

# 窄带高光谱干涉成像的压缩采样复原方法

孟 鑫 李建欣\* 朱日宏 周 伟 程静静

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

**摘要** 利用干涉成像光谱仪对目标进行窄带高光谱成像探测具有高光通量、高光谱分辨率和高目标分辨率等优点。按照尼奎斯特定理对窄带光谱干涉信息进行采样存在较大的数据冗余,增加了后期傅里叶变换的数据处理量,影响光谱的复原效率。在分析窄带光谱傅里叶变换特性的基础上,提出了基于滤光片光谱透射率函数的窄带光谱压缩采样方法。引入滤光片参数和混叠参数,可以复原不同精度的窄带光谱信息。配以符合要求的多带通窄带滤光片,可对目标进行压缩采样获取多个谱段的窄带光谱信息,从而避免了逐个谱段探测,提高了探测效率。对该方法进行了仿真分析和实验验证,得到了与目标光谱相吻合的复原窄带光谱。

**关键词** 光谱学;干涉成像光谱;窄带谱段;压缩采样

中图分类号 O433 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0130001

## Compressive Sampling Recovery Method of Narrow-Band Hyperspectral Interferometric Imaging

Meng Xin Li Jianxin Zhu Rihong Zhou Wei Cheng Jingjing

(*Institute of Electronic Engineering and Photoelectronic Technology,*

*Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China*)

**Abstract** Interferometric imaging spectrometer has the advantage of high flux, high spectral resolution and high target resolution when it is used for narrow-band hyperspectral imaging detection. When the fringe pattern is sampled according to the Nyquist law, it produces large data redundancy which increases the data of Fourier transform and affects the spectrum recovery efficiency. To improve the recovery efficiency of interferometric imaging spectrometer, a narrow-band compressive sampling method based on the transmittance function of optical band-pass filter is described after analyzing the Fourier transform characteristics of narrow-band spectrum. By introducing different parameters of the filter and aliasing parameter, we can get compressive sampling frequency of narrow-band spectrum with different recovery accuracy. Together with the optical multi-band-pass narrow-band filter, we can obtain multiple-band spectrums information of the target through direct compressive sampling in order to avoid the by-band detection and to improve the detection efficiency. The proposed method is verified by simulation and experiment. As a result, the recovery narrow-band spectrum is consistent with the target spectrum.

**Key words** spectroscopy; interferometric imaging spectrum; narrow-band spectrum; compressive sampling

**OCIS codes** 110.4234; 110.3175; 300.6190

## 1 引 言

在军事侦察、农产品检验及污染物监测等领域需要探测目标窄带(探测谱段的最大波数与最小波数之差远小于中心波数)谱段内的高光谱成像信息。

利用干涉成像光谱仪对目标进行窄带高光谱成像探测具有高光通量、高光谱分辨率和高目标分辨率等优点<sup>[1~3]</sup>。干涉成像光谱仪利用干涉信息和光谱信息之间存在的傅里叶变换关系,通过探测目标的干

收稿日期: 2012-07-09; 收到修改稿日期: 2012-07-17

基金项目: 国家自然科学基金(61205016, U1231112)资助课题。

作者简介: 孟 鑫(1989—),男,博士研究生,主要从事干涉成像光谱技术方面的研究。E-mail: njjustmengxin@163.com

导师简介: 朱日宏(1964—),男,博士,教授,主要从事光学干涉测量与光学精密仪器等方面的研究。

E-mail: zhurihong@mail.njust.edu.com

\* 通信联系人。E-mail: ljx@vip.163.com

涉信息,经过傅里叶变换复原目标的光谱信息<sup>[4,5]</sup>。在数据处理过程中要对干涉信息进行采样。按照奈奎斯特定理对干涉信息进行采样,可以复原从零频到最大探测波数的光谱,是目前普遍使用的采样方法<sup>[6]</sup>。当探测谱段为窄带光谱时,低于最小探测波数的复原光谱都是无用信息,增加了后期傅里叶变换的数据量,影响光谱的复原效率。对于像面干涉成像光谱仪<sup>[7,8]</sup>,冗余数据会增加探测时间和数据量,增加对存储设备、传输设备等硬件的要求。

为了减少干涉成像光谱技术中冗余的采样数据,本文在分析窄带光谱傅里叶变换特性的基础上,结合带通滤波的特点,提出了基于滤光片光谱透射率函数的窄带光谱压缩采样方法。引入滤光片参数和混叠参数,能够复原不同精度的窄带光谱信息。通过对两个非重叠窄带光谱压缩采样的方法的研究,提出了非重叠窄带光谱压缩采样的方法,进一步提高了窄带高光谱的探测效率。

## 2 窄带光谱压缩采样的基本原理

根据干涉信息和光谱信息之间的傅里叶变换关系,干涉成像光谱仪获取的物点干涉信息为

$$I(\Delta) = 2 \int_0^{+\infty} B(\sigma)(1 + \cos 2\pi\sigma\Delta) d\sigma. \quad (1)$$

式中  $B(\sigma)$  为目标物点的光谱信息,  $I(\Delta)$  为采集的干涉信息,  $\Delta$  为光程差,  $\sigma$  为波数 ( $\sigma = 1/\lambda$ )。对于充分调制的干涉信息,存在直流分量  $I(+\infty)$ , 其不包含光谱信息,在复原光谱信息时可以去除。将  $B(\sigma)$  对偶延拓至负数域, (1)式可改写为

$$I(\Delta) = \int_{-\infty}^{+\infty} B(\sigma) \cos(2\pi\sigma\Delta) d\sigma = \int_{-\infty}^{+\infty} B(\sigma) \exp(i2\pi\sigma\Delta) d\sigma. \quad (2)$$

如果也将  $I(\Delta)$  对偶延拓扩展至负数域,则干涉信息和光谱信息之间存在傅里叶变换的关系,即

$$I(\Delta) = \mathcal{F}^{-1} B(\sigma), \\ B(\sigma) = \mathcal{F} I(\Delta). \quad (3)$$

考虑到数字化处理,干涉成像光谱仪获取的干涉信息要进行采样。通常情况下按照奈奎斯特定理进行采样,此时相当于用一个  $\delta$  梳状函数与干涉信息相乘<sup>[9]</sup>,即

$$I_D(\Delta) = I(\Delta) \sum \delta(\Delta - \delta\Delta), \quad (4)$$

式中  $\delta\Delta$  为干涉信息的采样间隔,与采样频率互为倒数;  $I_D(\Delta)$  为获取的离散干涉信息;这一步通常由数

字采集系统完成。

当探测谱段为窄带光谱时,低于最小探测波数的复原光谱都是无用信息,意味着按照奈奎斯特定理对干涉信息采样存在冗余的数据。对干涉信息进行压缩采样可以减少冗余数据。对离散干涉信息进行等间隔采样,其他位置的数据置0。为避免产生新的相位误差,压缩采样后的干涉信息要包含干涉光强幅度最大的点。压缩采样后复原的光谱信息满足:

$$B_D(\sigma) = \mathcal{F}_D [I_D(\Delta) \sum \delta(\Delta - m\delta\Delta)], \quad (5)$$

式中  $\mathcal{F}_D$  为离散傅里叶变换,  $m$  为压缩采样倍数;  $B_D(\sigma)$  为复原的离散光谱信息,分布如图1所示,光谱信息周期性地分布  $N\sigma_s/m$  ( $N=1,2,3,\dots$ ) 的波数上。为避免相邻谱段混叠,需满足

$$\begin{cases} -\sigma_L + n\sigma_{cs} \leq \sigma_L, \\ -\sigma_R + (n+1)\sigma_{cs} \geq \sigma_R, \end{cases} \quad (6)$$

式中  $\sigma_L$  为探测最小波数,  $\sigma_R$  为探测最大波数,  $\sigma_{cs}$  为压缩采样频率。  $n$  是和探测谱段有关的整数,表达式为  $1 \leq n \leq E[\sigma_L/(\sigma_R - \sigma_L)]$ , 其中  $E[\ ]$  表示向下取整数运算。由(6)式可得

$$\frac{2\sigma_R}{n+1} \leq \sigma_{cs} \leq \frac{2\sigma_L}{n} [1 \leq n \leq \lfloor \sigma_L/(\sigma_R - \sigma_L) \rfloor], \quad (7)$$

给定探测光谱的范围,由(7)式可得到干涉信息的压缩采样频率。

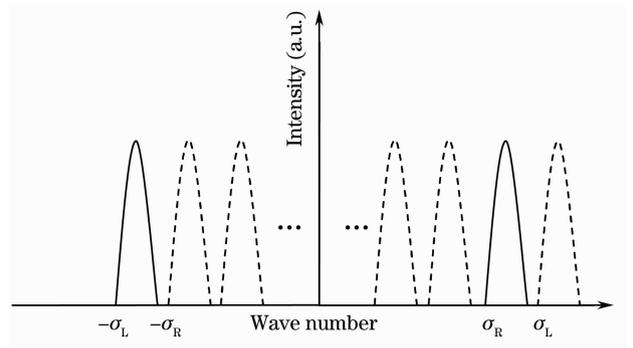


图1 压缩采样后复原光谱的分布图

Fig. 1 Distribution of recovered spectrum after compressive sampling

## 3 基于滤光片光谱透射率函数的窄带光谱压缩采样方法

由(7)式得到的压缩采样频率只与探测的最大波数和最小波数有关,是建立在滤光片光谱透射率函数为矩形窗基础上的。在窄带光谱探测过程中,为滤除其他波段光谱的影响,需要在探测装置中加入窄带滤光片。由于生产工艺等原因,窄带滤光片

透射率函数很难达到矩形窗要求<sup>[10,11]</sup>。此时利用(7)式得到的采样频率对干涉信息进行采样,复原光谱可能存在较大的误差。因此在窄带光谱探测中必须考虑滤光片光谱透过函数  $W(\sigma)$  对采样频率的影响。

窄带滤光片实际通光谱段与标明的谱段之间往往存在一定的偏差,会影响目标透过光谱的范围,在应用中应当考虑这一偏差。利用一个窄带滤光片通光谱段波动参数  $\Delta\sigma$  来扩展窄带滤光片光谱透过范围,可以保证探测谱段全部通过窄带滤光片,此时探测谱段应满足

$$\begin{cases} \sigma_{\min} = \bar{\sigma}_L = \sigma_L - \Delta\sigma, \\ \sigma_{\max} = \bar{\sigma}_R = \sigma_R + \Delta\sigma, \end{cases} \quad (8)$$

式中  $\sigma_L \sim \sigma_R$  为要探测的窄带光谱段,  $\bar{\sigma}_L \sim \bar{\sigma}_R$  为扩展后的探测谱段。

受谱线函数影响<sup>[12]</sup>,干涉成像光谱仪存在一个最小的可探测光强幅度  $I_m$ , 低于这个幅度的光谱被谱线函数的旁瓣淹没而无法探测。为防止探测谱段内的光谱出现漏测,要满足

$$I_{\sigma} t_m > I_m, \quad \bar{\sigma}_L \leq \sigma \leq \bar{\sigma}_R \quad (9)$$

式中  $t_m$  为探测谱段内最小透射率。在目标探测谱段  $\bar{\sigma}_L \sim \bar{\sigma}_R$  内,保证窄带滤光片光谱透射率函数值  $t$  都满足  $t \geq t_m$ , 如图 2 中虚横线所示。在应用中,为了减小噪声对复原光谱强度影响,提高复原光谱的可信度,  $t_m$  值不宜过小。

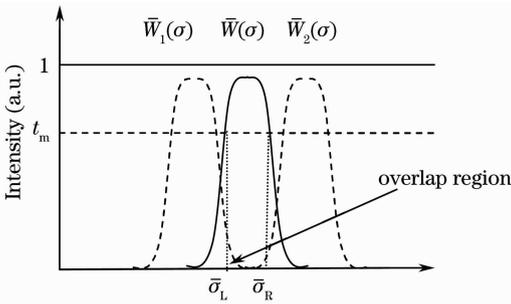


图 2 压缩采样后复原光谱的混叠示意图

Fig. 2 Aliasing of recovered spectrum after compressive sampling

为表示由于压缩采样导致的复原谱段两端的光谱混叠程度,定义混叠率函数为

$$\eta = \frac{\bar{I}(\sigma)}{I(\sigma)}, \quad \bar{\sigma}_L \leq \sigma \leq \bar{\sigma}_R \quad (10)$$

式中  $\bar{I}(\sigma)$  为压缩采样后复原光谱中与探测谱段相邻的谱段在波数  $\sigma$  上的光强幅度,其它谱段在探测谱段内的光强分布对混叠率影响较小,可以忽略。混叠率函数  $\eta$  与目标探测谱段值和窄带滤光片光谱透

射率函数相关。假设探测目标各波数具有相同光强幅度,目标发射或者反射的光束经过窄带滤光片后光谱分布和窄带滤光片透射率函数相同,即

$$\eta = \frac{\bar{W}(\sigma)}{W(\sigma)}, \quad \bar{\sigma}_L \leq \sigma \leq \bar{\sigma}_R \quad (11)$$

式中  $\bar{W}(\sigma)$  为滤光片透射率函数平移到与探测谱段相邻谱段上透射率函数。压缩采样后复原光谱存在重叠,如图(2)中重叠区域所示。在应用中根据探测精度要求,设定探测谱段内的最大混叠率为  $\eta_M$ , 代入混叠率函数定义式得

$$\eta_M = \max \left[ \frac{\bar{W}(\sigma)}{W(\sigma)} \right], \quad \bar{\sigma}_L \leq \sigma \leq \bar{\sigma}_R \quad (12)$$

窄带滤光片透过函数的值通常由中心波数向两边递减,如图 2 中实线所示,令  $W(\sigma_m) = \min[W(\bar{\sigma}_L), W(\bar{\sigma}_R)]$ , 此时:  $\max \left[ \frac{\bar{W}(\sigma)}{W(\sigma)} \right] = \frac{\bar{W}(\bar{\sigma}_m)}{W(\bar{\sigma}_m)}$ , 代入(12)式得到相邻谱段上透射率函数在探测谱段内最大值:

$$\bar{W}(\bar{\sigma}_m) = \eta_M W(\bar{\sigma}_m). \quad (13)$$

求解  $W(\sigma) = \bar{W}(\bar{\sigma}_m)$  得到波数  $\bar{\sigma}_L, \bar{\sigma}_R$ 。为了保证探测谱段内光谱混叠率不超过  $\eta_M$ , 探测的谱段进一步扩展为  $(\bar{\sigma}_L + \bar{\sigma}_L)/2 \sim (\bar{\sigma}_R + \bar{\sigma}_R)/2$ , 代入(7)式得到新的压缩采样频率关系式:

$$\begin{aligned} \frac{\bar{\sigma}_L + \bar{\sigma}_L}{n+1} \leq \sigma_{cs} \leq \frac{\bar{\sigma}_R + \bar{\sigma}_R}{n}, \\ (1 \leq n \leq [(\bar{\sigma}_L + \bar{\sigma}_L)/2\Delta\sigma]) \end{aligned} \quad (14)$$

式中  $W(\bar{\sigma}_L) = \eta_M W(\bar{\sigma}_L), W(\bar{\sigma}_R) = \eta_M W(\bar{\sigma}_R), W(\sigma) \geq t_m (\bar{\sigma}_L \leq \sigma \leq \bar{\sigma}_R)$ 。

需要说明的是,(14)式中关于混叠率函数的计算是建立在目标光谱值不随波数变化的条件下的,此时混叠率函数  $\eta$  在探测谱段内有最大值。在应用中,由于目标光谱随波数变化,所以探测谱段光谱混叠率小于  $\eta_M$ 。

## 4 非重叠窄带光谱的压缩采样方法

当探测目标具有两个或者多于两个的非重叠窄带光谱时,为避免逐个谱段探测,可以在干涉成像光谱仪中加入多带通滤光片对目标进行直接探测。当目标具有两个非重叠窄带光谱时。利用(14)式计算出两个窄带光谱的扩展探测谱段,设为  $\sigma_{L1} \sim \sigma_{R1}, \sigma_{L2} \sim \sigma_{R2}$ ; 带宽分别为  $\Delta\sigma_1$  和  $\Delta\sigma_2$ 。干涉数据在进行处理时要经过对偶化处理,因此在一个完整的傅里叶变换周期内存在四个谱段,如图 3 所示。为方便计算,根据下面的命名规则对四个谱段重新命名:

$$\Delta\sigma'_1: \sigma_{1L} = \sigma_{R2}, \quad \sigma_{1R} = \sigma_{L2},$$

$$\begin{aligned} \Delta\sigma'_2: \sigma_{2L} &= \sigma_{R1}, \quad \sigma_{2R} = \sigma_{L1}, \\ \Delta\sigma'_3: \sigma_{3L} &= \sigma_{L1}, \quad \sigma_{3R} = \sigma_{R1}, \\ \Delta\sigma'_4: \sigma_{4L} &= \sigma_{L2}, \quad \sigma_{4R} = \sigma_{R2}. \end{aligned}$$

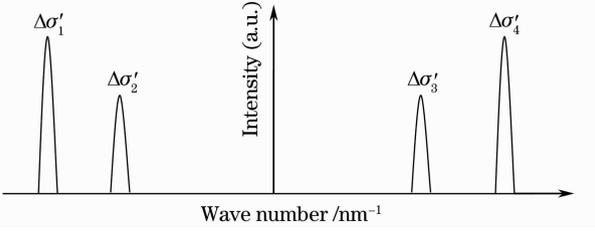


图 3 两个非重叠窄带光谱示意图

Fig. 3 Two-non-overlapping narrow-band spectrum

进行压缩采样后, 谱段信息周期性地分布在  $N\sigma_{cs}$  ( $N = 1, 2, 3, \dots$ ) 上, 为了保证四个探测谱段平移后互不重叠, 则压缩采样频率  $\sigma_{cs}$  应满足

$$\begin{cases} \frac{\sigma_{2R} - \sigma_{1L}}{n_1 + 1} \leq \sigma_{cs} \leq \frac{\sigma_{2L} - \sigma_{1R}}{n_1} \quad (0 \leq n_1 \leq \left\lfloor \frac{\sigma_{2L} - \sigma_{1R}}{\sigma_{sm}} \right\rfloor), \\ \frac{\sigma_{3R} - \sigma_{1L}}{n_2 + 1} \leq \sigma_{cs} \leq \frac{\sigma_{3L} - \sigma_{1R}}{n_2} \quad (0 \leq n_2 \leq \left\lfloor \frac{\sigma_{3L} - \sigma_{1R}}{\sigma_{sm}} \right\rfloor), \\ \frac{\sigma_{4R} - \sigma_{1L}}{n_3 + 1} \leq \sigma_{cs} \leq \frac{\sigma_{4L} - \sigma_{1R}}{n_3} \quad (0 \leq n_3 \leq \left\lfloor \frac{\sigma_{4L} - \sigma_{1R}}{\sigma_{sm}} \right\rfloor), \\ \frac{\sigma_{3R} - \sigma_{2L}}{n_4 + 1} \leq \sigma_{cs} \leq \frac{\sigma_{3L} - \sigma_{2R}}{n_4} \quad (0 \leq n_4 \leq \left\lfloor \frac{\sigma_{3L} - \sigma_{2R}}{\sigma_{sm}} \right\rfloor), \end{cases} \quad (15)$$

式中  $\sigma_{sm} = \Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2$ , 为目标各探测谱段的谱宽之和。第一个不等式保证波段  $\Delta\sigma'_1$  与  $\Delta\sigma'_2$  不重叠,  $\Delta\sigma'_3$  与  $\Delta\sigma'_4$  不重叠; 第二个不等式保证波段  $\Delta\sigma'_1$  与  $\Delta\sigma'_3$  不重叠,  $\Delta\sigma'_2$  与  $\Delta\sigma'_4$  不重叠; 第三个不等式保证波段  $\Delta\sigma'_1$  与  $\Delta\sigma'_4$  不重叠; 第四个不等式保证波段  $\Delta\sigma'_2$  与  $\Delta\sigma'_3$  不重叠。

由(15)式可得到两个非重叠窄带光谱的干涉信息压缩采样频率  $\sigma_{cs}$  的取值范围。在此基础上分析多个非重叠窄带光谱干涉信息压缩采方法。假设目标共有  $N$  个非重叠的窄带光谱  $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2, \dots, \Delta\sigma_N$ , 且满足

$$\sigma_{L1} < \sigma_{R1} \leq \sigma_{L2} < \sigma_{R2} \dots \leq \sigma_{LN} < \sigma_{RN}.$$

对干涉信息进行对偶化延拓处理后, 复原光谱信息的一个周期内存在  $2N$  个光谱谱段。各个探测谱段边沿光谱值从左往右依次命名:

$$\begin{aligned} \sigma_{1L} &= -\sigma_{RN}, \quad \sigma_{1R} = -\sigma_{LN}, \\ \sigma_{2L} &= -\sigma_{R(N-1)}, \quad \sigma_{2R} = -\sigma_{L(N-1)}, \\ &\vdots \\ \sigma_{2NL} &= -\sigma_{LN}, \quad \sigma_{2NR} = -\sigma_{RN}. \end{aligned}$$

为准确复原  $N$  个窄带光谱信息, 要保证  $2N$  个谱段经过平移后两两不重叠。由于  $2N$  个谱段为中心对称分布, 只需要满足  $N + (N - 1) + \dots + 1 +$

$N(N - 1)/2$  个不等式。其中前  $N + (N - 1) + \dots + 1$  个不等式保证中心对称线两侧谱段不出现重叠, 后面的  $N(N - 1)/2$  个不等式保证中心线同一侧的谱段不出现重叠。共有  $N^2$  个不等式, 简化表达式如下:

$$\frac{\sigma_{qR} - \sigma_{pL}}{n_{qp} + 1} \leq \sigma_s \leq \frac{\sigma_{qL} - \sigma_{pR}}{n_{qp}}, \quad (16)$$

式中  $0 \leq n_{qp} \leq \left\lfloor \frac{\sigma_{qL} - \sigma_{pR}}{\sigma_{sm}} \right\rfloor$ ,  $\sigma_{sm} = \sum_{p=1}^N \Delta\sigma_p$ ,  $p = 1, 2, \dots, N, q = p + 1, p + 2, \dots, 2N - p + 1$ 。

由上式中  $N^2$  个约束不等式可得到压缩采样频率的取值范围, 选取其中的波数为采样频率, 配以符合要求的多带通窄带滤光片, 可对多个非重叠窄带光谱的干涉信息进行压缩采样, 减少采样数据量。

## 5 仿真与分析

对本文提出的基于滤光片光谱透射率函数的窄带光谱压缩采样方法和非重叠窄带光谱的压缩采样方法进行了仿真分析。模拟目标的单窄带光谱信息如图 4(a) 所示, 假设探测谱段波数为  $1900 \sim 2100 \text{ mm}^{-1}$  (波长为:  $476.2 \sim 526.3 \text{ nm}$ ), 中心波数为  $2000 \text{ mm}^{-1}$  ( $500 \text{ nm}$ ), 对应的干涉信息如图 4(b) 所示。由(7)式得到干涉信息压缩采样频率为  $420 \sim 422.2 \text{ mm}^{-1}$ 。以  $421 \text{ mm}^{-1}$  对干涉信息进行采样, 复原的光谱如图 5(a) 所示。图中曲线为压缩采样后复原的光谱, 加粗曲线为模拟光谱信息。设置相似度函数  $R$  来表示压缩采样后复原光谱精度, 定义为

$$R = 1 - \frac{\sum_{\sigma_L}^{\sigma_R} |I_{cs}(\sigma) - I_s(\sigma)|}{\sum_{\sigma_L}^{\sigma_R} I_s(\sigma)}, \quad \sigma_L \leq \sigma \leq \sigma_R \quad (17)$$

式中  $I_{cs}(\sigma)$  为压缩采样后复原光谱的幅度值,  $I_s(\sigma)$  为按照尼奎斯特定理采样后复原的干涉信息,  $\sigma_L \sim \sigma_R$  为探测谱段。以  $421 \text{ mm}^{-1}$  对干涉信号进行采样后复原光谱与模拟光谱在  $1900 \sim 2100 \text{ mm}^{-1}$  谱段内的相似度  $R = 0.8956$ 。可见当滤光片光谱透射率函数不是理想矩形窗时, 以(7)式得到的波数对干涉信息进行采样存在明显的失真。

利用所提的基于滤光片光谱透射率函数的窄带光谱压缩采样方法对干涉信息进行采样, 假设滤光片光谱透射率函数如图 4(b) 所示, 光谱透射率参数  $t_m = 0.84$ , 假设滤光片的中心波数存在  $1\%$  的波动, 允许最大混叠率  $\eta_M = 0.05$ 。根据(14)式确定的压缩采样频率为  $1136.5 \sim 1151.3 \text{ mm}^{-1}$ 。以  $1140 \text{ mm}^{-1}$  波数进行采

样,复原光谱图如图 5(b)所示,图中曲线为压缩采样后复原的光谱,加粗曲线为目标模拟光谱。在探测谱段

内复原光谱与模拟光谱的相似度  $R=0.997$ ,与由(7)式得到的采样频率相比具有更高的采样精度。

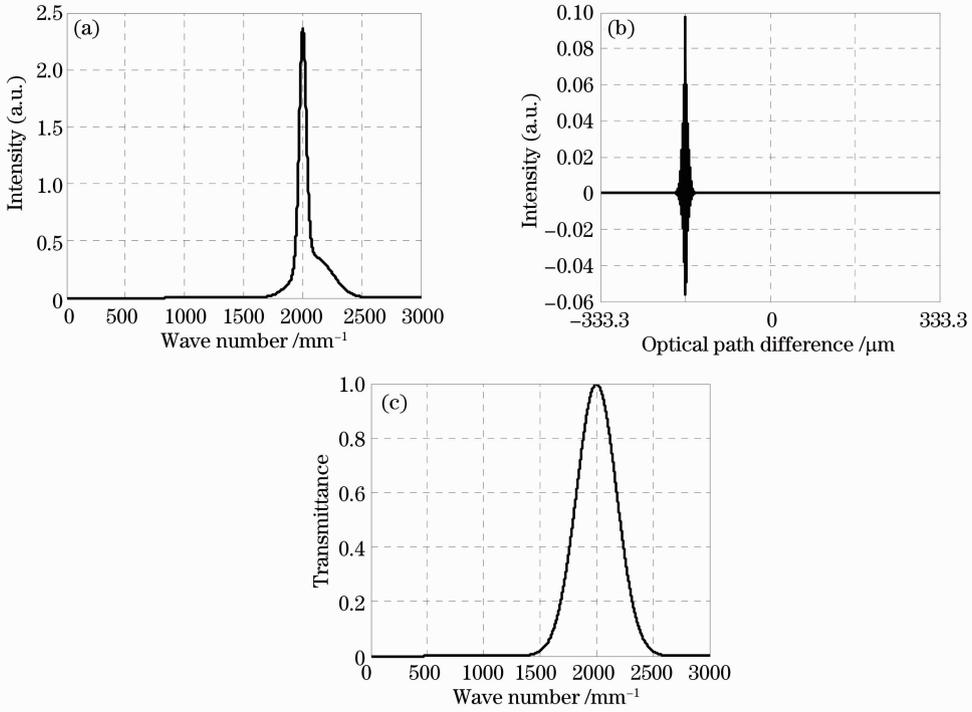


图 4 模拟目标的(a)窄带光谱信息、(b)仿真的干涉信息和(c)滤光片透射率曲线

Fig. 4 (a) Narrow-band spectral information; (b) simulated interference information; (c) filter transmittance curve of the simulated target

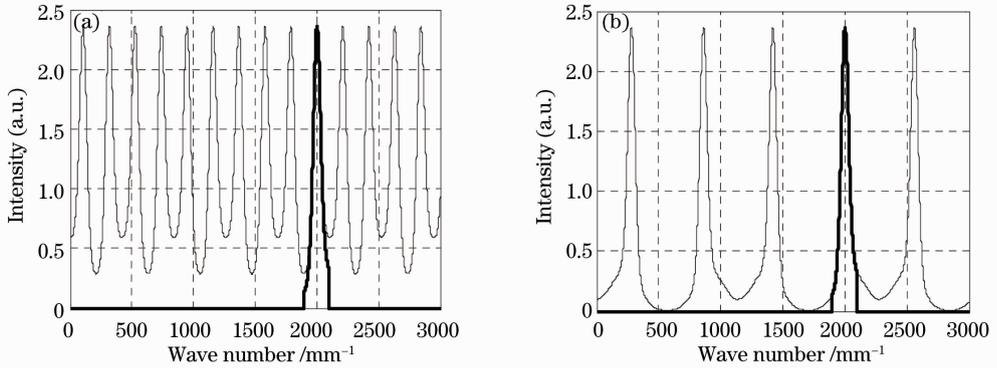


图 5 (a)理想压缩采样频率复原光谱; (b)基于滤光片透射率函数压缩采样频率复原光谱

Fig. 5 Recovery spectrum of (a) ideal compressive sampling frequency; (b) compressive sampling frequency based on the transmittance function of optical band-pass filter

设定不同的最大混叠率参数  $\eta_M$  和滤光片光谱透射率函数参数  $t_m$ ,可以复原不同精度的窄带光谱。参数  $t_m$  值越大, $\eta_M$  值越小,复原光谱与目标光谱越接近,采样频率也相应的增加。在应用中要根据探测要求,选取恰当的参数对目标干涉信息进行压缩采样。

为验证本文提出的多个非重叠窄带光谱压缩采样的方法,模拟了两个非重叠窄带光谱信息,如图 6(a)所示。两个窄带光谱探测谱段分别为  $1150\sim$

$1250\text{ mm}^{-1}$ 、 $2450\sim 2550\text{ mm}^{-1}$ 。利用(16)式得到的压缩采样频率为  $500\sim 514.2\text{ mm}^{-1}$ 。以  $512\text{ mm}^{-1}$  波数对目标干涉信息进行采样,复原的光谱如图 6(b)所示。图中曲线表示压缩采样后复原的光谱,加粗曲线表示目标光谱。在探测谱段内复原光谱与模拟光谱的相似度  $R=0.999$ ,表明利用本文提出的方法对两个非重叠窄带光谱的干涉信息进行采样,复原光谱具有较高的精确度。

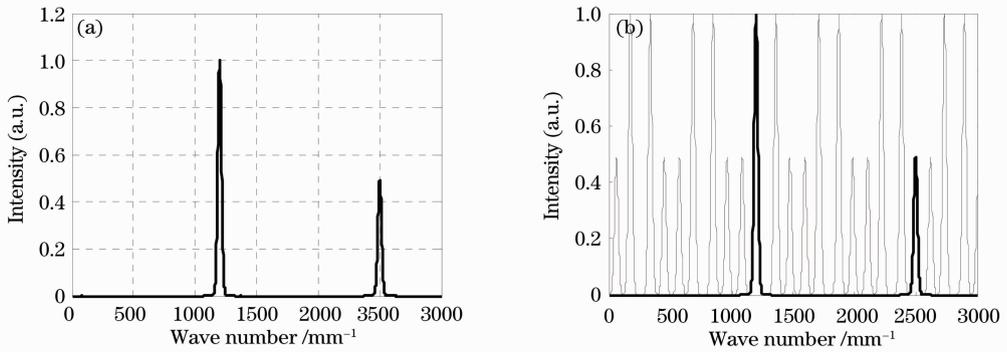


图 6 (a)模拟的两个非重叠窄带谱段的光谱信息;(b)压缩采样后复原的光谱信息

Fig. 6 (a) Simulated spectrum information of two-non-overlapping narrowband; (b) recovery spectrum of compressive sampling

## 6 实验与分析

为了验证本文的压缩采样方法,搭建了像面干涉成像光谱装置。实验装置由四部分组成:推扫部件、横向剪切干涉仪、成像系统和探测器。像面干涉成像光谱仪原理如图 7 所示,探测目标发射或者反射的光束以平行光束的形式进入横向剪切系统,不同的目标物点对应不同入射角的平行光束。当平行光束经过横向剪切分束器后,被横向剪切成两束相干平行光。两束出射光的等光程面与横向剪切分束器的光束出射面平行,而对于后面的成像系统而言,入射平行光束的等光程面垂直于入射光束。当横向

剪切分束器的出射面垂直于系统光轴时,对于视场角不为零的光束,两个等光程面不重合,则剪切开来的两束相干光束通过成像系统到达像面同一点会存在光程差,进而发生干涉。因此成像系统成的像是经过光程差调制的干涉图像。同一物点的视场角随着推扫改变,到达像面的干涉光程差发生变化,在探测器上可以记录下该点不同光程差下的干涉信息,通过傅里叶变换可以复原光谱信息。该类型成像光谱仪具有高光通量、高目标分辨率、结构简单实用等优点<sup>[13,14]</sup>。实验装置如图 8(a)所示,其中横向剪切分束器为三片式萨尼亚克剪切分束器。

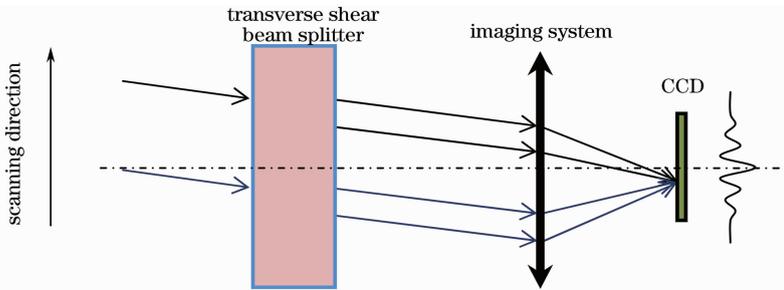


图 7 像面干涉高光谱成像的示意图

Fig. 7 Schematic diagram of image plane interferometric hyperspectral imaging

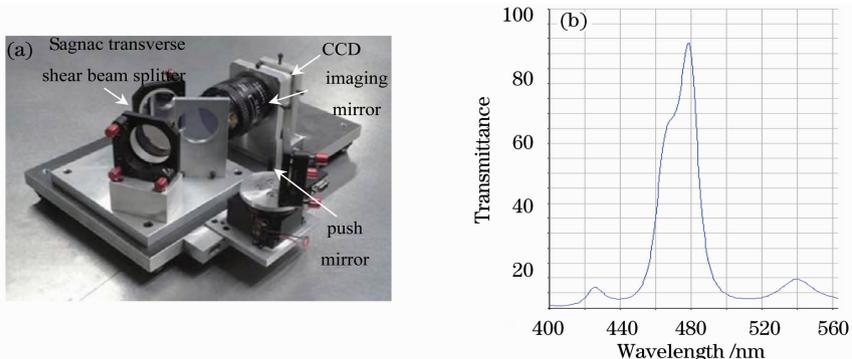


图 8 (a)实验装置;(b)滤光片透射率曲线

Fig. 8 (a) Experimental apparatus; (b) filter transmittance curve

利用实验装置对窄带光谱目标进行探测,探测波段为 466~485 nm,对应波数为 2062~2146  $\text{mm}^{-1}$ 。在探测装置前加入滤光片以滤除杂光,滤光片参数  $t_m=0.68$ ,光谱透射率函数如图 8(b)所示。根据奈奎斯特定理对目标干涉信息进行推扫采样,经过去趋势项<sup>[15]</sup>、相位校正<sup>[16]</sup>后得到的单边干涉图如图 9(a)所示,复原的目标光谱如图 9(c)中加粗曲线所示。由于滤光片透射率函数不是矩形窗,在探测波段范围外仍有光谱分布。利用所提的基于滤光片

光谱透射率函数的窄带光谱压缩采样方法进行采样。设定滤光片透射率参数  $\eta_M=5\%$ ,由(14)式得到探测波段应为 2000~2380  $\text{mm}^{-1}$ ,采样频率为 793~802  $\text{mm}^{-1}$ 。以 800  $\text{mm}^{-1}$ 波数对目标干涉信息进行推扫采样,对采样干涉信息进行补零处理后得到的单边干涉图如下图 9(b)所示,复原光谱如图 9(c)中曲线所示。在探测波段内复原光谱与模拟光谱的相似度  $R=0.9078$ 。

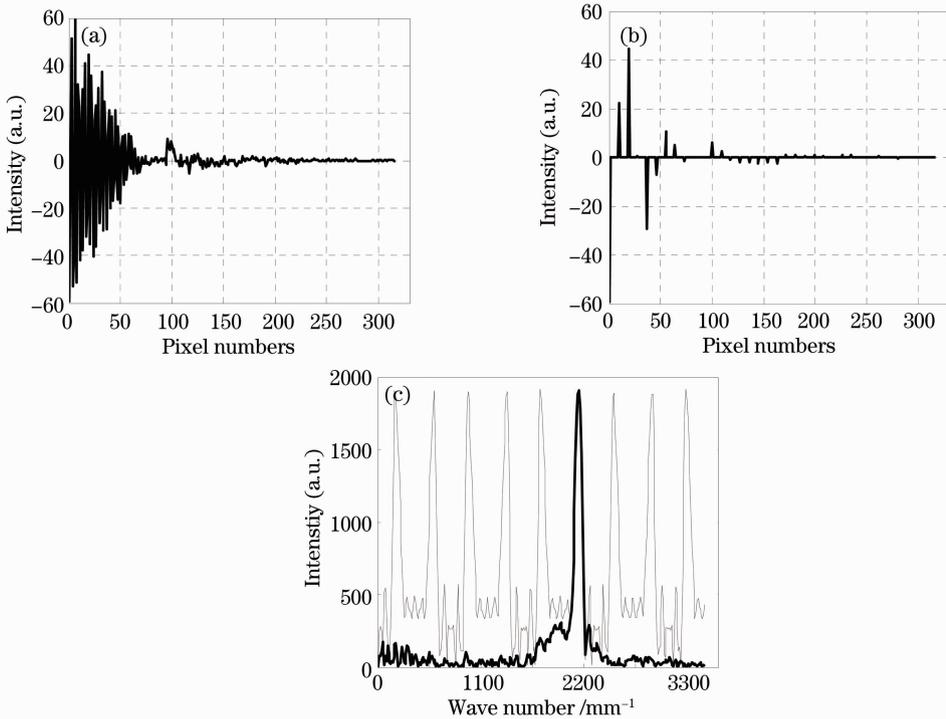


图 9 单个窄带光谱的实验结果。(a)按照奈奎斯特定理采样获取的干涉信息;(b)利用压缩采样频率获取的干涉信息;(c)两种方法采样干涉信息后复原的光谱信息

Fig. 9 Experimental results of one-narrow-band compressive sampling recovery spectrum. (a) Interference information according to the Nyquist law; (b) interference information after compressive sampling frequency; (c) recovery spectrum after sampling interference information with two ways

利用实验装置探测具有两个非重叠光谱的目标,探测目标是由红色窄带 LED 灯和蓝色窄带 LED 灯组成的光源。按照奈奎斯特定理对目标干涉信息进行推扫采样,获取的目标单边干涉信息如图 10(a)所示,复原目标光谱如图 10(c)中加粗曲线所示,复原光谱显示目标具有明显的两个非重叠的窄带光谱,峰值为 454~493 nm(2028~2202  $\text{mm}^{-1}$ )和 613~665 nm(1504~1631  $\text{mm}^{-1}$ )。利用由(16)式得到的目标压缩采样频率 1151  $\text{mm}^{-1}$ 进行推扫采样,获取的干涉信息如图 10(b)所示,复原的目标光谱信息如图 10(c)中曲线所示。在探测波段内复原光谱与模

拟光谱的相似度  $R=0.8711$ 。

实验数据表明,采用压缩采样方法复原光谱信息与按照奈奎斯特定理采样后复原的光谱信息在探测波段基本吻合。

## 7 结 论

对干涉成像光谱仪的干涉信息采样问题进行了分析研究,提出了基于滤光片光谱透射率函数的窄带光谱压缩采样方法。设定不同的滤光片参数和混叠参数,可以求得不同精度的窄带光谱压缩采样频率。研究了两个非重叠窄带光谱压缩采样的方法,

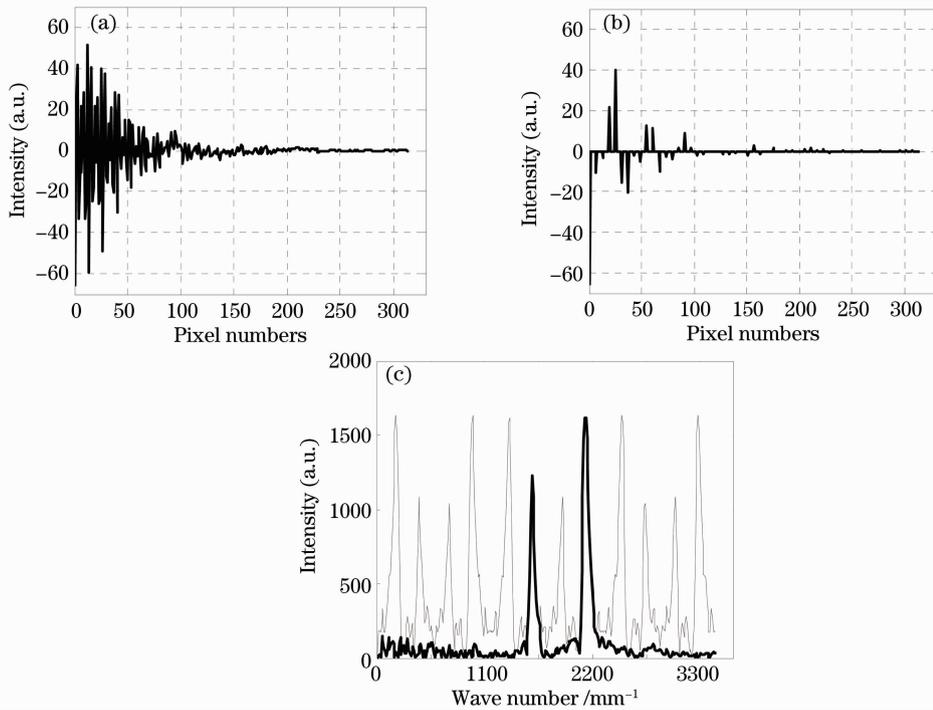


图 10 采样后复原两个非重叠窄带光谱信息。(a)按照尼奎斯特定理采样的干涉信息；(b)利用压缩采样频率获取的干涉信息；(c)两种方法采样干涉信息后复原的光谱信息

Fig. 10 Recovery spectrum of two non-overlapping narrow-band after sampling. (a) Interference information according to the Nyquist law; (b) interference information after compressive sampling frequency; (c) recovery spectrum after sampling interference information with two ways

提出了多个非重叠窄带光谱压缩采样的方法,以进一步提高窄带高光谱探测效率。对该方法进行了仿真分析,复原窄带光谱与模拟目标光谱吻合度超过99%。搭建像面干涉成像光谱探测装置,对本文所提方法进行实验验证,压缩采样后复原窄带光谱信息与奈奎斯特采样后复原窄带光谱基本吻合。本文所述的干涉信息压缩采样方法可以应用于各类型的干涉成像光谱仪中,能够减少冗余采样数据,可以用于军事侦察、农产品检验及污染物检测等窄带光谱成像探测领域。

### 参 考 文 献

- 1 J. Bruce Rafert, R. Glenn Sellar, J. Otten Leonard. An interactive performance model for spatially modulated Fourier transform spectrometers[C]. *SPIE*, 1995, **2480**: 410~417
- 2 Villemaire André, Fortin Serge, Giroux Jean *et al.*. An imaging Fourier transform spectrometer [C]. *SPIE*, 1995, **2480**: 387~397
- 3 Dong Ying, Xiangli Bin, Zhao Baochang. Analysis of interferometer system in a large aperture static imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(3): 330~334  
董 瑛, 相里斌, 赵葆常. 大孔径静态干涉成像光谱仪的干涉系统分析[J]. *光学学报*, 2001, **21**(3): 330~334
- 4 Casasent David, Psaltis Demetri. Optical Fourier transform techniques for advanced Fourier spectroscopy systems[J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(12): 2034~2037
- 5 Li Suning, Zhu Rihong, Li Jianxin. Research on new spectral reconstruction solution for Fourier-transform spectrometer[J]. *Optica Applicata*, 2011, **41**(1): 121~133
- 6 Zhang Chunmin, Yan xinge, Zhao baochang. A novel model for obtaining interferogram and spectrum based on the temporarily and spatially mixed modulated polarization interference imaging spectrometer[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(8): 2050~2056
- 7 Y. Ferrec, J. Taboury, H. Sauer *et al.*. Experimental results from an airborne static Fourier transform imaging spectrometer [J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(30): 5894~5904
- 8 Alessandro Barducci. Information-theoretic approach to Fourier transform spectrometry[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2011, **28**(4): 637~648
- 9 Sanjit K. Mitra. Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach[M]. Sun Hong, *et al.*. Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007. 138~145  
桑吉特·米特拉. 数字信号处理——基于计算机的方法[M]. 孙 红 等 译. 北京:电子工业出版社, 2007. 138~145
- 10 Jianyi Yang, Qingjun Zhou, Feng Zhao *et al.*. Characteristics of optical bandpass filters employing series-cascaded double-ring resonators[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **228**(1-3): 91~98
- 11 A. Rostami, S. Matloub. Optical filter characteristics control using chirped homogeneous fibonacci-class multilayer stacks[J]. *Laser Physics*, 2004, **14**(12): 1475~1482
- 12 Zhang Wenjuan, Zhang Bing, Zhang Xia *et al.*. Effects of apodization functions of imaging Fourier transform spectrometer on reconstructed spectrum [J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*, 2008, **27**(3): 227~232  
张文娟, 张 兵, 张 霞 等. 干涉成像光谱仪切趾函数对复原光谱的影响分析[J]. *红外与毫米波学报*, 2008, **27**(3): 227~232
- 13 Paul G. Lucey, Keith Horton, Tim Williams. High-performance Sagnac interferometer using cooled detectors for infrared LWIR

- hyperspectral imaging[C]. *SPIE*, 2007, **6546**: 654604
- 14 Yuan Yan, Zhang Xiubao, Sun Chengming, Zhou Zhiliang. Modeling of the temporally and spatially modulated Fourier transform imaging spectrometer working in orbit[J]. *Optik*, 2011, **122**(17): 1576~1583
- 15 Li Suning, Zhu Rihong, Li Jianxin *et al.*. Method of reconstruction on Fourier-transform spectroscopy[J]. *J. Applied Optics*, 2009, **30**(2): 268~272
- 李苏宁, 朱日宏, 李建欣 等. 傅里叶干涉成像光谱技术中的重构方法[J]. *应用光学*, 2009, **30**(2): 268~272
- 16 Midnael L. Forman, W. Howard Steel, George A. Vanasse. Correction of asymmetric interferograms obtained in Fourier spectroscopy[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1966, **56**(1): 59~63

栏目编辑：李文喆