**文章编号:** 1672-8785(2013)05-0001-07

## 外差探测激光多普勒雷达系统性能研究

#### 凌 元 洪光烈 崔桂华 舒 嵘

(中国科学院上海技术物理研究所空间主动光电技术与系统实验室,上海 200083)

**摘 要**:外差探测激光多普勒雷达由于具有测速精度高和可辨别速度方向等优点而广 泛应用于测风、流体测速以及着陆导航等方面。对外差激光多普勒雷达的测速原理、 误差来源和系统噪声进行了分析,并给出了系统的信噪比和探测精度的仿真结果。搭 建了全光纤外差探测激光多普勒系统。用研制的高精度运动目标模拟器开展了相关测 速实验。实验结果表明,速度测量精度优于 6.7 cm/s,而且与速度大小基本无关,这与 仿真分析结果相一致。

关键词: 激光雷达; 激光多普勒; 相干探测; 外差探测

中图分类号: TN957.51 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.05.001

## Performance Study of Heterodyne Detection Laser Doppler Radar System

LING Yuan, HONG Guang-lie, CUI Gui-hua, SHU Rong

(Key Laboratory of Space Active Opto-electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** Heterodyne detection laser Doppler radars are widely used in wind measurement, fluid speed measurement and landing navigation etc because of their high measurement accuracy and good velocity direction discrimination ability. The operation principle, error sources and system noise of a heterodyne detection laser Doppler radar are analyzed and the simulation results of signal-to-noise ratio and detection accuracy of the system are given. An all fiber heterodyne detection laser Doppler radar system is developed. The speed measurement experiment is made on it by using a high precision motion target simulator. The experimental result shows that its measurement accuracy is better than 6.7 cm/s and is independent of velocity. This result is consistent with the simulation result.

Key words: laser radar; laser doppler; coherent detection; heterodyne detection

## 0 引言

外差激光多普勒雷达以其高测量精度在风速测量、流体测量以及着陆导航等方面都具有 广泛应用<sup>[1]</sup>。激光波长短,频率高,因此其相同 速度所产生的多普勒频移比声波和微波都要高 几个数量级。直接探测无法响应激光光频,需要 用相干探测技术获得多普勒频移。通过声光调 制技术将发射光或本振光移频到一个中频上, 不仅可以降低系统的低频噪声,而且还可以区 分速度方向,因而在激光多普勒雷达中得到广 泛应用。

**收稿日期**: 2013–04–15

作者简介: 凌元 (1987-), 男, 安徽池州人, 博士研究生, 主要研究方向为相干探测激光雷达。

**基金项目:**国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2009CB724004)

E-mail: lyleling@hotmail.com

外差激光多普勒雷达的激光波长偏移、中 频频率频差以及信号处理等方面的误差会对系 统的测量精度造成影响。信噪比是影响信号处理 的重要因素。本振散粒噪声、相对强度噪声以及 探测器和电路方面的噪声是系统的主要噪声。 它们会直接影响系统的探测信噪比,从而影响 系统的探测性能。

本文介绍了全光纤外差探测激光多普勒雷 达的结构,然后对其误差来源和信噪比进行了 分析,并对探测精度进行了仿真。同时,我们在 实验室对探测精度进行了测试,测试结果与理 论分析结果相一致。

## 外差探测激光多普勒雷达系统的原 理与组成

#### 1.1 激光多普勒测速原理

同声波的多普勒效应一样,光源与物体相 对运动时也具有多普勒效应。当一束具有单一 频率 f。的激光照射到一个运动物体上时,物体 接收到的光波频率与光源频率之间会有差异, 其增减程度与物体的运动速度以及照射光与速 度方向的夹角有关<sup>[2]</sup>。假设物体沿激光方向的 运动速度为 v,则根据相对论原理,物体处所接 收到的激光频率 f' 为<sup>[2-4]</sup>

$$f' = f_0 \left(\frac{1}{1 \mp v/c}\right)^{1/2} \tag{1}$$

式中, *c* 为光速。在通常情况下, 由于 *v*/*c* ≪ 1, 式 (1) 可以简化为

$$f' \approx f_0(1 \pm v/c) \tag{2}$$

因此, 频率变化量为

$$\Delta f = f' - f_0 = \frac{v}{c} f_0 = \pm v/\lambda \tag{3}$$

式中, <sup>λ</sup> 为激光波长。如果用一个静止的探测器 接收物体散射的回波光, 那么所观察到的光波 频率就经历了两次多普勒效应, 即光波频率的 变化量可以近似表示成

$$f_d = \pm 2v/\lambda \tag{4}$$

式中,  $f_a$  为多普勒频移; v 为物体的运动速度;  $\lambda$  为激光波长。当物体朝着光源和探测器运动时,多普勒频移为正值,反之则为负值。

#### 1.2 **外差探测原理**<sup>[5]</sup>

激光外差相干探测技术的基本原理类似于 电子学的相关检测原理。当激光回波光与本振 光同时照射到光电探测器的光敏面上时,若这 两束光具有相干性,即具有固定的相位关系,那 么它们就会在探测器的光敏面上发生干涉。干 涉后的信号经探测器响应并被转换成光电流。

假设激光的回波光信号和本振光信号分别 为

$$E_s = A_s \cos(\omega_s t + \varphi_s) \tag{5}$$

$$E_{LO} = A_{LO} \cos(\omega_{LO} t + \varphi_{LO}) \tag{6}$$

式中, *E<sub>LO</sub>* 为本振光信号。在两束光混合后,照 射到光敏面上的光电场为

$$E = A_{\scriptscriptstyle S} \cos(\omega_{\scriptscriptstyle S} t + \varphi_{\scriptscriptstyle S}) + A_{\scriptscriptstyle LO} \cos(\omega_{\scriptscriptstyle LO} t + \varphi_{\scriptscriptstyle LO}) \quad (7)$$

根据光电探测器的平方率特性,光电探测 器输出的光电流为

$$i = \Re E^{2} = \Re [A_{s} \cos(\omega_{s}t + \varphi_{s}) + A_{LO} \cos(\omega_{LO}t + \varphi_{LO})]^{2}$$

$$= \frac{1}{2} \Re A_{s}^{2} + \frac{1}{2} \Re A_{LO}^{2} + \Re \{A_{s}^{2} \cos(2\omega_{s}t + 2\varphi_{s}) + A_{LO}^{2} \cos(2\omega_{LO}t + 2\varphi_{LO})$$

$$-A_{s} A_{LO} \cos[(\omega_{s} + \omega_{LO})t + (\varphi_{s} + \varphi_{LO})]\} + \Re A_{s} A_{LO} \cos[(\omega_{LO} - \omega_{s})t + (\varphi_{LO} - \varphi_{s})]$$
(8)

式中,第一项和第二项分别为本振光和回波光 的直接探测量;第三项为探测器无法响应的高 频项,其均值为0;第四项为回波光与本振光的 差频,可被探测器响应。因此式(8)可简化为

$$i = \frac{1}{2} \Re A_{_{S}}^{2} + \frac{1}{2} \Re A_{_{LO}}^{2} + \Re A_{_{S}} A_{_{LO}} \cos[(\omega_{_{LO}} - \omega_{_{S}})t + (\varphi_{_{LO}} - \varphi_{_{S}})]$$

INFRARED (MONTHLY)/VOL.34, NO.5, MAY 2013

$$= \Re P_{\scriptscriptstyle S} + \Re P_{\scriptscriptstyle LO} + 2\Re \sqrt{P_{\scriptscriptstyle S} P_{\scriptscriptstyle LO}} \cos[(\omega_{\scriptscriptstyle LO} - \omega_{\scriptscriptstyle S})t + (\varphi_{\scriptscriptstyle LO} - \varphi_{\scriptscriptstyle S})] \tag{9}$$

式中,  $P_s \ \pi P_{Lo} \ \beta$ 别为本振光和回波光的功率;  $P_s = A_s^2/2$ ,  $P_{Lo} = A_{Lo}^2/2$ 。若  $\omega_{Lo} - \omega_s = 0$ ,则 称之为零差探测;若  $\omega_{Lo} - \omega_s \neq 0$ ,则称之为外 差探测。

由式 (9) 可知, 通过相干探测可以得到本振

光的直接探测量、回波光的直接探测量以及回波光与本振光之间的频率差和相位差。

#### 1.3 外差探测激光多普勒雷达系统的组成

图 1 为外差探测激光多普勒雷达系统的结构图。



图 1 外差激光多普勒雷达的结构图

该系统选择窄线宽半导体激光器作为种子 源,其波长为1550 nm,线宽为3 kHz,输出功 率为20 mW。激光经过光纤分束器后被分成两 部分:一部分作为本振光,其本振功率约为1 mW;另一部分通过声光调制器进行移频,其移 频频率为62.5 MHz。声光移频主要用于解决速 度方向模糊问题。经光纤放大器放大后的激光 通过环形器和发射准直镜发射到目标上。接收 到的回波光经过环形器的另一端后和本振光同 时被输入到平衡相干探测系统中,形成回波光 与本振光之间的差频,从而得到速度信息。

表1列出了外差激光多普勒雷达系统的主 要设计参数。

# 2 固体测速激光多普勒雷达的误差来源

#### 2.1 波长漂移误差

根据激光多普勒效应公式,长时间的波长 漂移对系统测量精度的影响主要体现在计算误

表1 糸统参数

参数	指标
波长	1550  nm
线宽	3 kHz
脉冲能量	120 µJ
接收口径	40 mm
探测器带宽	200  MHz
RIN 噪声	$-140 \text{ dB}/\sqrt{\text{Hz}}$
本振功率	$1 \mathrm{mW}$
中频频率	$62.5 \mathrm{~MHz}$
采样时间	32.768 µs
采样速率	500  MHz
AD 位数	12 bit
FFT 运算	定点

差方面。在波长为 1550 nm 时, 假设得到的多普 勒频移为 f<sub>a</sub>,由于波长漂移 1 nm 后即为 1551 nm,因计算产生的误差可以表示为

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\frac{f_d \lambda_{1551}}{2} - \frac{f_d \lambda_{1550}}{2}}{\frac{f_d \lambda_{1550}}{2}} = 0.065\%$$
(10)

由式 (10) 可知, 在速度为 100 m/s 时, 1 nm 偏 差对系统产生的误差为 0.065 m/s。

系统的波长主要与半导体种子源的波长稳 定性有关,而半导体种子源的波长稳定性又与 其温度和驱动电流的稳定性有关。根据系统所用 激光种子源的数据手册,在 20~45℃范围内, 激光器的波长偏移不超过 0.4 nm。系统的种子 源采用精密温控设计,种子源的温度偏差可控 制在±3℃范围内,因此温度对种子源波长的影 响以及对测速精度的影响可以忽略不计。种子 源采取恒流源驱动,这里电流对波长的影响也 可忽略不计。

激光器的线宽对测量也会产生影响。若不 考虑线宽对系统信噪比的影响,则激光器的线 宽仅对速度分辨率有影响。本文所用激光种子 源的线宽为3kHz,远小于系统的频率分辨率, 因此可以忽略不计。

#### 2.2 外差中频频率偏差

外差激光多普勒雷达通过中频移频区别速 度方向。通过声光移频可以实现发射光的中频移 频。声光调制器驱动的中频频率为 62.5 MHz。 驱动电路采用温补晶振和功放实现。中频频率 偏差主要与温补晶振的频率漂移有关。温补晶 振通过附加的温度补偿电路使得周围温度变化 所产生的振荡频率变化发生消减。本文所用温 补晶振的频率稳定性参数为 20 ppm (百万分之 一),其对系统精度产生的影响为

 $\frac{(62.5 \times 10^6) \times (20 \times 10^{-6}) \times (1.55 \times 10^{-6})}{2}$ = 9.6875 × 10<sup>-4</sup> m/s

该值只同测量时的中频频率与 62.5 MHz 的 偏移有关, 与测量的速度大小无关。

事实上,外差激光多普勒雷达的探测精度 还与信号处理的提取精度有关,我们将在下面 的仿真中对其作详细描述。

INFRARED (MONTHLY)/VOL.34, NO.5, MAY 2013

3 外差激光多普勒雷达的性能分析

#### 3.1 系统噪声

外差相干探测激光多普勒雷达的主要噪声 包括散粒噪声、相对强度噪声、探测器噪声和电 路噪声。

#### 3.1.1 散粒噪声 [5]

散粒噪声主要包括本振散粒噪声和回波散 粒噪声。在相干探测中,本振功率一般接近 mW 量级,而回波功率的大小仅为 pW 量级。回波功 率比本振功率小得多,所以回波散粒噪声相对 而言可以忽略不计。本文系统中的本振功率为 1 mW,由此可以计算出本振散粒噪声:

$$v_{LO} = i_{LO} * K = \sqrt{2eP_{LO}\Re_i B} * K = 1.8 \text{ mV}$$
 (11)

式中, $i_{LO}$ 为本振相对强度噪声电流;K为探测器的跨阻增益,即探测器的电流信号转换为电压信号的增益(在本系统中,K=7500 V/A); $\Re_i$ 为探测器的电流响应率(在本系统中, $\Re_i = 0.9$  A/W);e为电子电量。

3.1.2 相对强度噪声<sup>[4]</sup>

相对强度噪声是由本振光引入的。平衡探测可以有效抑制本振光的相对强度噪声,其抑制效果与平衡探测器前 3-dB 耦合器的分束比 *ε* 有关。根据本系统的参数可以计算出相对强度 噪声电压:

 $v_{\scriptscriptstyle RIN} = \Re_i (1 - 2\varepsilon) P_{\scriptscriptstyle LO} \sqrt{2B * RIN} * K = 0.54 \text{ mV}$ (12)

由于采用平衡探测方式,本振光所产生的 相对强度噪声较小, 仅为 0.54 mV。

#### 3.1.3 探测器噪声

探测器集成了前置跨阻增益放大电路,其 噪声包括暗电流噪声和热噪声。由于缺少探测 器的暗电流和噪声因子数据,这里就不对其噪 声进行详细分析。探测器的噪声水平以测量结 果为准。图2所示为接通电源的探测器在未加任 何光信号时的输出波形。可以看出,该探测器的 平均输出噪声为 0.172 mV。



图 2 探测器噪声

#### 3.2 信噪比分析

面目标的激光雷达作用距离方程可以用式 (13) 表示<sup>[6]</sup>:

$$P_{R} = \frac{\pi P_{T} \rho D^{2}}{(4R)^{2}} * \eta_{Sys} \eta_{Atm}$$
(13)

式中,  $P_R$  为接收到的回波功率;  $P_T$  为发射峰 值功率;  $\rho$  为目标的平均反射率; D 为接收孔 径; R 为探测距离;  $\eta_{sys}$  为系统效率;  $\eta_{Atm}$  为 双程大气透过率,本课题中可以忽略不计。该方 程的意义可作以下表述: 在大气透过率为  $\eta_{Atm}$ 的条件下,用发射峰值功率为  $P_T$ 、系统效率为  $\eta_{sys}$ 、口径为D 的激光雷达系统探测距其 R 处、 平均反射率为 $\rho$  的面目标时所能接收到的回波 功率。 用 Matlab 软件仿真系统在目标反射率为 6% 时的回波峰值功率和探测器输出电压。目标的 距离范围为 2 m ~ 3 km,脉冲能量为 120 µJ。 图 3 所示为仿真结果。

通过仿真得到的系统最低回波功率为  $2.5 \times 10^{12}$  pW, 探测器的最小输出电压  $v_s = 0.6$  mV。

通过信号电压大小和噪声电压大小可以求 出系统的信噪比:

$$SNR = \frac{v_s}{v_n} = \frac{0.6 \text{ mV}}{2.512 \text{ mV}} = -6.22 \text{ dB}$$
 (14)

实际上,系统的信噪比达不到计算值的水 平。其主要原因是,在计算噪声时,由于缺少相 关器件噪声因子参数,系统的热噪声并没有被 考虑进去。

#### 3.3 探测精度分析

激光多普勒雷达的探测精度主要与多普勒 频率的提取精度有关。频率提取误差是系统的 主要误差源。频率提取误差与系统信噪比、脉冲 宽度以及信号处理算法有关。根据前面的相关 分析,系统的最低信噪比为 -6.22 dB。下面仿真 该信噪比下的速度提取误差。

设置速度为 77 m/s,系统的采样速率为 500 MSPS,采样时间为 32.768  $\mu$ s,信噪比为 -6.22 dB,仿真次数为 1000 次,通过仿真得到  $\overline{v}$  = 77 m/s,  $\sigma_v = 0.0243$  m/s。图 4 所示为仿真结果。



图 3 回波功率和探测器输出电压随探测距离的变化关系 (反射率为 0.06)

http://journal.sitp.ac.cn/hw







图 4 速度提取结果

速度较小时的仿真结果表明,在信噪比不 变的情况下,若不考虑波长漂移带来的计算误 差,则可认为速度提取误差与速度大小无关,如 图5所示。这与脉冲多普勒测速的精度理论也是 相符合的,如式(15)所示<sup>[7]</sup>。理论上的提取精 度仅与脉冲宽度及信噪比有关,而与速度大小 无关。





我们对不同信噪比下的速度提取精度进行 了仿真。仿真时,将速度大小设置为v = 77 m/s。 图 6 所示为仿真结果。可以看出,随着信噪比的 不断提高,速度提取精度逐渐增加。信噪比是以 分贝为单位来表示的。

由以上分析可知,系统的速度测量精度可以达到 2.5 cm/s。



## 4 外差激光多普勒雷达系统的实验

我们研制了激光多普勒雷达速度模拟器, 并对其探测精度进行了测试。通过设置模拟器 模拟了不同的速度。在每个速度值下,记录一定 数目的测量值。因此,激光多普勒雷达的测速精 度可由下式计算得到:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (v_i - \overline{v})^2}$$
(16)

图 7 所示为回波功率为 0.5 nW 时测得的速 度值。其中,上半部分所示为测量值与理论值的 对比情况。从中可以看出,测量值与理论值吻合 得非常好;下半部分所示为用式(16)进行统计 分析得到的速度标准差。从图7中可以看出, 在回波功率为0.5 nW时,测速精度达到了0.015 m/s的水平;另外,系统的测量精度与速度大小 之间没有必然关系,这与相关理论相吻合。



图 7 测量范围与测量误差 (回波功率为 0.5 nW)

根据式 (15), 在回波功率为 0.05 nW 时, 探 测精度应为

$$\sigma_{\rm m} = 0.015 \times \sqrt{10} = 0.047 \ {\rm m/s}$$

将回波衰减至 0.05 nW 时,用同样的方法测 量该回波功率下的测速精度。图 8 所示为测量结 果。



从图 8 中可以看出, 测速精度仍然约为 0.015 m/s。这显然与理论不符, 因为测速精度不仅与回波功率 (信噪比) 有关, 而且还与系统的速度分辨率有关。在本系统中,速度分辨率为 0.023 m/s, 其可能带来的速度误差为 0.0115 m/s。另外,速度模拟器本身也会带来模拟误差。因此可以认为, 在回波功率为 0.05 nW 时, 系统的测量精度已经达到极限; 回波功率的提高并不会明显改变系统的探测精度。这也是造成回波功率为 0.05 nW 和 0.5 nW 时测速精度区别不大的原因。

在不考虑分辨率影响的情况下,假设系统 在回波为 0.05 nW 时测得的速度精度小于或者 等于 0.015 m/s,根据上面的测量结果,这种假 设显然是合理的。因此在回波功率为 2.5 pW (对 应的探测距离为 3 km)时,系统的测速精度为

 $\sigma_v = 0.015 \times \sqrt{20} = 0.067 \text{ m/s}$ 

#### **5** 结束语

我们对外差激光多普勒雷达的噪声来源进 行了分析,并仿真了系统的探测精度。从仿真结 果来看,测速精度主要与信号处理的频率提取 精度有关。然后通过实验对测速精度进行了测 试。结果表明,该系统可以实现 0.067 m/s 的测 速精度。

#### 参考文献

- 周健, 龙兴武. 用于车载自主惯导系统的激光多普 勒测速仪 [J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1316–1321.
- [2] 沈熊. 激光多普勒测速技术及应用 [M]. 北京:清 华大学出版社, 2004.
- [3] Yang S H, Wu K Y, Zhao C M, et al. Coherent 1.06 μm CW Laser Radar System [C]. SPIE, 2000, 4223: 1–7.
- [4] Wei G, Zhou J, Long X W. Analysis of Signal-tonoise Ratio and Heterodyne Efficiency for Referencebeam Laser Doppler Velocimeter [J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44: 108–113.
- [5] 孟昭华. 啁啾调幅相干激光雷达关键技术研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2010.
- [6] 戴永江. 激光雷达技术 (上册) [M]. 北京: 电子工 业出版社, 2010.
- [7] Jelalian A V. Laser Radar Systems [M]. Boston: Artech House, 1992.

INFRARED (MONTHLY)/VOL.34, NO.5, MAY 2013