

多路复用光子多普勒测速复用方案分析及实验研究

李建中 刘寿先 刘俊 彭其先 雷江波 田建华

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 对光子多普勒测速(PDV)的基本原理和光学外差技术进行了阐述,对时分、波分、波分时分联合等三种多路复用光子多普勒测速(MPDV)复用方案进行了深入的分析,并指出了各种方案适宜的多点测速类型。根据理论分析结果,设计并搭建了一套 2 路波分加 2 路时分的 MPDV,并设计了爆轰实验装置,同时利用该装置进行了爆轰加载铝飞片的验证实验。结果表明,较好地实现了 MPDV 技术,并从其复用了 4 个测点速度信息的 1 路干涉信号中,分别解读出了各个测点的多普勒频移曲线及速度曲线,最高速度达到 2.5 km/s,飞行时间达到 16 μ s,同时验证了 MPDV 与常规 PDV 和外差式 PDV 在静态干涉信号、多普勒频移曲线、速度曲线等方面的差异性和相同点。研究结果对于研究大数量点数 MPDV 有重要的参考意义。

关键词 光纤光学; 多路复用光子多普勒测速; 光学外差; 时分复用; 波分复用

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1105009

Research on Multiplex Technology and Experiment of Multiplexed Photonic Doppler Velocimetry

Li Jianzhong Liu Shouxian Liu Jun Peng Qixian Lei Jiangbo Tian Jianhua

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract The operational principle and heterodyne technology of photonic Doppler velocimetry are introduced, time division multiplexing (TDM), wavelength division multiplexing (WDM), time and wavelength division multiplexing, are analyzed in detail. According to the analysis, a multiplexed photonic Doppler velocimetry (two TDM, two WDM) device is designed, and the velocities of explosively driven aluminum plates are tested by the proposed MPDV. The experimental results show that the MPDV is achieved well, four frequency curves and velocity curves are measured with just one interference signal, the velocity is up to 2.5 km/s, and the flight time is 16 μ s, the interference signal, frequency curve and velocity curve are distinct from those of photonic Doppler velocimetry and heterodyne multiplexed photonic Doppler velocimetry. The solution will provide a valuable reference for the multiplexed photonic Doppler velocimetry.

Key words fiber optics; multiplexed photonic Doppler velocimetry; heterodyne; time division multiplexing; wavelength division multiplexing

OCIS codes 120.7250; 060.2310; 070.2025; 280.3340

1 引言

在冲击波和爆轰物理、炸药、强激光、脉冲功率、超高速实验、天体物理、兵器等研究领域中,速度一直是最关键的问题和需要诊断的主要参数^[1-2],如连续地、非接触地测量各种材料在冲击波作用下的自由面速度历史,测量炸药、轻气炮、激光装置、电磁

驱动装置等加载技术驱动飞片的速度,测量炮弹在火炮及炮弹发射系统中的速度和加速度。光子多普勒测速仪^[3-5](PDV),具有非接触测量、时间分辨率高、测速准确度高等优点,得到了广泛应用,已成为主要的测速手段。

目前已有的激光测速技术仅能在待测对象上进

收稿日期: 2014-05-14; **收到修改稿日期**: 2014-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(11202194, 11272298)、中国工程物理研究院科学技术发展基金(2013B0403059)

作者简介: 李建中(1982—),男,硕士,助理研究员,主要从事光纤干涉测速及光纤传感等方面的研究。

E-mail: jianzhong265@163.com

行有限点数的测量,但随着相关研究的深入,提出了对待测对象进行大数量点数的阵列式或区域覆盖式测速的要求,如对多个对象同时进行速度测量、飞层整个表面的运动物理过程、强冲击波的时空不均匀性、激光或电磁加载的靶面上各点速度随时间的变化历史、某个或者多个时刻样品整个表面的速度分布及相对差别等诊断需求。激光测速技术的发展趋势,也提出了同样的要求,并把实现该要求的新式光学测速设备,定义为最新一代——第四代光学测速设备,目前我国已对此有着明确且迫切的需求。

在传统测速设备如 PDV 中,1 个测点至少需要 1 个记录通道(包括 1 个探测器和 1 个示波器通道),且一般 1 套测速主机最多仅能实现 4~8 点的测量,更多点数的测量,需通过多套主机的叠加实现,但随着测速点数的增多,其整套系统(尤其是记录通道)的复杂度、成本和体积均大幅增加,因此难以采用 PDV 的简单叠加方式实现大数量点(几十乃至上百点)测速,其他测速技术在此方面的问题则更为突出。国外最新采用的技术途径是利用复用技术构造多路复用光子多普勒测速系统^[6-8](MPDV),将多个测点的信号合并到 1 个记录通道,从而 1 个记录通道可以实现数点乃至十几点测速,1 台主机(对应 4~8 个记录通道)可实现数十点测速,不仅大幅减少了测速主机和记录通道的数量,降低了成本,而且显著降低了整套系统的复杂度和体积,使大数量点测量成为可能。国际上仅美国、英国和法国对 MPDV 技术进行了一定的研究和探索性实验应用,但复用方案均不相同,目前仍在发展的过程中,国内的中国工程物理研究院、北京交通大学、中国科学院力学研究所等单位对 PDV 进行了研发,但在多点测速方面,目前均是单点 PDV 的简单叠加,难以大幅提高测量点数,针对 MPDV,国内目前还处于起步阶段,暂未见相关报道,与迫切的需求相矛盾。

本文对 MPDV 的工作原理和光学外差技术进行描述,对波分、时分、波分时分联合等三种复用方式进行了分析及比较,在此基础上,设计了一种 MPDV 复用方案并采用常规器材搭建了一套演示装置,最后设计了爆轰实验,对该装置的单记录通道多点测速能力进行了验证,为在国内研制成功大数量点数 MPDV 提供了参考。

2 基本原理

MPDV 测速原理与 PDV 一样,均是光学多普勒效应^[9],以 PDV 为例进行说明。PDV 一般基于

单光源的零差探测,其基本结构如图 1 所示。当被测物体向探头运动时,从被测物体表面反射回的信号光 f_s ,相对于激光器从探头发出的探测光 f_0 ,会有微小的频率移动——多普勒频移 f_d ,即

$$f_d = f_s - f_0 = \frac{2V}{\lambda_0} = \frac{2f_0 V}{c}, \quad (1)$$

式中 V 是被测物体的运动速度, λ_0 是探测光的中心波长, c 是光速,可知被测物体的运动速度 V 和多普勒频移 f_d 直接呈线性关系。

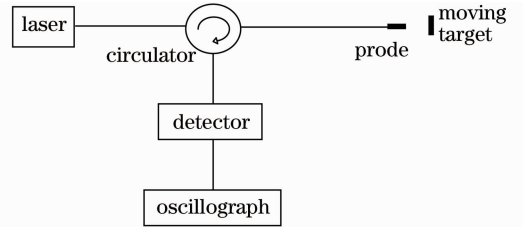


图 1 光子多普勒测速仪的基本结构

Fig. 1 Scheme of photonic Doppler velocimetry
信号光和探测光干涉后,干涉信号强度为

$$I(t) = I_0 + I_s + \sqrt{I_0 I_s} \sin[2\pi f_d t + \phi], \quad (2)$$

式中 I_0 是探测光的光强(无多普勒频移), I_s 是反射信号光的光强(有多普勒频移), ϕ 是两束光的相对相位差。可见,对干涉信号(2)式进行时频分析[一般采用短时傅里叶变换(STFFT)方法]^[10],提取出多普勒频移 f_d ,即可利用(1)式得到被测物体的运动速度 V 。

普通单源零差 PDV 的干涉信号频率直接等于多普勒频移,静态阶段速度为零,对应的干涉信号初始频率也为零,在动态阶段,随着速度增大,对应的干涉信号频率也随之增大,所要求的系统带宽也就越高,而在短历程低速测量时,由于条纹稀少,不能很好地还原速度变化细节,时间分辨率和测量精度较低(对干涉信号进行时频分析时,频率分辨率无法做到无限高,而是一个有限值,当条纹稀少即干涉信号频率值较低时,受制于有限的频率分辨率,对其进行 STFFT 分析处理后得到的频率数值精度会受影响,此外,要提高频率分辨率,需要增大 STFFT 的处理时间窗口,而这会导致时间分辨率降低)。

双源光外差技术可以弥补零差探测的不足,其基本结构如图 2 所示,利用有一定初始频差的参考光,借助外差探测技术测量多普勒频移信息,具备频率下变换和频率上变换双重功能。下变频双源外差时,干涉信号强度如(3)式所示,静态阶段速度为零,对应的干涉信号初始频率不为零,而是有一个基线频率 Δf_0 (数值上等于双光源的频率差),在动态阶

段,随着速度增大,干涉信号频率随之减小,到达零频时再重新增大,显著降低了高速过程中的干涉信号频率,降低了系统的带宽要求。上变频双源外差的干涉信号如(4)式所示,也有一个不为零的初始基线频率 Δf_0 ,动态阶段时随着速度增大,干涉信号频率在 Δf_0 的基准上增大,即显著增大了低速测量时的干涉信号频率(即干涉条纹的密度),提高了时间分辨率和测量精度。

$$I(t) = I_0 + I_s + \sqrt{I_0 I_s} \sin[2\pi |f_d - \Delta f_0| t + \phi], \quad (3)$$

$$I(t) = I_0 + I_s + \sqrt{I_0 I_s} \sin[2\pi |f_d + \Delta f_0| t + \phi]. \quad (4)$$

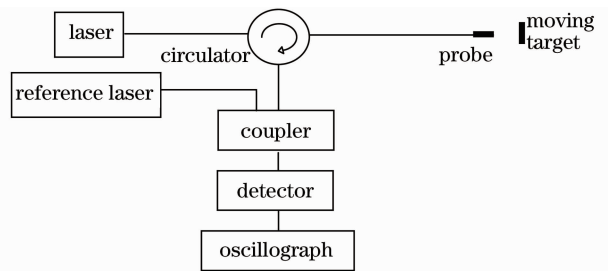


图2 双光源外差式光子多普勒测速仪的基本结构

Fig. 2 Scheme of heterodyne photonic Doppler velocimetry

由(1)式可知,速度误差主要来源于 f_0 (双源外差 PDV 则为 Δf_0) 在动态过程持续时间内(一般小于 $100 \mu\text{s}$) 的漂移,以及对干涉信号进行时频分析处理时 f_d 的误差。可知,单源零差 PDV 对光源的频率稳定性提出了较高要求,需要确保光源输出光在动态过程持续时间内具备较低的频率漂移,双源外

差 PDV 则对两个光源的频率稳定性均提出了较高的要求,需要确保其频率差值在动态过程持续时间内具备较小的漂移,因为上述两种漂移值均会导致测速误差。

此外,光学外差是 MPDV 的一项关键技术,必须采用该技术才能在频率轴上将波分复用各通道的测速信号区分开(通过调节初始基线频率)。

3 MPDV 复用方式分析

国内外均提出了对待测对象进行大数量点数的阵列式或区域覆盖式测速的要求,但难以采用 PDV 的简单叠加方式实现,国外最新采用的技术途径是利用复用技术构造 MPDV,将多个测点(即多个探头)的信号合并到 1 个记录通道的 1 路干涉信号中。

MPDV 主要包括时分、波分、波分时分联合等三种复用方案,美国、英国和法国采用的方案均不相同,为在国内研制 MPDV 提供参考,需要对此进行深入分析。对具有相同速度的目标进行测量时,常规 PDV、波分复用 PDV WDM PDV、时分复用 PDV TDM PPV 和波分时分联合复用 PDV (WDM+TDM PPV) 对多个(常规 PDV 仅 1 个)探头返回的 1 路干涉信号进行时频分析,获取到的多普勒频移曲线(等价于速度曲线)分别如图 3 所示(对应于一段单调递增的速度,均以上变频和 1 个示波器通道即 1 路干涉信号复用 4 个测点为例说明)。图 3 中,4 个测点的各条多普勒曲线在纵向上的数值,等于该测点测得的运动目标的实时多普勒频率/速度

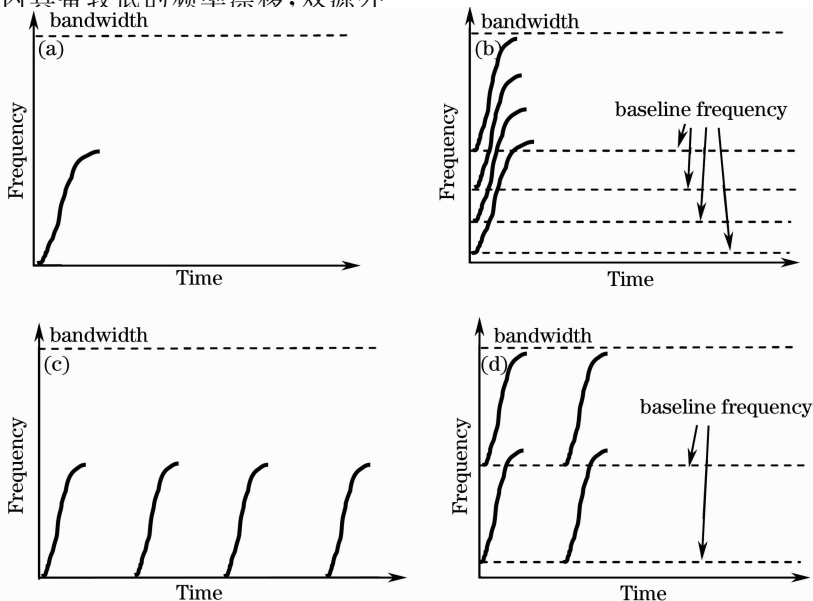


图3 各类型 PDV 的多普勒频移曲线。(a) 常规 PDV; (b) 波分复用 PDV; (c) 时分复用 PDV; (d) 波分时分联合复用 PDV

Fig. 3 Spectral diagram of different PDV. (a) PDV; (b) WDM PDV; (c) TDM PDV; (d) WDM+TDM PDV

值,其最大数值受限于系统带宽 B (系统不能响应频率大于其带宽的信号),而在横向上的数值,等于该测点测得的运动目标的飞行时间,其最大数值受限于系统对于单个测点所设定的记录时间 τ ,要测得各条完整的多普勒曲线,需要系统具备足够的带宽 B 和记录时间 τ 。

对于干涉信号特征及数据解读,图 3 所示的三种复用方案中,4 个测点获取到的速度信息均被复用在 1 路干涉信号里,需要从这 1 路干涉信号中分别解读出 4 个测探点的速度信息:时分方案,单位时间内(时频分析的处理时间窗口,一般为几纳秒或数十纳秒)的干涉信号仅包含 1 个测点的速度信息,即单位时间内的干涉信号仅有 1 个频率,数据处理跟常规 PDV 一致,未增加难度;波分方案,单位时间内的干涉信号包含多个(其数值等于波分数 4)测点的速度信息,即单位时间内的干涉信号有多个频率,需要分辨并分别解读出各个频率及其对应的速度,增大了数据处理的难度(如各条频率曲线数值差异较小时)和要求(如频率分辨率);波分时分联合方案,干涉信号特征和数据处理与波分方案类似,但单位时间内干涉信号包含的频率数量相对较少,从而数据处理难度也在一定程度上减小,但仍然大于时分 MPDV。

对相同系统带宽下的测速上限,由(1)式可知,最大多普勒频移等价于测速上限,由此从图 3 可直观地看出,在相同器材和相同参数设置的条件下(系统带宽相同),各复用方案的测速上限:时分方案,4 个时分通道测点的多普勒频移曲线均可完全占据零到带宽限制之间的频率区域,其测速上限均等于系统带宽;波分方案,4 个波分通道测点的多普勒频移曲线只能占据基线频率到带宽限制之间的频率区域,4 个测点的测速上限随基线频率的增大而减小,均小于系统带宽(差值由基线频率决定,可接近但不能等于零);波分时分联合方案,与波分方案基本相

同,4 个测点的多普勒频移曲线也只能占据基线频率到带宽限制之间的频率区域,但因为波分通道数减小一半,从而第二个测点的测速上限(如其与波分方案第二个测点的基线频率相同)可以高于波分复用方案的第三和第四个测点,但仍然小于时分方案的各个测点。

对于光路结构,首先是激光器数量,图 3 所示相同的 4 测点系统,时分方案仅需要 1 套光源(1 台探测光激光器和 1 台参考光激光器),波分方案需要 4 套,波分时分联合方案需要 2 套;其次是延迟光纤的需求量,时分方案需要 3 组长度递增的延迟光纤,波分方案不需要延迟光纤,波分时分联合方案需要 1 组延迟光纤,当点数增多时,时分方案需要的延迟光纤数量随之大幅增加(所需时间延迟量更大),由于光纤盘所占体积巨大,整套系统的体积大幅增大,不利于搭建和搬动系统,此外,从被测物体表面反射回的信号光为微弱信号(一般几个微瓦或更小),更长的延迟光纤会产生更大的衰减,导致信号光信噪比降低,甚至被噪声湮没,同时受环境因素(如温度和振动)干扰,系统稳定性会受影响,波分时分联合方案在此方面的问题小于时分方案,波分方案完全不存在该问题。

对于单个示波器通道的一路干涉信号可复用的测点数(对应于单台测速主机可复用的测点数,一般一台主机对应 4~8 个示波器通道),由于时分方案中更多的时分通道需要更长的延迟时间以及延迟光纤,存在如前所述的负面问题,加上示波器记录时间有限,从而总的时分通道数会受到限制,此外,波分方案中更多的波分通道会导致单位时间内干涉信号的频率数量增大,数据处理难度随之增大,从而总的波分通道数也会受到限制,因此对于时分方案和波分方案,单示波器通道可复用的测点数较难增加,波分时分联合方案则由于可以综合考虑波分数和时分数,单示波器通道可复用的测点数较易增加。

综上所述,可得出的结论如表 1 所述。

表 1 各种 MPDV 复用方案的比较

Table 1 Different in performance of several MPDV

	TDM PDV	WDM PDV	TDM+WDM PDV
Signal processing	Simple	Difficult	Medium
Measuring range	Big	Small	Medium
Number of lasers	Small	Big	Medium
Reliability and stability	Bad	Good	Medium
Number of probes with a single oscilloscope channel	Small	Small	Big
Suitable type of MPDV	Short recording time	Long recording time	Big number of probes

4 MPDV 光路结构设计

根据分析结果,为实现 MPDV 技术并对其进行进一步研究,设计了一套 2 路波分和 2 路时分的波分时分联合复用 MPDV(对应于 1 个示波器通道),

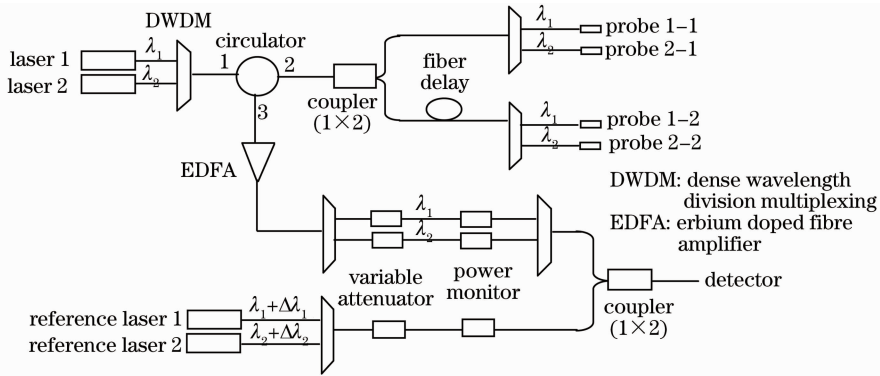


图 4 2 路波分和 2 路时分 MPDV 的光路结构

Fig. 4 Scheme of 2WDM+2TDM PDV

2 台激光器发出 2 束波长为 λ_1 和 λ_2 的探测光,通过密集型光波复用(DWDM)复用成 1 束光,然后经由环形器和分束器后被等分为 2 路,其中第一路通过 DWDM 解复用成 2 束波长为 λ_1 和 λ_2 的探测光,第二路通过一段光纤产生时间延迟后再被解复用成 2 束波长为 λ_1 和 λ_2 的探测光。4 束探测光进入 4 个不同的探头,并照射到运动目标上,形成 4 个测速点。在运动目标上反射的信号光产生了多普勒频移并被探头收集,4 个探头返回的 4 路信号光,被 DWDM 和分束器复用成 1 路信号光,经由环形器传输至掺铒放大器(EDFA)放大后,依照波长的不同被分至不同的功率调节通道,通过可调衰减器和功率监测计调节本通道传输信号光的功率值,以获得最优的干涉和外差条件,然后再次被复用成 1 路信号光。2 台波长可(微)调的激光器发出 2 束参考光,其波长(频率)与对应的 2 台探测光激光器具有特定的初始波长(频率)差 $\Delta\lambda$,从而可以利用双光源外差技术。2 束参考光被 DWDM 复用成 1 路参考光,并通过相应的功率监测和调节。参考光和信号光最后在分束器处进行干涉并得到 1 路干涉光信号,经过 1 个探测器转换为电压信号后被 1 个示波器通道记录,通过对这路信号进行处理,可分别获得 4 个测点测量到的运动目标速度。

所用激光器的频率稳定性指标为漂移小于 50 MHz(1 h),对该指标进行了长期测试,验证了 4 台激光器均符合该指标,同时将 laser1(2)和 reference laser1(2)之间的光学外差干涉信号(其频率为双光源频率差)接入示波器进行记录,并分别读取 100 μ s、

其光路结构如图 4 所示。此外,图 4 所示光路可同时对 2 路波分复用 MPDV 方案或 2 路时分复用 MPDV 方案进行验证。

500 μ s 和 1 ms 时间段的干涉信号,处理出其频率值(以及对应的速度)在该时间范围内随时间的变化历史,发现其具备可忽略的漂移,从而可知所用双光源的频率差值漂移导致的测速误差可忽略。

从图 4 中可以看出,2 路波分复用通道具有相同的特性,改变 DWDM 的通道数量后,可随之成倍增加该光路可复用的测点数量。

5 实验研究

设计了所需的爆轰实验装置,其基本结构(剖面图)如图 5 所示,传爆药柱、空腔、铝靶等模块均为圆柱(或圆片)状,被封装在一个铝制圆筒里,探头安装在铝制底座里。使用两块传爆药柱产生的爆轰波驱动铝靶,为了得到比较平缓的冲击波前沿,在传爆药柱和铝靶之间增加了空气间隙。

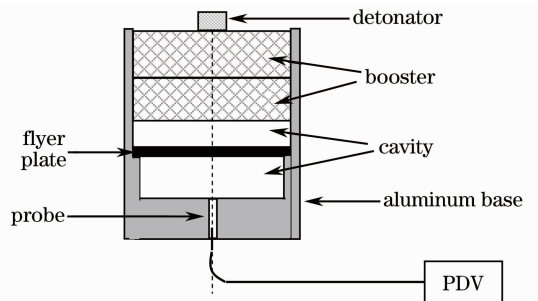


图 5 实验装置示意图

Fig. 5 Experimental setup

进行第一发爆轰实验,对常规 PDV 和外差式 PDV(上变频,双光源波长差 $\Delta\lambda_0$ 设为 20 pm,即频差大约为 2.5 GHz,光谱仪分辨率为 2 pm 即 0.25 GHz)

进行测试,常规 PDV 的 1 个探头和外差式 PDV 的 1 个探头,以铝制底座中心为基准对称安装。

起爆前,未产生爆轰波,飞片(铝靶)速度为零,此时常规 PDV 和外差式 PDV 的静态干涉信号如图 6 所示,可见,在速度为零时,多普勒频移也为零,

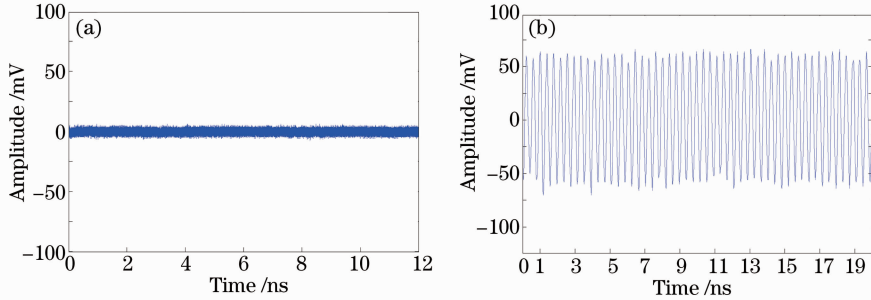


图 6 常规 PDV 和外差式 PDV 的静态干涉信号。(a) 常规 PDV; (b) 外差式 PDV

Fig. 6 Static interference signal of different PDV. (a) PDV; (b) heterodyne PDV

起爆后,传爆药柱产生的爆轰波加载在铝靶上,飞片开始进入动态变化阶段,常规 PDV 和外差式 PDV 产生动态干涉信号,对该信号进行时频分析后,获得的多普勒频移曲线如图 7 所示(示波器延迟 $5 \mu\text{s}$ 触发,外触发信号的传输时间约为 $4 \mu\text{s}$),如(1)式所述,该频移曲线直接等价于飞片的速度曲线(横向时间轴上的数值不变,纵向数值存在线性关系)。由图 7 可知,对于常规 PDV,静态阶段速度为零,干涉信号初始频率也为零,在动态阶段随着速度增大,干涉信号频率也随之增大,而对于上变频外差式

对于常规 PDV,(2)式所述干涉信号的频率也为零,静态干涉信号为一条表征系统噪声的直流信号,而对于外差式 PDV,(4)式所述干涉信号由于增加了一个双光源频率差决定的基线频率 Δf_0 ,静态干涉信号为一条频率为 Δf_0 的交流信号。

PDV,静态阶段有一个不为零的初始基线频率为 2.58 GHz ,该频率值与所设定的双光源频率差相吻合(0.08 GHz 的差异来源于光谱仪分辨率有限而产生的光源波长测量不确定度),在动态阶段时随着速度增大,干涉信号频率在 2.58 GHz 的基准上增大。由图 7 可知,常规 PDV 和外差式 PDV 分别获取到的飞片多普勒频移曲线(即速度曲线)较为吻合,运动过程持续时间大约为 $15.5 \mu\text{s}$,最大多普勒频移量为 2.84 GHz (外差式 PDV 中需减去基线频率),即最大速度为 2.2 km/s 。

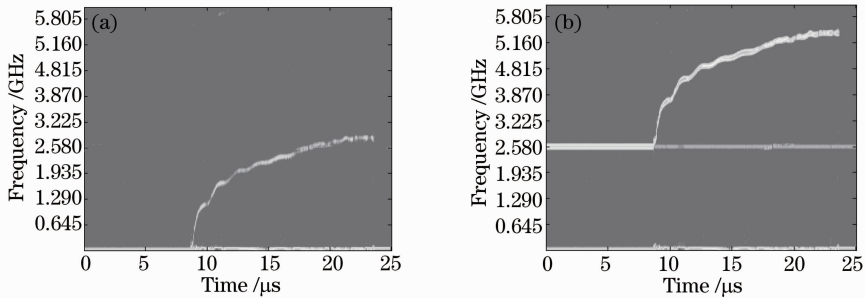


图 7 常规 PDV 和外差式 PDV 的多普勒频移曲线。(a) 常规 PDV; (b) 外差式 PDV

Fig. 7 Spectral diagram of different PDV. (a) PDV; (b) heterodyne PDV

进行第二发爆轰实验,对所研制的 2 路波分 2 路时分 MPDV(如图 4 所示)进行测试,该装置采用上变频,其第一个波分通道的双光源波长差 $\Delta\lambda_1$ 设为 6 pm 即频差 Δf_1 约为 0.75 GHz ,第二个波分通道的双光源波长差 $\Delta\lambda_2$ 设为 36 pm 即频差 Δf_2 约为 4.5 GHz ,第二路时分通道的光纤延迟线长度为 4 km 。4 个探头以铝制底座中心为基准对称安装。

起爆前,未产生爆轰波,飞片(铝靶)速度为零,MPDV 的干涉信号如图 8 所示,由于 4 个探头获取

到的速度信息均被复用在 1 路干涉信号里,且 2 个波分通道均采用了光学外差技术(如图 4 所示),从而静态干涉信号为一条单位时间内(时频分析的处理时间窗口,一般为几纳秒或数十纳秒)包含 2 个频率为 Δf_1 和 Δf_2 的交流信号。

起爆后,传爆药柱产生的爆轰波加载在铝靶上,飞片开始进入动态变化阶段,MPDV 产生动态干涉信号(仅 1 路),对该信号进行时频分析后,获得的多普勒频移曲线如图 9 所示(示波器延迟 $10 \mu\text{s}$ 触发,

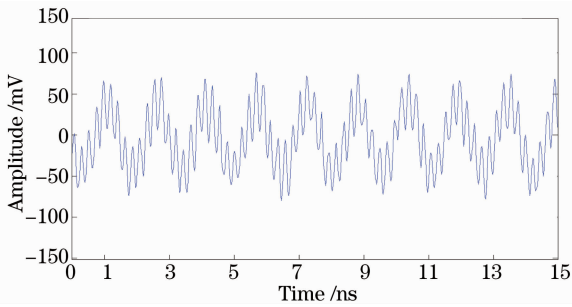


图 8 MPDV(2路波分,2路时分)的静态干涉信号

Fig. 8 Static interference signal of MPDV

(2 WDM, 2 TDM)

外触发信号的传输时间约为 $4 \mu\text{s}$),该频移曲线直接等价于其速度曲线,可见实测的多普勒频移曲线与图 3(d)的理论结果相吻合。由图 9 可知,对于 MPDV,静态阶段有 2 个不为零的基线频率 0.645 GHz 和 4.515 GHz ,该频率值与所设定的双光源频率差相吻合(0.105 GHz 和 0.015 GHz 的差异来源于光谱仪分辨率有限而产生的光源波长测量不确定度),在动态阶段时随着速度增大,2 路波分通道对应的干涉信号频率在 0.645 GHz 和 4.515 GHz 的基准上增大。此外,2 路时分通道的时间延迟量约为 $40 \mu\text{s}$,与光纤延迟线的长度相吻合(光信号来回 2 次经过延迟线)。由图 9 可知,MPDV 的 4 个探头分别获取到的飞片多普勒频移曲线(即速度曲线)较为吻合,运动过程持续大约为 $16 \mu\text{s}$,最大多普勒频移量为 3.225 GHz (需减去初始基线频率)。

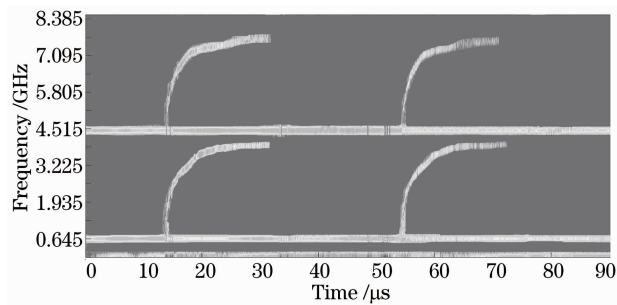


图 9 MPDV(2路波分,2路时分)的多普勒频移曲线

Fig. 9 Spectrum diagram of MPDV (2 WDM, 2 TDM)

在图 9 中,MPDV 的 4 个探头获取到的 4 条速度信息均被复用在 1 路干涉信号里,需要从这 1 路干涉信号中分别解读出 4 个测点各自的多普勒频移及其对应的速度。通过一定的数据处理,图 9 中左上角的多普勒频移曲线(以之为例说明)对应的速度曲线如图 10 所示,可知在大约 $16 \mu\text{s}$ 内,其速度值从零逐渐上升到 2.5 km/s 。

上述测试中,所使用示波器的采样率为 $12.5 \times$

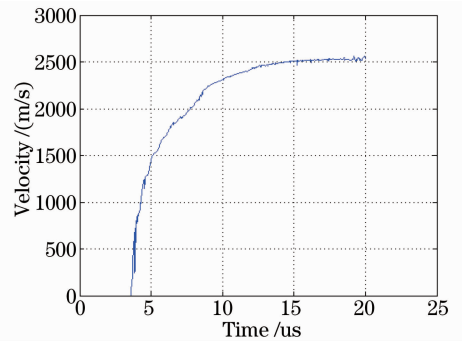


图 10 铝飞片的 MPDV 实测速度曲线

Fig. 10 Measured velocity of a large aluminum

flyer, using MPDV

10^{10} s^{-1} ,傅里叶变换计算点数为 4096,可计算得到速度准确度高于 3 m/s 。

6 结 论

本文对 PDV 的基本原理和光学外差技术进行了阐述,并对时分、波分、波分时分联合等三种 MPDV 复用方案进行了深入的分析,指出了各种方案适宜的多点测速类型,为研制 MPDV 奠定了基础。

根据本文所分析的结果,设计并搭建了一套 2 路波分复用加 2 路时分复用的 MPDV 光路结构,并利用所设计的爆轰实验装置进行了验证实验,实验结果表明,较好地实现了 MPDV 技术,并从其复用了 4 个探点速度信息的 1 路干涉信号中,分别获取到了各个探点的多普勒频移曲线及速度曲线,同时实验验证了 MPDV 与常规 PDV 和外差式 PDV 在静态干涉信号、多普勒频移曲线、速度曲线等方面的差异性和相同点。

参 考 文 献

- Ren Aiguo, Zhang Yongkang, Jiang Yinfang, *et al.*. Numerical simulation of metal sheet velocity by laser shock forming with semi-die[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(5): 1368-1374.
任爱国, 张永康, 姜伟方, 等. 激光冲击半模成形板料运动速度的数值模拟[J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1368-1374.
- Liu Shouxian, Wen Weifeng, Yuan Shuyun, *et al.*. Full field velocity measurement of laser-driven flyer using framing-imaging velocity interferometer system for any reflector[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0912007.
刘寿先, 温伟峰, 袁树云, 等. 分幅面成像任意反射面速度干涉仪诊断激光驱动飞片全场速度[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0912007.
- Weng Jidong, Wang Xiang, Ma Yun, *et al.*. A compact all-fiber displacement interferometer for measuring the foil velocity driven by laser[J]. Review of Scientific Instruments, 2008, 79(11): 113101.
- Hong Guangwei, Jia Bo. All-fiber velocity interferometer for multipoint measurement[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(8): 1097-1100.
洪广伟, 贾波. 用于多点测试的全光纤速度干涉仪研究[J].

- 中国激光, 2005, 32(8): 1097-1100.
- 5 Chen Guanghua, Wang Detian, Liu Jun, *et al.*. A novel photonic Doppler velocimetry for transverse velocity measurement [J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(1): 013101.
- 6 E Daykin, A Diaz, C Gallegas, *et al.*. A Multiplexed Many-Point PDV (MPDV) [OL]. http://kb.osu.edu/dspace/bitstream/handle/1811/52727/PDV_2010_dAYKIN_Multiplexed_ManypointPDV.PDF?SEQUENCE=1. [2014-07-21].
- 7 E Daykin, M Burk, A Diaz, *et al.*. High-Definition Optical Velocimetry: a New Diagnostic Paradigm for Nuclear Security [OL]. <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/1057203>. [2014-07-21].
- 8 Science & Technology Review. Ten Times More Data for Shock-Physics Experiments [OL]. <http://str.nsl.gov/OctNov12/kostinski.html>. [2014-08-08].
- 9 Dong Jing, Chen Rui, Li Xiaolong, *et al.*. Lidar coherent detection and feature extraction of moving target based on micro-Doppler effect[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1014001. 董晶, 陈蕊, 李小龙, 等. 运动目标微多普勒效应的激光雷达相干探测及特征提取[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1014001.
- 10 Liu Shouxian, Li Zeren, Wu Jianrong, *et al.*. Signal processing of displacement interferometer based on the continuous wavelet transform[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(8): 1235-1239. 刘寿先, 李泽仁, 吴建荣, 等. 基于连续小波变换的瞬态位移干涉仪信号处理[J]. 中国激光, 2008, 35(8): 1235-1239.

栏目编辑: 何卓铭