

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.02.07

# 瞬态高速光子多普勒测速技术研究现状及展望

吕林杰, 武腾飞, 韩继博, 夏传青, 张大治, 梁志国

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

**摘要:** 面对短时间、高速度等极端测量条件的挑战, 光子多普勒测速系统朝向更大测速范围、更高时间分辨力、更高灵敏度和多点测量能力四个方面快速发展。首先文章详细介绍了光子多普勒系统测速原理和背景; 其次对测量速度在 100 m/s 以上、记录时间为纳秒级的瞬态高速光子多普勒测速系统的经典改进方法和发展现状进行了分类和总结; 然后着重介绍时域展宽技术中, 时间拉伸和时间透镜两种方法在光子多普勒测速系统中的应用, 结合两者时间放大特点和应用潜力进行了探讨; 最后总结了瞬态高速光子多普勒测速系统现阶段遇到的问题并对其未来发展做出展望。

**关键词:** 瞬态高速; 光子多普勒测速; 时域展宽; 时间拉伸; 时间透镜

**中图分类号:** TB9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5795(2021)02-0064-09

## Research Status and Prospect of Transient High Speed Photon Doppler Velocimetry

LV Linjie, WU Tengfei, HAN Jibo, XIA Chuanqing, ZHANG Dazhi, LIANG Zhiguo

(Changcheng Institute of Metrology &amp; Measurement, Beijing 100095, China)

**Abstract:** Facing the challenge of extreme measurement conditions such as short time and high speed, the photonic Doppler velocimetry (PDV) system is developing rapidly in four aspects: larger dynamic range, higher sensitivity, higher temporal resolution and multi-channel measurement ability. Firstly, the principle and background of PDV is introduced in detail. Secondly, the classical improvement methods and development status of transient high speed photon Doppler velocity measurement system with measuring speed above 100 m/s and recording time of nanoseconds are classified and summarized. Then, the application of time stretch and time lens in the PDV system is emphatically introduced, and the characteristics and potential of time amplification are discussed. Finally, the problems of the transient high speed PDV system are summarized and its future development is prospected.

**Key words:** transient high-speed; PDV; time domain broadening; time-stretched; time-lens

## 0 引言

自 2006 年 O. T. Stand 采用三端口环路器等光纤器件提出了光子多普勒测速系统 (Photon Doppler Velocimetry, PDV)<sup>[1]</sup> 以来, PDV 因其非接触测量、成本低、使用方便、响应快、频响高、量值溯源性好等优点被广泛使用。PDV 技术在高速冲击<sup>[2]</sup>、爆轰波速度测量<sup>[3-5]</sup>、弹丸动力学<sup>[6]</sup>、电脉冲功率测量<sup>[7]</sup>、材料高应变率动态力学性能<sup>[8-10]</sup> 表现出了较大优势。在这些瞬态高速测量场景中, 测试目标加速度极高。一般记录时间在几微秒到几百纳秒之间, 速度从零加速到每秒几公里甚至几十公里。在短时间、高速度等极端测量条件的挑战下, 光子多普勒测速系统往更大测速范围、更高时间分辨力、更高灵敏度和多点测量能力四大方向快速发展。

本文主要针对速度在 100 m/s 以上光子多普勒测

速方法进行分类整理, 从经典光子多普勒测速方法和背景着手, 将当前多普勒测速方案的经典改进方法和发展现状进行分类与总结, 重点介绍时域展宽技术中时间拉伸技术和时间透镜技术在光子多普勒测速系统中的应用, 总结时域展宽技术在未来的应用潜力, 最终对瞬态高速光子多普勒测速技术未来发展进行展望。

## 1 PDV 介绍

### 1.1 应用背景

激光干涉测速方法在瞬态高速测量中已经有了 40 年的历史。在 PDV 出现前, 任意反射面速度干涉仪 (Velocity Interferometer System for Any Reflector, VISAR)<sup>[11]</sup> 和 Fabry-Perot 测速仪<sup>[12]</sup> 分别在 20 世纪 70 年代和 80 年代早期被开发, 至今仍被广泛使用。

PDV 在原理上与 F-P 测速仪和 VISAR 有很大不同。F-P 测速仪和 VISAR 在干涉腔前直接通过激光器将光

信号打的目标物体表面，反射回的信号光通过干涉腔进行信号干涉处理。但 PDV 是在干涉腔前将光源光信号分为信号光和参考光两部分，然后将两束光混频后进行拍频处理。F-P 测速仪利用 F-P 谐振腔进行干涉，使用条纹法进行数据解调，由于其空间条纹位置不受到信号光光强变化的影响，也不受光电响应的影响，F-P 测速仪得到了很好的稳定性，国内外已将该技术作为爆轰冲击实验的基本诊断技术。而 VISAR 是利用将信号光分为不同延时的光信号进行干涉，通过条纹法<sup>[13-14]</sup>进行信号处理，有较高的测量测速范围和时间分辨力。而 PDV 对干涉频差信号使用时频分析算法解调出运动物体的运动速度历史，具有结构简单、频响高等优点。

随着电信行业的发展，光纤技术已经趋于成熟，三端口环形器等光纤器件成本越来越低，性能趋于稳定，在瞬态高速测量领域，光子多普勒测速技术逐渐取代了两种速度诊断技术。目前，在瞬态高速测量领域干涉测量方案形式上有多种类型，但原理类似，因此，从测量原理角度<sup>[15]</sup>本文所述 PDV 包括光子多普勒测速仪 (Photonic Doppler Velocimetry, PDV)<sup>[11]</sup>、位移干涉仪 (Displacement Interferometer System for Any Reflector, DISAR)<sup>[16]</sup>、外差测速仪 (Heterodyne Velocimetry)<sup>[17]</sup> 和全光纤位移干涉仪 (All Fiber-Displacement Interferometer, AFDI)<sup>[18]</sup>。

### 1.2 光路原理

如图 1 所示，PDV 通过窄带激光器产生窄带光谱激光，光波从三端口环形器 1 端口进入，2 端口输出到自聚焦光纤探头上。在光纤探头表面，一部分光信号经过镜面反射直接返回的光称为参考光 (频率为  $f_0$ )，另一部分光透射在运动速度为  $\mu$  的目标物体表面，通过运动物体多普勒频移  $f_0 + 2\mu/\lambda_0$  后反射回光路的光称为信号光。参考光和信号光在光纤中进行混频后返回环形器 2 端口，从 3 端口输出后混频光信号被探测器捕获。

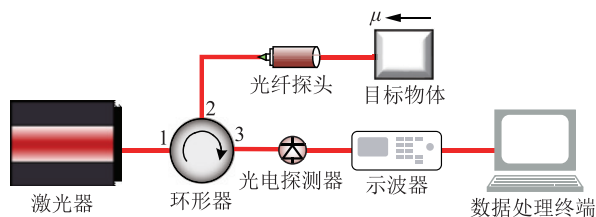


图 1 光子多普勒测速系统原理图

在光电转换定理中，光电探测器的输出电流与入射平均光功率成正比，即光电探测器输出的光电流与

光电场强度的平方成正比，如公式(1)。

$$E^2 = [E_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + E_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2)]^2 = E_1^2 \cos^2(\omega_1 t + \varphi_1) + E_2^2 \cos^2(\omega_2 t + \varphi_2) + E_1 E_2 \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)] + E_1 E_2 \cos[(\omega_1 + \omega_2)t + (\varphi_1 + \varphi_2)] \quad (1)$$

式中： $E_1$  为参考光强度； $\omega_1$  为频率； $\varphi_1$  为初始相位； $E_2$  为信号光强度； $\omega_2$  为初始角频率； $\varphi_2$  为初始相位。

光波本身频率很高，1550 nm 波长激光频率大约  $2 \times 10^{14}$  Hz，但有实用意义的多普勒频移一般情况下为  $10^6 \sim 10^{11}$  Hz。目前，常用的光电探测器不能响应光波频率，其它与光频接近或更高频率信息都因超过光电探测器的频率响应被滤去，所以公式(1)的前三项只输出平均值， $\cos^2 \omega$  平均值为 1/2， $\cos \omega$  平均值为 0，所以最终检测信号 *Signal* 如公式(2)。

$$Signal = E_1 E_2 \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)] + \frac{E_1^2 + E_2^2}{2} = A_0 + A \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda} \mu(t)t + \Delta\varphi\right] \quad (2)$$

式中： $A_0$  为基底信号，与信号光和参考光强平方和有关； $A$  为震荡信号的幅值，等于信号光强与参考光强乘积；而震荡信号的角频率与激光波长和目标物体运动速度有关；初始相位为信号光与参考光相位差。相位差固定不变时，探测信号表现为频率随时间变化的瞬态信号。因此，通过时频分析数据处理算法将目标物体的速度信息解调出来<sup>[22-24]</sup>。

## 2 PDV 经典改进策略

PDV 凭借其结构简单、成本低、量值溯源性好等特点被应用在很多方面，同时很多因素限制着普通光子多普勒测速系统的使用(如激光稳定性、三端口环形器和数字化仪器噪声、电子器件带宽受到时间分辨能力、灵敏度、成本限制、环境光照变化和极端速度变化情况)。本文将 PDV 经典改进策略分为三大类：优化光源型、光纤器件改进型和外差级联型。

### 2.1 优化光源型

优化光源型可以分为两种：一种直接更换不同波长激光器，另一种使用调制器对激光器或者参考光路进行调制得到合适参考频率以适应不同测量需求。

第一种优化光源型 PDV 将激光器直接更换合适波长范围的光源。传统的光纤位移干涉仪工作在 1550 nm，在测量的速度较低时，因为微小的多普勒频率产生较低的拍频频率，因此时间分辨力或速度分辨力较低。如果采用 532 nm 的可见光激光器，这种波长更短、光

频更高的激光器产生的拍频信号频率提高了约3倍,在实验中能得到相较于1550 nm激光三倍的灵敏度<sup>[22]</sup>。

第二种优化光源型PDV通过调制器对光源进行调制或对参考光光路信号进行调制,目的为获得合适范围内的参考光频率。如图2所示,为了降低光电探测器探测到的拍频信号,通过对激光器射频调制,将多普勒频移与调制频率进行二次拍频,如公式(3),由此可以选择更小的拍频与调制频率之差 $f_b - f_m$ 。该方案可

$$I = (r_1 + r_2)I_{AC}\cos(2\pi f_m t + \phi_m) + 2\sqrt{r_1 r_2}I_{DC}\cos(2\pi f_b t + \phi_b) + (r_1 + r_2)I_{DC} + I_{AC}\sqrt{r_1 r_2}\cos[2\pi(f_b - f_m)t + (\phi_b - \phi_m)] + I_{AC}\sqrt{r_1 r_2}\cos[2\pi(f_b + f_m)t + (\phi_b + \phi_m)] \quad (3)$$

式中: $I$ 为光电探测器接收电流; $f_m$ 为微波调制频率; $f_b$ 为信号光的多普勒频移; $\phi_m$ 为微波调制频率初始相位; $I_{DC}, I_{AC}$ 分别为光电探测器初始输入功率的直流分量和交流分量; $r_1, r_2$ 分别为参考光和信号光耦合效率; $f_b + f_m$ 和 $f_b - f_m$ 为二次拍频,可以使用低带宽示波器检测其频差 $f_b - f_m$ ,因此达到了降低带宽作用。

2012年,中国科学技术大学杨军等人首次提出使用声光移频器调制DISAR参考光光路,得到固定移频频率,使得测速范围为0~263 m/s的速度范围平移到-116~147 m/s<sup>[23]</sup>。2016年,Zhen Chen和Ryan Rettinger等人合作为测量高速物体,采用图2所示微波调制方法将~3.5 GHz高频信号降低为~1 GHz低频信号,降低了数字示波器数据采集门槛限制,减小了系统成本<sup>[24]</sup>。

## 2.2 光纤器件改进型

光纤器件改进型是在普通PDV基础上实现光纤器件改进,如在光电探测器前端加入 $3 \times 3$ 耦合器得到两路或三路测量电信号的三角光子多普勒测速仪(Triature Photon Doppler Velocimetry, TDV)。如图3所示,TDV在光电探测器前端加入 $3 \times 3$ 耦合器得到两路或三路输出电信号,目的为提高多普勒测速仪灵敏度或前后方向辨别能力。普通PDV一般得到的是视向速度的拍频信号,其信号为一个标量,不能分辨前后方向,只能通过拍频差计算得到速度大小,而TDV<sup>[25-26]</sup>利用 $3 \times 3$ 耦合器输出信号的 $120^\circ$ 相位差,通过测量信号的变化顺序确定其运动方向,同时由于每一种信号之间时间延迟,抑制了共模数据噪声。该方法三个信号中至少有一个被测信号始终远离其波峰或波谷,因此可以解决低速瞬变现象。但是TDV需要比普通PDV更高质量的激光器,并且系统中像数字仪器的削波的任何非线性都有可能影响测量。

以通过FPGA等外围射频控制电路实现精确的微波频率控制,所以该方法具有很大应用前景。

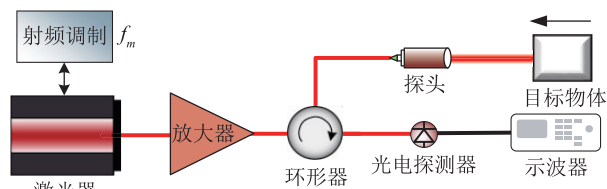


图2 微波调制光源PDV原理示意图

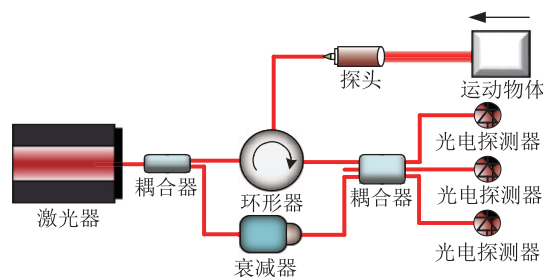


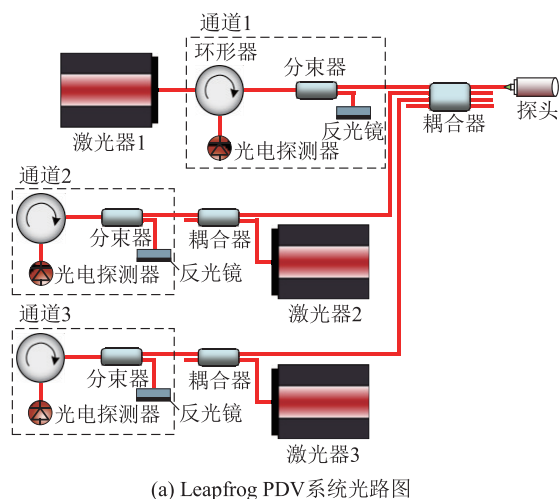
图3 光纤器件改进型PDV原理示意图

2006年,中国工程物理研究院翁继东等人发表了基于 $3 \times 3$ 单模光纤耦合器的三端输出式结构(DISAR),通过对具有固定 $120^\circ$ 相位差的两路信号进行解算,可以获得物体的运动速度方向<sup>[16]</sup>,测量速度达到了1300 m/s。2007年,为提高测量准确度,DOLAN等人提出了推挽式PDV<sup>[27]</sup>。2015年,J. Macdonald等人使用TDV与普通PDV进行了比较,TDV具有更高的灵敏度,明显的噪声抑制能力<sup>[25,28]</sup>。2018年,翁继东等人改进了DISAR结构,掺铒光纤放大器和半导体放大器配合使用,增强了信号光光强,输出稳幅干涉条纹,简化了数据处理算法,提升了应变测量准确度<sup>[29]</sup>。

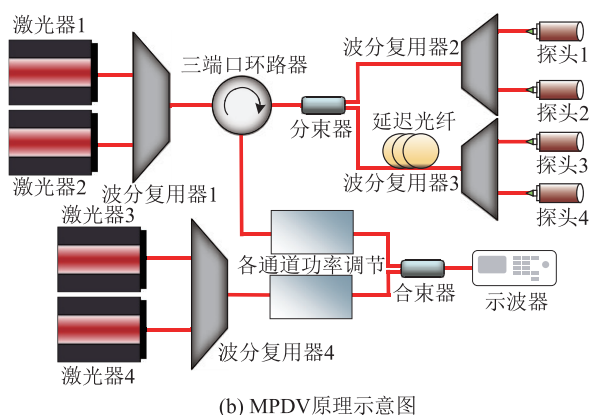
## 2.3 外差级联型

外差级联型PDV可以分为两种方案,如图4所示,第一种使用多激光器外差技术的leapfrog-PDV,提高了系统的零频率点,达到降低拍频频率目的;第二种为多路复用光子多普勒测速系统(Multiplexed Photonic Doppler Velocimetry, MPDV),使用外差技术利用波分或时分方法使用有限的测量通道获得更多测量点。

第一种外差级联型PDV是2013年D. H. Dolan使用多个激光器按照级联方式进行了速度测量上限扩展,该方法被称为leapfrog PDV,应用于测量速度在20 km/s以上的圆柱内爆实验<sup>[30]</sup>。该方法通过三个通道参考光



(a) Leapfrog PDV系统光路图



(b) MPDV原理示意图

图4 多激光器外差级联光路图

路，三个通道激光波长分别为  $\lambda_1, \lambda_2$  和  $\lambda_3$ ，通过控制三路通道激光波长的关系 ( $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ )，采用多路参考光的方式，减少了用于记录每个光信号的探测器的带宽要求。如图4(a)所示，每个虚线框均表示一个单独的PDV通道，每个单通道由三端口环路器、分束器、反光镜和光电探测器组成。第一个PDV通道由波长为1550.95 nm的激光器作为光源，信号光通过4×4的耦合器发射并返回，与通道2和通道3参考光在两个2×2耦合器内混合，得到最终的拍频信号。通道2和通道3的激光只作为参考光，从而避免了信号光过多而导致拍频混乱的情况。2013年，D. H. Dolan使用leapfrog PDV实现了0~50 km/s测量测速范围<sup>[30]</sup>。

第二种光纤器件改进型PDV方案——MPDV是PDV技术近年来重要发展技术之一，目的是为满足待测对象进行大数量点数的阵列式或区域覆盖式测速需求，如图4(b)。如果采用传统的多套主机简单叠加实现多通道测量，整套系统的复杂度、成本和体积均大幅增加，难以实现大数量点(几十乃至上百点)测速。而采用复用技术构造MPDV，可将多个测点信号合并到1

个记录通道，大大降低了主机和通道数量。MPDV可分为时分、波分、波分时分联合复用<sup>[31-33]</sup>三种方式。时分方案一般通过延时器件将多个频率信息在时域上分离开来，如图5(a)所示，保证各个频率信息能够独立分离；波分方案利用波分复用技术将各通道信号分离开来，如图5(b)所示；波分时分联合复用方案将两者结合起来方式，如图5(c)所示，在频域和时域上同时进行了拓展，因此可以使用更大数量的探头。

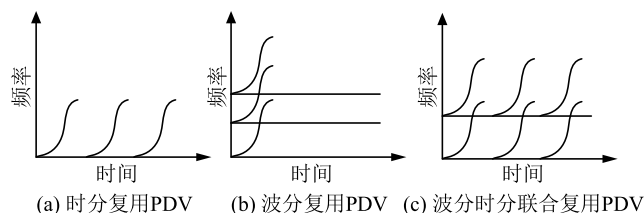


图5 各类型MPDV速度曲线图

如图5(b)所示，该方案通过两台激光器发出两束不同波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的探测光，波分复用器1将两束探测光复用为一束信号光。信号光通过环形器后，分束器将其等分为两路光，其中第一束光直接通过波分复用器2解复用为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的探测光，而第二路光通过延迟光纤后解复用为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的探测光。4束光经过运动物体进行多普勒频移后，返回探头被波分复用器复合成一束光，经三端口环路器和功率调节，与两台可调激光器参考光波长  $\lambda_1 + \Delta\lambda_1$  和  $\lambda_2 + \Delta\lambda_2$  进行拍频。

在国内，2014年，李建中等人使用了该方案获得了2×2个测点测量运动目标物体的目标速度<sup>[34]</sup>，后来按照该方法提出了32点原理样机<sup>[35]</sup>。2020年，中国科学院西安光学精密机械研究所对37个改进光纤阵列探头的耦合效率方法<sup>[36]</sup>进行了研究。在国外，2016年，Edward Daykin使用波分复用技术对PDV做了很多改进，测量速度范围为4.5~6.8 km/s，探测点数达到25个<sup>[37-38]</sup>。2020年，Yohan Barbarin对16通道阵列探头的MPDV系统的串扰问题进行了研究，通过改进激光频率和WDM通道之间的间隔减小各通道间串扰<sup>[39]</sup>。

### 3 时域展宽技术在PDV中的应用

若使用波长1550 nm的激光器，1 km/s的速度会产生1.29 GHz的多普勒频移。目前成熟的数字化示波器带宽不大于30 GHz，理论上1550 nm波长的激光测量速度上限能达到20 km/s，能满足绝大多数测量场景需求<sup>[40-41]</sup>。在美国桑迪亚国家实验室的Z脉冲功率测量实验和国家点火装置高功率激光实验中，测量速度

能分别达到 50 km/s 和 100 km/s。面对这种极高速度的测量需求，如果通过 leapfrog PDV 多个激光器级联的方法，系统将会十分复杂，较难实现。

近二十年来，飞秒脉冲<sup>[42]</sup>激光由于其极高的瞬时功率和超短脉冲宽度，具有超高准确度和空间分辨力，在精密计量学和光谱学中起着革命性作用<sup>[43-44]</sup>，不断应用在新研究领域。时域展宽 PDV 正是利用飞秒激光的超短脉冲时域展宽技术，实现测速范围和时间分辨力的提高。

### 3.1 TS-PDV 时间拉伸光子多普勒测速系统

2019 年，Mance J G 等人在文献<sup>[45]</sup>中介绍了一种基于时间拉伸的光子多普勒测速系统 (Time-stretched Photonic Doppler Velocimetry, TS-PDV)，该方案通过降

低检测前 PDV 信号的拍频信号来增加最大记录速度范围，并且得到更高的时间分辨力。

由于电信行业的发展带来的基于光纤的激光技术的发展，时域展宽方法被广泛应用与高带宽实时光采样<sup>[46-48]</sup>、超快实时光成像<sup>[49]</sup>等领域<sup>[50]</sup>。TS-PDV 结构如图 6 所示，光源为 Menlo 激光器重复频率 100 MHz、波长 1550 nm、脉冲脉宽 100 fs。激光器通过脉冲选择器选择单脉冲进行降频处理，然后通过高度色散光纤 (FS1) 进行时域展宽，展宽到 150 ns 后经过分束器分为信号光与参考光，通过控制参考光臂上的延时器控制两束光光程相同。返回的参考光与信号光在耦合器内相遇混频，经过 FS2 光纤的时域展宽，到达光电接收器，得到最终的光电拍频信号。

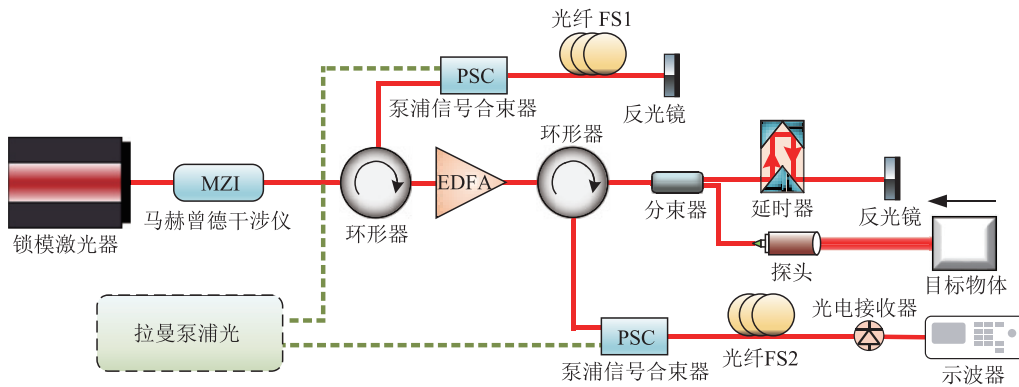


图 6 TS-PDV 光路原理图

色散效应可以用公式(4)概括为：频率  $\omega_0$  的光信号通过长度为  $L$  的光纤线路传播，相位  $\varphi$  进行泰勒展开。

$$\varphi = \beta_0 L + \beta_1 L(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \beta_2 L(\omega - \omega_0)^2 + \frac{1}{6} \beta_3 L(\omega - \omega_0)^3 + \dots \quad (4)$$

式中： $\beta_i$  值为相位传播常数。信号在光纤中的传播时间可以记为公式(5)。

$$t = \frac{\partial \varphi}{\partial \omega} = \beta_1 L + \beta_2 L(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \beta_3 L(\omega - \omega_0)^2 + \dots \quad (5)$$

信号光和参考光在 FS1 展宽时，由于信号光与参考光还没有分离，此时参考光频率等于信号光频率  $\omega_{\text{ref}} = \omega_{\text{sig}}$ 。光脉冲已经进行了充分的时域展宽，从 A 点  $f_s$  级时间长度脉冲展宽到时间长度为 150 ns 的 B 点，不同频率分量的信号在时域上展开分布，如图 7 所示。耦合器将光信号分为信号光和参考光，然后在 C 点进行混频，此时信号光频率  $\omega_{\text{sig}} = \omega_{\text{ref}}(1 + 2u/c)$ ，

因为  $u \ll c$ ，可以得到  $\omega_{\text{sig}} \approx \omega_{\text{ref}}(1 - 2u/c)$ 。可得信号光的传输时间和参考光的传输时间。

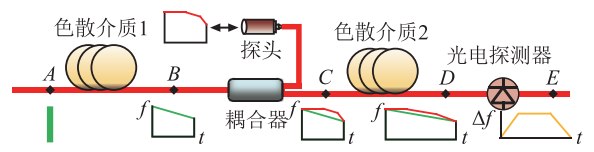


图 7 时间拉伸原理示意图

注：红线为信号光频率分量，绿线为参考光频率分量，黄线为光电探测器探测差频信号。

$$t_{\text{sig}} = \beta_1 L + \beta_2 L_1(\omega_{\text{sig}}(1 - \frac{2u}{c}) - \omega_0) + \beta_2 L_2(\omega_{\text{sig}} - \omega_0) + \frac{1}{2} \beta_3 L_1(\omega_{\text{sig}}(1 - \frac{2u}{c}) - \omega_0)^2 + \frac{1}{2} \beta_3 L_2(\omega_{\text{sig}} - \omega_0)^2 \quad (6)$$

$$t_{\text{ref}} = \beta_1 L + \beta_2 L(\omega_{\text{ref}} - \omega_0) + \frac{1}{2} \beta_3 L(\omega_{\text{ref}} - \omega_0)^2 \quad (7)$$

通过调整延时器使得  $t_{\text{sig}} = t_{\text{ref}}$ ，由公式(6)和公

式(7)可以得到

$$\omega_{\text{ref}} = \omega_D \left(1 - \frac{L_1}{L_1 + L_2} \frac{2u}{c}\right) \quad (8)$$

式中： $\lambda$  为激光波长。光电探测器探测到的差频为

$$\omega_{\text{sig}} - \omega_{\text{ref}} = \omega_{\text{ref}} \frac{L_1}{L_1 + L_2} \frac{2u}{c} = \frac{L_1}{L_1 + L_2} \frac{2u}{\lambda} \quad (9)$$

依据公式(9)，图7中光脉冲从C点到D点，经过FS2第二次时域展宽，信号光与参考光频率差被降低了  $M = L_1 / (L_1 + L_2)$  倍。Mance J G 等人通过实验记录了降频因子  $M$  低至 0.1，这意味着可以用 20 GHz 带宽检测记录 200 GHz 拍频<sup>[45]</sup>。该方法在频率降低的同时，拉伸了时间长度，示波器的实时采样点数也将增加至  $M$  倍，因此其时间分辨力提高至  $M$  倍。

但在该实验中，存在两个不能忽视的问题：第一，使用脉冲激光使得系统有效记录时间受到较大限制，要增加有效记录时间，则需要通过更长的色散光纤进行拉伸，也会带来更大的损耗，因此需要更高的泵浦补偿，这将大大增加系统器件复杂性。第二，因为返回后的参考光和信号光都为啁啾脉冲，其拍频频率也会随着位移的增加而增大，因此该方案在速度解调信

号中引进了位移误差。该实验中脉冲激光经过足够长的时域展宽，将啁啾脉冲展宽为 150 ns，其位移引进的误差约为 150 MHz，而实际测量频移信号能达到 30 GHz，误差小于 1%，因此可忽略不计。

第一种方法通过加长第一色散光纤或减短探头记录距离，第二种方法通过数据处理终端进行补偿，两种方法均可减小位移误差。

### 3.2 TL-PDV 时间透镜光子多普勒测速系统

2021 年，Pinghan Chu 基于时域展宽技术提出了另外一种方案 TL-PDV (Time-Len Photonic Doppler Velocimetry, TL-PDV)<sup>[51]</sup>，该方案利用时间透镜和四波混频原理完成信号波形在时域上的 10 倍放大仿真验证，扩展了 10 倍测速范围和时间分辨能力。

如图8所示，该方案使用连续激光作为信号光光源，通过探头完成了多普勒频移光的采集。色散光纤1、高非线性光纤和色散光纤3构成了时间透镜，利用时间透镜原理完成了信号在时域的放大或缩小。锁模激光器发出的脉冲激光经过色散光纤2时域展宽后的啁啾脉冲作为泵浦光。

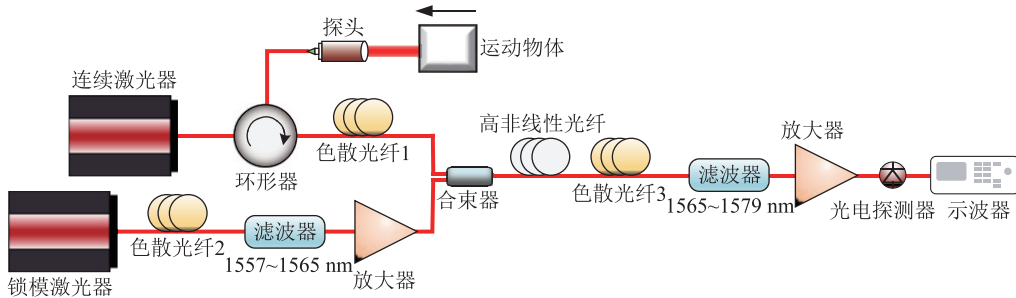


图8 时间透镜光路原理图

如图9所示，此时高非线性光纤输入时有两个频率分量泵浦光频率  $\omega_p$ ，色散光纤1输出的信号光频率  $\omega_s$ ，调整泵浦光和信号光满足相位匹配条件，由于高非线性光纤的非线性响应产生了简并四波混频效应，生成闲频光，其角频率为

$$\omega_i = 2\omega_p - \omega_s \quad (10)$$

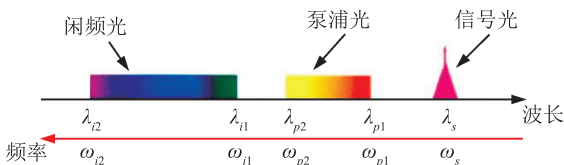


图9 四波混频波段示意图

闲频信号除了相位反转(或共轭)外，继承了信号

光的所有特征，因此可以通过更高频段的闲频光获得信号光的特征，使用带通滤波器筛选出闲频光通道有用信号。时间透镜原理如图10。

时域脉冲色散与空域傍轴衍射如图10(a)所示。在电磁波沿着  $z$  轴进行传播时，单色傍轴衍射与时间透镜公式如式(11)、式(12)。

$$\frac{\partial A_{\text{space}}}{\partial z} = \frac{-j}{2k} \frac{\partial^2 A_{\text{space}}}{\partial x^2} \quad (11)$$

$$\frac{\partial A_{\text{time}}(z, t)}{\partial z} = \frac{-j\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_{\text{time}}(z, t)}{\partial t^2} \quad (12)$$

式中： $A_{\text{space}}$  为空间域电场强度大小； $A_{\text{time}}$  为时间域电场强度大小； $\beta_2$  为色散光纤二阶色散系数，通过公式(11)和公式(12)傍轴衍射方程与窄带色散方程极其

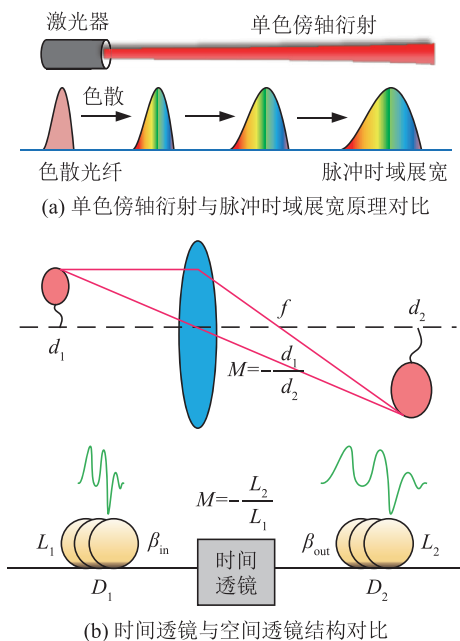


图 10 时间透镜与空间透镜类比图

相似，等式左边都为对  $z$  方向上的一阶偏导，右边分别为对传播界面方向的二阶偏导与对时间的二阶偏导。因此对空间应用的技术可以对应到时域上，这就是时空对偶性。

衍射的作用相当于对原电场包络，在其  $k_x$  波数域

引入了一个二次相位的偏移。同样地，色散作用也是在频域中引入了一个角频率的二阶相位偏移，傍轴衍射和窄带色散的本质是对波束引入了空间或时间的二次相位偏移。时间透镜时域成像系统满足成像条件，则能够对输入脉冲进行任意比例缩放。当前后两段色散光纤为同种光纤，时间放大倍数为

$$|M| = \frac{d^2\beta_{out} L_2}{d\omega^2 \frac{L_2}{2}} = \frac{L_2}{L_1} \quad (14)$$

式中： $\beta_{in}$  为输入色散光纤色散参量； $\beta_{out}$  为输出色散光纤色散参量； $L_1$  为输入色散光纤长度； $L_2$  为输出色散光纤长度。而通过  $|M|$  可以控制成像的放大或缩小情况，当  $|M| > 1$  时，脉冲被放大； $|M| < 1$  时，脉冲被缩小；该方法与空间透镜在空间成像的关系非常相似，只是空间透镜放大与缩小是在空间尺度上，而时间透镜放大倍数是在时间尺度上，如图 10(b) 所示。

该方法使用了连续激光器进行外差拍频，这样的好处是可以实现探测光在时域上的连续性，不仅只局限于单个脉宽时间内的事件。但为保证使用四波混频信号波长的较高转换效率，时间-波长映射的预啁啾泵浦光同信号光入射到光纤中受到相位匹配条件很大影响。这就对相位失配条件提出了较高的要求。

表 1 PDV 改进方法分类表

瞬态高速 PDV 测速方法	特点和优势	缺点
普通 PDV	相比较于传统 VISAR 和 F-P，结构简单、成本低、频响高，使用时频分析进行数据处理，时间分辨率高。	对电子器件的带宽范围和采样率要求较高。
优化光源型——532 nm PDV	使用 532 nm 光源与 1550 nm 光源相比灵敏度提高约 3 倍。	测速范围相比 1550 nm 激光器更低。
优化光源型——微波调制光源 PDV	可以自由调制微波源频率，控制该系统测速范围。	因为输出电信号为二次拍频，所以信噪比较低。
光纤器件改进型——TDV	通过 3×3 耦合器，提高测量准确度，具备了分辨前后方向能力。	需要更高质量的激光器，器件非线性化要求更高。
外差级联型——leapfrog PDV	通过三个激光器级联方式扩展了测速范围。	面对更高频率的物体时，需要更多激光器，系统更为复杂。
外差级联型——MPDV	主要有时分、波分、波分时分复用三种方法，扩展使更多的探头，提高多普勒系统多通道测量能力。	数据处理更为复杂，对器件和目标物体的记录时间或测速范围有更高要求。
时域展宽型——TS-PDV	通过脉冲激光时间拉伸方法降低信号光与参考光频差，扩展了该系统测速范围；提高了该系统时间分辨率。	光源为脉冲激光，有效记录时间有限；引进了位移误差。
时域展宽型——TL-PDV	通过时间透镜方法降低参考光和信号光频差频率，通过其比例因子将信号在时间尺度上可放大也可缩小，具有更大灵活性；通过连续激光发射信号光，有更强连续性。	非线性在四波混频阶段需考虑相位匹配条件，对光源和光纤器件要求较高。

## 4 总结和展望

本文将瞬态高速 PDV 经典改进方法分别为优化光源型、光纤器件改进型和外差级联型。三类方法中介绍了 6 种改进测速仪, 每种测速仪通过不同改进方式满足特定测量需求(如表 1)。更高速度运动物体需要更大测速范围和更高时间分辨能力, 而更高加速度的瞬态信号需要有更高灵敏度, 为满足待测对象进行大数量点数的阵列式或区域覆盖式测速需求, 则需要更强大的多点测量能力。瞬态高速 PDV 目前发展的四大方向归纳为更大测速范围、更高时间分辨能力、更高灵敏度和多点测量能力。

最后文章着重阐述了时域展宽技术在 PDV 中的应用, TS-PDV 和 TL-PDV 可以通过时间拉伸和时间放大特点实现高频信号的降频, 达到扩展系统测速范围和提高时间分辨力的目的。目前, 在提高测速范围和时间分辨能力时, 数据采集和处理端遇到了“电子学瓶颈”。时域展宽技术有利于提升时间分辨能力, 突破模数转换技术奈奎斯特限制。虽然面临诸多挑战, 但将与时域展宽技术与光子多普勒测速系统相结合是未来扩展瞬态高速 PDV 测速范围主要方法之一。

### 参 考 文 献

- [1] Strand O T, Berzins L V, Goosman D R, et al. Velocimetry using heterodyne techniques[J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2005, 5580: 593–599.
- [2] 翁继东. 全光纤速度干涉技术及其在冲击波物理中的应用[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.
- [3] Mercier P, Bénier J, Frugier P A, et al. Heterodyne velocimetry and detonics experiments[C]//*The Proceedings of the 28th International Congress on High-Speed Imaging and Photonics*, 2008, 7126: 10.
- [4] Frugier P A, Mercier P, Bénier J, et al. PDV and shock physics: Application to nitro methane shock detonation transition and particles ejection[C]//*Novel Optical Systems Design and Optimization XII*, International Society for Optics and Photonics, 2009, 7429: 316–326.
- [5] Pei H, Huang W, Zhang X, et al. Measuring detonation wave profiles in plastic-bonded explosives using PDV[J]. *AIP Adv.* 2019, 9: 015306.
- [6] 李秀明. 用于弹丸速度测量的激光多普勒测速技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [7] Reisman D B, Stoltzfus B S, Stygar W A, et al. Pulsed power accelerator for material physics experiments[J]. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 2015, 18(9). DOI: 10.1103/PhysRevSTAB.18.090401.
- [8] Curtis A D, Banishev A A, Shaw W L, et al. Laser-driven flyer plates for shock compression science: Launch and target impact probed by photon Doppler velocimetry[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(4): 1655.
- [9] Hutchinson T M, Awe T J, Bauer B S, et al, Photonic Doppler Velocimetry of Ohmically Exploded Aluminum Surfaces[J]. *Physics of Plasmas*, 2020, 27: 052705.
- [10] Mallick D D, Zhao M, Parker J, et al. Laser-Driven Flyers and Nanosecond-Resolved Velocimetry for Spall Studies in Thin Metal Foils[J]. *Experimental Mechanics*, 2019, 59(5).
- [11] Barker L M, Hollenbach R E. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface[J]. *Journal of Applied Physics*, 1972, 43(11): 4669–4675.
- [12] Memillan C F, Goosman D R, Parker N L, et al. Velocimetry of fast surfaces using Fabry-Perot interferometry [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1988, 59(1): 1–21.
- [13] 马云, 张林, 彭其先, 等. VISAR 条纹常数的检测方法[J]. *高压物理学报*, 2008(04): 384–388.
- [14] 范方兵. 全光纤干涉测速数据处理技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [15] Dolan D H. Extreme measurements with Photonic Doppler Velocimetry (PDV)[J]. *The Review of scientific instruments*, 2020, 91(5).
- [16] Weng J, Hua T, Xiang W, et al. Optical-fiber interferometer for velocity measurements with picosecond resolution[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(11): 4669.
- [17] Routley N R, Price E, Keightley P T, et al. An investigation of surface velocimetry of shocked polyethylene using HetV[J]. *Aip Conference Proceedings*, 2007, 955: 1131.
- [18] Weng J, Wang X, Ma Y, et al. A compact all-fiber displacement interferometer for measuring the foil velocity driven by laser[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79(11).
- [19] 张梦娇. 激光多普勒信号探测与数据处理方法研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2017.
- [20] Zhang D, Sun S, Zhao H, et al. Doppler signal processing based on trispectral interpolation of Nuttall window[J]. *Optik*, 2020, 205.
- [21] Jiang C, Li Y, Liu Q, et al. A 532 nm fiber-optic displacement interferometer for low-velocity impact experiments [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(2): 023101.
- [22] Chen Z, Hefferman G, Wei T. A Sweep Velocity-Controlled VCSEL Pulse Laser to Interrogate Sub-THz-Range Fiber Sensors [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(17): 1471–1474.
- [23] 杨军, 王克逸, 徐海斌, 等. 光纤位移干涉仪的研制及其在 Hopkinson 压杆实验中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(01): 102–107.
- [24] Chen Z, Rettinger R, Hefferman G, et al. Microwave-Modulated Photon Doppler Velocimetry[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(03): 327–330.
- [25] Gallegos C H, Marshall B, Teel M, et al. Comparison of Tri-



- ature Doppler Velocimetry and Visar[J]. Journal of Physics Conference Series, 2010, 244(3): 032045.
- [26] Tao T, Liu S, Ma H, et al. Twiddle factor neutralization method for heterodyne velocimetry[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(1): 083108–4675.
- [27] Dolan D H, Jones S C. Push-pull analysis of photonic Doppler velocimetry measurements [J]. Review of Scientific Instruments, 2007, 78(7): 076102.
- [28] Macdonald J, Bland S N, Threadgold J. A fibre based triature interferometer for measuring rapidly evolving, ablatively driven plasma densities[J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(8): 083506.
- [29] Weng J, Li Y, Chen H, et al. Application of all-fiber displacement interferometry in SHPB experimental measurement [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(01): 94–99.
- [30] Dolan D H, Lemke R W, McBride R, et al. Tracking an imploding cylinder with photonic Doppler velocimetry[J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(5): 1625.
- [31] Daykin E, Perez C, Strand T, et al. Techniques and tools for PDV applications: A work in progress[C]// the third Annual PDV Conference and Workshop, Albuquerque, 2008.
- [32] Danielson J R, Daykin E P, Diaz A B, et al. Measurement of an explosively driven hemispherical shell using 96 points of optical velocimetry[J]. Journal of physics. Conference series, 2014, 500: 142008.
- [33] Turley W D, Daykin E, Hixson R, et al. Copperspall experiments with recompression using HE (copper spall soft recovery experiments)[R]. In: 8th Annual PDV Workshop, Las Vegas, 2014.
- [34] 李建中, 刘寿先, 刘俊, 等. 多路复用光子多普勒测速复用方案分析及实验研究[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 166–173.
- [35] 李建中. 32 点多路复用光学测速样机研制[C]// 2016 年版中国工程物理研究院科技年报, 2016: 80–82.
- [36] 牟瑞欣, 张建, 安飞, 等. 多点光子多普勒测速光纤阵列耦合系统设计[J]. 光学技术, 2020, 46(04): 443–447.
- [37] Daykin E, Diaz A, Gallegas C, et al. A Multiplexed Many-Point PDV (MPDV) [OL]. [https://kb.osu.edu/bitstream/handle/1811/52727/PDV\\_2010\\_Daykin\\_MultiplexedMany-pointPDV.pdf](https://kb.osu.edu/bitstream/handle/1811/52727/PDV_2010_Daykin_MultiplexedMany-pointPDV.pdf)
- [38] Roy S K, Peña M, Hixson R S, et al. Use of a Multiplexed Photonic Doppler Velocimetry (MPDV) System to Study Plastic Deformation of Metallic Steel Plates in High Velocity Impact [C]//Zehnder A T, Carroll J, Hazeli K, et al. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series: Fracture, Fatigue, Failure and Damage Evolution, 2016, 8: 253–260.
- [39] Yohan B, Blanc G L, d'Almeida T, et al. Multi-wavelength crosstalk-free photonic Doppler velocimetry[J]. The Review of Scientific Instruments, 2020, 91(12): 123105.
- [40] 吴立志, 陈少杰, 叶迎华, 等. 用于瞬态高速飞片速度测量的光子多普勒测速系统[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(12): 263–267.
- [41] Wang C H, Lee H, Hsu Y H, et al. Photonic Doppler velocimetry for high-speed fragment generator measurements [J]. Optics Express, 2020, 28(3).
- [42] 魏志义. 2005 年诺贝尔物理学奖与光学频率梳[J]. 物理, 2006(03): 213–217.
- [43] 高宇炜, 方守龙, 武腾飞, 等. 双飞秒激光频率梳光谱测量技术研究进展[J]. 应用光学, 2021, 42(01): 157–175.
- [44] Han J, Wu T, Li S, et al. Time-of-flight absolute distance measurement with dual-comb [C]// Fourth Seminar on Novel Optoelectronic Detection Technology and Application. International Society for Optics and Photonics, November 13–11, 2017, Changsha, 2017.
- [45] Mance J G, La Lone B M, Dolan D H, et al. Time-stretched photonic Doppler velocimetry [J]. Optics Express, 2019, 27(18).
- [46] Bhushan A S, F Coppinger, Jalali B. Time-stretched analogue-to-digital conversion[J]. Electronics Letters, 1998, 34(11): 1081–1083.
- [47] 李政凯, 张旨遥, 李和平, 等. 高速高精度光学模数转换技术研究进展[J]. 空间电子技术, 2020, 17(04): 117–125.
- [48] Li Y H, Zhu K, Kang Z, et al. CMOS-compatible high-index doped silica waveguide with an embedded silicon-nanocrystal strip for all-optical analog-to-digital conversion[J]. Photonics Research, 2019, 7(10): 1200–1208.
- [49] Goda K, Tsia K K, Jalia B, Serial time-encoded amplified imaging for real-time observation of fast dynamic phenomena [J]. Nature, 2009, 458: 1145–1149
- [50] Mahjoubfar A, Churkin D V, Barland S, et al. Time stretch and its applications[J]. Nat. Photonics, 2017, 11(6): 341–351.
- [51] Chu P, Kilic V, Mark A, et al. Time-lens Photon Doppler Velocimetry (TL-PDV)[J]. Physical Optics, 2021, 6(1).

收稿日期: 2021-04-08

基金项目: 航空科学基金科研项目(KJJ82004580)

### 作者简介

吕林杰(1995–), 男, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为超快测量与信号处理。2019 年毕业于河北工业大学自动化专业, 获得学士学位, 2018 年至今就读于北京长城计量测试技术研究所控制理论与控制工程专业。

