

空间调制型傅里叶变换光谱仪光场的均匀性研究

吕金光^{1,2}, 梁静秋^{1*}, 梁中翥¹, 付建国^{1,2}

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 基于多级微反射镜的空间调制型傅里叶变换光谱仪在光场的横向空间同时采集所有光程差的干涉图信息, 所以光场能量的空间分布特性影响着系统的性能。文章将空间分布函数引入到光谱仪系统中, 通过仿真实验得到, 分布函数调制后的干涉图对比度下降, 同时复原光谱中出现边频谱线。理论分析表明, 干涉图调制度下降来源于调制度函数对光程差采样空间的周期性变化; 而边频谱线则是光源的单色谱线对调制度函数的空间频谱进行频率搬移的结果。最后, 提出了平场校正的差影算法与反向恢复算法。仿真结果表明, 反向恢复算法可以更好的复原出干涉图和光谱。

关键词 傅里叶变换光谱仪; 分布函数; 对比度; 边频谱线; 反向恢复

中图分类号: O433.1 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)01-0259-05

引言

傅里叶变换光谱仪应用光学相干原理, 可以对物质的结构和成分进行测量、分析和处理。傅里叶变换光谱仪记录的是干涉图信息, 通过光谱与干涉图之间的傅里叶变换关系来间接地测量光谱信息^[1]。目前, 广泛应用的傅里叶变换光谱仪大多是时间调制型的, 利用动镜扫描来获得采样光程差的干涉图数据。这种仪器结构对动镜的移动精度要求很高, 并且动镜驱动系统会带来额外的附加体积, 使其在很多领域的应用受到了限制。因此, 对于静态微小型的傅里叶变换光谱仪的研究具有广阔的应用前景^[2]。

1 仪器基本原理

基于多级微反射镜的空间调制型傅里叶变换光谱仪不需要动镜和动镜驱动系统, 通过多级微反射镜的结构实现光程差的精密采样^[3], 可以降低光谱仪整机的尺寸和重量, 其结构如图1所示。

基本光学结构基于 Michelson 干涉仪, 不同的是经典的平面反射镜被两个多级微反射镜所代替, 两面镜子均为阶梯形状, 一个有着小的阶梯阶距, 另一个有着大的阶梯阶距。

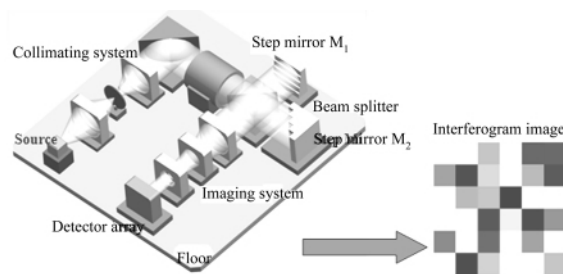


Fig 1 Instrumental configuration of the static FTS

阶梯镜的阶梯高度遵循 Nyquist-Shannon 采样定理^[4], 并且两个阶梯镜遵循高度互补准则。将两个阶梯反射镜正交放置, 则可以形成一个光程差的空间阵列。阶梯镜产生干涉图的空间采样, 干涉信号的强度取决于阶梯镜分割图样中采样点的位置, 故干涉信号可以写作 $I(x, y)$ 。通过探测器阵列接收的不同空间的干涉光强信息就是干涉图的采样点。探测器阵列的像元数是干涉图采样点数的数倍, 每一个干涉图采样点被多个探测器像元接收, 称之为超像元。图1显示了探测器超像元记录的干涉图, 不同超像元的颜色代表了不同的干涉图强度。图中清楚的显示了干涉图的采样阵列。光谱图可以通过对干涉图进行傅里叶变换的数字处理过程重构得到。

收稿日期: 2011-04-20, 修订日期: 2011-08-16

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: jingguanglv@163.com

* 通讯联系人 e-mail: liangjq@ciomp.ac.cn

2 理论计算模型

由于这种空间调制的傅里叶变换光谱仪是在一个面阵列上同时呈现所有采样光程差的干涉图, 因此, 相比于时间调制的傅里叶变换光谱仪, 对光场的横向能量分布特性有着更高的要求。

对于一个强度均匀分布的光场, 各个采样光程差形成的干涉图是理想的干涉条纹。这时干涉图函数可以表示为^[1]

$$I_0(x, y) = \int_0^\infty B_0(\nu) e^{i2\pi\delta(x, y)} d\nu \quad (1)$$

但是如果光场强度的空间分布是不均匀的, 那么每一个光程差采样的干涉图的光强将与空间位置有关。这里将有固定空间能量分布形式的光场作为研究内容, 讨论其均匀性对于干涉图以及光谱图的影响。

当光场的空间能量分布有固定的初等函数形式时, 例如在用可调谐激光器做实验时, 激光光束基模的空间能量分布是高斯函数的形式。这时可以将干涉图函数表示为

$$\begin{aligned} I(x, y) &= \int_0^\infty B(\nu, x, y) e^{i2\pi\delta(x, y)} d\nu \\ &= \int_0^\infty f(x, y) B_0(\nu) e^{i2\pi\delta(x, y)} d\nu \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $f(x, y)$ 定义为空间分布函数。

在这里暂不考虑空间分布函数与光波频率的关系, 而只分析空间不均匀性对光场的限制。由式(2)可以看出, 空间分布函数的形式, 直接决定着干涉光强的大小, 从而影响着复原光谱的质量。对于高斯光束, 我们可以构造分布函数的形式为

$$f(x, y) = \left[\exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{R^2}\right) \right]^2 \quad |f(x, y)| \leq 1 \quad (3)$$

式中 R 是分布函数的有效半径。

本文以高斯能量分布为例, 讨论光场的均匀性问题, 但研究方法可以适用于任意具有初等函数形式能量分布的光场。

3 仿真实验

将光场的空间分布特性引入到本研究的光谱仪系统中, 仿真其对采样干涉图的影响, 并通过离散傅里叶变换反演来观察其对复原光谱图的贡献。

基于分布函数 $f(x, y)$ 的调制, 入射光强在空间干涉图面上不再均匀分布。将功率谱密度作用到空间分布函数所对应的每一个光程差采样的空间点, 在每一个采样空间点对所有波长的能量进行傅里叶积分, 得到空间分布函数调制后每一个采样空间点的干涉图像。

对于高斯型分布函数, 对光程差采样空间进行傅里叶积分反演^[6], 得到的干涉图如图 2 和图 3 所示。

仿真所用的光源为单谱线光源, 频率 $\nu = 0.3 \mu\text{m}^{-1}$ 。图 2 是没有受到 $f(x, y)$ 函数调制的干涉图。图 3 是受到有效半径为 $R = 16 \text{ cm}$ 的高斯函数调制时的干涉图。从两个图的比较可以看出, 由于干涉图受到 $f(x, y)$ 的调制, 使得干涉条纹

的对比度下降。干涉图中心区域条纹的对比度下降较小, 而干涉图边缘区域的条纹对比度下降较大。

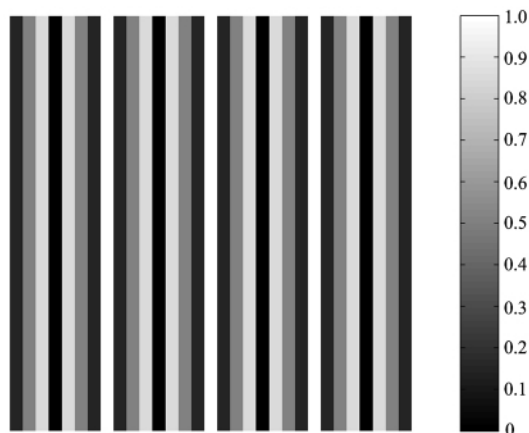


Fig 2 The interferogram without modulation

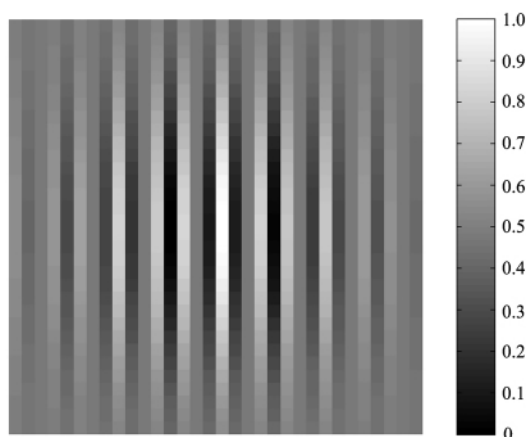


Fig 3 The interferogram modulated by Gauss distribution function

将探测器阵列所采集到的干涉图像的灰度数据进行预处理与切趾运算, 然后与相应的光程差分布相匹配。对干涉图采样序列做离散傅里叶变换之后, 即可反演出其频率域的光谱信息。

图 4 是理想的干涉图(图 2)反演的光谱信息, 图 5 是受到高斯函数调制后的干涉图(图 3)反演的光谱信息。从图中

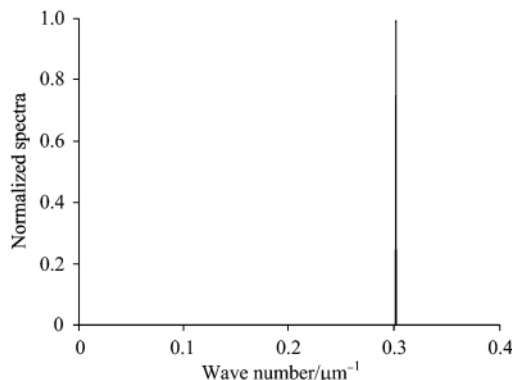


Fig 4 The spectrum without modulation

可以看出, 高斯函数调制的光谱中除了光源的频率谱线外, 还增加了两条边频谱线。并且, 中心谱线的峰值降低, 谱线有所展宽。

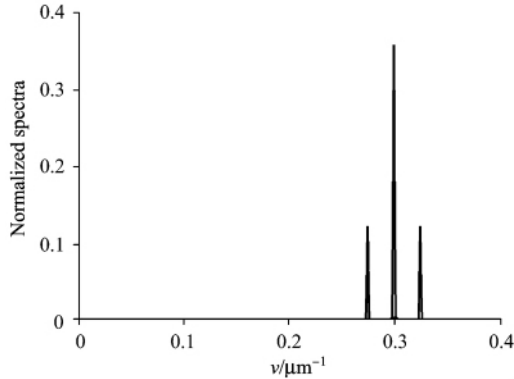


Fig 5 The spectrum modulated by Gauss distribution function

4 仿真结果的理论分析

空间分布函数对于采样干涉图的空间调制, 使得调制干涉图边缘区域调制度下降, 并且反演光谱中出现边频谱线。下面将对空间分布函数导致这两种现象的原因进行分析。

4.1 干涉图对比度分析

由式(2), 通过推导可以得到受到空间分布函数调制的干涉图的对比度为 $f(x, y)$ 。用光程差表示为

$$M = F(\delta) \quad (4)$$

将分布函数 $f(x, y)$ 随空间坐标的关系转化为其随光程差的关系, 得到调制度函数 $F(\delta)$ 。其函数曲线如图 6 所示。

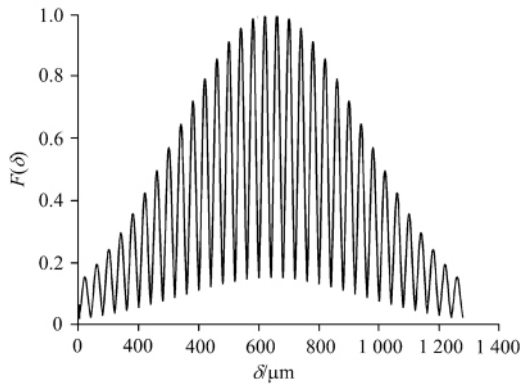


Fig 6 The relationship of contrast vs. OPD

由图 6 可以看出, 干涉图的调制度随着光程差的增加呈现一种 Δ 型准周期的函数关系。调制干涉图的调制度总体上是下降的。在某些特定的光程差区域, 其下降的尤为明显。而这些特定的光程差即对应着干涉图的边缘区域。这就是干涉图边缘调制度下降的原因。

4.2 调制频谱分析

由式(1)和式(2), 调制干涉光强可以表示为

$$I(\delta) = F(\delta) \times I_0(\delta) \quad (5)$$

对式(5)的两边同时傅里叶变换, 则调制光谱可以表示为

$$B(\nu) = F[F(\delta)] * B_0(\nu) = H(\nu) * B_0(\nu) \quad (6)$$

式中“ $*$ ”表示卷积运算, $H(\nu)$ 是调制度函数 $F(\delta)$ 的傅里叶空间频谱。

调制干涉图在空间域表现为调制度函数与理想干涉图的乘积。但是在频率域中, 调制光谱则表现为调制度频谱与理想光谱的卷积。

对于高斯函数调制的干涉图, 其调制度函数 $F(\delta)$ 的曲线形式如图 6 所示, 则其傅里叶空间谱 $H(\nu)$ 如图 7 所示。

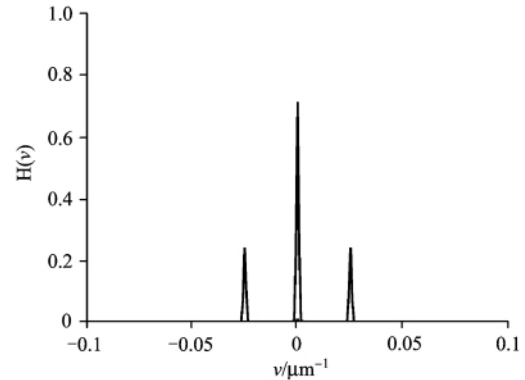


Fig 7 The spectrum of the modulation function

由图 7 可以看出, 调制度频谱主要由一条零频谱线和两条边频谱线组成。其边频谱线的频率中心值正好等于分布函数对空间分布的光程差阵列按其排布顺序逐行或逐列变化的频率。本系统中 $V = \frac{1}{N \times 2d} = 0.025 \mu\text{m}^{-1}$, d 是阶梯反射镜的阶距。

对于单谱线函数的光谱, $B_0(\nu) = \delta(\nu - \nu_0)$, 其中 ν_0 为峰值频率。则调制光谱为

$$B(\nu) = H(\nu) * \delta(\nu - \nu_0) = H(\nu - \nu_0) \quad (7)$$

由式(7)可以看出, 将调制度函数的频谱搬到理想干涉条纹的频段上, 就是调制光谱。而边频谱线与中心谱线的频距就是调制度频谱的伴线频率。

5 非均匀光场校正

空间分布函数对采样干涉图的光强信息进行了调制, 使得干涉图调制度下降, 同时复原光谱中出现虚假的频率成分。因此, 需要对非均匀分布的光场进行平场校正。

5.1 差影算法

由图 2 和图 3 可以看出, 空间分布函数调制后的干涉图像同时含有理想干涉图像与分布函数的图像, 即 $I(x, y) = I_0(x, y) \cup f(x, y)$ 。因此, 我们将调制干涉图像与分布函数图像求差集, 来分离出理想干涉图像。即

$$I_0(x, y) = I(x, y) - f(x, y) \quad (8)$$

式中“ $-$ ”表示求差集运算。

5.2 反向恢复算法

由式(2)可知 $I(\delta) = F(\delta) \times I_0(\delta)$, 因此, 我们可以构造一个恢复函数 $G(\delta)$ 与退化的干涉图函数进行作用。在调制度函数 $F(\delta)$ 没有零点的情况下, 可设

$$G(\delta) = \frac{1}{F(\delta)} \quad (9)$$

在干涉平面上有些区域可能会产生 $F(\delta)=0$ 或 $F(\delta)$ 非常小的情况,在这种情况下应用式(9)进行平场校正时会出现奇异性。因此,改进的方法是在 $F(\delta)=0$ 的干涉区域及其附近,对 $G(\delta)$ 的值进行设置,从而使得在这些区域附近不致使复原的干涉图出现病态。当然,我们预先并不知道分布函数的具体函数形式,这就需要对具体的光场进行分析,来解析出分布函数的形式。

由两种校正算法复原的干涉图如图 8 和图 9 所示。

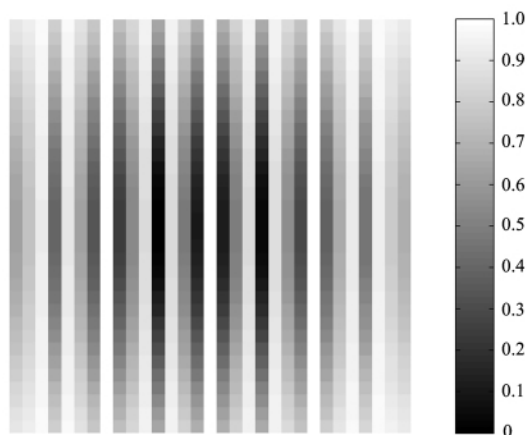


Fig 8 The interferogram recovered by difference image

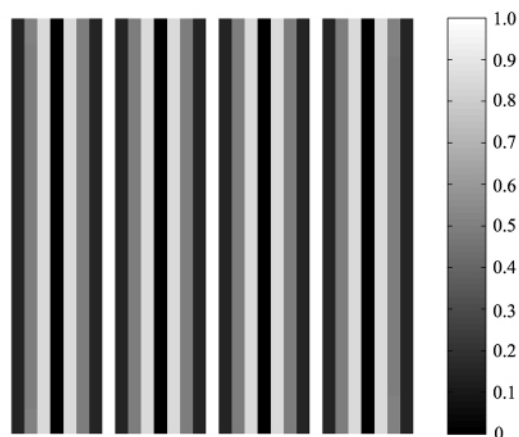


Fig 9 The interferogram recovered by converse recovery

将两幅干涉图进行傅里叶变换,得到复原光谱如图 10 和图 11 所示。

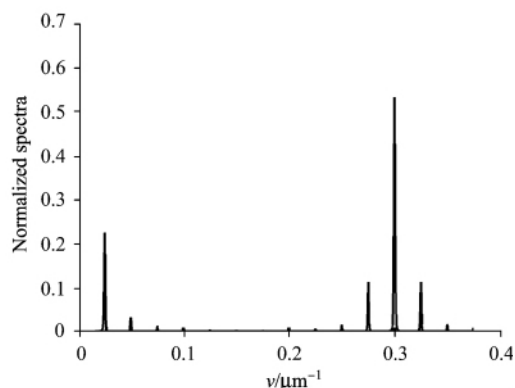


Fig 10 The spectrum recovered by difference image

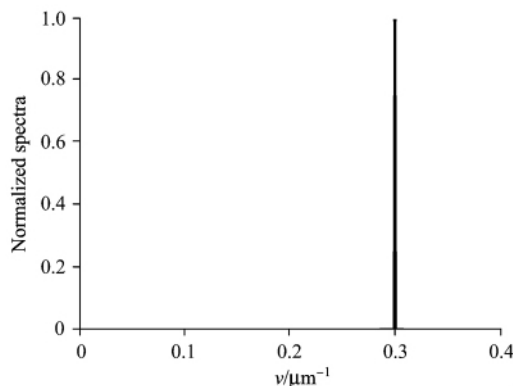


Fig 11 The spectrum recovered by converse recovery

从图 10—图 11 可以看出,相比于差影算法,反相恢复算法能够恢复比较理想的干涉图,并且能够反演出比较理想的光谱。因此,我们利用反向恢复算法来进行非均匀分布光场的平场校正。

6 小 结

由于光场横向空间的光强分布的不均匀性,在研究中引入空间分布函数。本文以高斯分布函数为例,模拟了其对于采样干涉图与反演光谱的影响。空间分布函数对干涉图产生调制作用,使得干涉图的对比度下降,并且使得复原出的光谱出现边频谱线。通过理论推导,分析了干涉图边缘区域调制度下降的原因,并且论证了单线光谱对调制度函数的空间频谱的频谱搬移作用。最后,对光场的非均匀分布校正进行了研究,提出了差影算法和反向恢复算法两种平场校正的方法。其中反向恢复算法可以得到比较理想的结果。

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] KONG Yan-mei, LIANG Jing-qi, 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.
- [3] 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.

- [4] DING Yu-mei, GAO Xi-quan(丁玉美, 高西全). Digital Signal Processing(数字信号处理). Xi'an: Xidian University Press(西安: 西安电子科技大学出版社), 2001. 19.
- [5] ZHOU Bing-kun, GAO Yi-zhi, CHEN Ti-rong, et al(周炳琨, 高以智, 陈侗嵘, 等). Principles of Lasers(激光原理). Beijing: National Defence Industrial Press(北京: 国防工业出版社), 2009. 70.
- [6] 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.

Study on Uniformity of Optical Field in Static Fourier Transform Spectrometer

LÜ Jin-guang^{1,2}, LIANG Jing-qiu^{1*}, LIANG Zhong-zhu¹, FU Jian-guo^{1,2}

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 Since the Fourier transform spectrometer based on multi-micro mirrors samples the interferogram image which corresponds to each OPD in the transverse optical field, the spatial distribution of the irradiance has much effect on the quality of the interferogram. In the present paper, distribution function is introduced in this spectrometer system. By means of simulation, the contrast of the interferogram modulated by distribution function is depressed in the fringe area and the concomitant line appears in the spectrum. According to theory analysis, the decline of the contrast lies on the distribution function which scans the interferogram periodically. And the concomitant line is the effect of the spectrum shift, which belongs to the modulation function. Finally, the difference image and conversed recovery arithmetic are proposed. Via the simulation, the conversed recovery arithmetic can recover the interferogram and the spectrum evidently.

Keywords Fourier transform spectrometer; Distribution function; Contrast; Concomitant line; Conversed recovery

(Received Apr. 20, 2011; accepted Aug. 16, 2011)

* Corresponding author