The dynamic range of the system is about 1m, and the measurement accuracy of 10^{-3} is obtained.

Key words: frequency-modulated continuous-wave chirp signal

引 言

在工业和机器人技术感兴趣的范围内,有许多应用要求进行无接触、无累加误差距离测量,这种需求往往还要求测量系统装置紧凑、结构简单耐用以适应现场操作。作者给出的频率调制连续波(FMCW)技术与文献[1]提取方法不同,不是通过鉴相而是通过鉴频,以简明直观的物理思想和相对简单的技术实现米量级动态范围和 10^{-3} 精度的无接触、无累加误差距离测量。从本质上讲它是一个 Michelson 干涉仪,信号臂的终端是待测目标表面。迄今为止,在已经提出的种类繁多的各种干涉仪技术中,FMCW 技术给出的光学设计最为简单,它的动态范围和分辨率依赖于激光器可调谐的最大频偏和激光器线宽。随着半导体激光器性能的不断改善和新型激光器的出现^[2],FMCW 技术性能会得到数量级改善,这种技术有着广泛应用前景。

1 系统描述

图 1 给出的是实验装置框图。在半导体激光器偏置电流上加一三角波或锯齿波调制电流

6 Agrawal G P. Nonlinear fiber optics(Second edition). San Diego:Academic Press,1995:54~64

作者简介:李大义,男,1940年6月出生。副教授。从事非线性光学、光纤通信的教学和研究工作。

实现激光频率线性调制。为避免光反馈引起的问题,激光束经过光学隔离器(OI),由非偏振分束器(BS)分束后,进入非平衡干涉仪的两臂。在三角波扫描周期 T_m 期间,激光频率可表示为

$$f(t) = f_0 + t \tag{1}$$

式中, f_0 代表未加三角波 ($t = t_0$) 时刻的光频率, 是由调制电流引起的变化率, 而 $\dot{f} = 2 f_p / T_m$, $f_p = K_m I_p$ 。 f_p 和 I_p 分别是最大频偏和最大电流偏置, K_m 为调制系数 (GaAlAs 激光器典型的 K_m 值为 $0.06\text{nm}/\text{mA}$)。由于干涉仪两臂有 $2d$ 光程差, 当激光束在分束器上重新汇合时, 两束激光之间有一微小光频差并在光电检测器 (PD) 上产生一个拍信号

$$f_{PD} = f(t) - f(t -) \tag{2}$$

式中, 延时 $\tau = 2d/c$, (2) 式的波形如图 2 所示。若锯齿波扫描周期不小于 10^{-5}s , 在我们感兴趣的目标距离内, 延时 τ 和 T_m 相比可以忽略, 因此, f_{PD} 的不连续性可以忽略。

Fig. 1 FMCW experimental setup

(2) 式可重写为

$$f_{PD} = 4 f_p d / (T_m c) = 4 K_m I_p d / (T_m c) \tag{3}$$

通过测量拍频率 f_{PD} , 可以计算目标距离 d ,

$$d = T_m c f_{PD} / (4 K_m I_p) \tag{4}$$

2 实验

实验中使用的激光二极管是 Sharp L T24MD, 激光波长 785nm , 功率 10mW , 这类激光器的典型线宽为 30MHz 。三角波调制频率 1kHz , 最大电流偏置 I_p 为 10mA 。图 3 示出的是光电检测器 PD

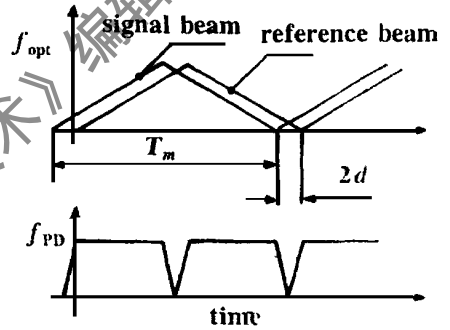


Fig. 2 Time diagram of the optical frequencies of the interfering beams and time diagram of the beat frequency

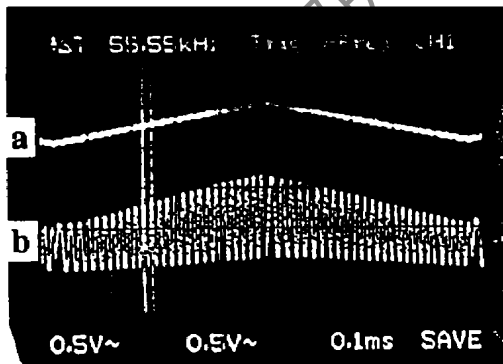


Fig. 3 Oscilloscope display showing the interference beat signal $f_m = 1\text{kHz}$, $T = 23$, $I_0 = 74.46\text{mA}$, $I_p = 10\text{mA}$, $d = 14\text{cm}$. a — modulation signal (triangle) b — beat signal

上接收到的一组拍信号 (下端) 和调制信号波形 (上端)。目标距离在 $d = 14\text{cm}$ 处, 图 4 是图 3 所示的拍信号在频域中的波形, 对应的拍频率为 56kHz 。我们用常规的频率解调技术测量拍频率, 然后按 (4) 式计算目标距离。值得指出的是, 当用三角波注入电流线性调制激光器频率时, 激光器输出的光功率也同时受到了调制, 这一效应表现在图 3 上即是拍频信号的幅度也随时间变化。它对测量拍频频率的不利影响在于: (1) 在待测目标距离较小时振幅调制的基波以及其高次谐波有可能和拍频谱相交叠; (2) 引起拍频频谱主叶加宽或畸变。为减少这一效应, 在对拍信号进行频率解调之前, 需用一个截止

频率为 10kHz 的高通滤波器滤除振幅调制基波和 10 次以下的高次谐波。图 5 示出的是测量距离的一个实例, 实验测量出的拍频 f_{PD} 和目标距离 d 之间显示出良好的线性关系, 它的斜

率是 2kHz/cm。

按照文献[2],由激光光源相位噪声引起的测量不确定性可用公式

$$d/d = [c / (2 f_p^2 d)]^{1/2} \tag{5}$$

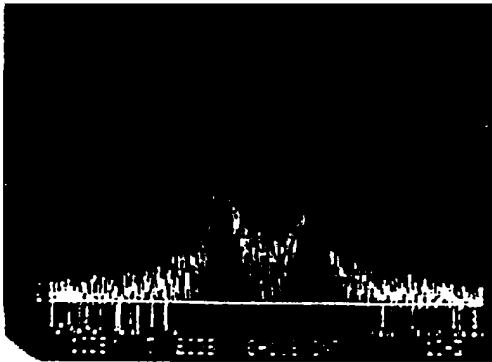


Fig. 4 Spectrum analyzer display showing peak frequency of beat signal for $d = 14\text{cm}$, $f_b = 56\text{kHz}$

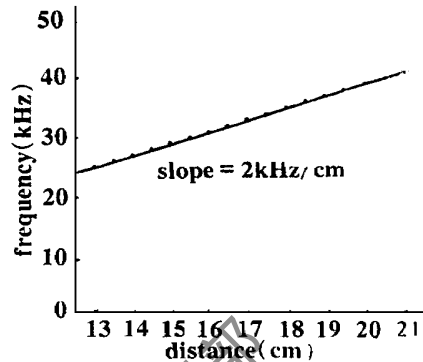


Fig. 5 Experimental plot of the frequency of the beat frequency signal as a function of the target distance moving from 12.5cm

计算,用 GaAlAs 激光器典型线宽 $\Delta f = 30\text{MHz}$ 和我们实验中所用的参数代入上式,计算出测量精度为 2.8×10^{-3} 。这和测量结果相一致。我们可以把(4)式变换成另外一种形式,即用周期条纹计数 N 表征距离 $d = cN / (2 f_p)$ (6)

式中, N 为干涉条纹数,对该式取微分得 $d = c N / (2 f_p)$ (7)

取 $N = 1$ 及 $f_p = 30\text{GHz}$ 得到 $d = 5\text{mm}$ 。我们可使用有更大线性调频范围的激光器(例如文献[2]中的激光器, f_p 最大可达 1400GHz)或使用精益求精的电子学技术对条纹细分以进一步提高测量精度。

由激光器的线宽 Δf 可知激光器的相干长度。这个参数决定着 FMCW 技术的最大动态范围,在我们系统中最大测量距离为 1m 。

3 结束语

我们给出的 FMCW 技术实现了 1m 范围内、 10^{-3} 精度的、无接触、无累加误差距离测量。由于这种技术的物理思想直接了当,光路设计和电子学技术十分简单,系统结构简单耐用。若使用线性调频范围 f_p 大、线宽 Δf 又窄的新型半导体激光器为光源, FMCW 系统的性能会大大改善,因此,在工业、机器人技术和舰船、飞行器上光纤故障检测等方面有重要应用前景。

参 考 文 献

- 1 徐左,谢巍,田芊 *et al.* 计量学报,1989;10(1):18~22
- 2 Dieckmann A, Amann M C. Opt Engng, 1995;34(3):896~903

* * *

作者简介:吴义芳,女,1939年5月出生。教授。1993.12~1995.12在美国 New Mexico State University 工作。长期从事激光稳频、高分辨光谱研究工作,并开展用激光进行大气散射光谱、高精度大动态范围位移测量和空间光通信等研究和应用技术研究。