

一种超快时间分辨速度干涉仪的设计和理论研究*

范伟¹⁾²⁾ 谷渝秋^{1)2)†} 朱斌²⁾ 税敏²⁾ 单连强²⁾ 杜赛²⁾ 辛建婷²⁾
赵宗清²⁾ 周维民²⁾ 曹磊峰²⁾ 张学如¹⁾ 王玉晓^{1)‡}

1) (哈尔滨工业大学物理系, 哈尔滨 150001)

2) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 等离子体物理重点实验室, 绵阳 621900)

(2013年11月4日收到; 2013年11月27日收到修改稿)

在单发、超快时间分辨的测量技术中, 线性啁啾脉冲和光谱仪的结合使用是一种常见方法. 本文以成像型光谱仪为记录系统, 利用线性啁啾脉冲的频-时对应关系, 设计了一种应用于自由面速度超快测量的速度干涉仪. 理论研究了其工作原理和适用范围, 该速度干涉仪可以实现皮秒量级的时间分辨, 且速度灵敏度可调、易调, 大大拓宽了速度干涉仪的应用范围. 数值模拟了系统的测速过程, 结果表明, 重建速度信号与给定物体速度符合得很好, 进一步验证了系统的可行性.

关键词: 任意反射面速度干涉仪, 拍频干涉, 啁啾脉冲, 时间分辨

PACS: 07.60.Ly, 42.15.Eq

DOI: 10.7498/aps.63.060703

1 引言

研究强冲击波作用下的材料动力学性能是材料物理领域的热点问题之一. 采用强激光驱动冲击加载是开展相关实验研究的一种重要方法, 通过测量材料中的冲击波速度和粒子速度, 有助于推导材料的应力-应变状态和建立物质性态的理论模型^[1]. 其中, 粒子速度的测量常采用自由面速度法, 一种主要诊断设备是任意反射面的速度干涉仪 (VISAR)^[2]. VISAR 最早由 Barker 和 Hollenbach^[3] 于 1972 年建立, 它被用来代替速度干涉仪对冲击样品表面的运动速度剖面等进行测量, 由于受到光电倍增管-示波器记录系统的制约, 当时 VISAR 的时间分辨只能做到纳秒量级, 满足不了人们在许多现象上的观测要求. 1983 年, Bloomquist 和 Sheffield^[2] 对 VISAR 的光路进行改动, 并以电子条纹相机代替光电倍增管-示波器记录系统, 改造后的系统被称为光学记录速度干涉仪 (ORVIS),

其时间分辨能力主要受限于条纹相机, 因此, 达到了皮秒时间分辨的水平. 1998 年, Celliers 等^[4] 又利用条纹相机的空间分辨能力, 通过在 VISAR 中引入成像系统, 构造了成像型 VISAR, 并在测量激光驱动冲击波的实验中, 同时实现了皮秒时间分辨和亚微米的一维空间分辨. 此后, 这些技术被广泛应用在与冲击波传播相关的物理实验当中, 如高压状态方程实验^[5,6]、材料动力学性能实验^[7-10] 以及惯性约束聚变中的冲击波时序调控实验等^[11,12]

作为记录系统, 条纹相机影响着 VISAR 的时间分辨能力. 然而, 其昂贵的价格使系统的建造成本居高不下. 为了改善这种状况, 本文设计了一种超快时间分辨速度干涉仪, 其记录系统为成像型光谱仪. 因该速度干涉仪使用线性啁啾脉冲作为探针光, 又可称为啁啾脉冲速度干涉仪. 通过对啁啾脉冲速度干涉仪的测量原理进行理论研究, 给出了系统的适用测速范围、时间分辨能力及其他系统特性. 最后, 数值模拟了速度干涉仪的测速过程, 以验证

* 国家自然科学基金 (批准号: 10902101) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: yqgu@caep.ac.cn

‡ 通讯作者. E-mail: wangyx@hit.edu.cn

其可行性.

2 啁啾脉冲速度干涉仪

2.1 速度干涉仪原理

考虑一束激光脉冲通过马赫-曾德尔干涉仪后, 产生一对同轴传输且具有延迟时间差的脉冲, 如图 1(a) 所示. 令它们的电场分布为

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{01} \cos(\omega t + \varphi_{01}), \\ E_2 &= E_{02} \cos[\omega(t - T) + \varphi_{02}], \end{aligned} \quad (1)$$

式中, E_{01} 和 E_{02} 分别是两束脉冲的振幅, ω 是它们的圆频率, φ_{01} 和 φ_{02} 是场点相应的初始位相. 当此脉冲对先后被运动物体反射并被探测器接收时, 根据多普勒原理, 探测器接收到的光波频率将发生变化. 若光脉冲被反射时的物体速度分别为 v_1, v_2 , 探测器接收到的相应光频为

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \omega + 2n\frac{\omega}{c}v_1 \cos(\theta), \\ \omega_2 &= \omega + 2n\frac{\omega}{c}v_2 \cos(\theta), \end{aligned} \quad (2)$$

式中, n 为光传输介质的折射率, c 为真空中的光速, θ 为光波入射到物体上的入射角. 如果补偿两脉冲间的延迟时间差, 使它们同步传输. 然后, 令脉冲对以一定的夹角照射在探测器的相同空间位置上, 如图 1(b) 所示, 它们的振幅将发生干涉叠加. 若探测器是光强敏感且高频截止的器件, 其接收到的拍频干涉信号强度为

$$\begin{aligned} E^2(t) &= \frac{E_{01}^2 + E_{02}^2}{2} + E_{01}E_{02} \cos[(\omega_2 - \omega_1)t \\ &+ (\varphi_{02} - \varphi_{01})]. \end{aligned} \quad (3)$$

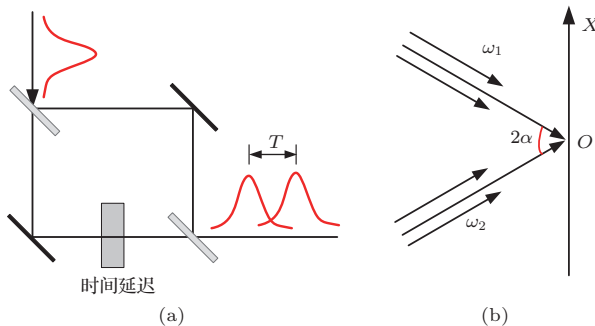


图1 脉冲对产生及其拍频干涉示意图 (a) 马赫-曾德尔干涉仪; (b) 两光束拍频干涉

在图 1(b) 中, 令 $\varphi_{01}(o) = \varphi_{02}(o)$. 然后, 将 (2) 式代入 (3) 式, 并取 $\cos(\theta) = 1, n = 1$, 即脉冲对在

真空中传播, 且沿表面法线方向入射到待测物体表面. 考虑到初始位相差的空间分布, 拍频干涉信号沿探测器记录面 X 方向的强度分布为

$$\begin{aligned} E^2(x, t) &= \frac{E_{01}^2 + E_{02}^2}{2} + E_{01}E_{02} \cos \left[2\frac{\omega}{c}(v_2 - v_1)t \right. \\ &\left. + 2\frac{\omega}{c}x \sin(\alpha) \right], \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $(E_{01}^2 + E_{02}^2)/2$ 为直流背景, 沿 X 方向是缓变的; 余弦函数项为交流信号项, 它使 X 方向的光强分布呈周期性条纹状. 具体来说, 固有位相差 $2\omega x \sin(\alpha)/c$ 产生了 X 方向上的周期性条纹, 对应的条纹周期为 $\Delta x = \pi c/[\omega \sin(\alpha)]$; 由运动物体速度变化引起的附加位相差 $2\omega(v_2 - v_1)t/c$, 则使周期性条纹随时间发生移动, 移动变化率为

$$\begin{aligned} F_t &= \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{1}{2\pi} \times 2\frac{\omega}{c}(v_2 - v_1)t \right] \\ &= \frac{\omega}{\pi c}(v_2 - v_1). \end{aligned} \quad (5)$$

如果使用具有时间分辨能力的探测器扫描记录不同时刻的条纹分布, 根据 (5) 式, 已知每个时刻的条纹变化率 F_t 和 T 时刻前的物体速度 v_1 , 即可获得该时刻的物体速度 v_2 . 由此可知, 探测器具有快速的时间响应能力是实现超快时间分辨速度测量的必要条件. 例如, 实现皮秒时间分辨的速度测量, 需要使用皮秒时间分辨的光学条纹相机作为记录设备, 从而大大增加了速度测量系统的建造成本, 限制了它的广泛应用.

2.2 啁啾脉冲速度干涉仪原理

对于线性啁啾脉冲, 脉冲频率和时间之间存在一一对应的关系:

$$\omega = \omega_0 + 2bt, \quad (6)$$

式中, $2b$ 为啁啾脉冲的线性啁啾系数. 如果上述速度干涉仪系统中使用的激光脉冲为线性啁啾脉冲, 那么条纹分布随时间的变化将反映为其随频率的变化, 通过色散记录不同频率的条纹分布, 可以达到时间分辨条纹分布的效果. 一般的成像型光谱仪均可作为记录系统, 实现这种功能. 此时, 外界信号导致的条纹移动随频率的变化率为

$$F_\omega = \frac{1}{2b} F_t = \frac{\omega}{2\pi b c}(v_2 - v_1), \quad (7)$$

我们称这样的测量系统为啁啾脉冲速度干涉仪, 它使用成像型光谱仪作为记录设备, 可以在达到皮秒

时间分辨的同时(见下文分析),有效地控制建造成本,其光路排布如图2所示.一束啁啾脉冲首先经过马赫-曾德尔干涉仪产生一对共轴传输的脉冲,脉冲对之间具有一定的延迟时间差 T ,且它们的偏振方向相互垂直.一块前置透镜将啁啾脉冲对聚焦到运动物体表面,然后收集其散射光并进行准直.当准直光束经过偏振分光棱镜PBS-3时,偏振方向相互垂直的脉冲对开始分开传输,其中透射光束将通过一个光路延迟器补偿延迟时间差 T ,从而两束光在时间上同步传输.当它们传播通过偏振分光棱镜PBS-4时,将以一定的夹角进行合束.45°极化片使垂直极化的光束产生相同的偏振成分,光谱仪接收并记录它们之间的拍频干涉条纹.

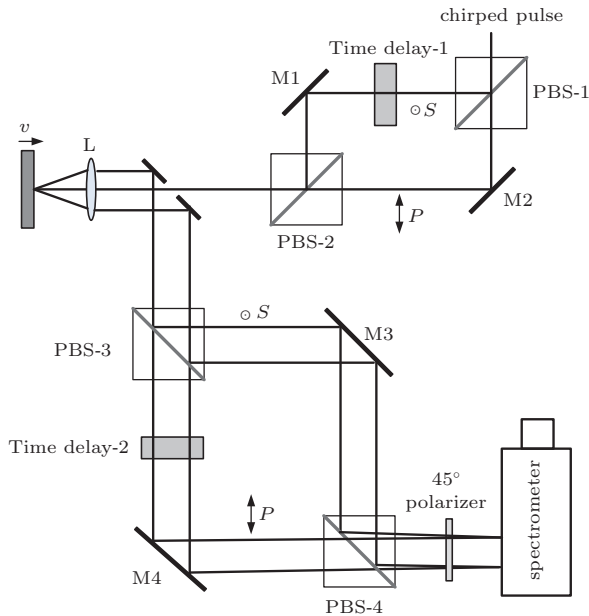


图2 啁啾脉冲速度干涉仪光路排布 M, 反射镜; L, 透镜; PBS, 偏振分光棱镜; Time delay, 时间延迟器; polarizer, 极化片

在马赫-曾德尔干涉仪产生的脉冲对中,同一频率成分相隔时间 T ,当它们分别经历 T 前后两个时刻的多普勒频移,然后沿光谱仪狭缝方向拍频干涉时,值得注意的一个问题是,由于光谱仪将不同频率的光色散记录到不同的空间位置上,为使发生多普勒频移后的两个频率仍被色散到相同的位置上,且不出频率叠加现象(不同色散位置的频率,在发生多普勒频移后叠加在相同的色散位置上),物体速度导致的多普勒频移量应小于 $\delta\lambda/2$ ($\delta\lambda$ 为光谱仪的采样间隔).假设啁啾脉冲为高斯型脉冲,中心波长 λ_0 ,带宽 $\Delta\lambda$ (FWHM),脉宽 τ_c (FWHM),相应的变换极限脉宽 τ_0 .当多普勒频移

量小于 $\delta\lambda/2$ 时,相应的物体速度必须满足

$$v < \frac{c\delta\lambda}{4\lambda_0}, \quad (8)$$

也就是说,啁啾脉冲速度干涉仪存在测速上限.

通常定义一个条纹移动对应的速度变化 Δv_F 为速度灵敏度,根据(8)式,啁啾脉冲速度干涉仪的速度灵敏度为

$$\Delta v_F = \frac{\lambda_0}{2T}, \quad (9)$$

受条纹对比度和信噪比的影响,条纹分辨的不确定度一般为0.05个条纹,所以系统的最低测速极限 v_{\min} 为

$$v_{\min} = \frac{\lambda_0}{40T}. \quad (10)$$

如果要求系统测速的不确定度小于1%,则待测速度信号引起的条纹移动必须大于5个.此时,待测速度需满足 $v > \frac{5\lambda_0}{2T}$,结合(8)式有

$$\frac{5\lambda_0}{2T} < v < \frac{c\delta\lambda}{4\lambda_0}. \quad (11)$$

当利用线性啁啾脉冲的频-时对应关系实现时间分辨测量时,在没有其他限制因素的情况下,系统的单发时间测量范围是 τ_c ,所能达到的最小时间分辨为 $\sqrt{\tau_0\tau_c}$ [13,14].考虑到光谱仪的采样间隔 $\delta\lambda$,啁啾脉冲速度干涉仪的最小时间分辨为 $\max\left\{\sqrt{\tau_0\tau_c}, \frac{\delta\lambda}{\Delta\lambda}\tau_c\right\}$.

上面理论研究了啁啾脉冲速度干涉仪系统的适用范围,为了对这些参数有一个直观的认识,我们通过一组数据反映它们的大小.令 $\lambda_0 = 400 \text{ nm}$, $\Delta\lambda = 60 \text{ nm}$, $\tau_c = 300 \text{ ps}$, $T = 40 \text{ ps}$, $\delta\lambda = 0.3 \text{ nm}$.代入(8)—(11)式,可知系统的测速上限为56.25 km/s,速度灵敏度和最低测速极限分别是5 km/s, 250 m/s,当要求系统测速的不确定度小于1%时,其测速范围为 $25 \text{ km/s} < v < 56.25 \text{ km/s}$.此外,系统达到的时间分辨和测量范围分别为1.5, 300 ps.实际上,这些参数都是可调和易调的.例如,使用超连续激光作为探针光源,可以控制啁啾脉冲的中心波长和带宽,其中,减小啁啾脉冲的中心波长,可以提高系统的测速上限和速度灵敏度,增大啁啾脉冲的带宽,则能增加系统的时间分辨能力;啁啾脉冲的脉宽可以通过光栅对进行灵活调节,当其增大时,有利于扩展系统的单发时间测量范围,不过也同时降低了系统的时间分辨能力,因此,需结合实验需要确定.总之,系统参数的可

调性和易调性使其具有了很大的灵活性,从而大大拓宽了啁啾脉冲速度干涉仪的潜在应用范围.

3 数值模拟

为了验证上述设计的可行性,我们开展了相关的数值模拟研究工作,模拟参数如上文所述.首先给定物体的运动速度,如图3(a)中的蓝色实线所示.在初始阶段物体处于静止状态,一段时间后开始做匀速加速运动,当速度达到20 km/s后,保

持一段时间的匀速运动,然后再经过一个快速的匀速减速过程,物体静止下来.其间,一对线性啁啾脉冲先后被物体反射,分别产生多普勒频移.补偿脉冲对之间的延迟时间差,使它们以一定的夹角 $2\alpha = 0.05^\circ$ 同时照射到光谱仪狭缝上.根据(7)式,光谱仪接收和记录的拍频干涉条纹如图3(b)所示,纵轴为沿光谱仪狭缝方向的空间坐标,横轴代表频率分布,可以看出,随着频率增加,条纹周期 ($\Delta x = \pi c / [\omega \sin(\alpha)]$) 在逐渐减小.

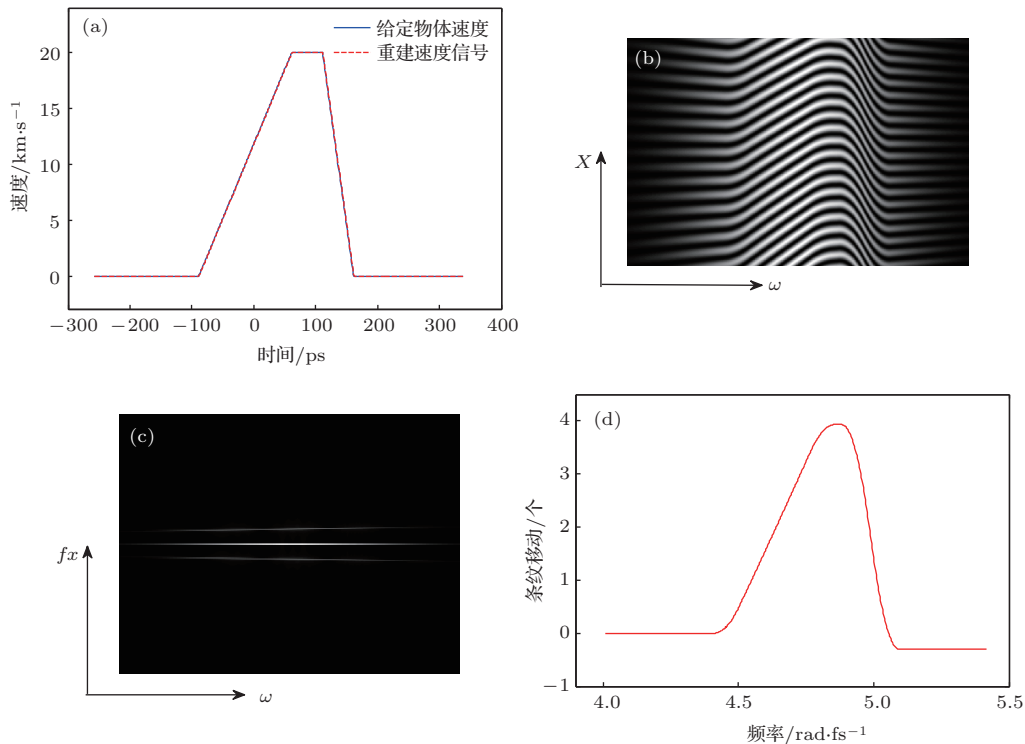


图3 啁啾脉冲速度干涉仪的测速过程模拟 (a) 运动物体速度; (b) 光谱仪记录的拍频干涉条纹; (c) 拍频条纹的频谱分布; (d) 条纹移动数随频率的变化

数据解谱时,我们使用傅里叶变换的方法提取条纹的移动.对图3(b)做二维傅里叶变换,得到它的傅里叶频谱,如图3(c)所示,图中的三条直线分别代表零级信号和一对共轭的一级信号.中间的零级信号对应(4)式中的直流背景项,不包含物体速度的任何信息;一级信号则由余弦函数项变换得到,其中的任意一项包含速度的全部信息.使用滤波函数将负一级项滤出,对其做傅里叶逆变换,将得到一个复函数,从中除去固有位相差 $2\omega x \sin(\alpha)/c$ 部分,再进行位相提取和解缠绕处理,最后将所得位相转化为条纹移动,结果如图3(d)所示.求解条纹移动随频率的变化率,然后代入(7)式,重建出物体的运动速度,如图3(a)中的红色虚

线所示.可以看出,重建速度信号与给定物体速度符合得很好,从而为啁啾脉冲速度干涉仪的可行性论证提供了一个有力的证据.

4 结论

基于线性啁啾脉冲,设计了一种应用于自由面速度超快测量的速度干涉仪系统.理论研究表明,该系统可以达到皮秒量级的时间分辨.由于系统使用成像型光谱仪作为光学记录设备,它在达到超快时间分辨测量的同时,避免了使用昂贵的条纹相机,从而控制了系统的建造成本,为系统的普及提供了方便.另外,通过方便地改变啁啾脉冲的中心

波长、脉宽和带宽等参数,可以对系统的测速上下限、速度灵敏度及时间分辨能力等分别进行调节,大大拓宽了系统的应用范围.对系统测速过程的数值模拟结果显示,重建速度信号和给定物体速度符合得很好,从而为啁啾脉冲速度干涉仪的可行性论证提供了有力的支撑.啁啾脉冲速度干涉仪的提出为实验研究激光驱动冲击波等物理过程提供了一种很有前景的方法.

参考文献

- [1] Hu S L 2001 *Laser Interferometry for Measuring Velocities* (Beijing: National Defence Industry Press) p1 (in Chinese) [胡绍楼 2001 激光干涉测速技术 (北京: 国防工业出版社) 第1页]
- [2] Bloomquist D D, Sheffeld S A 1983 *J. Appl. Phys.* **54** 1717
- [3] Barker L M, Hollenbach R E 1972 *J. Appl. Phys.* **43** 4669
- [4] Celliers P M, Collins G W, Da Silva L B, Gold D M, Cauble R 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 1320
- [5] Shu H, Fu S Z, Huang X G, Ye J J, Zhou H Z, Xie Z Y, Long T 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 114102 (in Chinese)[舒桦, 傅思祖, 黄秀光, 叶君建, 周华珍, 谢志勇, 龙滔 2012 物理学报 **61** 114102]
- [6] Celliers P M, Bradley D K, Collins G W, Hicks D G, Boehly T R, Armstrong W J 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 4916
- [7] Wang Y G, He H L, Wang L L, Jing F Q, Boustie M, Sekine T 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 033511
- [8] Cuq-Lelandais J P, Boustie M, Berthe L, de Rességuier T, Combis P, Colombier J P, Nivard M, Claverie A 2009 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** 065402
- [9] de Rességuier T, Lescoute E, Loison D, Chevalier J M, Ducasse F 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 123504
- [10] Shan L Q, Gao Y L, Xin J T, Wang F, Peng X S, Xu T, Zhou W M, Zhao Z Q, Cao L F, Wu Y C, Zhu B, Liu H J, Liu D X, Shui M, He Y L, Zhan X Y, Gu Y Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 135204 (in Chinese)[单连强, 高宇林, 辛建婷, 王峰, 彭晓世, 徐涛, 周维民, 赵宗清, 曹磊峰, 吴玉迟, 朱斌, 刘红杰, 刘东晓, 税敏, 何颖玲, 詹夏宇, 谷渝秋 2012 物理学报 **61** 135204]
- [11] Wang F, Peng X S, Mei L S, Liu S Y, Jiang X H, Ding Y K 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 135201 (in Chinese)[王峰, 彭晓世, 梅鲁生, 刘慎业, 蒋小华, 丁永坤 2012 物理学报 **61** 135201]
- [12] Robey H F, Boehly T R, Olson R E, Nikroo A, Celliers P M, Landen O L, Meverhofer D D 2010 *Phys. Plasmas* **17** 012703
- [13] Sun F G, Jiang Z P, Zhang X C 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 2233
- [14] Kim K Y, Yellampalle B, Rodriguez G, Averitt R D, Taylor A J, Glowacki J H 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 041123

Design and theoretical research of an ultrafast time-resolved velocity interferometer*

Fan Wei¹⁾²⁾ Gu Yu-Qiu^{1)2)†} Zhu Bin²⁾ Shui Min²⁾ Shan Lian-Qiang²⁾ Du Sai²⁾
Xin Jian-Ting²⁾ Zhao Zong-Qing²⁾ Zhou Wei-Min²⁾ Cao Lei-Feng²⁾
Zhang Xue-Ru¹⁾ Wang Yu-Xiao^{1)‡}

1) (*Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

2) (*Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

(Received 4 November 2013; revised manuscript received 27 November 2013)

Abstract

In single-shot, ultrafast time-resolved measurements, the combination of linear chirp pulse and spectrometer is a common way. In this paper, according to the time-frequency mapping relationship of linear chirp pulse and utilizing an imaging spectrometer as a recording system, we design a chirped pulse velocity interferometer for the ultrafast measurement of free surface velocity. Theoretical research on the principle and applicability shows that picosecond resolution is achievable and the velocity sensitivity is easily adjustable, which greatly widens applications of the velocity interferometer. The numerical simulation of the measurement process shows that reconstructed velocity signal is well consistent with the given velocity, further confirming the feasibility of the chirped pulse velocity interferometer.

Keywords: velocity interferometer system for any reflector, beat frequency interference, chirped pulse, time-resolved

PACS: 07.60.Ly, 42.15.Eq

DOI: [10.7498/aps.63.060703](https://doi.org/10.7498/aps.63.060703)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10902101).

† Corresponding author. E-mail: yqgu@caep.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: wangyx@hit.edu.cn