第31卷,第10期
2011年10月

光 谱 学 与 光 谱 分 析
Spectroscopy and Spectral Analysis

Vol 31, No 10, pp2865-2869
October, 2011

基于多级微反射镜的傅里叶变换红外光谱仪中准直误差的分析

吕金光[1,2], 梁中翥[1], 付建国[1,2], 梁静秋[1*]

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 100049

摘 要 通过对基于多级微反射镜的空间调制傅里叶变换红外光谱仪准直误差的分析, 模拟了准直误差的存在而导致的干涉图大光程差处对比度反转和光谱图边频噪声的产生。讨论了在不同的误差系数下复原光谱图的信噪比和分辨率, 并且分析了干涉图大光程差处对比反转以及光谱图边频分量的产生原因。仿真结果表明, 在误差系数 = 0 15 mm^{-1}时, 光谱的信噪比会下降到 6 dB, 同时光谱分辨率会退化到 13 4 cm^{-1}。本文的结论将应用于微型光谱仪系统的光学设计与装调。

关键词 傅里叶变换光谱仪; 准直误差; 对比反转; 边频噪声
中图分类号: O433 1 文献标识码: A DOI: 10 3964/j issn 1000-0593(2011) 10-2865-05

引 言

光谱仪作为对物质进行检测剖析的科学仪器, 在生产生活与科研领域中发挥着越来越大的作用, 有着日益广阔的应用前景。由于傅里叶变换光谱仪[1]具有高光通量、多频道、波数准确、杂散光低等优点, 因而越来越受到人们的青睐。传统的傅里叶变换光谱仪体积大、重量沉、价格昂贵等缺点, 阻碍了傅里叶变换光谱仪的普及和应用的进程, 这样就迫切需要微小型、轻量化、可批量化生产的傅里叶变换光谱仪的出现[2,3]。目前, 国内外许多院校与研究所开展了微型傅里叶变换光谱仪的研究工作, 其中调制方式多为时间调制[4,5]; 但是时间调制的傅里叶变换光谱仪由于需要一套高精度的动镜驱动系统, 这成为其研究与发展的主要瓶颈。本文在一种新型空间调制微型傅里叶变换光谱仪的原理模型的基础上对其准直误差进行了分析。

1 基于多级微反射镜的傅里叶变换光谱仪原理

基于多级微反射镜的新型空间调制的微型傅里叶变换光谱仪原理如图 1 所示[5,6]。

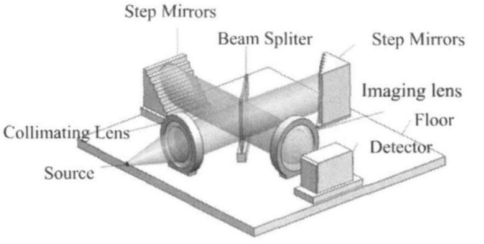

Fig 1 The model of micro-Fourier transform spectrometer based on step mirrors

利用两个具有不同阶梯常数的多级微反射镜代替传统迈克尔逊干涉仪的平面反射镜, 并且两个多级微反射镜正交放置。两个多级微反射镜的级数均为 N, 周期分别为 d 和 Nd。分束器上一点分出的两束光被两个微反射镜反射后再次相遇时, 由于微反射镜的结构而产生光程差, 从而携带一定的位相信息; 而分束器上不同空间点分出的光因多级微反射镜的结构不同而产生不同的光程差, 因而携带不同的位相信息。这样, 在出射面上形成多个定域干涉光场。也就是说, 光束在横向空间上被分成了 N^2 个区域, 每一个区域对应着一个特定的光程差[6,7]。根据阶梯镜摆放方式的不同, 横向空间上可以有不同的光程差排布方式, 图 2 是光程差排布方式的一种。

收稿日期: 2010-11-26, 修订日期: 2011-03-30
基金项目: 国家(863 计划) 项目(2009AA04Z315) 和国家自然科学基金项目(60977062, 61027010) 资助
作者简介: 吕金光, 1984 年生, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生 e-mail: jinguanglv@163.com
* 通讯联系人 e-mail: liangjq@ciomp.ac.cn
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

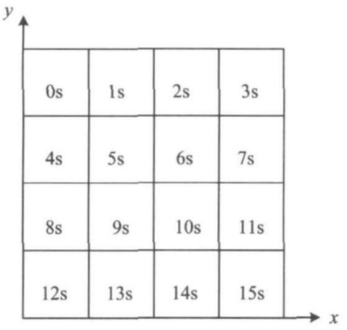

Fig 2 The chart of OPDs array in 4 multiply 4 mode

对记录在探测器上的光强信息通过离散傅里叶变换解调，就可以获得不同波长的光谱信息[8]。

2 准直误差引起光束偏折的理论分析

傅里叶变换光谱仪中准直系统的作用是将来自光源的发散光束整形为一平行光束投向干涉系统，保证干涉系统始终处于平行光束中。实际上，由于准直误差的存在，使得入射到干涉图每个图元上的光程差相对于理想的光程差有一漂移增量，这一光程差的改变导致了干涉图上光强信息的改变，从而影响光谱复原的质量。

2 1 光束偏离角与入射高度的关系

在理想状态下，光束通过准直系统后变为一束平行光，在系统出瞳平面上将产生一平面波束；而实际上，由于准直误差的作用，出射光束不再是平行光束，而是相对于平行光束有一定的偏离角，这会使得系统出瞳平面上的波前发生弯曲，如图 3 所示。

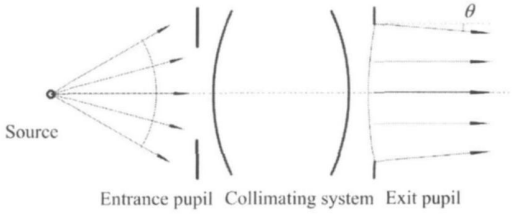

Fig 3 The effect of the error in collimating systerm

这里考虑一种离焦的情况，即本应该平行的光束，由于准直误差的影响而会聚于有限远处的一点。这时系统出瞳面上的波前为一球面波前，如图 4 所示。

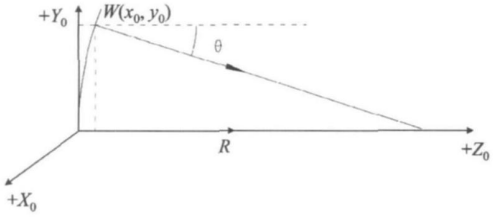

Fig 4 The curve of wavefront in defocus system

这时的波面方程为

$$W(x_0, y_0) = \frac{x_0^2 + y_0^2}{2R} = \frac{h_1^2}{2R} \tag{1}$$

式中(x_0, y_0)为系统出瞳瞳面坐标，h_1 为入射高度，R 为会聚像点与出瞳平面之间的距离。由三角关系可以得到

$$\tan = \frac{h_1}{R - W} \quad \frac{h_1}{R} + \frac{h_1^3}{2R^3} \tag{2}$$

式中 为入射高度 h_1 所对应的光束偏离角。

忽略高次项，只保留一次项，可以得到偏离角 与入射高度的关系。令

$$= \quad h_1 \tag{3}$$

式中 为误差系数。

由于光束偏离平行状态，使得某一光束偏离角的光线投射到阶梯反射镜上的入射高度不再是经过准直系统后的出射高度。由简单的几何关系可以得出准直系统的出射高度 h_1 与阶梯反射镜的入射高度 h_2 之间的关系为

$$h_1 = \quad l + h_2 \tag{4}$$

式中 l 为准直系统出瞳平面到阶梯反射镜之间的距离。

由式(3)和(4)可以得到

$$= \frac{h_2}{1 - \quad l} \tag{5}$$

2 2 光程差与光束偏离角之间的关系

光束偏离平行状态，使得经过反射镜反射后再次相遇的两束光，其光程差不再是理想的光程差，受到一个光束偏离角的调制，其调制关系如图 5 所示。

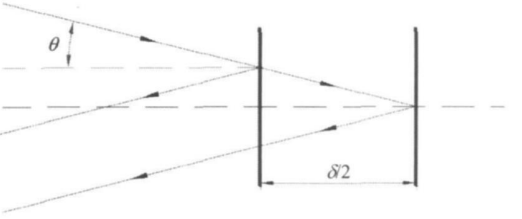

Fig 5 The change of OPD resulting from beam divergence

设理想的平行光束经过系统后的光程差为 ，那么有一定偏离角度 的光线经过系统后的光程差为

$$= \frac{/2}{\cos} + \frac{/2}{\cos}\cos 2 \quad = \quad \cos \tag{6}$$

在本系统中，理想光程差 是阶梯反射镜平面位置坐标的函数，而偏离角度也是阶梯反射镜位置坐标的函数。由此，接受屏上的干涉光强信息可以表示为

$$I(x, y) = \quad {}_0 B(\ ) e^{i2} \quad d$$

$$= \quad {}_0 B(\ ) e^{i2 \quad (x, y)\cos(x, y)} d \tag{7}$$

式中， $= \frac{1}{}$是光源的空间频率，$B(\ )$为光源的功率谱密度。

取光源光谱为单谱线函数，即$B(\ ) = \quad (\ - \ {}_0)$，其中 ${}_0$ 为单谱线光源的频率，则由光束偏离角调制下的光强信号可以表示为

$$I(x, y) = \cos[2 \quad {}_0 \ (x, y)\cos(x, y)] \tag{8}$$

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3　仿真实验

基于光束偏离角　的调制，各个光程差在干涉图面上进行重新分布。对于一个单谱线光源，对每个特定的光程差，将功率谱密度函数进行傅里叶积分变换，得到相对于各个特定光程差的干涉图函数。

在仿真软件环境下[8]，利用符号积分运算，对光程差矩阵进行傅里叶积分来反演干涉图信息，得到的干涉图如图 6 和图 7 所示。

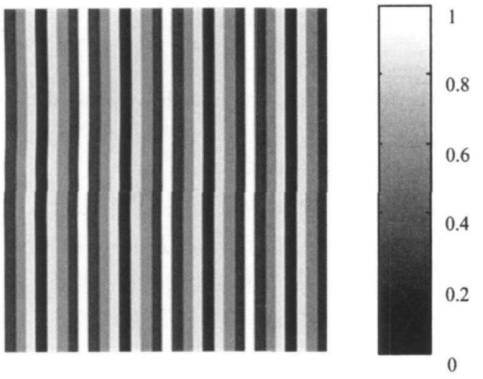

Fig. 6　The interferogram without collimation error

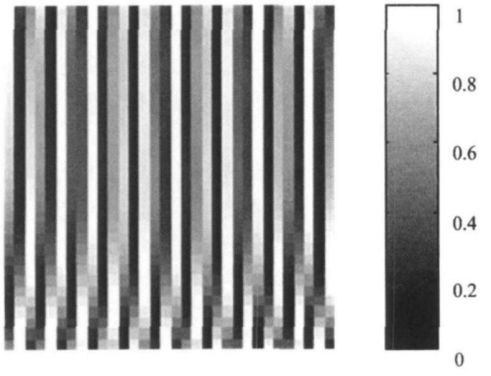

Fig. 7　The interferogram with collimation error

图 6 是误差系数　= 0　mm^{-1}时的傅里叶积分产生的干涉图，图 7 是误差系数　= 0 15　mm^{-1}时的傅里叶积分产生的干涉图。从两个图的比较中，可以看出，由于准直误差的存在，干涉条纹弯曲，干涉图畸变。对于小光程差的位置，干涉图的畸变较小；而对于大光程差的位置，干涉图畸变较大，在有的光程差位置，甚至出现了对比度反转。

将二维的干涉图信息进行数据预处理与切趾运算，然后与理想的光程差相匹配。对干涉图上空间分布的灰度信息做 FFT 运算，即可以得到频率域的光谱信息。

图 8 是由　= 0　mm^{-1}的干涉图解调得到的光谱信息，图 9 是由　= 0 15　mm^{-1}的干涉图解调得到的光谱信息。从两图的比较可以看出，由于准直误差的存在，使得光源真实的脉冲谱线峰值下降，谱线展宽，而且周围产生伴线。

对于不同的误差系数，测试其干涉图的退化情况及其光谱图的失真程度。将信噪比和光谱分辨率与误差系数的关系绘制成曲线，如图 10 和图 11 所示。

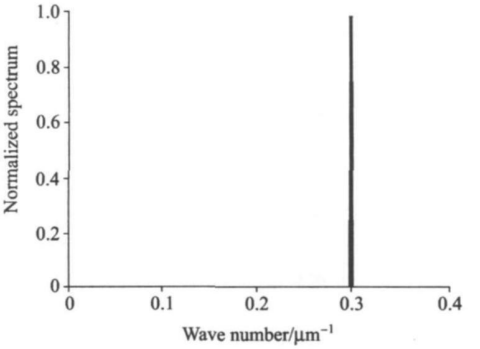

Fig. 8　The spectrogram without collimation error

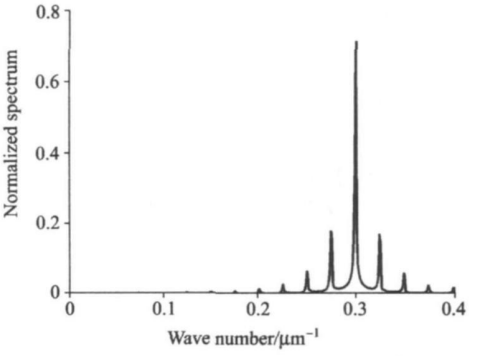

Fig. 9　The spectrogram with collimation error

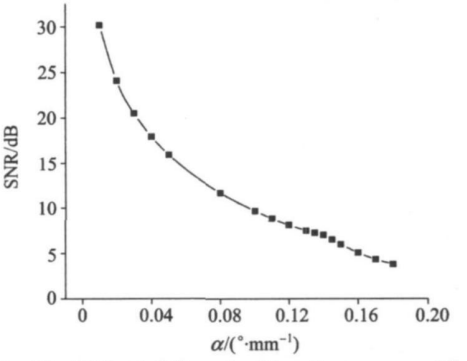

Fig. 10　The SNR at different collimation error coefficient

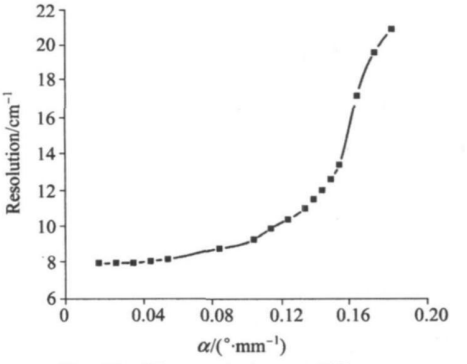

Fig. 11　The resolution at different collimation error coefficient

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由图 10 和图 11 可以看出，随着误差系数的增加，光谱图像的信噪比迅速的降低，同时光谱分辨率降低。也就是说，由于准直误差的存在，会明显的降低复原光谱的信噪比，同时降低光谱的分辨率。

4 实验结果分析

干涉图大光程差处的对比度出现反转，光谱图中也在特定的频率位置周期性的出现边频噪声，都是由光束偏离角对光程差的调制引起的。

4 1 关于光谱图边频分量的分析

光程差是干涉图平面位置坐标的函数，而光束偏离角也是干涉图平面位置坐标的函数，这样，光束偏离角就是光程差的函数，即 = ( )，每一个光程差都对应着一个特定的光束偏离角。光束偏离角与光程差的关系如图 12 所示。

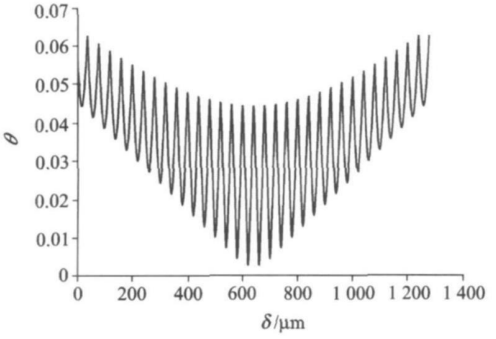

Fig 12 The relationship between divergence angle *vs* OPD

图 12 是误差系数 = 0 15 mm^{-1}时的光束偏离角与光程差的关系图示。光束偏离角随着光程差呈 V 型准周期振荡变化，并且振荡的幅值也与光程差有关系。

在 N^2 个光程差范围内，共有 32 个振荡周期，所以这种振荡变化的周期为 $T=\frac{N^2 \quad s}{32}=40$ m。而这个周期正是光束偏离角扫过干涉图一行时的光程差间隔，即 $T=s \quad N=40$ m。周期性的光束偏离信号 ( )作为一调制信号对干涉光强信号进行调制，从实验得到的带有误差系数的复原光谱图可以看出，这种调制作用，在频域中表现为一调频的过程。这种调频的结果是，在干涉光强调频信号中除了光源频率 $_0$ 外，还产生了边带频率($_0$ F)，($_0$ $2F$)，($_0$ $3F$)， ，其中 F 正是调制信号 ( )的频率，$F=\frac{1}{T}=0\ 025$ m^{-1}。边频的数目很多，但是，距主频较远的边频分量其幅值很小。

随着误差系数的增加，上边频与下边频分量的幅值增加，这种边频幅值的增加，导致了复原光谱信噪比的降低。

4 2 关于干涉图对比反转的分析

光束偏离平行状态，这就使得广束的光程差偏离理想的情况，这样会产生一个附加的位相延迟。由式(6)可以得出附加的位相延迟为

$$= \frac{2}{}(-) = \frac{2}{}(\cos -) \tag{9}$$

当 = 时，位相会产生 的转变。由于位相错动了半个周期，黑条纹变白，白条纹变黑，致使对比度反转。附加位相延迟与光程差的关系如图 13 所示。

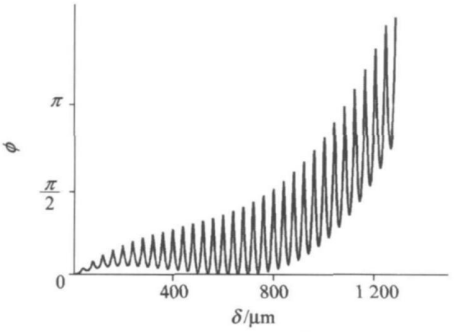

Fig 13 The relationship between additive phase delay *vs* OPD

图 13 是光源的频率 $_0=0\ 3$ m^{-1}，误差系数 = 0 15 mm^{-1}时，附加位相延迟与光程差之间的关系。从图 13 可以看出，附加位相差随着光程差呈号角型准周期振荡变化，并且振荡的幅值随着光程差的增加而增大。在小光程差的时候，附加位相延迟比较小，不易出现对比反转的现象；但是对于大光程差的情况，附加位相延迟涨幅比较大，很容易发生对比反转的现象。将 cos 进行泰勒展开，可以得到附加位相延迟为

$$\frac{}{} = \frac{^2( )}{} \tag{10}$$

由这个式子也可以看出，对于大光程差的地方，同时有着大的光束偏离角，从而会产生大的位相延迟，所以容易发生对比反转。

发生对比反转之后的干涉光强信息对于光谱复原不再有贡献，这样就会导致最大光程差减小，而最大光程差的减小带来的影响就是光谱分辨率的降低。由此可以得到由光谱分辨率所决定的光束最大偏离角为

$$_{max} = \sqrt{\quad_{min}} = \sqrt{\frac{}{}_{max}} \tag{11}$$

5 结 论

由于傅里叶变换光谱仪中准直误差的存在，使得经过准直系统后的出射光束相对于理想的平行光束有一偏离角。这个光束偏离角漂移了干涉图上每一个图元对应的光程差，从而调制了干涉图上的光强信息。由于光程差的蜕变，从而产生一个附加位相延迟，当附加位相延迟等于 时，干涉图上就会发生对比反转现象。由于光束偏离角相对于光程差来说，是一个准周期函数，这个准周期函数对干涉光强进行调制，在频域就会发生频移，产生多余的边频分量，而频移的步长，就是光束偏离角相对于光程差的摆扫频率。复原光谱图的信噪比随着误差系数的增加而降低，光谱分辨率的值随着误差系数的增加而降低。在误差系数 = 0 15 mm^{-1}时，信噪比下降到 6 dB，而光谱分辨率则增加到 13 4 cm^{-1}。因此，在光学设计以及装调过程中，应将准直误差控制在 0 15 mm^{-1}以下。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

References

[1] WENG Shi-fu(翁诗甫). Fourier Transform Infrared Spectrometer(傅里叶变换红外光谱仪). Beijing: Chemical Industry Press(北京: 化学工业出版社), 2005. 34.

[2] SHI Jun-feng, HUI Mei, WANG Dong-sheng, et al(史俊峰, 惠 梅, 王东生, 等). Optical Technique(光学技术), 2003, 29(1): 13.

[3] KONG Yan-mei, LIANG Jing-qiu, LIANG Zhong-zhu, et al(孔延梅, 梁静秋, 梁中翥, 等). Semiconductor Optoelectronics(半导体光电), 2008, 29(1): 1.

[4] Jeongsik Sin, Woo Ho Lee, Dan Popa, et al. Proc. of SPIE, 2006, 6109(4): 1.

[5] Reyes D, Schildkraut E R, Kim J, et al. Proc. of SPIE, 2008, 6888(D): 1.

[6] WANG Bo, LIANG Zhong-zhu, KONG Yan-mei, et al(王 波, 梁中翥, 孔延梅, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2010, 59(2): 907.

[7] ZHANG Zhi-yong, YANG Zu-ying(张志涌, 杨祖樱). The Tutorial of MATLAB(MATLAB 教程(R2008a)). Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press(北京: 北京航空航天大学出版社), 2008. 67.

Analysis of Collimation Error in Fourier Transform Infrared Spectrometer Based on Step Mirrors

L Jin-guang[1,2], LIANG Zhong-zhu[1], FU Jian-guo[1,2], LIANG Jing-qiu[1*]

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 Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The collimation error in Fourier transform spectrometer has many effects on the interferogram and the spectrogram. By means of modulation, the authors found the reverse of contrast in the interferogram and the side slope noise in the spectrogram due to the collimation error. The authors analyzed the signal-to-noise ratio and resolution at different factor of beam divergence. When the factor of the beam divergence is 0 15 mm^{-1}, the signal-to-noise ratio can reduce to 6 dB and the resolution can go bad to 13 4 cm^{-1}.

Keywords Fourier transform spectrometer; Collimation error; Reverse of contrast; Side slope noise

(Received Nov. 26, 2010; accepted Mar. 30, 2011)

* Corresponding author

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net