第 36 卷 第 11 期
2016 年 11 月

光 学 学 报
ACTA OPTICA SINICA

Vol. 36, No. 11
November, 2016

微小型傅里叶变换光谱仪光场分析与衍射抑制

吕金光 梁静秋 梁中翥* 秦余欣

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

摘要 为了进一步实现傅里叶变换红外光谱仪的微小型化，在基于多级微反射镜的傅里叶变换红外光谱仪结构中引入空间光调制器与点探测器。利用多级微反射镜对入射光场进行相位调制，同时利用空间光调制器对各干涉级次进行分布式测量。将两个多级微反射镜作为两个相位衍射屏并将空间光调制器作为振幅衍射屏，分析光波与每一个衍射屏的作用，发现干涉光场受到空间光调制器和多级微反射镜边缘衍射光场的调制。多级微反射镜边缘对入射光的截止产生了衍射效应，为了抑制该衍射效应对系统的影响，提出了一种扩展多级微反射镜阶梯级数的方法。该方法通过扩大干涉区域，避免了边缘衍射效应对内部有效干涉级次的影响。计算表明，该方法可以消除干涉图序列的失真，有效实现信号光谱复原。

关键词 光谱学；空间光调制器；标量衍射；干涉

中图分类号 O433.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1130002

Optical Field Analysis and Diffraction Restraint of Microminiature Fourier Transform Spectrometer

Lü Jinguang Liang Jingqiu Liang Zhongzhu Qin Yuxin

State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, *China*

Abstract In order to further realize the miniaturization of the Fourier transform infrared spectrometer, a spatial light modulator and a point detector are introduced in the Fourier transform infrared spectrometer which is based on multistep micro-mirror. The phase of incident optical field is modulated by the multistep micro-mirror, and the distributed measurement is conducted for each interference order using the spatial light modulator. The two multistep micro-mirrors are regarded as two phase diffraction screens, and the spatial light modulator is regarded as an amplitude diffraction screen. The interaction between optical wave and each diffraction screen is analyzed. It is found that the interference optical field is modulated by the spatial light modulator and the diffraction optical field at the multistep micro-mirror margin. The incident optical field is cut off by the multistep micro-mirror margin, which results in the diffraction effect. In order to inhibit the influence of diffraction effect on the system, a method which extends the step order of the multistep micro-mirror is proposed. By means of enlarging the interference area, the influence of the marginal diffraction effect on the internal effective interference order can be avoided. The results indicate that this method can eliminate distortion of the interferogram sequence and achieve signal spectrum recovery effectively.

Key words spectroscopy; spatial light modulator; scalar diffraction; interference

OCIS codes 300.6190; 300.6300; 120.5060; 070.6120

1 引 言

傅里叶变换光谱仪具有多通道、高精度、高分辨、低杂光等优点，在光谱探测与光谱分析等领域得到广泛

收稿日期：2016-05-09；**收到修改稿日期**：2016-07-02

基金项目：国家自然科学基金(61575193，61376122，61027010，61627819)、吉林省科技发展计划(20150520101JH，20150204072GX，20130206010GX)、长春市科技计划(2013261)、应光室自主基金(Y5743FQ15A)

作者简介：吕金光(1984—)，男，博士，助理研究员，主要从事微小光学系统设计与光学信息处理方面的研究。E-mail: jinguanglv@163.com

* **通信联系人**。E-mail: liangzz@ciomp.ac.cn

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的应用[1-2]。传统的傅里叶变换光谱仪利用驱动机构推动平面镜对光程差进行时间扫描，获得离散的干涉图序列，并通过离散傅里叶变换获得入射光信号的光谱[3]。由于平面镜扫描系统的驱动机构增大了仪器的体积，限制了传统傅里叶变换光谱仪的使用。近年来，随着环境监测、资源勘探、空间遥感、军事侦察等高新科技领域的发展，迫切需要实现微小型化、轻量化以及可在线分析的傅里叶变换光谱仪。国内外研究者们正积极开展基于新原理和新结构的傅里叶变换光谱仪的研究。Manzardo 等[4]将倾斜平面镜与分束器组合，进行宽光谱范围的测量；但探测器像元的尺寸限制了系统的光谱分辨率。Manuilskiy 等[5]研制了一种基于阶梯形和楔形法布里-珀罗干涉具的多通道光谱仪，实现了系统的微型化；但由于系统具有波长选择性，只能进行单波长或窄带光谱范围的测量。2008 年，梁静秋等[6-7]利用两个多级微反射镜代替平面镜扫描系统，实现了红外光谱仪的微小型化以及宽谱高分辨率光谱测量；该系统的缺陷为缩束系统体积大，且红外面阵探测器十分昂贵。

为了进一步降低红外光谱仪的体积和成本，本文引入空间光调制器与点探测器，利用空间光调制器对各级次的干涉图像进行选通，利用单点探测器代替红外面阵探测器对干涉图强度进行分步式测量，从而实现了系统的微小型化与低成本。为了明确该光谱仪的光波场传播与干涉过程，本文进行了系统建模与理论分析，并对系统边缘光场提出了有效的衍射抑制方法。

2　基本工作原理

基于多级微反射镜与空间光调制器，设计了微小型傅里叶变换光谱仪，结构原理如图 1 所示。入射光场的空间相位调制由两个多级微反射镜完成[8-10]，干涉图像的接收由空间光调制器完成。两个多级微反射镜将入射光场分割为多个单元，并对每个单元的光场进行不同的相位调制。令两个多级微反射镜具有相同的级数 N，其中一个多级微反射镜的阶梯步长为 d，则光程差(OPD)采样间隔 $s=2d$；为了满足光程差的互补原则，另一个多级微反射镜的阶梯步长设为 Nd。两个多级微反射镜彼此正交，其中一个多级微反射镜的第 m 个阶梯与另一个多级微反射镜的第 n 个阶梯形成的光程差 $\Delta(m,n)=2(nNd-md)$。如图 1 所示，光程差按照从上到下、从右到左的顺序逐级递增，多级微反射镜的内部阶梯和边缘阶梯分别对应小光程差区域和大光程区域。因此，第 (m,n) 个单元的光场对应的相位调制量可以表示为

$$\varphi(m,n)=2\pi\nu\Delta(m,n)=4\pi\nu(Nn-m)d, \tag{1}$$

式中 ν 为入射光波的波数，$\nu=1/\lambda$，其中 λ 为入射光波的波长。

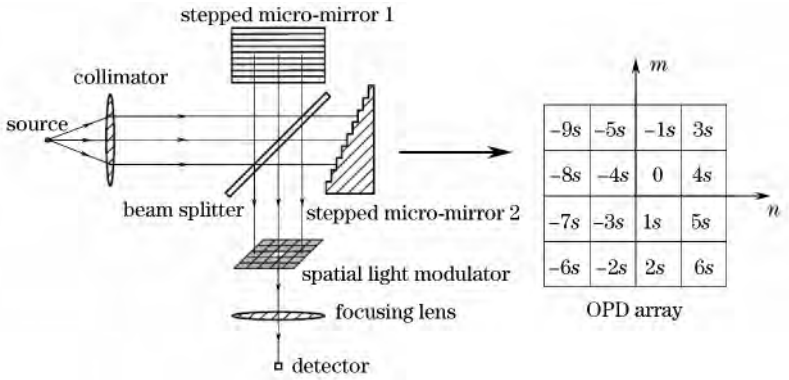

图 1　微小型傅里叶变换光谱仪原理图及光程差分布

Fig. 1　Schematic of microminiature Fourier transform spectrometer and distribution of OPD

每一个单元的光场对应一个相位调制量 $\varphi(m,n)$，因此每一个单元的光场对应着一个级次的干涉光强 $I(m,n)$。空间光调制器控制各个单元光场的选通，某一时刻只有一个单元的光场可通过，每个单元的干涉光强均由点探测器接收。随着空间光调制器的寻址选通，被多级微反射镜调制的干涉光场中不同级次的干涉光强在不同时刻被探测器接收和采集，从而获得干涉图采样序列，即 $I(Nn-m)=I(m,n)$。对干涉图采样序列作离散傅里叶变换，反演出的入射光波的光谱可表示为

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$B(\nu) = 2d\sum_{m}\sum_{n} I(Nn-m)\exp[-\mathrm{j}2\pi\nu 2(Nn-m)d]。\tag{2}$$

3　系统建模与分析

3.1　光波场传播建模

假设经准直镜出射单位振幅的平面波，单位振幅的平面波入射到分束器后被分为透射光路和反射光路，两条光路均垂直入射到两个多级微反射镜上，区别在于多级微反射镜阶梯的排布方式，即透射光路中的多级微反射镜阶梯沿 x 轴方向排布，反射光路中的多级微反射镜阶梯沿 y 轴方向排布。透射光路的等效光路示意图如图 2 所示。

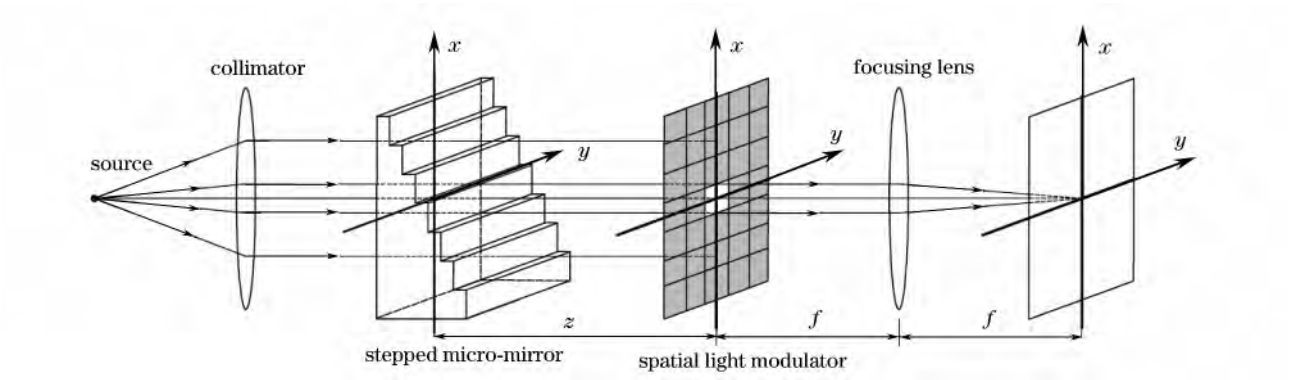

图 2　透射光路的等效光路示意图

Fig. 2　Equivalent light path diagram of transmission light path

多级微反射镜在系统中相当于一个相位衍射屏，对入射光波的波前相位分布进行调制。假设多级微反射镜每条阶梯的宽度均为 a，对于透射光路，多级微反射镜的屏函数可以表示为

$$s_1(x,y) = \left\{\mathrm{rect}\left(\frac{x-0.5a}{a}\right) * \left[\sum_{m=-\infty}^{\infty}\exp(\mathrm{j}4\pi\nu md)\delta(x-ma)\right]\right\}\mathrm{rect}\left(\frac{x}{Na}\right)\mathrm{rect}\left(\frac{y}{Na}\right),\tag{3}$$

式中 $\mathrm{rect}(\cdot)$ 为矩形函数。

同理，对于反射光路，阶梯步长为 Nd，多级微反射镜的屏函数可以表示为

$$s_2(x,y) = \left\{\mathrm{rect}\left(\frac{y-0.5a}{a}\right) * \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty}\exp(\mathrm{j}4\pi\nu nNd)\delta(y-na)\right]\right\}\mathrm{rect}\left(\frac{x}{Na}\right)\mathrm{rect}\left(\frac{y}{Na}\right)。\tag{4}$$

根据标量衍射理论，设光波由多级微反射镜到空间光调制器的传播距离为 z，则透射光路与反射光路的光波传播到空间光调制器的平面上发生干涉时形成的光场分布为

$$u_1(x,y) = s_1(x,y) * h(x,y) + s_2(x,y) * h(x,y) = [s_1(x,y)+s_2(x,y)] * h(x,y),\tag{5}$$

式中 $h(x,y)$ 为菲涅耳脉冲响应函数，$h(x,y) = \frac{1}{\mathrm{j}\lambda z}\exp(\mathrm{j}2\pi\nu z)\exp\left[\mathrm{j}\frac{\pi}{\lambda z}(x^2+y^2)\right]$[11]。

空间光调制器在系统中相当于一个位置随时间变化的矩孔衍射屏，每一个矩孔由 $p\times p$ 个像素组成。作为一个调制单元，空间光调制器对入射光波的振幅透射率进行调制，进而对各个干涉级次的光信号进行分步式开关。假设矩孔调制单元与多级微反射镜的阶梯具有相同的宽度 a，某一时刻第 (m,n) 个调制单元处于打开状态，此时空间光调制器的屏函数可以表示为

$$t(x,y) = \mathrm{rect}[(x-0.5a-ma)/a]\mathrm{rect}[(y-0.5a-na)/a]。\tag{6}$$

干涉光波经过空间光调制器的调制作用后，光场可表示为

$$u_2(x,y) = u_1(x,y)t(x,y) = \{[s_1(x,y)+s_2(x,y)] * h(x,y)\}t(x,y)。\tag{7}$$

根据透镜的傅里叶变换性质，略去常量相位因子，由空间光调制器透射的干涉光波经过焦距为 f 的聚焦镜后干涉光场在其后焦面上的分布可表示为[11]

$$u_f(x,y) = \frac{1}{\mathrm{j}\lambda f}\Im[u_2(x,y)] = \frac{1}{\mathrm{j}\lambda f}\Im\{[s_1(x,y)*h(x,y)+s_2(x,y)*h(x,y)]t(x,y)\}\Big|_{f_x=\frac{x}{\lambda f},f_y=\frac{y}{\lambda f}},\tag{8}$$

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式中 f_x、f_y 为空间频率变量，$f_x = x/(\lambda f)$，$f_y = y/(\lambda f)$；$\Im$ 表示傅里叶变换。

根据傅里叶变换的卷积定理，焦平面上的干涉光场分布可表示为

$$u_f(x,y) = \frac{1}{\mathrm{j}\lambda f}\{\{\Im[s_1(x,y)+s_2(x,y)]\Im[h(x,y)]\}*\Im[t(x,y)]\}\big|_{f_x=\frac{x}{\lambda f},f_y=\frac{y}{\lambda f}} = \frac{1}{\mathrm{j}\lambda f}\{[S_1(f_x,f_y)+S_2(f_x,f_y)]H(f_x,f_y)\}*T(f_x,f_y)\big|_{f_x=\frac{x}{\lambda f},f_y=\frac{y}{\lambda f}}, \tag{9}$$

式中 $H(f_x,f_y)$ 为菲涅耳传递函数，$H(f_x,f_y) = \Im[h(x,y)] = \exp(\mathrm{j}2\pi\nu z)\exp[-\mathrm{j}\pi\lambda z(f_x^2+f_y^2)]$[11]，$S_1(f_x,f_y)$ 和 $S_2(f_x,f_y)$ 分别为两个多级微反射镜的空间频谱，$T(f_x,f_y)$ 为空间光调制器的空间频谱，$S_1(f_x,f_y)$、$S_2(f_x,f_y)$、$T(f_x,f_y)$ 的具体函数形式分别为

$$S_1(f_x,f_y) = N^2a^3\left\{\mathrm{sinc}(af_x)\exp(-\mathrm{j}\pi f_x a)\sum_{m=-\infty}^{\infty}\exp[\mathrm{j}2\pi m(2\nu d - f_x a)]\right\}* \mathrm{sinc}(Naf_x)\mathrm{sinc}(Naf_y), \tag{10}$$

$$S_2(f_x,f_y) = N^2a^3\left\{\mathrm{sinc}(af_y)\exp(-\mathrm{j}\pi f_y a)\sum_{n=-\infty}^{\infty}\exp[\mathrm{j}2\pi n(2N\nu d - f_y a)]\right\}* \mathrm{sinc}(Naf_x)\mathrm{sinc}(Naf_y), \tag{11}$$

$$T(f_x,f_y) = a^2\mathrm{sinc}(af_x)\mathrm{sinc}(af_y)\exp[-\mathrm{j}\pi a(f_x+f_y)]\exp[-\mathrm{j}2\pi a(mf_x+nf_y)], \tag{12}$$

式中 sinc(·)为矩形函数的傅里叶变换。

将(10)～(12)式代入(9)式，得到焦平面上的干涉光强分布为

$$I(x,y) = \left(\frac{1}{\lambda f}\right)^2\left|\{[S_1(f_x,f_y)+S_2(f_x,f_y)]H(f_x,f_y)\}*T(f_x,f_y)\right|^2_{f_x=\frac{x}{\lambda f},f_y=\frac{y}{\lambda f}}。 \tag{13}$$

由(13)式可以看出，焦平面上的干涉光强为两个多级微反射镜的空间频谱之和与空间光调制器的空间频谱卷积的平方。两个多级微反射镜的空间频谱之和代表双光束干涉，空间光调制器的空间频谱代表光波衍射，因此焦平面上的干涉光强受到了空间光调制器衍射效应的调制。

3.2　干涉光强图像分析

以(1,1)、(16,1)、(1,16)、(16,16)这 4 个调制单元处于打开状态时获得的干涉光强图像为例，分析该系

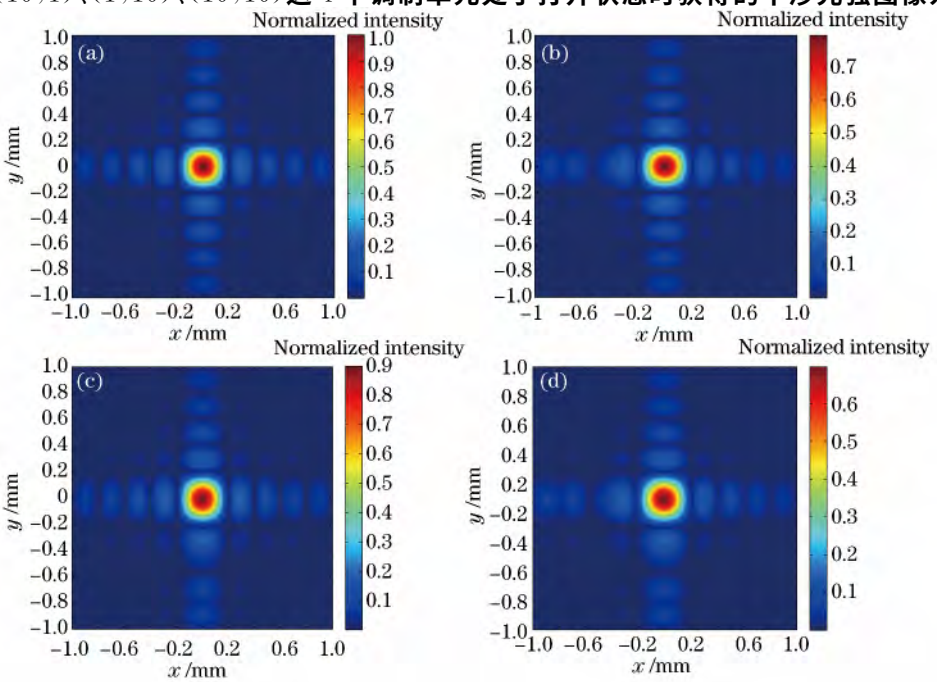

图 3　不同调制单元处于打开状态时对应的干涉光强图像。(a) (1,1)；(b) (1,16)；(c) (16,1)；(d) (16,16)

Fig. 3　Images of interference light intensity corresponding to different modulation units at on-state. (a) (1,1); (b) (1,16); (c) (16,1); (d) (16,16)

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

统聚焦光斑的能量分布。取 $a=1$ mm，$N=32$，$z=40$ mm，$f=40$ mm，当(1,1)、(16,1)、(1,16)、(16,16)这4个调制单元处于打开状态时，系统焦平面上的干涉光强图像分别如图3(a)～(d)所示。

由图3可以看出，干涉光强图像中除了中央亮斑之外，周围出现了许多衍射斑，即形成干涉-衍射图像，这是由于多级微反射镜的双光束干涉光场受到空间光调制器光波衍射光场的调制形成的，即干涉光场受到 $T(f_x,f_y)$ 函数的调制。图4为空间光调制器各调制单元对应的干涉光强沿 x 轴分布的截面图，可以看出，不同的调制单元对应不同能量的干涉光强，这些干涉光强都受到 $T(f_x,f_y)$ 函数的调制，且对应的中央亮斑具有相同的宽度，均为0.4 mm。通过分析，发现干涉光强图像中央亮斑的宽度 w_x、w_y 与空间光调制器的孔径及聚焦镜的焦距有关，即 $w_x=2\lambda f/a$，$w_y=2\lambda f/a$。

记录空间光调制器的每一个调制单元处于打开状态时焦平面上的干涉光强，将其与调制单元的开态位置相对应，便可得到与空间光调制单元对应的干涉光强图像阵列，即 $I[m(x,y),n(x,y)]$，如图5所示。可以看出，各个级次对应的干涉光强图像的相对强度不同，光场分布特征基本相同。

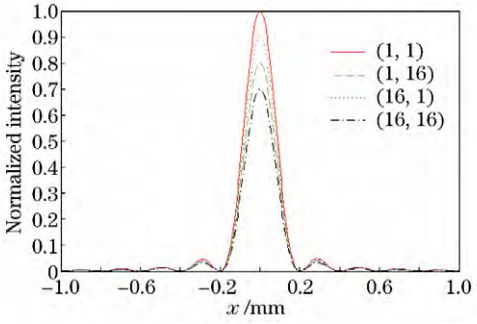

图4　沿 x 轴的截面干涉光强

Fig. 4　Interference light intensity of cross section along x axis

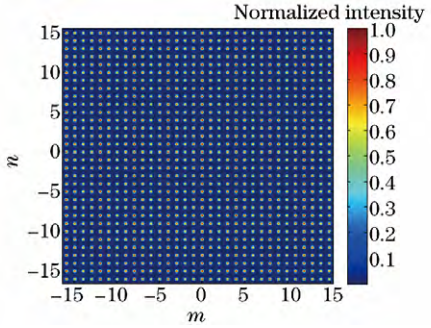

图5　空间光调制单元对应的干涉图像阵列

Fig. 5　Interference image array corresponding to spatial light modulation units

4　光谱反演与边缘衍射抑制

由于探测器光敏面的大小有限，无法将焦平面上干涉光强图像所有的光能量都收集起来。同时，由于各级次干涉光强均受到相同函数的调制，强度较弱的衍射斑具有相同的能量百分比。因此，忽略强度较微弱的边缘衍射斑，只接收强度较大的中央亮斑。中央亮斑的宽度与聚焦镜的焦距有关，合理设计聚焦镜的参数可以将中央亮斑的光能量聚焦到探测器的光敏面内。假设探测器光敏面的边长为 b，为了使干涉光强图像中央亮斑的宽度 w_x 小于探测器光敏面的尺寸 b，聚焦镜的焦距应满足 $f\leqslant ab/(2\lambda_{max})$。对于光敏面尺寸为0.4 mm×0.4 mm的碲镉汞(MCT)探测器，当系统工作于中波红外波段时，聚焦镜的焦距应满足 $f\leqslant 40$ mm。

取波数 ν 分别为0.2，0.25，0.3 μm^{-1}，焦距 $f=40$ mm，测量每一个空间光调制单元处于打开状态时对应

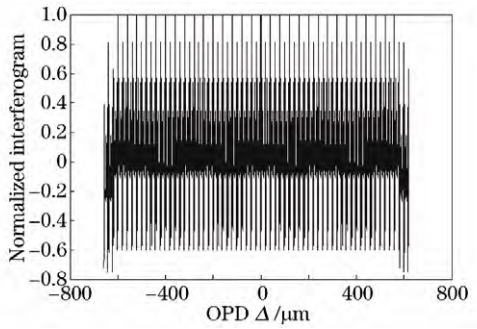

图6　滤除直流分量后的干涉图序列

Fig. 6　Interferogram sequence after filtering direct current component

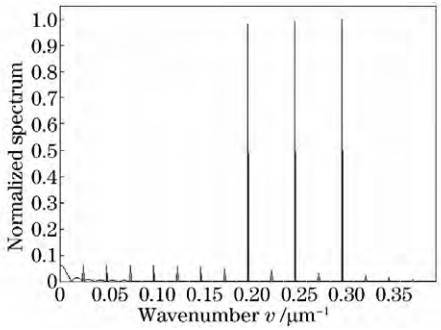

图7　干涉图序列对应的复原光谱

Fig. 7　Recovered spectrum corresponding to interferogram sequence

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的每一个级次的干涉光强，得到对应各个级次的干涉图阵列 $I(m,n)$。将干涉图阵列按照光程差排布进行数据重组，得到一维干涉图序列，即 $I(Nn-m)$。滤除直流分量后的干涉图序列如图 6 所示。根据(2)式，对 $I(Nn-m)$ 作离散傅里叶变换，可以得到入射光信号在频域的复原光谱谱线[12-15]，如图 7 所示。

由图 6 可以看出，干涉图序列两侧的大光程差区域产生失真，干涉图序列强度产生衰减，导致图 7 的复原光谱中除了入射光信号的主频谱线外，周围出现了许多强度较弱的伴随谱线。计算得到复原光谱的归一化光谱误差[8] $E=0.64$，噪声明显。

干涉图序列中大光程差区域对应多级微反射镜的边缘，因此干涉图序列的失真主要是由于多级微反射镜的尺寸限制了边缘入射光场。为了明确多级微反射镜对入射光场造成的影响，根据(5)式得到入射光场与多级微反射镜相互作用后的光场分布，如图 8 所示。

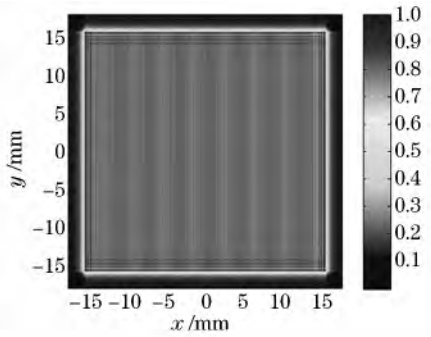

图 8　入射光场经过多级微反射镜后的光场分布

Fig. 8　Optical field distribution of incident light field passing through multistep micro-mirrors

由图 8 可以看出，多级微反射镜边缘区域对应的光场发生了畸变，出现了一些细微的衍射条纹，并且能量向外围空间弥散。当多级微反射镜与空间入射光场相互作用时，由于多级微反射镜的边缘呈阶跃变化，边缘的入射光场突然被截止，产生了衍射条纹，因此干涉图序列中大光程差位置处的干涉信号产生失真，并且复原光谱中主频谱线的周围产生衍射噪声。

为了抑制由多级微反射镜的边缘截止产生的衍射效应对系统的影响，提出了一种扩展阶梯级数的方法以消除干涉图序列的失真与复原光谱中的衍射噪声。在不改变两个多级微反射镜阶梯步长与阶梯宽度的情况下，扩展多级微反射镜的阶梯级数，并在每个多级微反射镜的两侧各增加一定数目的阶梯，同时延长每个阶梯的长度以覆盖阶梯级数的扩展，从而增加了多级微反射镜的通光孔径。附加的阶梯产生附加的干涉级次，但并不影响内部有效干涉级次的空间分布。附加的干涉级次将有效的干涉级次包围在干涉光场内部，从而避免了多级微反射镜的边缘衍射效应对内部有效干涉级次的影响。利用空间光调制器对各干涉级次的光进行分步式开关时，只选择内部有效的干涉级次通过。利用扩展阶梯级数方法获得的滤除直流分量后的干涉图序列和复原光谱分别如图 9、10 所示。

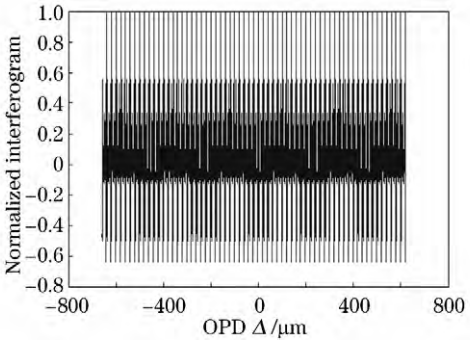

图 9　扩展阶梯级数后的干涉图序列

Fig. 9　Interferogram sequence after extending step order number

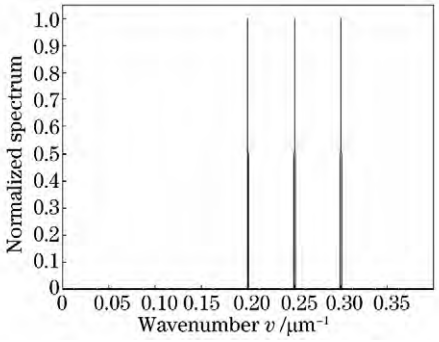

图 10　扩展阶梯级数后的复原光谱

Fig. 10　Recovered spectrum after extending step order number

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

对比图 6、9 可以看出，扩展多级微反射镜的阶梯级数可消除干涉图序列两侧大光程差区域的信号失真。对比图 7、10 可以看出，对多级微反射镜进行扩展阶梯级数后的复原光谱中只有入射光信号的主频谱线。计算得到入射光信号的主频谱线归一化光谱误差为 $E=6.5\times10^{-4}$，可见多级微反射镜的边缘截止在复原光谱中产生的衍射噪声得到了抑制，从而有效实现了信号光谱复原。

5 结　论

在基于多级微反射镜的傅里叶变换光谱仪结构中引入空间光调制器与点探测器，利用多级微反射镜对入射光场进行空间调制，并且利用空间光调制器对干涉图像进行选通测量，不仅可以降低干涉图接收系统的体积，还可以避免使用红外面阵探测器，降低了仪器成本。空间光调制器的各个调制单元与多级微反射镜的各个光场分割单元相对应，通过控制每一个调制单元的开关态，使各个级次的干涉光场依次通过，从而实现干涉图像的分步式测量。使用两个多级微反射镜形可成双光束干涉光场，使用空间光调制器形可成光波衍射光场，因此探测面上形成的干涉光强图像是双光束干涉与光波衍射相互调制的结果，图像中央为干涉亮斑，周围为衍射斑。由于探测器的光敏面有限，并且衍射斑能量较弱，通过合理设计聚焦镜的焦距，可利用探测器的有效光敏面只接收中央亮斑的光能量。通过对空间光调制器各个调制单元打开时的干涉光强进行探测，获得干涉图序列，进而获得入射光信号的光谱。多级微反射镜的边缘截止效应使得入射光波产生衍射，且边缘级次的干涉光信号产生失真。为了抑制多级微反射镜截止产生的边缘衍射效应，采用一种扩展阶梯级数的方法，通过增加多级微反射镜的阶梯级数扩大干涉区域，避免边缘衍射效应对内部有效干涉级次的影响，从而获得理想的干涉图序列，有效实现入射光信号的光谱复原。

参　考　文　献

1 Weng Shifu. Fourier transform infrared spectrometer[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 34-56.
翁诗甫. 傅里叶变换红外光谱仪[M]. 北京：化学工业出版社，2005：34-56.

2 Griffiths P R, de Haseth J A. Fourier transform infrared spectrometry[M]. 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007: 19-41.

3 Saptari V. Fourier-transform spectroscopy instrumentation engineering[M]. Washington: SPIE Press, 2004: 17-26.

4 Manzardo O. Micro-sized Fourier spectrometers[D]. Neuchatel: University of Neuchatel Institute of Microtechnique, 2002: 29-54.

5 Manuilskiy A, Andersson H, Tungström G, *et al*. Compact multichannel optical Fourier spectrometer[C]. SPIE, 2006, 6395: 639504.

6 Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu, Lü Jinguang, *et al*. Micro spatial modulation Fourier transform infrared spectrometer[J]. Chinese Optics, 2015, 8(2): 277-296.
梁静秋，梁中翥，吕金光，等. 空间调制微型傅里叶变换红外光谱仪研究[J]. 中国光学，2015，8(2)：277-296.

7 Fu Jianguo, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu. Analysis and design for the optical system of a static infrared Fourier transform spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0222006.
付建国，梁静秋，梁中翥. 一种静态傅里叶变换红外光谱仪的光学系统分析与设计[J]. 光学学报，2012，32(2)：0222006.

8 Feng C, Liang J Q, Liang Z Z. Spectrum constructing with nonuniform samples using least-squares approximation by cosine polynomials[J]. Applied Optics, 2011, 50(34): 6377-6383.

9 Lü Jinguang, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu. Error synthesis and statistical analysis on stepped mirror array by Monte Carlo method[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(22): 220701.
吕金光，梁静秋，梁中翥. 多级反射镜阵列 Monte Carlo 法误差合成与统计分析[J]. 物理学报，2012，61(22)：220701.

10 Feng C, Wang B, Liang Z Z, *et al*. Miniaturization of step mirrors in a static Fourier transform spectrometer: theory and simulation[J]. J Opt Soc Am B, 2011, 28(1): 128-133.

11 Lü Naiguang. Fourier optics[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2006: 89-90.
吕乃光. 傅里叶光学[M]. 2 版. 北京：机械工业出版社，2006：89-90.

12 Lü Jinguang, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu. Study on spectrum inversion of spatially modulated Fourier transform spectrometer[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(6): 1694-1699.
吕金光，梁静秋，梁中翥. 空间采样傅里叶变换光谱仪光谱反演研究[J]. 光谱学与光谱分析，2012，32(6)：1694-1699.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

13 Jian Xiaohua, Zhang Chunmin, Zhu Baohui, *et al*. The data processing method of the temporarily and spatially mixed modulated polarization interference imaging spectrometer[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(9): 6131-6137.
简小华，张淳民，祝宝辉，等. 时空混合调制型偏振干涉成像光谱仪数据处理研究[J]. 物理学报, 2010, 59(9): 6131-6137.

14 Feng Yutao, Sun Jian, Li Yong, *et al*. Broad-band spatial heterodyne interferometric spectrometer[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(1): 48-55.
冯玉涛，孙　剑，李　勇，等. 宽谱段空间外差干涉光谱仪[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(1): 48-55.

15 Mu Tingkui, Zhang Chunmin, Li Qiwei, *et al*. The polarization-difference interference imaging spectrometer - Ⅰ. Concept, principle, and operation[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(11): 110704.
穆廷魁，张淳民，李祺伟，等. 差分偏振干涉成像光谱仪Ⅰ. 概念原理与操作[J]. 物理学报, 2014, 63(11): 110704.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net