

光学元件群延迟的直接测量*

邓玉强[†] 孙青 于靖

(中国计量科学研究院光学所, 北京 100013)

(2010年1月4日收到; 2010年5月8日收到修改稿)

提出了一种测量群延迟的新方法, 利用白光干涉仪产生的光谱干涉, 通过时间频率联合分析直接得出群延迟, 减小了传统相位差分方法产生的误差, 并通过测量结果减去系统背景, 进一步提高了光学元件色散测量的准确度. 该方法适合于具有复杂色散光学元件群延迟和色散的准确测量, 也适合于慢光器件群速度延迟的测量.

关键词: 色散测量, 白光干涉, 时间频率分析, 超快激光

PACS: 81.05. Ni, 07.60. Ly, 43.60. Hj

1. 引言

色散是光辐射的一个基本参数, 也是光学材料和光学器件本身固有的一种特性, 任何的光学材料和光学器件都有色散. 色散在超短脉冲的产生、控制和传播等各个过程中都发挥着重要的作用. 不同的波长成分的单色辐射通过传输介质后产生不同程度的时间延迟, 导致超短脉冲的时域波形发生变化. 色散引起脉冲产生啁啾, 超短脉冲的产生过程就是色散的控制和补偿过程. 因此, 光学器件色散特性的测量在超短脉冲激光器的设计, 以及超短脉冲激光的产生、传输、控制、应用和测量等各个过程中都具有重要的作用.

白光干涉仪是一种简单、直接而有效的色散测量仪器, 它将入射光分为两束, 一束作为参考光束, 另一束作为测试光束载有被测光学元件的相位信息^[1, 2]. 两束光在时域或频域发生干涉, 用示波器或光谱仪接收干涉信号, 从干涉信号中可以解析出干涉相位, 通过相位差分而得到色散. 白光时域干涉测量需要振动位移平台和对位移平台的行程标定, 位移平台的非线性给测量结果带来误差, 并且也很难达到较高的光谱分辨率. 而白光频域干涉测量不需要移动部件, 具有结构简单、测量准确、光谱分辨率高等优点, 从而取代时域干涉被用于色散参数的测量和评价^[2].

传统的色散测量方法从光谱干涉中提取干涉相位, 对相位作一次差分得到群延迟、再作一次差分(即相位的二次差分)得到群延迟色散^[2, 3]. 然而, 相位的噪声会导致差分产生很大的振荡和误差, 而色散要由二次差分得到, 相位噪声引起的差分误差往往淹没了色散的真实值, 导致色散难以分辨. 为了减小噪声引起的差分振荡, 通常采用的方法是先对提取的光谱相位作曲线拟合, 然后再作差分处理^[2, 3]. 对于群色散变化有规律的光学元件, 可以通过高阶多项式曲线拟合减小差分噪声. 然而对于色散复杂、变化无规律的光学元件, 如啁啾镜、光纤等, 因其相位变化没有规律性, 任何阶次的多项式曲线拟合都将产生错误的结果. 因此, 迫切需要一种直接测量高阶相位的方法, 如直接测量群延迟或直接测量群色散, 减小差分次数以降低群色散的测量误差.

目前直接测量群延迟时间的方法是用微位移平台扫描, 记录下每一个平衡波长点对应的延迟时间而直接得到群延迟^[4]. 该方法需要测量的数据量大、花费时间长, 结果准确度也受到平移台位移非线性影响, 且精确的平衡波长点难以从光谱干涉中准确判别. 本文提出了一种直接提取群延迟的方法, 将色散的测量由二次差分减为一次, 大大减小了差分引入的噪声, 提高了群色散测量的准确性. 同时该方法不需要移动的光学部件, 具有仪器结构简单、计算过程简捷、结果快速准确等优点.

* 国家科技支撑计划(批准号:2006BAF06B05)和中国计量科学研究院基本科研业务费(批准号:AKY0904, AKY0748)资助的课题.

[†] E-mail: yqdeng@nim.ac.cn.

2. 理论分析

白光干涉仪将入射光分为两束,一束作为参考光束,另一束作为测试光束载有被测光学元件的相位信息 $\varphi(\omega)$. 其中,光谱干涉的相位 $\varphi(\omega)$ 可以表示为

$$\varphi(\omega) = \omega \cdot t(\omega), \quad (1)$$

式中, ω 是光学角频率, $t(\omega)$ 是光谱干涉在角频率 ω 处的局域干涉周期. 由(1)式,根据群延迟是光谱相位 $\varphi(\omega)$ 对角频率 ω 的一次差分可知, $t(\omega)$ 即为群延迟对角频率的函数,因此有

$$GD = \frac{d\varphi(\omega)}{d\omega} = t(\omega). \quad (2)$$

由(2)式可知,光学器件的群延迟就是光谱干涉在角频率 ω 处的局域干涉周期. 因此,可以通过直接测量光谱干涉的局域干涉周期而直接得到群延迟.

小波变换作为时间频率分析的工具,可以对干涉信号作联合时间频率分析,因此具有 Fourier 变换无可比拟的优势^[5-9]. Fourier 变换是一维的时间频率变换,只能将频域干涉信号的时间信息显示在一个时间轴上,不能分辨出不同频率位置处的局域干涉周期信息. 而小波变换是二维的时间频率联合分析,通过小波函数的平移和伸缩,可以得到频域干涉信号每一频率位置处的局域周期信息^[5-9]. 光谱干涉的局域周期反映在小波变换的脊处,因此光谱干涉的小波变换的脊的位置反映了群延迟和角频率的对应关系,可以通过提取小波变换的脊而直接得到光学元件的群延迟^[10, 11].

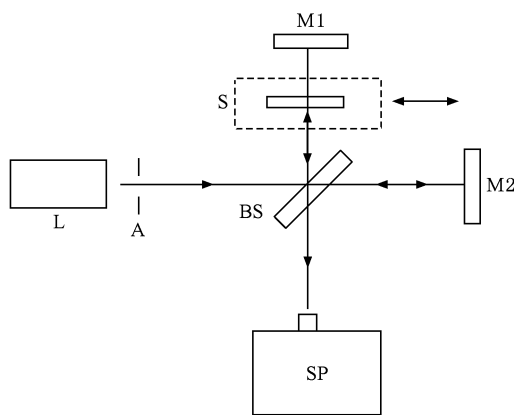


图1 白光干涉仪光路图 L为金属卤素灯,A为小孔光阑,BS为分束镜,M1、M2为银镜,SP为光谱仪,S为测试样品

3. 测量实例

实验搭建的白光干涉仪如图1所示,用分束镜将金属卤素灯发出的白光分为两束,再分别用两个反射镜使透射光和反射光原路返回. 当干涉仪的两臂接近等光程时,可在干涉仪透射光和反射光合束的位置处用光谱仪接收到频域干涉信号. 测量光学元件色散时,可将样品放于干涉仪的一臂.

将一片厚度为 3.9 mm 的熔石英放入白光干涉仪的一臂,调节干涉仪的两臂至等光程附近,测得载有熔石英色散的白光光谱干涉,如图2所示. 分别用提出的直接提取小波变换脊的方法和相位差分的方法求解群延迟.

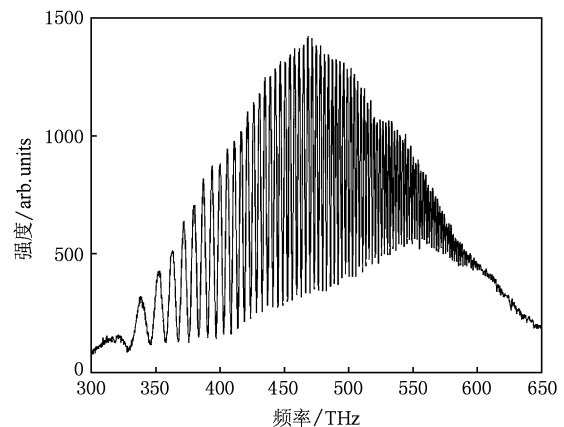


图2 测量的熔石英的白光光谱干涉

对图2测得的光谱干涉作小波变换,得到的二维时间频率分布图如图3(a)所示. 选取图3(a)中每一频率列的极大值,即小波变换的“脊”^[12],得到的在每一频率点出的局域时间周期如图3(b)所示.

由图3(b)可以看出,从小波变换的强度图中直接提取“脊”而得到的群延迟计算过程简单,不需要计算相位和对相位差分;同时,直接提取群延迟避免了差分导致的误差,得到的是一条光滑的曲线.

如果用传统的相位求导的方法计算群延迟,先将光谱干涉作 Fourier 变换或小波变换,从 Fourier 变换的伪时域中通过选择合适的滤波窗口,滤除交流分量,然后将滤除的交流分量作 Fourier 反变换,而得到光谱干涉的光谱相位,或者提取小波变换的脊上地相位信息而得到光谱干涉的光谱相位. 然后在对相位作差分,差分得到的群延迟如图4所示.

图4可以看出,相位差分得到的群延迟因为受

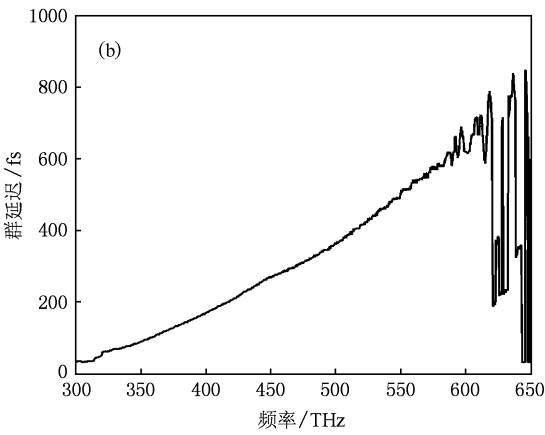
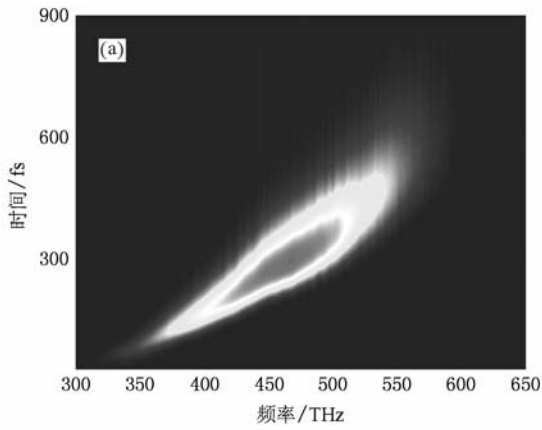


图3 提取小波变换的脊直接得到的群延迟 (a)光谱干涉的小波变换,(b)小波变换的脊

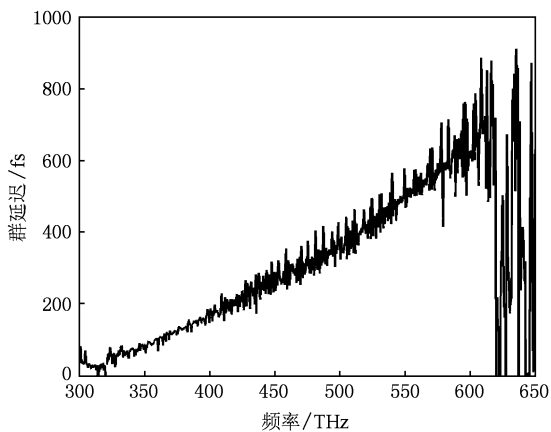


图4 相位差分得到的群延迟

到相位噪声的影响,使差分产生大量的噪声. 可见,传统的相位差分求解群延迟不仅过程复杂,而且结果受噪声干扰很大,群延迟几乎被噪声淹没. 而色散要由二次差分才能得到,如此大的噪声以至于不能分辨出再次差分得到的色散值.

而直接提取群延迟的方法可以得到准确的群延迟结果,受噪声干扰很小,因此可以经过一次差分而得到色散. 在不同的平衡波长点处,实验测量了5组熔石英的白光光谱干涉,用小波变换从光谱干涉中直接提取的群延迟结果如图5(a)所示,因为群延迟是一个相对的量,从图5(a)中可以看出5组结果具有一致的变换趋势,可见对于不同的平衡波长点测量的结果能够很好的符合. 对得到的群延迟作一次差分,得到熔石英的色散,如图5(b)所示. 从图5(b)中可以看出,从5组干涉中得到的熔石英色散值能够精确的符合,证明了直接提取群延迟的方法具有很好的一致性,且受噪声干扰很小.

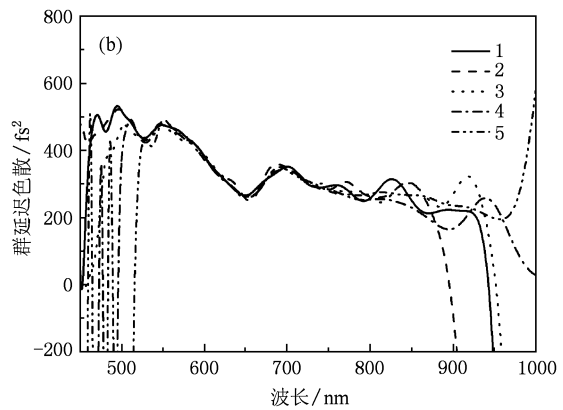
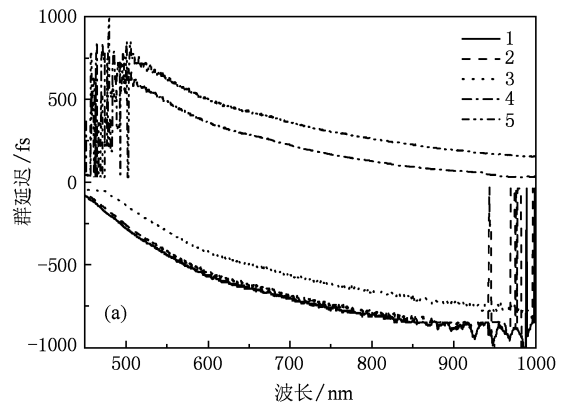


图5 从5组光谱干涉中提取得群延迟和群延迟色散 (a)群延迟,(b)群延迟色散

为了消除系统误差的影响,得到更精确的色散结果,实验测量了干涉仪两臂都没有石英片的白光光谱干涉,从中计算出无光学元件的色散值作为背景. 从测量的3组干涉中得到的背景色散如图6(a)所示. 干涉仪的背景色散是由镜引起的. 在干涉仪中反射光在分束镜前表面膜层被反射,然后再原路返回透过分束镜,这样只经过分束镜基体介质

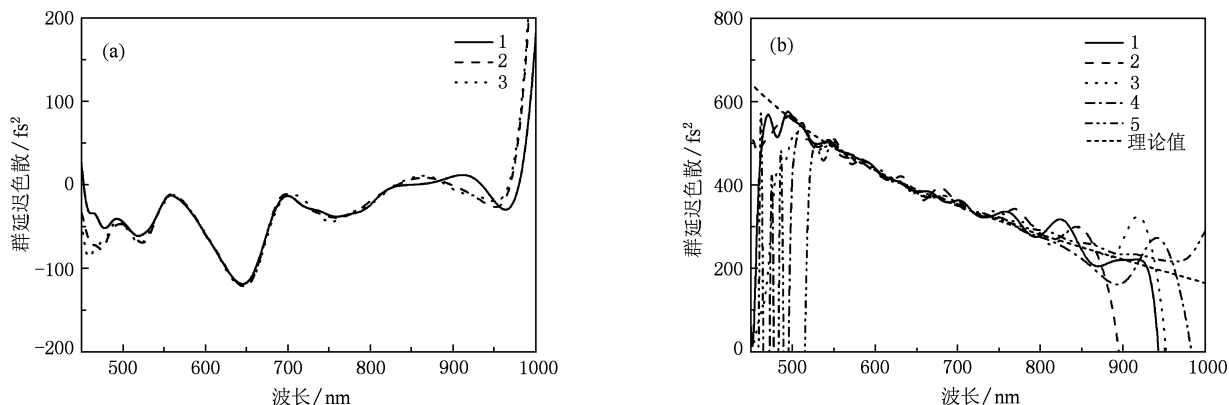


图6 测量的群延迟色散和理论值的比较 (a)测量的系统背景色散,(b)减去背景色散的色散值和理论计算值的比较

1次;而透射光透过分束镜后,又原路返回,由分束镜后表面穿越到前表面,在前表面膜层反射后与另一臂的透射光汇合,这样透射光通过分束镜基体介质3次,比反射光多经过分束镜基体2次,从而产生了背景色散.用直接提取群延迟的方法可以准确测量系统的背景色散,几次测量的结果都能精确的符合.

将得到的熔石英的色散减去背景色散,得到的结果如图6(b)所示,图6(b)也给出了用 Sellmeier公式计算的熔石英的色散值.从图6(b)可以看出直接提取群延迟的方法得到的色散能够和理论值精确的符合,证明了直接提取群延迟的方法测量色

散的准确性.

4. 结 论

提出了从小波变换的脊中直接提取群延迟的方法,消除了传统测量方法由差分产生的噪声,解决了传统方法难以准确测量色散的问题.对于光学元件的色散测量得到了和理论计算相一致的结果.该方法适用于光学元件色散的准确测试和产品色散参数快速检验、慢光器件的群延迟测量,也将在利用白光干涉仪精确测量长度、薄膜厚度、位移和几何形貌等领域的应用中发挥作用.

- [1] Naganuma K, Mogi K, Yamada H 1990 *Opt. Lett.* **15** 393
- [2] Lee J Y, Kim D Y 2006 *Opt. Express* **14** 11608
- [3] Reolon D, Jacquot M, Verrier I, Brun G, Veillas C 2006 *Opt. Express* **14** 12744
- [4] Zhao Y C, Fleming S 2005 *Meas. Sci. Technol.* **16** 1628
- [5] Deng Y, Wu Z, Chai L, Wang C, Yamane K, Morita R, Yamashita M, Zhang Z 2005 *Opt. Express* **13** 2120
- [6] Deng Y Q, Wu Z B, Chen S H, Chai L, Wang Q Y, Zhang Z G 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3716 (in Chinese) [邓玉强、吴祖斌、陈盛华、柴路、王清月、张志刚 2005 物理学报 **54** 3716]
- [7] Deng Y Q, Xing Q R, Lang L Y, Chai L, Wang Q Y, Zhang Z G 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5224 (in Chinese) [邓玉强、邢岐荣、郎利影、柴路、王清月、张志刚 2005 物理学报 **54** 5224]
- [8] Deng Y Q, Lang L Y, Xing Q R, Cao S Y, Yu J, Xu T, Li J, Xiong L M, Wang Q Y, Zhang Z G 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7747 (in Chinese) [邓玉强、郎利影、邢岐荣、曹士英、于靖、徐涛、李健、熊利民、王清月、张志刚 2008 物理学报 **57** 7747]
- [9] Deng Y Q, Cao S Y, Yu J, Xu T, Wang Q Y, Zhang Z G 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7017 (in Chinese) [邓玉强、曹士英、于靖、徐涛、王清月、张志刚 2008 物理学报 **57** 7017]
- [10] Deng Y, Yang W, Zhou C, Wang X, Tao J, Kong W, Zhang Z 2008 *Opt. Lett.* **33** 2855
- [11] Deng Y, Yang W, Zhou C, Wang X, Tao J, Kong W, Zhang Z 2009 *Opt. Express* **17** 6038
- [12] Deng Y, Wang C, Zhang Z 2009 *Appl. Phys. B* **81** 1107

Direct measurement of group delay of optical elements^{*}

Deng Yu-Qiang[†] Sun Qing Yu Jing

(Optics Division, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

(Received 4 January 2010; revised manuscript received 8 May 2010)

Abstract

A technique for direct measurement of group delay of optical elements is introduced. With the joint time-frequency analysis of white-light spectral interferogram, group delay can be directly extracted from the ridge of wavelet-transform. The technique is accurate and simple. The measurement results of group delay and group delay dispersion of a piece of fused silica was demonstrated. The results agree well with those from theoretical calculation, and the noise is greatly reduced. This technique is suitable for various application of white-light interferometer.

Keywords: dispersion measurement, white-light interference, time-frequency analysis, ultrafast laser

PACS: 81.05. Ni, 07. 60. Ly, 43. 60. Hj

^{*} Project supported by the National Science and Technology Supporting Program of China (Grant No. 2006BAF06B05) and the Basic Research Fund of National Institute of Metrology of China (Grant Nos. AKY0904, AKY0748).

[†] E-mail: yqdeng@nim.ac.cn