

新型空间调制微型傅里叶变换光谱仪的设计与仿真

孔延梅^{1,2}, 梁静秋^{1*}, 王波^{1,2}, 梁中翥¹, 徐大伟^{1,2}, 张军³

1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039
3. 暨南大学光电工程系, 广东 广州 510632

摘要 傅里叶变换光谱仪(FTS)在光谱分析中的应用越来越广泛,并且其微型化的趋势也愈加明显。文章设计了一种新型空间调制微型傅里叶变换光谱仪。在介绍其结构理论的基础上,对其空间的光强分布进行了模拟,通过对该结构下引起相位误差因素的详细分析,采用改进的 Mertz 相位校正方法对小双边的采样数据进行了光谱复原,其理论分辨率可达到 3.43 nm @800 nm,信噪比的理想分辨极限为 6.8 dB。该结构的微型 FTS 可以用微机械加工的方法来实现,具有性能稳定,误差容易校正等优点,文章对空间调制微型傅里叶变换光谱仪的结构设计及仿真,为微型 FTS 的微机械加工实验提供了理论支持,还为微型傅里叶变换光谱仪的进一步应用提供了更广阔的空间。

关键词 傅里叶变换光谱仪;微型化;空间调制;相位校正

中图分类号: O438.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)04-1142-05

引言

傅里叶变换光谱仪(FTS)由于具备较高的光通量和多通道传输能力,在电磁光谱分析中有着广泛的应用。微光机电系统(MOEMS)理论与技术的发展和独特优势使光谱分析仪逐渐向微型化发展,微型光谱分析仪具备许多大型甚至小型光谱仪所不具备的优点,如体积小、重量轻、探测速度快、易集成、批量制造、可用于二次开发以及成本低廉等。与传统的大型光谱仪相比,微型光谱仪的光谱分辨率相对较低,但由于价格与便携等方面的优势和在光谱成像与探测等方面的巨大潜力,使得它的应用前景较为诱人。

国内外对微型化的傅里叶光谱仪进行了许多研究^[1-7],其中大部分是基于时间调制方式,而这种基于时间调制的光谱仪都必须具备动镜驱动系统,它的驱动方式有热电、电磁及静电梳驱动^[5]等。通过一个驱动器来控制反射镜的空间运动从而获得不同时间上的干涉调制图,然后根据傅里叶变换复原光谱信息。时间调制的方式存在一些明显的缺点,比如:系统的实时性较差,并且需要一套高精度的驱动系统,使得系统加工和装调都比较困难,重复性不好。同时间调制方式相比,空间调制方式的光谱仪结构中没有可动部件,从

而使得系统具备稳定性好,结构紧凑等优点,并且能够实现光谱的精确分析。所以空间调制的 FTS 得到了人们的极大关注,其研究在国外也正在进行中^[6,7]。

本文基于空间调制的能量空间分割原理,提出一种能够实现光学结构更紧凑的微型光谱仪结构,其分光装置是基于迈克耳逊干涉仪的原始结构,而反射镜采取了阶梯状的反射镜,它可以在省略空间驱动装置的前提下实现空域上各级次的同时采样,这种结构设计既能避免时间调制的缺点又能精简传统 FTS 中的参考干涉仪,从而实现系统的微型化,并且其结构可以通过 MOEMS 工艺来实现。因此,这种设计为微型傅里叶光谱仪的发展提供了新的思路。

1 基本原理

本文所设计的空间调制的傅里叶光谱仪系统主要是由干涉分光系统和干涉图数据处理系统两部分组成,如图 1 所示,在右手坐标系中,阶梯镜 M1, M2 代替了传统迈克耳逊干涉仪中的两个平面反射镜,两个阶梯镜有相同 m 个台阶数,周期分别为 d 和 md ,且沿 x 和 y 方向正交放置。其工作原理为:光束经透镜准直后入射到分束器上,分束器将入射光分为强度相等的两束相干光:一束经分束器反射后入射到

收稿日期: 2007-11-26, 修订日期: 2008-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(60578036)资助

作者简介: 孔延梅,女,1982年生,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室博士研究生

*通讯联系人 e-mail: liangjq@ciomp.ac.cn; liangjqsohu@sohu.com

反射镜 M1 上经过反射后返回分束器，另一束透过分束器入射到反射镜 M2 上，经反射后回到分束器。两束由反射镜不同位置反射的出射光在空间不同位置发生干涉形成多个定域干涉条纹，所以光束分为了 m^2 个小空间，以 x 和 y 代表 M1 和 M2 的台阶的序数，记为 (x, y) ，则 (x, y) 的空间干涉光即 $(my - x)$ 级干涉条纹的光程差为 $= 2nd(my - x) (n=1)$ 。记录每一个干涉级次的条纹并通过傅里叶变换即可恢复待测光谱曲线。

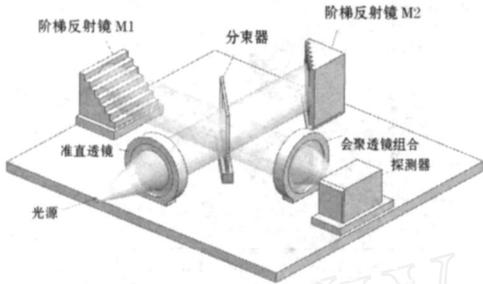


Fig 1 Schematic diagram of a Michelson interferometer with stepped mirrors

波数为 σ 的光波在 (x, y) 上的干涉光强表达式为

$$I(\sigma, x, y) = \frac{1}{4m} B_0(\sigma) (1 + e^{i2\pi(\sigma)(my-x)}) \quad (1)$$

其中， $B_0(\sigma)$ 为光源光谱亮度，舍去第一项的常数项并将各波数单色光干涉图函数积分，以间隔 $\Delta\sigma = 2d$ 离散采样，可得到整个光谱范围的干涉图函数 $I_D^{[8]}$ 。

对频域进行离散量化， $n = \frac{n}{N} (n = 0, 1, \dots, N - 1)$ ，在这些频率上，变换值确定了傅里叶分量

$$B_{0n} = 4m \sum_{k=-n}^{N-n} I_D(k) e^{-i\frac{2\pi nk}{N}} \quad (2)$$

采用过零单边采样方法来降低系统的原始数据量并减轻系统其他环节的压力，即 $k = -n, \dots, 0, \dots, N - n$ ，其中 n 为过零采样量，它决定了系统装配的精密位置。

2 仿真与模拟

针对工作在可见-近红外波段 (400 ~ 1 000 nm) 的系统进行研究，由于在实际的测量过程中引入相差的因素有很多，目前国内外的分析仅做了一般综述^[9]，并没有深入分析这些因素对光谱的影响。为了进一步研究，本文对引入相差的因素进行了系统的分析，在对系统进行仿真得到复单色光源的空间光强分布的基础上，利用改进的 Mertz 相位校正法对光谱进行切趾校正，得到了在系统本身引入相差条件下的还原光谱图，计算了系统的理论分辨率与极限信噪比。

2.1 相位误差因素

在误差引入下的系统的探测干涉图方程为

$$I_m(x) = \int_0^{\infty} S(\sigma) \cos(2\pi\sigma x + \phi) d\sigma \quad (3)$$

其中 ϕ 为附加相位，它主要由以下因素引起：

2.1.1 系统取样误差

FTS 的一个挑战性的问题是系统实现等间隔距离上的采样，由于取样误差的存在使得探测到的谱线往往存在伴线和噪声，分析取样误差对光谱带来的影响的文章有很多，基本是针对动镜驱动下的误差来进行分析的^[10]，在阶梯镜反射结构中取样误差仅仅由阶梯镜的加工误差所引入，该加工误差属于随机误差，在系统中属于一个特定的系统误差。

2.1.2 扩展光源引起的相位误差

严格的单色点光源是不存在的，实际的光源是扩展光源，如图 2 所示，设光源的半径为 R_s ， f 为准直系统焦距，镜子 M1，M2 可以等效为图中的位置关系，角度 α_s 是光源入射最大半视场角，设镜子 M1，M2 之间的光程差为 d ，计算得到

$$I(\sigma) = \int_{-R_s}^{R_s} \left\{ 2 \sin \left[2 \pi \left(\frac{R_s^2}{4f^2} \right) \cdot \cos \left[2 \pi \left(1 - \frac{R_s^2}{4f^2} \right) \right] \right] \right\} dR_s \quad (4)$$

由式(4)可以看出，扩展光源干涉图一方面使得光谱在频域上发生了偏移，另一方面是光谱图进行调制，从而限制了光谱的分辨率。

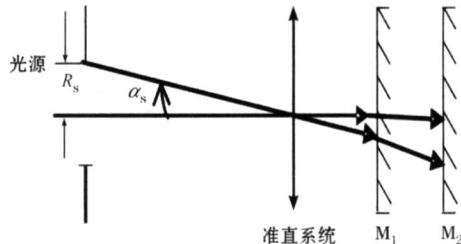


Fig 2 The effect of the extended source

2.1.3 反射镜平行度引起的误差

反射镜的平行度误差是在装调整个系统时由于反射镜有一定的倾斜度从而引入的误差，时间调制下的采样数据中的误差引入是由平面反射镜倾斜度引起的误差与驱动误差的叠加^[11]。与传统的迈克耳逊干涉仪不同，在一定的倾斜角度下，阶梯镜的倾斜所引入的误差是一个常量。其引入的相位误差为

$$\text{misalign} = 2 \pi d \sin \alpha \quad (5)$$

2.1.4 探测器引入的噪声误差

探测器作为待测光谱和测量电路之间的桥梁，对仪器精度有重要影响，傅里叶变换光谱中，干涉图中非线性振幅失真主要是由探测器引起的。引入的噪声源可分为热噪声、暗电流和光子起伏噪声等，在可见及近红外波段，光子起伏噪声为主要的噪声源，在探测限内测量光强较强的发射谱时，探测器的多重传输特性依然适用^[12]。

实际系统中的相差因素还依赖于器件材料选择以及电路的设计等系统个体因素。在仿真设计中，为了使得分析结果不失一般性，我们仅考虑系统存在的共同因素。以上提出的各因素所引入的误差中，加工与扩展光源引起的误差是随着光程差的变化而变化的，而其他误差均与光程差无关，在近似的情况下，可以采用 Forman 线性非对称校正法来实现光谱的位相校正^[13]。我们采取邢廷等提出的改进 Mertz 相位校正法来进行精确的校正^[14]。

2.2 引入误差的光谱复原仿真

设复单色光源的尺寸为 $1.8 \times 1.8 \text{ mm}^2$, 透镜焦距为 $1\ 500 \text{ mm}$, 镜子的对准误差角度为 $100 \mu\text{rad}$, 得到空间光强的 256 级的灰度分布^[15]如图 3(a)所示, 这里我们只给出其中 400 个级次的空间光分布图, 并由灰度的分布图转化为归一化的强度分布[图 3(b)], 由该强度分布图可以看出由于误差的存在, 最大光强所对应的点已经不是理想的光程差(OPD)为 0 的中心点, 而是相对于零光程差点有一定的偏移量, 并且由于随机噪声的存在, 干涉图失去了理想情况下的对称性。

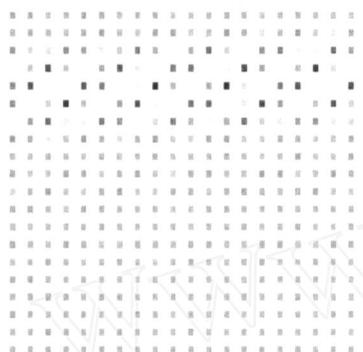


Fig. 3 (a) The gray level of the intensity

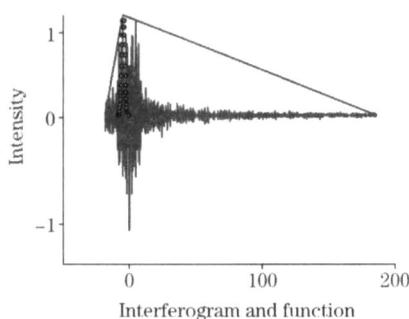


Fig. 3 (b) The distribution of the optical intensity vs OPD

2.2.1 切趾函数

为了增强干涉函数的对称性并减小仪器函数的旁瓣效应, 需要对强度分布函数进行加权。其中对零光程差附近的数据采用 Blackman-Harris 四阶函数^[16], 对整个范围内的采样数据利用三角形函数进行加权, 函数如图 3(b)所示。

2.2.2 相位校正

采用改进的 Mertz 相位校正法对干涉图进行校正, 利用 FFT 变换后的实部和虚部求得相对于第一个采样点的相位分布^[17]

$$\phi(k) = \arctan(\text{imag}(B_0)/\text{real}(B_0)) \quad (6)$$

相位信息一般都是相对于光强最大点来进行分析的, 转化公式由(7)给出

$$\phi(k) = \phi(k) + \frac{(k-1) \cdot (I_{\max})}{N} \quad (7)$$

其中, N 为采样点数, I_{\max} 是最大光强点的光强值, k 为采样点的序数, 在中央主极大强度值的附近取一些点再补零后可以得到光谱分辨率较低的准确的光谱相位信息, 而所有的数据变换后可得到高光谱分辨率的光谱信息。由(6), (7)式计

算得到相对于最大光强点的位相谱图^[14, 18], 如图 4 所示, 其中图 4(a)为大单边采样数据的相位谱图, 图 4(b)是整个光谱区间的频率-相位图。可以看出, 小双边的相位随频率的增加呈现缓慢上升趋势, 这是由于随机误差的引入, 使得它与频率之间不再是简单的线性关系, 这与第 1 部分的分析结果一致。大单边由于噪声较大导致其起伏程度不同, 变化较为剧烈。如图 4 所示为单边数据和小双边数据得到的相位信息图。

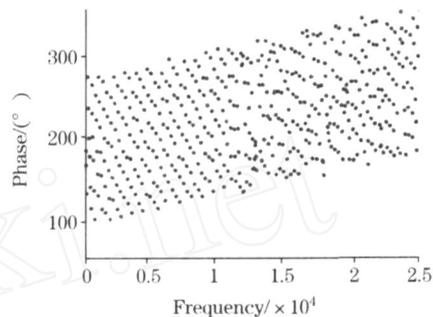


Fig. 4 (a) Phase derived from all interferogram

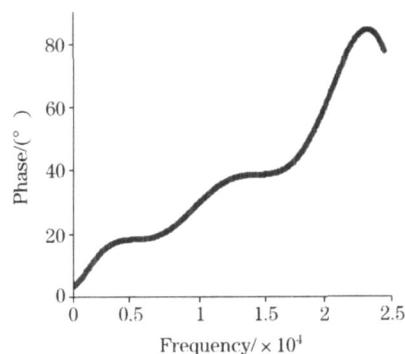


Fig. 4 (b) Phase derived from central region of interferogram

利用过零小双边的准确位相信息对光谱进行校正, 可以得到小双边校正后的光谱图(如图 5 所示), 由图中可以看出理想的单色光源扩展为有一定宽度的光谱时出现了频谱的泄漏, 并且由于误差的存在, 使得频谱中出现了一系列的其他频率成分, 但在采样数据的复原下能够分辨出光源的各单色光谱。

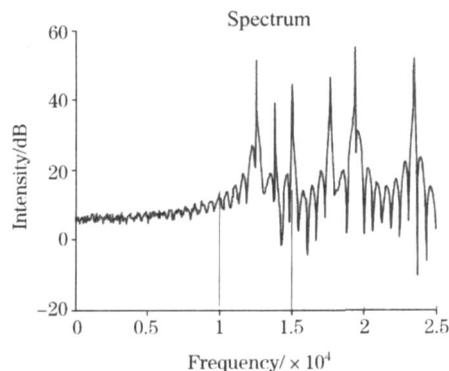


Fig. 5 The recovery of the spectrum

2.3 分辨率与信噪比

理想的分辨率是由最大光程差决定的, 最大的理论分辨率为 53.6 cm^{-1} 。图6所示的截断造成的频谱混叠效应很小, 在中心波长为 800 nm 处分辨率可以达到 3.43 nm , 若考虑探测过程中的光子起伏噪声为加性随机噪声, 在一定的信号

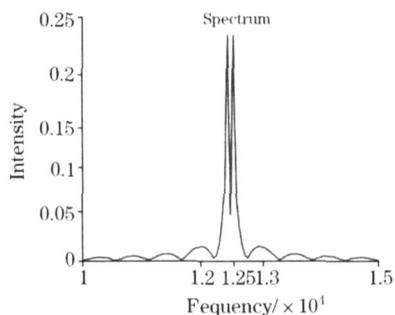


Fig 6 The simulation of the resolution

输入增加噪声的条件下, 可以得出信噪比的理想分辨极限在 6.8 dB 。因此, 该结构的光谱仪对微弱信号的分辨能力很高, 可以满足实际中的辐射光源的测量要求。

3 结果分析与展望

本文给出了一种基于空间调制的新型的傅里叶光谱仪的微型干涉系统结构, 并对该结构存在的误差进行了分析, 利用 Mertz 相位校正方法对模拟数据进行变换得到了较为理想的复原光谱, 对该结构的光谱仪的分辨率与信噪比的计算结果表明: 应用于可见-近红外波段的光源探测时可分辨的波长为 3.43 nm @ 800 nm , 信噪比分辨极限 6.8 dB , 因此, 系统的信号探测的灵敏度较高。对空间调制微型傅里叶变换光谱仪的结构设计及仿真为微型 FTS 的微机械加工实验提供了理论支持, 为微型傅里叶变换光谱仪的进一步应用提供了更广阔的空间。

参 考 文 献

- [1] LIU Hong-xin, ZHANG Jun, LIANG Jing-qiu, et al(刘宏欣, 张 军, 梁静秋, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2006, 26(supplement): 299.
- [2] JU Hui, WU Yi-hui(鞠 挥, 吴一辉). Opt. Precision Eng. (光学精密工程), 2001, 9(4): 372.
- [3] Boer Gerben, Ruffieux Patrick, Scharf Toralf, et al. Applied Opt., 2004, 43: 2201.
- [4] CHEN Gang, WEN Zhi-yu, YANG Gui-rong, et al(陈 刚, 温志渝, 杨桂荣, 等). Opt. Precision Eng. (光学精密工程), 2002, 10(6): 552.
- [5] Wallrabe Ulrike, Solf Christian, Mohr Jurgen, et al. Sensors and Actuators A, 2005, 123: 459.
- [6] Sin Jeongsik, Lee Woo Ho, Popa Dan, et al. Stephanou Proc. of SPIE, 2006, 6109: 1.
- [7] Manuilskiy Anatoliy, Andersson Henrik, Thungström Göran, et al. Proc. of SPIE, 2006, 6395: 1.
- [8] LI Zhi-gang, WANG Shu-rong, LI Fu-tian(李志刚, 王淑荣, 李福田). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2000, 20(2): 203.
- [9] Thurlow P E. SPIE, 1990, 1334: 64.
- [10] Palchetti Luca, Lastrucci Davide. Applied Opt., 2001, 40(19): 3235.
- [11] ZENG Li-bo, YIN Bang-sheng, HE Bing, et al(曾立波, 尹邦胜, 何 冰, 等). Opt. Precision Eng. (光学精密工程), 2006, 14(2): 191.
- [12] TONG Shou-feng, RUAN Jin, HAO Zhi-hang(佟首峰, 阮 锦, 郝志航). Opt. Precision Eng. (光学精密工程), 2000, 8(2): 140.
- [13] Forman Michael L, Steel W Howard, Vanasse George A. J. Opt. Soc. Am., 1966, 56(1): 59.
- [14] XING Ting, WANG Mo-chang, GONG Hui-xing(邢 廷, 王模昌, 龚惠兴). Acta Optica Sinica(光学学报), 1999, 19(3): 355.
- [15] LUO Jun-hui, FENG Ping, Halidan A(罗军辉, 冯 平, 哈力旦 A). Applications of MATLAB7. 0 in Image Processing(MATLAB7. 0 在图像处理中的应用). Beijing: China Machine Industry Press(北京: 机械工业出版社), 2005. 5.
- [16] Nuttall Albert H. IEEE Transactions on Acoustics. Speech. and Signal Processing, 1981, 29(1): 84.
- [17] Mertz L. Infrared Phys., 1967, 7(1): 17.
- [18] Edward G coddling, Gary Horlick. Appl. Spectrosc., 1973, 27: 85.

The Investigation and Simulation of a Novel Spatially Modulated Micro-Fourier Transform Spectrometer

KONG Yar-mei^{1,2}, LIANG Jing-qiu^{1*}, WANG Bo^{1,2}, LIANG Zhong-zhu¹, XU Da-wei^{1,2}, ZHANG Jun³

1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China
2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China
3. Department of Optoelectric Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China

Abstract Fourier transform spectrometer (FTS) is widely used in science and industry for the measurement of electromagnetic spectra, and its trend of minimization is particularly pronounced in many applications. A novel model of a micro FTS with no moving parts is proposed and analyzed. During the analysis, the gradients which mainly introduce the phase error are accounted for in details. Based on these assumptions and the improved Mertz phase correcting method, the spectrum of the signal is simulated, given the real extended light source. The resolution can reach 3.43 nm @800 nm, with high SNR limiting resolving ability 6.8 dB. The novel micro FTS could be made by MOEMS technology, which has some advantages over the conventional micro dispersive spectrometers based on the traditional technology, and this method can also afford some new concepts on the design of spectrometers. The research work is underway to demonstrate the theory.

Keywords Fourier transform spectrometer (FTS); Minimization; Spatial-modulation; Phase correction

(Received Nov. 26, 2007; accepted Mar. 6, 2008)

* Corresponding author