

一种全光纤结构的相干激光测速雷达研究

眭晓林 周寿桓 赵鸿 刘波 张颖 颜子恒

(中国电子科技集团第十一研究所, 固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

摘要 研究了一种基于多普勒效应测速的光频率调制连续波相干激光雷达测速方案。该方案采用全光纤结构, 效率高、体积小、功耗低、性能稳定可靠, 具有良好的机动平台挂载适应能力。对雷达原理、结构、数据处理算法等部分进行了详细讨论。另外, 还给出了直升机飞行挂飞实验结果: 最大测量速度为 150 m/s, 作用距离大于 3 km, 最大测量误差为 0.08 m/s。

关键词 测量; 相干探测; 光频率调制; 光纤激光; 激光多普勒测速

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1208007

Research on an All-Fiber Structure Velocity Measurement Coherent Lidar

Sui Xiaolin Zhou Shouhuan Zhao Hong Liu Bo Zhang Ying Yan Ziheng

(Science and Technology on Solid-State Laser Laboratory, No.11 Institute, China Electronic Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

Abstract An optical frequency modulated continuous wave coherent lidar technology for velocity measurement based on the Doppler effect is presented. The technology uses all-fiber structure. It has advantages of high efficiency, low power consumption, stable and reliable performance, with good ability to adapt to a mobile platform. Radar principles, structures, data processing algorithms and other related parts are discussed in detail. Flying helicopter hanging results are also given: the maximum measurement velocity is 150 m/s, the measuring range is over 3 km, and the maximum measurement error is 0.08 m/s.

Key words measurement; coherence detection; optical frequency modulation; fiber laser; laser Doppler speed measurement

OCIS codes 120.3180; 110.2970; 140.3538

1 引言

激光相干探测在 20 世纪 80 年代就得到了广泛的应用^[1-2]。激光相干探测的性能比起直接探测有非常大的优势, 具有抗干扰能力强、探测灵敏度高的优点, 一直是激光探测发展的重要方向。在 20 世纪 90 年代, 林肯实验室的火池激光雷达系统展示了对远距离目标(卫星)的测速能力, 这是激光多普勒测速历史的一个重大里程碑, 为激光测速空间应用打下了良好的基础^[3]。该类系统一般采用 CO₂ 激光

器作为光源, 体积大、功耗高、系统构造复杂, 无法满足机动平台测速应用要求。类似火池系统的激光测速装置光路一般由分离透镜、偏振片等光学元件组成, 在恶劣环境下光路相干条件很难得到保证。为了可以在机动平台上使用, 激光测速方案必须具备小体积、低功耗、高可靠性、耐冲击振动等优点。随着激光技术的发展, 特别是半导体激光技术的发展, 相干激光雷达在体积上可以实现紧凑化。分布式反馈(DFB)半导体激光器和掺铒光纤放大器(EDFA)

收稿日期: 2013-04-27; **收到修改稿日期**: 2013-08-26

基金项目: 固体激光技术重点实验室基金(9140C040204110C0404, 9140C040201130C0402)、中国电子科技集团公司创新基金

作者简介: 眭晓林(1975—), 男, 博士研究生, 主要从事光电技术探测方面的研究。E-mail: pcb550@126.com

导师简介: 周寿桓(1937—), 男, 中国工程院院士, 博士生导师, 主要从事固体激光方面的研究。

E-mail: zhoushh11@gmail.com

以主振荡器功率放大(MOPA)结构组成的相干光源是一种新型的激光相干雷达发射源,它的出现引起了相干激光雷达技术的一次革新,使得光频率调制连续波相干体制的空间应用相干激光测速雷达实现成为可能。本文在分析激光相干探测基本原理的基础上,提出了一种基于多普勒效应测速的光频率调制连续波相干激光雷达测速方案。

2 工作原理

当光源与探测器处于相对运动状态时,探测器所接收到的光频率会发生变化,即光波的多普勒效应,频率变化量与速度的关系为^[4]

$$v = \frac{\lambda}{2} f_d, \quad (1)$$

式中 v 为物体沿光波束方向的运动速度, λ 为光波长, f_d 为光波频率的变化量,也就是多普勒频移。如果测到多普勒频移,从而能得到物体沿光波束方向的运动速度,这就是多普勒效应测速法。光的频率很高,其频率为

$$f_0 = c/\lambda, \quad (2)$$

式中 c 为光速。

对于 $1.55 \mu\text{m}$ 的激光,光频率为 1.9×10^{14} Hz, 机动平台挂载应用中目标运动速度在数厘米每秒至数百米每秒的范围内,由(1)式可得,多普勒频移为数十千赫兹至数百兆赫兹。多普勒频移约为光波自身频率的 10^{-6} 倍。现有的探测器响应频率都无法达到光波频率。必须采用间接的相干探测的方法,相干探测采用的原理光路如图 1 所示。

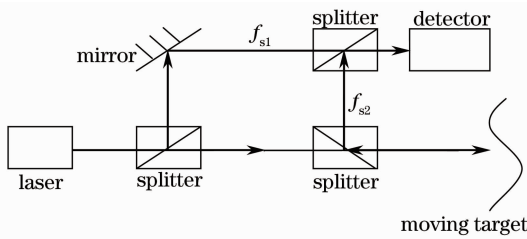


图 1 相干探测原理光路图

Fig. 1 Principle diagram of optical coherence detection

将激光器发出的光分为两束,其中一束是本振光,频率为 f_{s1} ,另一束射到运动目标,目标反射回来的光为信号光,频率为 f_{s2} 。本振光和信号光到达光探测器阴极表面的光场振幅分别为

$$E_1 = E_{01} \cos(2\pi f_{s1} t + \phi_1), \quad (3)$$

$$E_2 = E_{02} \cos(2\pi f_{s2} t + \phi_2), \quad (4)$$

式中 E_{01} 、 E_{02} 分别为两束光在光阴极表面处的振

幅; ϕ_1 、 ϕ_2 分别为两束光的初始相位。两束光在光阴极表面混频,其合成的电场强度为

$$E = E_1 + E_2 = E_{01} \cos(2\pi f_{s1} t + \phi_1) + E_{02} \cos(2\pi f_{s2} t + \phi_2). \quad (5)$$

探测器输出电流与光强度成正比,光强度与光的电场强度的平方成正比,所以探测器输出电流为^[5]

$$I = K (E_1 + E_2)^2 = \frac{1}{2} K (E_{01} + E_{02})^2 + KE_{01} E_{02} \cos[2\pi(f_{s1} - f_{s2})t + \phi], \quad (6)$$

式中 K 为常数, ϕ 为两束光初始相位差,第一项是直流分量,可用电容器隔去,第二项是交流分量,其中 $f_d = f_{s1} - f_{s2}$ 是多普勒频移。

测得多普勒频移后,代入(1)式即可得到目标沿波束方向的速度。多普勒效应测速法具有测速范围大、测速精度高、响应速度快、可进行矢量测速等优点,这些优点正是机动平台测速应用所需要的。

3 光频率调制连续波相干激光雷达测速方案

本文采取的系统结构如图 2 所示。激光种子源发出窄线宽单频激光通过 EDFA 放大到适当功率。放大后的激光线宽较放大前基本不变。达到一定功率的单频激光进行线性调频后,分为两束。其中一束为参考光,经过 $1/2$ 波片到达平衡探测器(采用 QH1550BD 型平衡探测器)。另一束光照射到目标,目标反射光由收发开关导入接收支路在探测器上与参考光混频。发出的激光经目标散射后,再次进入系统,两次经过 $1/4$ 波片,与参考光匹配。探测器输出的信号携带有相对运动速度信息,数据采集及处理系统对该信号处理后得到飞船速度。图中 A/D 表示模数转换。

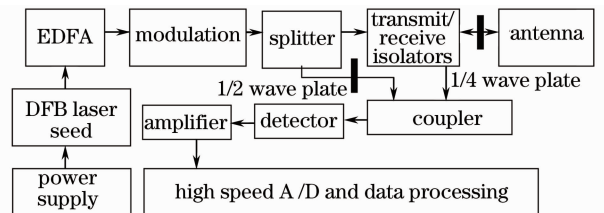


图 2 相干探测光学系统结构

Fig. 2 Block diagram of optical coherence detection system

激光器是本实验室为此项目专门研发的,采用功率为 5 mW 的 DFB 经过 EDFA 放大后输出 100 mW 窄线宽连续激光,其参数如表 1 所示。

表 1 发射系统参数表

Table 1 Transmission system parameters

No.	Item	Value
1	Wavelength /nm	1550
2	Linewidth /kHz	35
3	Power /mW	100
4	Modulation bandwidth /GHz	1
5	Modulation frequency /MHz	10

如图 3 所示,系统发出激光为三角线性调频波,其回波(Return)也为三角线性调频波。信号光相对于参考光频率极大值与极小值在时间横轴的延时体现出目标的远近,在频率纵轴的差异体现出目标运动速度的大小与方向^[6]。混频曲线(IF)为探测器回波信号时频变换后所得曲线。

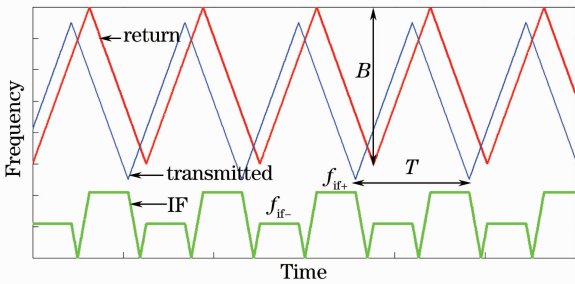


图 3 测速信号示意图

Fig. 3 Velocity measurement signal schematic diagram

根据图 3,不难得到以下方程组:

$$f_{if-} = |f_R - f_d|, \quad (7)$$

$$f_{if+} = |f_R + f_d|, \quad (8)$$

式中 f_R 为距离引起的频移, f_d 为速度引起的频移。通过(7)、(8)式解得 f_d , 代入(1)式即可得到目标沿波束方向的速度。

测量 f_{if+} 和 f_{if-} 时,没有采用将探测器输出信号直接做快速傅里叶变换(FFT)的测量方法。FFT方法只能给出频域中信号的特征,不具有时间分辨特性,因而需要采用时频分析算法。时频分析算法选用短时傅里叶变换(STFT)方法。STFT是用窗函数移动截取数据,进行傅里叶变换。这样随着窗函数的移动,就可得到随时间信号频率分布的情况,其计算公式为

$$X(\omega, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)w(t-\tau)\exp(-j\omega\tau)d\tau, \quad (9)$$

式中 $x(\tau)$ 为探测器输出的信号, $w(t-\tau)$ 为窗函数。

STFT方法在频率轴上的频率范围和分辨率取决于采样速率和窗函数的长度。功率谱图上的频率点数或谱线数为 $N/2$, N 是窗函数的长度。所有的

频点间隔大小一致,通常称之为频率分辨率,可以表示为

$$F_R = \frac{F_{\text{Sample}}}{N}. \quad (10)$$

根据(10)式可以得到,选择窗函数长度 $N = 32786$,数据采样率为 400 MHz 情况下,STFT方法可得到 0~200 MHz 范围,分辨率为 12.2 kHz 的功率图谱。采用波长为 1550 nm 的激光,多普勒频移与速度的关系如表 2 所示。

表 2 速度与多普勒频移的关系

Table 2 Velocity and Doppler frequency shift

No.	Velocity /(m/s)	Doppler frequency shift /kHz
1	0.009	12.2
2	0.1	129
3	30	38709
4	100	129032
5	150	193548

从表 2 可以看出,对应于 0.9 cm/s 的速度,多普勒频移为 12.2 kHz。对应于 150 m/s 的速度,多普勒频移为 194 MHz,小于 200 MHz 的最大频率分析上限。因此理论上该测速系统测速范围为 -150~150 m/s,精度为 0.9 cm/s。

4 实验结果

4.1 室内测试

为了验证测速范围和测速精度,利用圆盘转速测试设备搭建了相关的检测平台,在室内对整套设备进行测试。激光雷达如图 4 所示。测试原理图如图 5 所示。测试设备激光入射到轮子边缘。设轮子的角速度为 ω ,半径为 R ,入射点与切线点半径夹角为 θ ,则轮子边沿在波束方向的线速度为

$$v_{\text{wheel}} = R\omega \cos \theta. \quad (11)$$

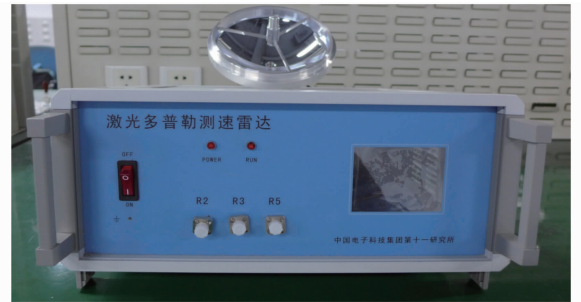


图 4 相干激光雷达

Fig. 4 Coherent lidar

其测试曲线如图 7 所示。在 150 m/s 的范围内雷达测量数据相对于转轮自身测量数据的最大误差为 $\delta = 1.5$ cm/s。可见该相干激光测速雷达具有较

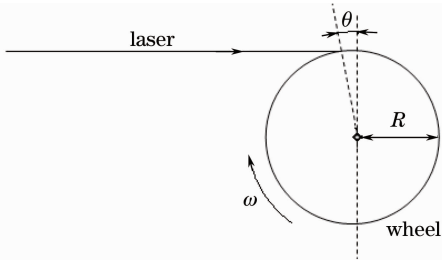


图 5 转轮测试原理图

Fig. 5 Wheel test schematic diagram

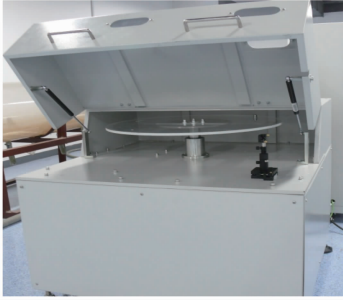


图 6 转轮测试设备图

Fig. 6 Wheel test equipment

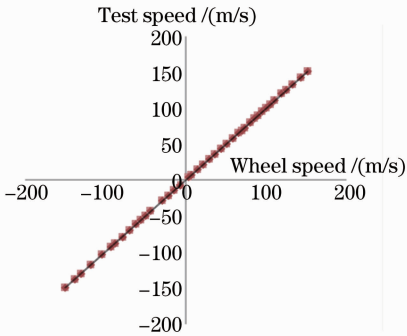


图 7 转轮速度与测量速度最小二乘法拟合图

Fig. 7 Least squares method fitting diagram of wheel velocity and measurement velocity

大的测量范围和较高的精度。

由(1)式可知,有两个因素会引起激光测速雷达测量误差,分别为激光波长漂移引起的误差 σ_λ 和测量频率不准确引起的误差 σ_f 。这两个误差分项表达式为

$$\sigma_\lambda = \frac{\Delta\lambda}{2} f_d, \quad (12)$$

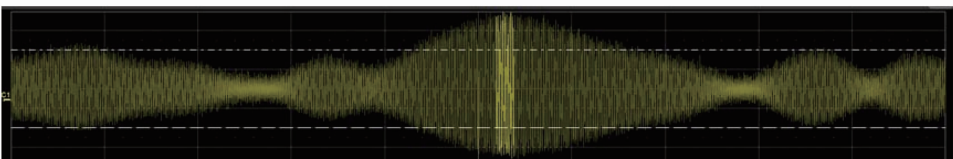


图 9 示波器显示的探测信号

Fig. 9 Detection signals displayed by oscillograph

$$\sigma_f = \frac{\lambda}{2} \Delta f_d. \quad (13)$$

激光测速雷达测量误差为

$$\sigma_L = \sqrt{\sigma_\lambda^2 + \sigma_f^2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta\lambda}{2} f_d\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{2} \Delta f_d\right)^2}. \quad (14)$$

将实际偏差 $\Delta\lambda = 2.8 \times 10^{-7} \text{ nm}$, $\Delta f_d = 12.2 \text{ kHz}$ 代入(14)式,可得 $\sigma_L = 0.95 \text{ cm/s}$ 。

转轮中自身轴角编码器测速误差为 δ_M ,则系统总测量误差为

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_M^2}. \quad (15)$$

已知 $\sigma_M = 1 \text{ cm/s}$,可得系统总测量误差为 $\sigma_T = 1.38 \text{ cm/s}$ 。实际测量误差为 $\delta = 1.5 \text{ cm/s}$,该实际误差与理论分析误差基本一致。

4.2 挂飞测试

为了验证系统在实际工作过程中的的作用距离及测试的精度,本系统实验采用直升飞机作为载体,将系统固定在直升飞机驾驶舱侧下方,如图 8 所示^[7],实际测试信号如图 9 所示。此信号经过低噪声放大、小波消噪^[8]、STFT 处理后,找到频谱曲线峰值对应的频率值得到飞机速度。在最高距地面 3 km 处飞行,进行速度测量,测试数据如图 10 所示。其中一条曲线为激光雷达测试数据,另一条曲线为全球定位系统(GPS)测试数据。在 GPS 测量随机误差 $\delta = 0.05 \text{ m/s}$ 的情况下,测量数据与 GPS 最大误差为 $\delta = 0.08 \text{ m/s}$ 。产生误差的主要原因是地面目标形状较为复杂(楼房、高大的烟囱等),激光照射到和离开此类目标的时候,会对回波有扰动。



图 8 相干探测系统安装于直升机上

Fig. 8 Coherent detection system is mounted on the helicopter

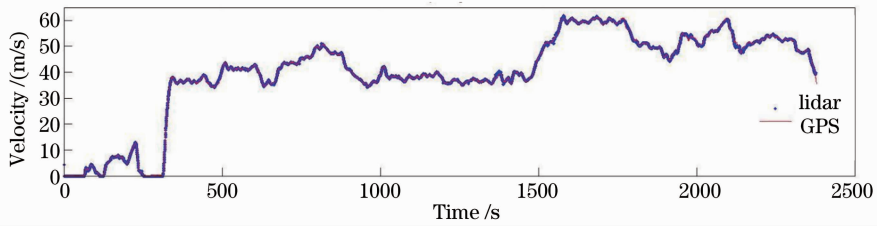


图 10 激光雷达系统与 GPS 测试数据对比

Fig. 10 Lidar system test data versus GPS data

5 结 论

基于多普勒效应测速原理方法提出并实现了一种光频率调制连续波相干激光测速雷达。该技术采用全光纤结构,效率高、功耗小、性能稳定可靠,具有良好的机动平台挂载应用适应能力。最新挂飞实验结果表明:这种相干激光测速雷达具有测量范围大、精度高、作用距离远的优点,可以满足机动平台着陆时对速度测量的需求,在机动平台挂载测速应用方面具有良好的前景。

参 考 文 献

- 1 J M Vaughan, K O Steinvall, C Werner, *et al.*. Coherent laser radar in Europe[J]. Proc IEEE, 1996, 84(2): 205-226.
- 2 R M Huffaker, R M Hardesty. Remote sensing of atmospheric wind velocities using solid-state and CO₂ coherent laser systems [J]. Proc IEEE, 1996, 84(2): 181-204.
- 3 Alfred B Gschwendtner, William E Keicher. Development of coherent laser radar at Lincoln Laboratory [J]. Lincoln Laboratory Journal, 2000, 12(2): 383-385.
- 4 Yu Xiao, Hong Guanglie, Ling Yuan, *et al.*. Homodyne

- detection of distance and velocity by chirped-amplitude modulated lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0606002.
- 于 啸,洪光烈,凌 元,等.啁啾调幅激光雷达对距离和速度的零差探测[J].光学学报,2011,31(6):0606002.
- 5 Zhang Jun, Yang Yong, Cheng Xuewu, *et al.*. Application of K-FADOF in solar high-resolution observation [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0808003.
- 张 俊,杨 勇,程学武,等.钾原子滤波器在太阳高分辨率观测中的应用[J].中国激光,2012,39(8):0808003.
- 6 Ding Lufei, Gen Fulu. Radar Principle [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2002. 239.
- 丁鹭飞,耿富路.雷达原理[M].西安:西安电子科技大学出版社,2002. 239.
- 7 Sui Xiaolin, Zhou Shouhuan, Zhao Hong, *et al.*. All fiber coherent detection system far target velocity measurement [J]. Laser and Infrared, 2013, 43(3): 256-257.
- 眭晓林,周寿桓,赵 鸿,等.全光纤激光相干探测实现远距离目标测速[J].激光与红外,2013,43(3):256-257.
- 8 Yan Shuai, Shang Jianhua, Liu Yuying, *et al.*. Wavelet denoising for heterodyne laser Doppler vibrometer [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(8): 081203.
- 燕 帅,尚建华,刘玉英,等.小波消噪在外差式激光多普勒振动测量中的应用[J].激光与光电子学进展,2012,49(8):081203.

栏目编辑:何卓铭