

脉冲啁啾干涉绝对距离测量中的时频分析

刘亭洋¹ 张福民^{1*} 吴翰钟¹ 曲兴华¹ 樊世超² 杨艳静² 高海洋²

¹天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

²中国空间技术研究院北京卫星环境工程研究所, 北京 100029

摘要 介绍了飞秒脉冲啁啾干涉测距的原理和典型的时频变换方法, 比较了这些方法对啁啾光谱干涉信号分析的影响, 研究了影响结果的因素, 并将这些方法用于处理啁啾光谱干涉的测距数据。通过实验比对发现, 相对于参考的 He-Ne 干涉仪数据, 这些时频变换方法的处理结果在 65 m 范围内的相对精度都优于 6×10^{-7} , 满足高精度处理要求, 其中 SPWV(smoothed pseudo Wigner-Ville)分布、连续小波变换(CWT)和 SCW(smoothed Choi-Williams)分布处理啁啾光谱数据性能较好, 获得了预期的结果。

关键词 测量; 脉冲啁啾干涉; 绝对距离测量; 时频分析; 光学信号处理

中图分类号 TH741; TB921; TN249; TN911.74

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0904005

Time-Frequency Analysis in Absolute Distance Measurement Using Chirped Pulse Interferometry

Liu Tingyang¹ Zhang Fumin¹ Wu Hanzhong¹ Qu Xinghua¹

Fan Shichao² Yang Yanjing² Gao Haiyang²

¹State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China

²Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100029, China

Abstract This paper introduces the principle of chirped femtosecond pulse interference ranging and typical time-frequency analysis methods, and the influences of these methods on the analysis of the chirped spectra interference signal are compared. The factors which can affect the results are studied, and these methods are used for processing the ranging data of chirped spectrum interference. The experiment comparison shows that the relative precisions of the time-frequency transform methods are all better than 6×10^{-7} in a range up to 65 m, with respect to the reference He-Ne interferometer data, which meets the high-precision processing requirements. Wherein smoothed pseudo Wigner-Ville distribution, continuous wavelet transform and smoothed Choi-Williams distribution perform better in processing chirped spectral data and get the expected results.

Key words measurement; chirped pulse interferometry; absolute distance measurement; time-frequency analysis; optical signal processing

OCIS codes 120.3180; 320.7160; 320.1590; 070.4790

1 引言

高精度、大尺度的绝对距离测量技术在科学研究和工业生产中都发挥着重要的作用^[1-2]。激光测距技术一直处于绝对距离测量领域的前沿, 稳定的光源是实现高精度测距的重要保障。光学频率梳(简称“光频梳”)具有频谱宽、脉宽窄、频率稳定度高等特点。在过去的十几年里, 光频梳的绝对距离测量被广泛关注, 科

收稿日期: 2016-03-18; **收到修改稿日期:** 2016-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(51105274, 51327006)、天津市科技兴海行动计划(KJXH201408)、天津市应用基础与前沿技术研究计划(15JCZDJC39300)

作者简介: 刘亭洋(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事测试计量技术及仪器等方面的研究。E-mail: liutingyang@tju.edu.cn

导师简介: 曲兴华(1956—), 男, 博士, 教授, 主要从事测试计量技术及仪器等方面的研究。E-mail: quxinghua@tju.edu.cn

* **通信联系人。** E-mail: zhangfumin@tju.edu.cn

学家们提出了许多方法,实现了大范围、高精度、快速的距离测量^[3-10]。

在绝对距离测量中,传统的光谱干涉法获得的干涉条纹中包含直流分量和稳定的正弦振荡分量,可以经过傅里叶变换(FT)、滤波处理和逆傅里叶变换解算出振荡分量中携带的被测距离信息^[11]。对于这种平稳的光谱干涉信号处理,FT 及其逆变换建立了信号频域与时域的映射关系,揭示了信号在频域的特征,所以 FT 可满足这类平稳信号的处理要求。然而,对于啁啾干涉光谱信号^[12],由于一路光脉冲经过介质啁啾,脉冲的中心频率发生偏移,假设为线性啁啾,则脉冲中心频率偏移量与脉冲飞行时间成正比,这样就会对啁啾干涉光谱信号的正弦振荡分量的相位产生调制,从而使信号的振荡频率随波长变化呈现出二次曲线的变化规律。因此,啁啾干涉光谱信号是属于多频率成分的非平稳信号,FT 无法对其进行全面分析。在本课题组以往的研究^[13]中,为了找到干涉条纹振荡频率最小的位置(光谱图中最宽条纹的中心位置),以求得被测距离,曾直接观察条纹波形判断其位置,但是这种方法不够科学和准确;所以就需要使用信号的时频分析方法,同时要保证较好的频率和时间分辨率。时频分析方法将一维时域信号映射到二维的时频平面,能够全面反映信号的时频特征。

普遍地,时频变换(TFT)已经被应用到多个领域,例如用于解释地球物理现象^[14],以及用于生理学响应^[15]和广播电视^[16-18]等领域。在过去的 20 年,时频变换的应用得到重要的发展。目前,这种新的、不断精细化的分析工具已经能给不同的使用者提供有益的帮助。

本文主要介绍了脉冲啁啾干涉测距原理和典型的时频分析方法,并运用时频分析方法对实验获得的啁啾干涉光谱信号进行分析,比较它们之间的区别,并寻找合适的分析方法。实验发现它们对测距数据处理结果与参考的 He-Ne 干涉仪的相比较,测距的相对精度都优于 6×10^{-7} ,满足高精度处理的要求,其中,smoothed pseudo Wigner-Ville (SPWV) 分布、连续小波变换变换(CWT)和 smoothed Choi-Williams (SCW)分布处理啁啾光谱数据性能较好。

2 脉冲啁啾干涉测距原理

基于脉冲啁啾的绝对距离测量原理示意图如图 1 所示。光频梳发出的脉冲序列被分束器(BS)分为两路,一路脉冲序列经过一对光栅调制,射向参考镜,作为参考光束;另一路射向目标镜,作为测量光束。经反射镜反射后,两路光束在分束器汇合,由光谱仪探测光谱干涉条纹。实验得到的脉冲啁啾光谱干涉条纹及其 FT 分别如图 2(a)和图 2(b)所示,可以看到,从图 2(b)中无法获得有用的信息。

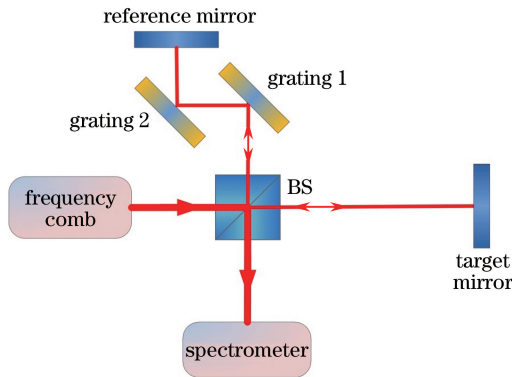


图 1 脉冲啁啾干涉实验原理示意图

Fig. 1 Schematic of chirped pulse interferometry experiment

在以往研究^[13]中已详细推导了脉冲啁啾干涉测距原理,被测距离 L 可以表示为

$$L = \frac{c_n}{4b}(\omega_b - \omega_c) = \frac{c_n \omega_{\text{shift}}}{4b}, \quad (1)$$

式中 b 为脉冲的中心频率啁啾系数, $b \approx \Delta\omega / (2\tau_{\text{chirp}})$, $\Delta\omega$ 为脉冲源的带宽, τ_{chirp} 为啁啾后的脉冲宽度。 c_n 为脉冲在空气中的群速度, ω_c 为光谱的中心频率, ω_b 为振荡条纹最宽处的频率。由 (1) 式可以看出,由脉冲啁啾引起的中心频率偏移量 $\omega_{\text{shift}} = 2\pi c (1/\lambda_b - 1/\lambda_c)$,即通过最宽条纹的移动量可以确定被测距离 L ,其中 c

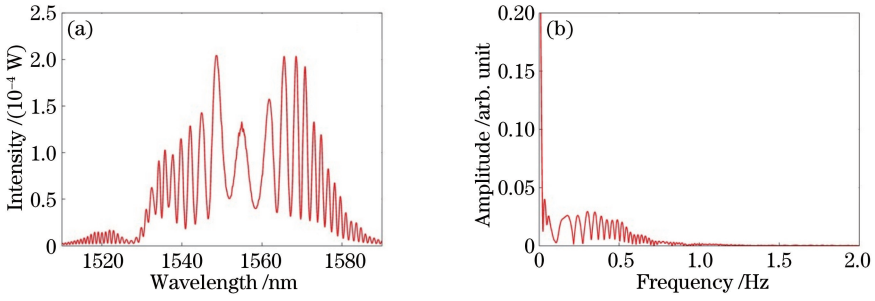


图 2 (a) 由色散型光谱仪获得的啁啾干涉光谱信号; (b) 啁啾干涉光谱信号的傅里叶变换
Fig. 2 (a) Chirped spectrum interference signal obtained by dispersive spectrometer;
(b) FT of chirped spectrum interference signal

为真空中的光速, λ_b 和 λ_c 分别为 ω_b 和 ω_c 所对应的波长。

3 时间频率变换

3.1 短时傅里叶变换

最具代表性的线性时频表示可以追溯至 Gabor^[19] 提出的短时傅里叶变换(STFT)。其基本思想是用一个在时间轴上滑动的窗口去分析信号的频率成分, 只对处在窗口里的信号做 FT。其定义如下:

$$F_{\text{STFT}}(t, \nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t')h(t'-t)\exp(-i2\pi\nu t') dt. \quad (2)$$

这种变换与 FT 不同之处在于对每一时刻的信号进行加窗处理, 再计算其 FT。也正是由于如此, 加窗带给 STFT 最显著的不足是限制了分辨率。一个短的时间窗口能得到较好的时间分辨率, 但是频域的不确定性增加了, 反之亦然。因此, STFT 在时间分辨率和频率分辨率之间有一个折中。由于 STFT 用固定窗口长度分析信号, 所以其时间、频率分辨率是固定的, 这样对于一个频率成分发生变化的信号, 不能很好地反映其特征。

3.2 CWT

20 世纪 80 年代出现了一种更加先进的 CWT, 基本思想是在一个零均值的函数族上对信号 $s(t)$ 进行分析处理, 这个函数族是由一个基函数(母小波)通过展缩和平移转化而来的。CWT 由下式给出:

$$F_{\text{CWT}}(t, a) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t')\Psi^*\left(\frac{t'-t}{a}\right) dt, \quad (3)$$

式中 Ψ 是一个短时振荡函数, 称为母小波, 其中 $a = v/v_0$ 为尺度因子, v_0 为母小波的中心频率^[20-21]。CWT 与 STFT 的基本区别在于: 当尺度因子 a 改变时, 小波的时宽和带宽均发生变化, 但其形状和大小却是相同的; 在低频时用宽窗, 在高频时用窄窗, 这样处理可以部分地避免 STFT 分析的不足, 但是会造成高频成分的频率分辨率变差^[22-23]。

3.3 Margenau-Hill-Spectrogram 时频分布

MHS (Margenau-Hill-Spectrogram) 时频分布^[24] 是 Margenau-Hill 时频分布^[25] 的改进, 可以表示为两个不同时间窗口长度的 STFT 乘积的实部:

$$F_{\text{MHS}}(t, \nu) = \text{Re} [F_{\text{STFT}_h}(t, \nu) \cdot F_{\text{STFT}_h}^*(t, \nu)], \quad (4)$$

式中的窗口长度可以独立选取, 能够充分保证较好的时频分辨率。此方法的缺点是当两个窗口长度差别较大以及信号包含相似的频率成分时, 会有伪迹产生。

3.4 Wigner-Ville 时频分布

最为常用的双线性时频变换是 WV (Wigner-Ville)^[26-27] 时频分布, 其定义如下:

$$F_{\text{WV}}(t, \nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} s\left(t + \frac{t'}{2}\right)s^*\left(t - \frac{t'}{2}\right)\exp(-i2\pi\nu t') dt'. \quad (5)$$

WV 时频分布具有许多较好的性质。任何信号的 WV 变换总是实数,并且满足时频边界条件^[28],即对 WV 时频分布沿频率轴积分得到信号的平方 $|s(t)|^2$,沿时间轴积分得到信号的频谱 $|S(\nu)|^2$ 。研究者之所以对 WV 时频分布感兴趣,是因为其具有很好的时频分辨率。然而,WV 时频分布最大的缺点是在分析多频率成分信号时会出现很强的交叉干涉项^[29-30]。

(5)式中的被积函数乘以两个时间窗口函数可以削弱干涉项的振荡,例如 SPWV 时频分布^[31]:

$$F_{\text{SPWV}}(t, \nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t') \int_{-\infty}^{+\infty} g(t'' - t) \times s\left(t'' + \frac{t'}{2}\right) s^*\left(t'' - \frac{t'}{2}\right) \exp(-i2\pi\nu t') dt' dt'' \quad (6)$$

3.5 Choi-Williams 时频分布

Cohen 类中还有另一个常用的变换:CW (Choi-Williams)时频分布^[32],其定义如下:

$$F_{\text{CW}}(t, \nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sqrt{\alpha}}{\sqrt{4\pi|t''|}} \exp\left[-\frac{t'^2\alpha}{(4t'')^2}\right] \times s\left(t + t' + \frac{t''}{2}\right) s^*\left(t + t' - \frac{t''}{2}\right) \exp(-i2\pi\nu t') dt' dt'' \quad (7)$$

CW 分布的性质取决于参数 α ,当 $\alpha \rightarrow \infty$ 时得到 WV 分布;相反地, α 越小,干涉项的衰减就越大。尽管 CW 分布能获得较好的频率分辨率,但是如果信号是由在时间上同步的多个频率成分构成的,则其 CW 分布会在不同频率成分之间出现很强的干涉项,在纵轴方向出现变形。为了克服这一限制,可以借鉴 SPWV 的方法,对(7)式的被积函数乘以两个时间窗函数,得到 SCW 分布:

$$F_{\text{SCW}}(t, \nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t'') \int_{-\infty}^{+\infty} g(t') \frac{\sqrt{\alpha}}{\sqrt{4\pi|t''|}} \exp\left[-\frac{t'^2\alpha}{(4t'')^2}\right] \times s\left(t + t' + \frac{t''}{2}\right) s^*\left(t + t' - \frac{t''}{2}\right) \exp(-i2\pi\nu t'') dt' dt'' \quad (8)$$

4 实 验

4.1 实验装置

实验装置如图 3 所示。光频梳发出的脉冲经过准直器后进入迈克耳孙干涉结构,被分束器分为两束光,一束经过一对光栅调制作为参考光,其中光栅间距为 3 cm,参考光束入射角设置为 28° ,展宽后的脉宽约为 893 fs;另一束射向目标镜,作为测量光。两束光经反射后在分束器处相遇,相互作用,最终由色散型光谱仪(型号:YOKOGAWA AQ6370D-20)探测并显示。实验使用的飞秒激光器型号为 Onefive Origami-15 (250.012 MHz, 80 mW),激光器的脉宽为 71 fs,中心波长为 1560 nm,带宽约为 55 nm,其光谱如图 4 所示。使用增量式测距仪(型号:Agilent 5519B)来验证测距结果。系统中的测量光束和作为参考的 He-Ne 激光器的光束要严格地平行。

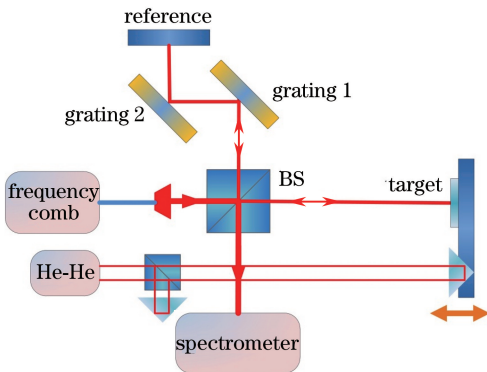


图 3 实验装置框图

Fig. 3 Schematic of experimental setup

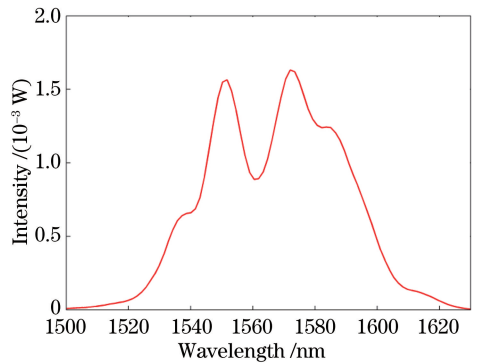


图 4 Onefive Origami-15 脉冲激光器光谱图

Fig. 4 Spectrum map of Onefive Origami-15 pulse laser

4.2 实验结果比较

上面介绍了多种时频变换方法,为了有一个直观的理解,本文将这些方法用在实验获得的啁啾干涉光谱信号的分析中。理论上,啁啾干涉光谱信号模型的交流部分携带被测距离的信息。分析干涉条纹振荡频率

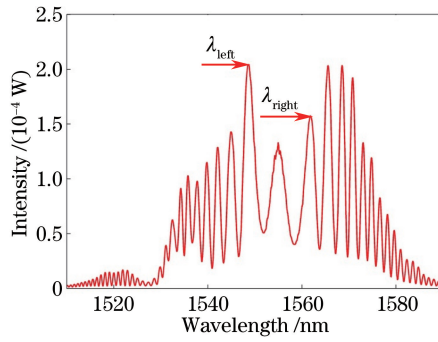


图 5 直接确定最宽条纹位置

Fig. 5 Direct determination of the widest stripe's position

的变化趋势,寻找频率最小值的位置,可以精确地计算出被测距离。在以往的研究中^[13,33],只是简单地读取紧邻最宽条纹两侧的两个波峰的位置,分别用 λ_{left} 和 λ_{right} 表示,如图 5 所示,则最宽条纹的位置 $\lambda_{widest} = (\lambda_{left} + \lambda_{right})/2$ 。这种方法不够科学,引入的随机误差比较大。所以,下文中采用时频变换的方法计算被测距离,并对不同变换方法的计算结果进行对比。

影响时频变换的潜在因素有:1)被分析信号的特征,不同的时频变换对包含不同频率成分的信号适用程度不同,而且抵抗噪声的能力也不尽相同;2)时频变换中时间窗函数 $g(t)$ 和 $h(t)$ 的选择影响也比较大;3)窗函数 $g(t)$ 和 $h(t)$ 参数的选取。若要全面研究这些影响因素,不是一项简单的工作,本文关注的是哪些时频变换适用于啁啾干涉光谱信号的分析,并通过实验比较得到适用效果最好的分析方法。但是,可以简单分析一下基于不同的时频变换得到的时频谱时间分辨率以及时频聚焦特性。对于 STFT,选定窗函数 $h(t)$ 之后,其时宽和频宽也就确定了,且满足下面的不等式^[21]:

$$\Delta t \times \Delta f \geq \frac{1}{4\pi}, \quad (9)$$

式中 Δt 、 Δf 分别为时间分辨率和频率分辨率,这就是不确定性原理,所有的时频表示都遵守这个原理。假设此时窗函数 $h(t)$ 的中心为 $E\{h(t)\}$,半径为 $\Delta t/2$,则 STFT 得到时窗 $[E\{h\} + t - \Delta t/2, E\{h\} + t + \Delta t/2]$ 和频窗 $[E\{H\} + f - \Delta f/2, E\{H\} + f + \Delta f/2]$ 中信号的局部信息。且此时频窗是与时间 t 和频域 f 无关的矩形,具有固定面积 $\Delta t \times \Delta f$,所以时频窗的形状和面积可以表征 STFT 的时频分析能力;当形状固定时,窗口面积越小,时频局部化描述能力越强,反之亦然。对于 CWT 中的基函数也可以看作窗函数,但时间宽度是随尺度因子 a 变换而变化,所以 CWT 具有时间局部分析能力,但其形状和大小并不改变,所以时频分析能力不变化。

对于双线性时频变换可以用下面的通式表示:

$$P(t, v) = \iint_{-\infty}^{\infty} \varphi(t' - t, t'') s(t + t''/2) s^*(t - t''/2) \exp(-j2\pi t'v) dt' dt'', \quad (10)$$

式中 $\varphi(t', t'')$ 为窗函数。众多时频分布只是 WV 分布的变形^[31],由于 WV 分布不含有任何窗函数,因此避免了 STFT 中时间分辨率与频率分辨率相互牵制的矛盾,其时间带宽积达到了测不准原理给出的下界;但是, WV 分布存在较强的交叉项,往往需要加窗函数进行抑制,这就使其时频聚焦性变差。

对实验得到的信号,滤除直流成分后,使用不同的时频变换进行分析比较。为了保证比较的结果有意义,对采用的时频变换中的时间窗函数都选择高斯函数,而且窗口长度保持一致,实验结果如图 6 所示,图中可以看出不同变换方法的优点和缺点。CWT 的结果[图 6(a)]显示,频率分辨率变化情况与理论分析一致,即高频部分频率分辨率差。STFT 结果[图 6(b)]的时间分辨率较差,且和 CWT 结果在时间轴上有相似的伪迹,这可能是由窗函数截断造成的畸变引起的。MHS 分布[图 6(c)]、SPWV 分布[图 6(d)] 和 SCW 分布[图 6(e)]的 $g(t)$ 和 $h(t)$ 函数均为高斯窗函数,长度分别为 301 点(4.800 nm)和 971 点(15.523 nm),对应的频率分辨率分别为 0.208 Hz 和 0.064 Hz;这三种分布的结果都具有较好的时频聚焦性,即时间轴和频率轴的分辨率都比较好,尤其是 SPWV 的结果和 SCW 的结果。然而,SCW 的结果在垂直方向上显示出较多的伪迹。

对时频变换后的二维平面,提取时频曲线的轨迹,得到频率随波长变化的曲线,如图 7 所示。从图 7 可以看出,曲线呈反抛物线形,对数据进行适当的平滑后,再对其求导,导数为零的位置即为最小频率的位置。

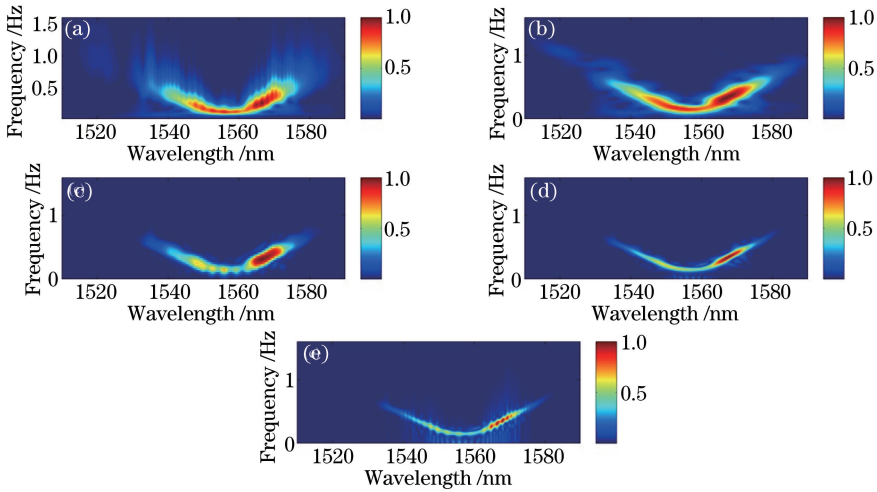


图 6 不同时频变换对同一个啁啾光谱干涉信号的分析结果比较。

(a)CWT,母小波为复 Gaussian 函数;(b)STFT,高斯窗函数,长度 971 点;(c) MHS;(d) SPWV;(e) SCW

Fig. 6 Comparison of different TFTs analysis results on the same chirped spectrum interference signal.

(a) CWT, the mother wavelet is complex Gaussian function; (b) STFT, Gaussian window function, length of 971 points;

(c) MHS; (d) SPWV; (e) SCW

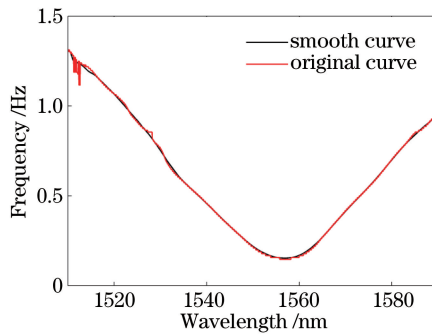


图 7 频率随波长的变化曲线

Fig. 7 Curves of the frequency changing with variation of wavelength

为了得到每太赫兹代表的位移量,需要对测距系统进行标定^[13]。绝对距离的计算公式为

$$L = \frac{1}{2} \cdot (N \cdot L_{pp} + f_{\text{shift}} \cdot L_{p\text{THz}}), \quad (11)$$

式中 L_{pp} 为脉冲间距, $L_{pp} = c_n / f_{\text{rep}}$, N 为 L_{pp} 的个数; f_{shift} 为最宽条纹的频率偏移, $f_{\text{shift}} = c(1/\lambda_b - 1/\lambda_a)$, λ_b 为最小频率对应的波长, λ_a 为参考位置处最小频率对应的波长; $L_{p\text{THz}}$ 为每太赫兹代表的位移量。

在长距离测量实验中,实验环境比较稳定,温度为 22.4 °C,气压为 1004.7 hPa,湿度为 48.1%。基于 Ciddor 方程^[34] 计算得到的环境中的群折射率为 1.0002649。目标镜每移动 3 m,重复测量该位置处的干涉条纹 10 次。在距离为 1.8 m 和 64.7 m 处的光谱干涉条纹分别如图 8(a)和图 8(b)所示。从图 8 中可以观察到明显的光谱噪声,这是由于在大范围实验中导轨的振动和空气的扰动影响显著。同时发现光谱的强度和干涉条纹的调制深度都随着距离的增加而减小。使用不同时频变换对实验得到的啁啾干涉测距数据进行计算,将得到的测距结果与参考 He-Ne 干涉仪数据比对,得到它们的偏差和标准差,实验结果如图 9 所示。从图 9 可以看出,在 65 m 范围内所有时频变换结果的相对精度都优于 6×10^{-7} ,满足高精度处理要求;随着被测距离增加,偏差和标准差都有增大的趋势,但是不同的时频变换计算结果显著不同,并具有各自的特点。接下来对这些结果进行定量分析。

不同时频变换的计算结果的偏差比较如图 10(a)所示,可以看到所有结果的变化趋势相似,数值范围十分接近,说明从偏差方面难以判断出不同时频变换的表现差异。不同时频变换的计算结果的标准差比较如

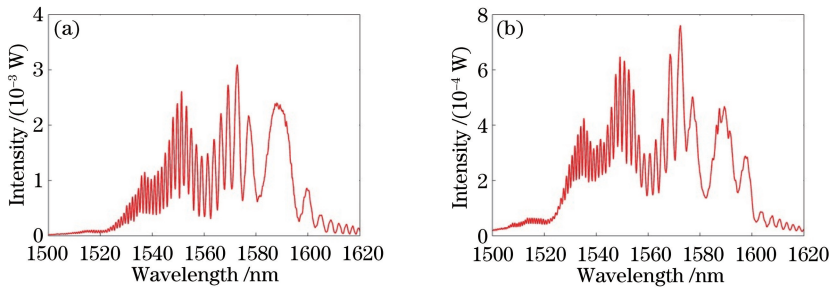


图 8 (a)1.8 m 处和(b)64.7 m 处的光谱

Fig. 8 Spectrogram at (a) 1.8 m and (b) 64.7 m

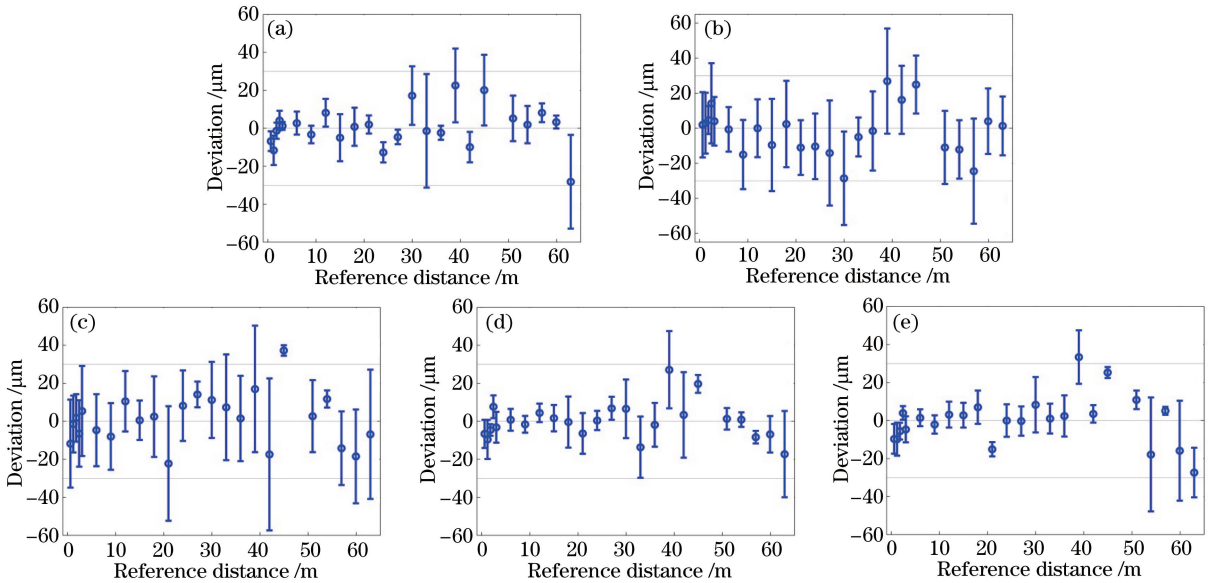


图 9 对同一组测距数据应用不同的时频变换计算结果与参考的 He-Ne 干涉仪比较。

(a) CWT; (b) STFT; (c) MHS; (d) SPWV; (e) SCW

Fig. 9 Results of different TFTs calculation on the same set of distance measurement data compared with the reference He-Ne interferometer. (a) CWT; (b) STFT; (c) MHS; (d) SPWV; (e) SCW

图 10(b)所示,可以看出,在 30 m 范围内,STFT 和 MHS 的计算结果的标准差分布在 $10 \sim 30 \mu\text{m}$ 范围内,另外三种方法的计算结果的标准差分布在 $2 \sim 12 \mu\text{m}$ 范围内,说明 STFT 和 MHS 数据处理的精确度比较低,这与其时频变换的频率分辨率较差有关。其余三个变换的结果比较好,在 30 m 范围内计算结果的标准差低于 $12 \mu\text{m}$,这是由于 SPWV 和 SCW 分布具有较好的时频聚焦性,以及 CWT 变换的低频分辨率比较好。其中,SPWV 计算结果的偏差和标准差相对较小,相对精度达到 3.8×10^{-7} ,数值波动也相对较小,如图 9(d)所示,说明其数据处理性能表现最好。

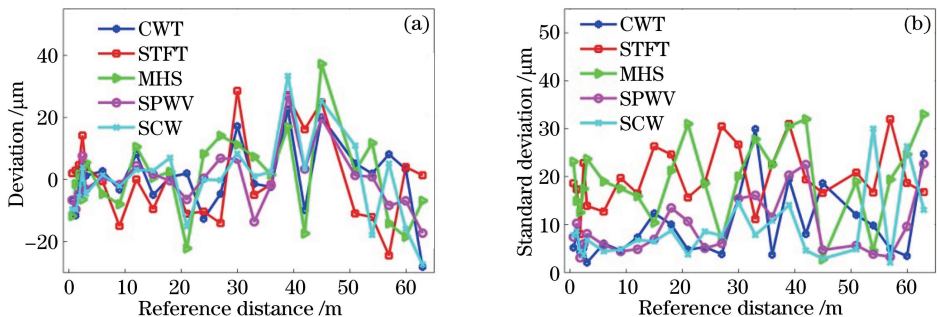


图 10 不同的时频变换计算结果的(a)偏差和(b)标准差比较

Fig. 10 Comparisons of (a) deviation and (b) standard deviation of different TFTs calculation results

4.3 影响时频变换的因素：窗函数和噪声

为了验证不同窗函数选择对时频变换分析结果的影响,下面对 STFT 进行分析,采用时频分析中常用的窗函数,重复运算,进行实验,STFT 运算的结果如图 11 所示。从图 11 可以看到,除了矩形窗会产生边缘震荡效应外[图 11(c)],所有窗函数的变换结果都相似。窗函数形状选择应考虑以下几点:主瓣宽度要小,最大旁瓣峰值要小,旁瓣峰值衰减速度要大。考虑到变换结果对窗函数的依赖度不高,所以经常采用高斯函数^[35]。

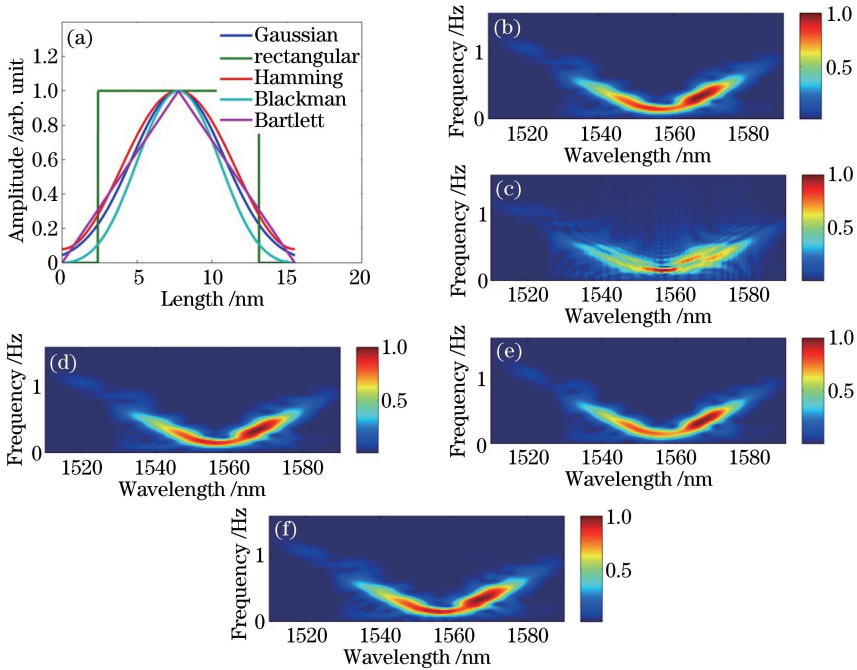


图 11 (a) STFT 分析所用的窗函数以及不同窗函数对信号进行 STFT 分析的结果。

(b) 高斯窗;(c)矩形窗;(d) Hamming 窗;(e) Blackman 窗;(f) Bartlett 窗

Fig. 11 (a) Different window functions of STFT analysis and the results of STFT analysis by different window functions.

(b) Gaussian window; (c) rectangular window; (d) Hamming window; (e) Blackman window; (f) Bartlett window

在实际测量中,因为采集的信号可能会受到大量噪声的影响,所以需要测试不同时频变换抵抗噪声的能力。由于实验中获得啁啾干涉光谱信号的信噪比较高,为了比较不同信噪比对实验结果的影响,在实验数据中人为地加入高斯白噪声。计算了信噪比分别为 20 dB、10 dB、-1 dB 的掺噪信号对不同时频变换的影响,结果发现,对于这一实验,加入噪声的信噪比不能低于 -10 dB,否则原信号会被噪声湮没。对图 6 所用的信号加入信噪比为 -1 dB 的高斯白噪声,分析结果如图 12 所示。

由于噪声的影响,所有变换的结果都有所变差。当噪声强度增加时,沿频率维度的伪迹数量增加,导致虚假的散杂信号出现,如图 12(c)所示。由图 12 可以看出,CWT[图 12(b)]和 STFT[图 12(c)]抵抗噪声的能力不强,尤其是和其余三种变换比较。其中,SPWV 分布[图 12(e)]和 MHS 分布[图 12(d)]在相对强度较高的噪声中,变换结果也比较好,这与其平滑窗口长度选择有关,窗口较长,平滑效果好。

5 结 论

传统的光频梳光谱干涉条纹是稳定振荡的,而啁啾光谱干涉条纹的振荡频率是变化的,常规的 FT 无法对后者进行全面分析。时频分析方法可以同时获得信号的时域和频域信息,所以可以用来分析啁啾光谱干涉信号。介绍了脉冲啁啾干涉测距的原理和几种时频变换方法,比较了这些方法对啁啾光谱干涉信号分析的性能,研究了影响分析结果的因素,并将这些方法用于处理啁啾光谱干涉的测距数据。通过实验验证发现,相对于参考的 He-Ne 干涉仪数据,这些时频变换方法的处理结果在 65 m 范围内相对精度都优于 6×10^{-7} ,满足高精度处理要求,其中 SPWV 分布、CWT 和 SCW 分布处理啁啾光谱数据效果较好,获得了

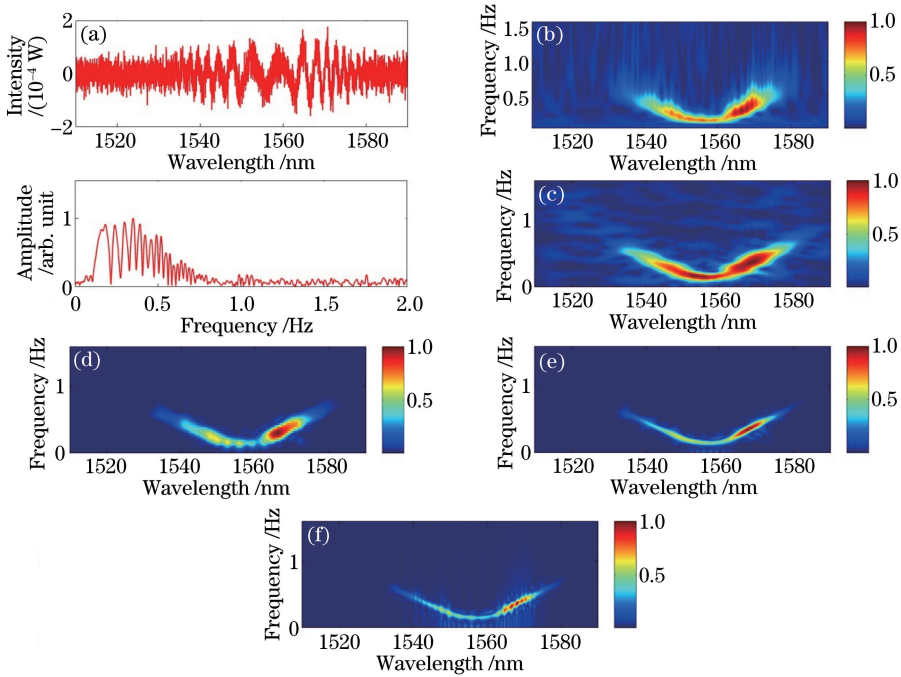


图 12 信噪比为 -1 dB 的噪声对不同的时频变换分析结果的影响。

(a) 被分析信号在时域和频域表示; (b) CWT; (c) STFT; (d) MHS; (e) SPWV; (f) SCW

Fig. 12 Influence of noise with the signal-to-noise ratio of -1 dB on different TFTs analysis results. (a) Representations of the tested signal in time domain and frequency domain respectively; (b) CWT; (c) STFT; (d) MHS; (e) SPWV; (f) SCW

预期的结果,为今后基于脉冲啁啾干涉测距系统的数据处理奠定了基础。研究还发现,一方面这些分析方法可以获得丰富的时频信息;另一方面,这些方法理所当然地受到时频测不准原理的限制,因此特别容易产生伪迹,从而与信号的真实特征混淆。为了区分开伪迹和实际信号,要根据特定的输入信号和预期的输出结果选择适当的时频变换及其参数。

参 考 文 献

- 1 Qu Xinghua, Dai Jianfang, Zhang Fumin. Application study on laser ranging in large-scale measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(3): 481-485.
曲兴华, 戴建芳, 张福民. 基于激光测距的大尺寸测量应用研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(3): 481-485.
- 2 Wang Guochao, Yan Shuhua, Yang Jun, *et al.* Theoretical modeling analysis for precise space ranging based on cross-correlation of femtosecond optical frequency comb[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0412002.
王国超, 颜树华, 杨俊, 等. 基于飞秒光梳互相关的空间精密测距理论模型分析[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0412002.
- 3 Ye J. Absolute measurement of a long, arbitrary distance to less than an optical fringe[J]. Optics Letters, 2004, 29(10): 1153-1155.
- 4 Wei D, Takahashi S, Takamasu K, *et al.* Time-of-flight method using multiple pulse train interference as a time recorder [J]. Optical Express, 2011, 19(6): 4881-4889.
- 5 Wu H, Zhang F, Li J, *et al.* Intensity evaluation using a femtosecond pulse laser for absolute distance measurement[J]. Applied Optics, 2015, 54(17): 5581-5590.
- 6 Matsumoto H, Wang X, Takamasu K, *et al.* Absolute measurement of baselines up to 403 m using heterodyne temporal coherence interferometer with optical frequency comb[J]. Applied Physics Express, 2012, 5(4): 046601.
- 7 Joo K N, Kim S W. Absolute distance measurement by dispersive interferometry using a femtosecond pulse laser[J]. Optical Express, 2006, 14(13): 5954-5960.
- 8 Wang Guochao, Wei Chunhua, Yan Shuhua. Wavelength selection and non-ambiguity range analysis for optical-comb-referenced multi-wavelength absolute distance measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0412002.
王国超, 魏春华, 颜树华. 光梳多波长绝对测距的波长选择及非模糊度量程分析[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0412002.

- 9 Cui M, Zeitouny M G, Bhattacharya N, *et al.* High-accuracy long-distance measurements in air with a frequency comb laser[J]. *Optics letters*, 2009, 34(13): 1982-1984.
- 10 Xu Yan, Zhou Weihu, Liu Deming. Numerical experiment and analysis of cross-correlation between pulses of femtosecond laser sequence[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(11): 1108002.
许 艳, 周维虎, 刘德明. 飞秒激光脉冲序列互相关的数值模型与分析[J]. *中国激光*, 2011, 38(11): 1108002.
- 11 An Weining, Zhang Fumin, Wu Hanzhong, *et al.* Absolute distance measurement method based on frequency-domain interference using a femtosecond optical frequency comb[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(11): 2458-2465.
安慰宁, 张福民, 吴翰钟, 等. 一种基于飞秒光频梳频域干涉的绝对测距方法[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(11): 2458-2465.
- 12 Wu Hanzhong, Cao Shiyang, Zhang Fumin, *et al.* Spectral interferometry based absolute distance measurement using frequency comb[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(2): 020601.
吴翰钟, 曹士英, 张福民, 等. 光学频率梳基于光谱干涉实现绝对距离测量[J]. *物理学报*, 2015, 64(2): 020601.
- 13 Liu Tingyang, Zhang Fumin, Wu Hanzhong, *et al.* Absolute distance ranging by means of chirped pulse interferometry [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(2): 020601.
刘亭洋, 张福民, 吴翰钟, 等. 光学频率梳啁啾干涉实现绝对距离测量[J]. *物理学报*, 2016, 65(2): 020601.
- 14 Wu X Y, Liu T Y. Spectral decomposition of seismic data with reassigned smoothed pseudo Wigner-Ville distribution[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2009, 68(3): 386-393.
- 15 de Souza N E P, Custaud M A, Frutoso J, *et al.* Smoothed pseudo Wigner-Ville distribution as an alternative to Fourier transform in rats[J]. *Autonomic Neuroscience Basic & Clinical*, 2001, 87(2): 258-267.
- 16 Karlheinz G. Foundations of time-frequency analysis[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2001.
- 17 Tan J L, Bin Sha'ameri A Z. Signal analysis and classification of digital communication signals using adaptive smooth-windowed Wigner-Ville distribution[C]. *Telecommunication Technologies 2008 and 2008 2nd Malaysia Conference on Photonics*, 2008: 260-266.
- 18 Yang Mengling, Su Xinyan, Wang Jian, *et al.* A method of automatic extraction of effective signal of target in interior ballistics[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(9): 092802.
杨梦玲, 苏新彦, 王 鉴, 等. 膛内目标有效信号自动提取方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(9): 092802.
- 19 Gabor D. Theory of communication[J]. *Journal of the IEEE*, 1946, 93: 429-457.
- 20 Prior J, Castro E, Chin A W, *et al.* Wavelet analysis of molecular dynamics: efficient extraction of time-frequency information in ultrafast optical processes[J]. *Journal of Chemical Physics*, 2013, 139(22): 224103.
- 21 Ge Zhexue, Chen Zhongsheng. Matlab time-frequency analysis technology and its application[M]. Beijing: People's Posts & Telecom Press, 2006: 9-15.
葛哲学, 陈仲生. Matlab 时频分析技术及其应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006: 9-15.
- 22 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.
- 23 Wang Yuangan, Yu Honglin, Huang Liangming. Grating signal quality assessment based on wavelet analysis[J]. *Chinese J Lasers*, 2005, 32(3): 336-340.
王远干, 喻洪麟, 黄良明. 基于小波分析的光栅信号质量评估方法[J]. *中国激光*, 2005, 32(3): 336-340.
- 24 Hippenstiel R D, De Oliveira P M. Time-varying spectral estimation using the instantaneous power spectrum (IPS)[J]. *IEEE Transactions Acoustics Speech & Signal Processing*, 1990, 38(10): 1752-1759.
- 25 Margenau H, Hill R N. Correlation between measurements in quantum theory[J]. *Progress of Theoretical Physics*, 1961, 26(5): 722-738.
- 26 Wigner E. On the quantum correction for thermodynamic equilibrium[J]. *Physics Review*, 1932, 40(5): 749-759.
- 27 Ville J. Théorie et applications de la notion de signal analytique[J]. *Cables et Transmission*, 1948, 2(1): 61-74.
- 28 Cohen L. Time-frequency distributions—a review[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1989, 77(7): 941-981.
- 29 Cohen L. Generalized phase-space distribution functions[J]. *J Mathematical Physics*, 1966, 7(5): 781-786.
- 30 Bai Xue, Guo Pan, Chen Siying, *et al.* Simulation in the time domain and time-frequency analysis for coherent Doppler wind lidar[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(1): 114003.
白雪, 郭 磐, 陈思颖, 等. 相干多普勒测风激光雷达时域信号仿真及时频分析[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 114003.

- 31 Claasen T, Mecklenbrauker W. The Wigner distribution-A tool for time-frequency signal analysis[J]. Philips Journal of Research, 1980, 35: 217-250.
- 32 Choi H I, Wolliams W J. Improved time-frequency representation of multicomponent signals using exponential kernels [J]. IEEE Transactions Acoustics Speech & Signal Processing, 1989, 37(6): 862-871.
- 33 Wu H, Zhang F, Liu T, *et al.* Absolute distance measurement by chirped pulse interferometry using a femtosecond pulse laser[J]. Optical Express, 2015, 23(24): 31582-31593.
- 34 Ciddor P E. Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared[J]. Applied Optics, 1996, 35(9): 1566-1573.
- 35 Qian S, Chen D. Joint time-frequency analysis[J]. IEEE Signal Process Magazine, 1999, 16(2): 52-67.