

# 共轭傅里叶变换校正成像光谱重构

李苏宁 朱日宏 高志山 李建欣

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

**摘要** 傅里叶变换干涉成像光谱仪的光谱重构过程主要基于光源光谱和其对应干涉图的傅里叶变换对关系。采用傅里叶变换或余弦傅里叶变换方法可完成重构,但该两种方法由于没有消除变换过程中由引入相位信息和边界条件而产生的误差,会给光谱重构精度尤其是光谱强度重构精度造成负面影响。针对该问题,提出了一种针对傅里叶变换干涉成像光谱仪的共轭校正光谱重构方法,利用傅里叶变换的共轭性质,首先对预处理后的干涉图作共轭对称,然后采用傅里叶变换求得共轭光谱项及共轭校正项,再通过这两项校正得到真实光谱。经仿真和利用氦灯进行实验,可以验证,相对传统的光谱重构方法,该方法兼顾了干涉图和光谱图的实数域问题,同时也解决了余弦傅里叶变换的边界条件问题,采用重构光谱与定标光谱差值的均方根值进行评价,相比于定标光谱,该方法的重构光谱频率一致性和强度一致性均优于0.1%,较之传统方法,其对于光谱强度的重构精度一致性可提高5%,对傅里叶变换成像光谱仪的光谱重构方法研究工作具有指导意义。

**关键词** 傅里叶光学;成像光谱;重构;光谱曲线;傅里叶变换;共轭校正

**中图分类号** TH774.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0412010

## Fourier Conjugate Correction Spectral Reconstruction for Fourier-Transform Spectrometer

Li Suning Zhu Rihong Gao Zhishan Li Jianxin

(Department of Optics Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract** The spectral reconstruction theory of Fourier-transform imaging spectrometer is based on the Fourier-transform relationship between the spectrum of the source and the interferogram so that the spectral reconstruction can be simply achieved by using Fourier transform or Fourier cosine transform. However, the traditional Fourier transform solution is carried out in the complex-number field and the result is also a complex-number sequence. To acquire the real-number reconstructed spectrum, people usually use the real part or the absolute magnitude of the transformation result as the reconstructed spectrum, which will introduce in an extra-phase to the spectrum and lead to inaccuracy of reconstructed spectral intensity. Although researchers use Fourier cosine transform to avoid the extra-phase problem effectively, this solution has a boundary condition problem which cannot be avoid and may also lead to inaccuracy of reconstructed spectral intensity. To solve the problem, on the base of the analysis of traditional reconstruction solutions, an improved spectral reconstruction solution based on Fourier conjugate correction (FCC) for Fourier-transform spectrometer is developed and discussed. Firstly the conjugated symmetrical form of the interferogram sequence is created by the use of the original interferogram captured, and then the conjugated symmetrical spectrum and the correction element can be acquired by carrying out Fourier transform to the sequence. By using the conjugated symmetrical spectrum and the correction element, the real-number spectrum sequence can be calculated. By carrying out both the simulation and the experiment using helium lamp, it can be concluded that the FCC solution can avoid either the extra-phase problem caused by discrete Fourier transform (DFT) solution or the boundary condition caused by discrete Fourier cosine transform (DCT) solution effectively and improve the reconstructed spectral intensity accuracy.

**Key words** Fourier optics; imaging spectroscopy; reconstruction; spectrum; Fourier transform; conjugated correction

**OCIS codes** 120.2650; 300.6300; 100.2650

**收稿日期**: 2010-10-08; **收到修改稿日期**: 2010-11-10

**基金项目**: 国家自然科学基金(60977008)和江苏省社会发展基金(BS2007061)资助课题。

**作者简介**: 李苏宁(1984—),男,博士研究生,主要从事光学干涉测量及光学精密仪器等方面的研究。

E-mail: lsnlm@hotmail.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.cn(通信联系人)

## 1 引 言

自 1966 年 Loewenstein<sup>[1]</sup> 提出采用傅里叶变换的方法来获取光源光谱信息以来,傅里叶变换光谱仪开始发展<sup>[2~4]</sup>,由于其具有多通道、高通量的优点<sup>[5]</sup>,同时具有很高的信噪比<sup>[6]</sup>,至今,在遥感、化工以及近年开始发展的太赫兹等各个领域都有广泛应用<sup>[2,7~10]</sup>,而傅里叶变换技术的使用,也使得仪器在精度和测量效率极大提高的同时,大大减小了体积<sup>[11~13]</sup>。

傅里叶变换光谱仪主要利用光谱和干涉图的傅里叶变换对关系<sup>[14]</sup>,首先对干涉图作傅里叶变换,之后对变换结果取模或者取实部作为重构的光谱<sup>[14,15]</sup>,该方法计算简便、快速,因此被广泛使用。中国科学院西安光学精密机械研究所研制的 CE-1 傅里叶变换干涉成像光谱仪,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的 Sagnac 型干涉成像光谱仪原理样机以及中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的光纤傅里叶变换光谱仪均使用该方法进行光谱重构<sup>[16~18]</sup>。但该方法需要在复数域进行,因此并不完全满足干涉图和光谱均为实数域的条件,从而会带来一定的误差。针对该问题,余弦傅里叶变换被广泛采用在光谱重构中。该变换利用了傅里叶偶对称变换性质,可以看作实数域的傅里叶变换<sup>[19~21]</sup>,然而通过对余弦傅里叶变换和傅里叶变换之间关系的分析可知,在离散数据情况下,对源数据序列采用不同的边界条件进行对称化会得到不同的偶对称序列,从而导致最终重构结果的不同,影响重构光谱的精度特别是重构光谱强度的精度<sup>[22,23]</sup>。为此,本文对传统重构方法做了分析,提出并推导了共轭傅里叶变换校正光谱重构方法(FCC),仿真验证及氦灯实验证明,相比于传统的傅里叶变换重构方法和余弦变换重构方法,该方法可更准确地重构光谱。

## 2 傅里叶变换成像光谱仪基本原理

任何类型的傅里叶变换成像光谱仪,都是利用干涉条纹和光谱曲线的傅里叶变换对关系,对仪器采集得到的干涉图进行傅里叶变换从而重构出光谱。在理想的干涉成像光谱仪中,重构光谱的表达式为

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

式中  $B(\sigma)$  即为重构光谱,  $I(\Delta)$  为光谱仪所采集到的理想情况下的干涉图,  $\sigma$  为波数,  $\Delta$  为光程差。

此时假设光源光谱函数  $B(\sigma)$  为偶函数,即令  $B(-\sigma) = B(\sigma)$ ,则将  $\sigma$  范围延拓至  $-\infty \sim +\infty$ ,则由(1)式

$$I(\Delta) = 2 \int_0^{+\infty} B(\sigma) \cos(2\pi\sigma\Delta) d\sigma = \int_{-\infty}^{+\infty} B(\sigma) \exp(j2\pi\sigma\Delta) d\sigma, \quad (2)$$

可见,干涉图为偶函数化的  $B(\sigma)$  的傅里叶变换,若将  $\Delta$  也扩充至  $-\infty \sim +\infty$ ,则  $I(\Delta) = I(-\Delta)$ ,也为偶函数,此时得干涉场光强  $I(\Delta)$  与光源光谱  $B(\sigma)$  间成傅里叶变换对关系,即

$$I(\Delta) = \mathcal{F}[B(\sigma)], \quad (3)$$

$$B(\sigma) = \mathcal{F}^{-1}[I(\Delta)], \quad (4)$$

考虑到干涉图的获取是离散采样,因此采用离散傅里叶变换表示

$$I(\Delta) = \mathcal{F}_D[B(\sigma)], \quad (5)$$

$$B(\sigma) = \mathcal{F}_D^{-1}[I(\Delta)], \quad (6)$$

式中  $\mathcal{F}_D$  为离散傅里叶变换(DFT),  $\mathcal{F}_D^{-1}$  为离散逆傅里叶变换(IDFT)。

## 3 常用光谱重构方法分析

传统的光谱重构方法即利用上述关系,对获得的干涉图作傅里叶逆变换,然而由于傅里叶变换的变换核是复数,因此该方法的结果也是一个复数。在光谱精度要求不高的情况下,普遍的方法是对该结果直接取实部或者求模<sup>[14,15]</sup>,然而,此方法会引入原本复数域中的额外相位信息,这些多余的信息会影响重构光谱的光谱强度,从而会增加光谱辐射标定难度。另外从物理意义来看,对于负  $\sigma$  值,光谱  $B(\sigma)$  不可能存在,因此干涉图  $I(\Delta)$  的傅里叶变换也并不是光谱  $B(\sigma)$ ,而是类似于  $\sigma \geq 0$  时,  $B(\sigma)$  的偶函数。

针对该问题,研究者们提出,可以采用余弦傅里叶变换,将光谱重构的过程始终限定在实数域进行<sup>[19~25]</sup>。余弦傅里叶变换是傅里叶变换在实数域的表达形式,由于采集得到的干涉图数据是离散的,因此在重构中使用离散余弦变换(DCT),该变换以实数作为变换核,是实数域的正交变换。经过了多年的发展,DCT 共发展出 16 种变换形式,其中常用的是 DCT-II<sup>[26,27]</sup>,其形式为

$$B(k) = \left(\frac{2}{N}\right)^{1/2} c_k \sum_{n=0}^{N-1} I(n) \cos\left[\frac{(2n+1)k\pi}{2N}\right], \quad k = 0, 1, \dots, N-1, \quad (7)$$

$$I(n) = \left(\frac{2}{N}\right)^{1/2} \sum_{k=0}^{N-1} c_k B(k) \cos\left[\frac{(2n+1)k\pi}{2N}\right],$$

$$n = 0, 1, \dots, N-1, \quad (8)$$

式中

$$c_k = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & k = 0, N \\ 1, & k = 1, 2, \dots, N-1 \end{cases} \quad (9)$$

DCT 一般被看作是实偶序列的 DFT, 此时, 虚部正弦项将被抵消, 而实部余弦项会被保留。然而, 对于离散实序列  $I(n)$  ( $n = 0, 1, \dots, N-1$ ), 若将其做偶对称处理, 设由  $I(n)$  生成的偶序列为  $I_s(k)$ , 则  $I_s(k)$  满足  $I_s(k) = I_s(N_s - 1 - k)$  ( $k = 0, 1, \dots, N-1$ ), 其中  $N_s$  是序列  $I_s(k)$  的长度。此时, 会存在两种对称情况, 即  $N_s = 2N-1$  或  $N_s = 2N$ , 分别对这两种情况下的对称实序列做傅里叶变换, 虽然结果都是实数, 但数值是不同的, 将重构结果对比(7)式和(8)式, 显见与 DCT 的结果形式也不同。实际上, DCT 有很强的“能量集中”特性, 将光谱能量多集中在低频区域, 这造成的后果是, 在对重构结果的光谱频率进行标定后, 较之 DFT, 其光谱分辨率会下降更多。

#### 4 共轭校正光谱重构方法

针对上述问题, 重新回归到 DFT, 利用其共轭

性质, 设  $N$  点共轭对称复数序列  $I_s(n)$  满足

$$\begin{cases} I_s(N-n) = I_s^*(n) & n = 1, 2, \dots, N/2-1 \\ I_s(0) \text{ and } I_s(N/2) \in \mathbb{R} \end{cases}, \quad (10)$$

序列  $I_s(n)$  的 DFT 为

$$B_s(k) = \sum_{n=0}^{N-1} I_s(n) W_N^{kn}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1, \quad (11)$$

式中  $W_N = \exp(-j2\pi/N)$ , 将  $B_s(k)$  写成前后两部分, 即

$$B_s(k) = \sum_{n=0}^{N/2} I_s(n) W_N^{kn} + \sum_{n=N/2+1}^{N-1} I_s(n) W_N^{kn}, \quad (12)$$

通过代换, 上式可以写成

$$B_s(k) = \sum_{n=0}^{N/2} I_s(n) W_N^{kn} + \sum_{n=1}^{N/2-1} I_s(N-n) W_N^{k(N-n)}, \quad (13)$$

由于  $I_s(n)$  及  $W_N^{kn}$  均为共轭对称序列, 即  $I_s(N-n) = I_s^*(n)$ ,  $W_N^{k(N-n)} = (W_N^{kn})^*$ , 则(13)式可写为

$$B_s(k) = \sum_{n=0}^{N/2} I_s(n) W_N^{kn} + \sum_{n=1}^{N/2-1} I_s^*(n) (W_N^{kn})^*, \quad (14)$$

将  $I_s(n)$  表示成实、虚部的形式:

$$I_s(n) = I_{sr}(n) + jI_{si}(n),$$

又

$$W_N^{kn} = \cos[(2\pi/N)kn] - j\sin[(2\pi/N)kn],$$

代入(14)式得

$$B_s(k) = I_s(0) W_N^{k \cdot 0} + I_s(N/2) W_N^{k(N/2)} + \sum_{n=1}^{N/2-1} [I_s(n) W_N^{kn} + I_s^*(n) (W_N^{kn})^*] = I_s(0) + I_s(N/2) \cos(k\pi) +$$

$$2 \sum_{n=1}^{N/2-1} \left[ I_{sr}(n) \cos\left(\frac{2\pi}{N}kn\right) + I_{si}(n) \sin\left(\frac{2\pi}{N}kn\right) \right], \quad k = 0, 1, \dots, N-1, \quad (15)$$

同理可以得到, 对于  $N$  点共轭对称复数序列  $B_s(k)$ ,

$$I_s(n) = \frac{1}{N} B_s(0) + \frac{1}{N} B_s(N/2) \cos(n\pi) + \frac{1}{N} \sum_{k=N/2-1}^1 [B_s(k) W_N^{kn} + B_s^*(k) (W_N^{kn})^*] = \frac{1}{N} B_s(0) +$$

$$\frac{1}{N} B_s(N/2) \cos(n\pi) + \frac{2}{N} \sum_{k=1}^{N/2-1} \left[ B_{sr}(k) \cos\left(\frac{2\pi}{N}kn\right) - B_{si}(k) \sin\left(\frac{2\pi}{N}kn\right) \right], \quad n = 0, 1, \dots, N-1. \quad (16)$$

(15) 式和(16)式即共轭对称序列的 DFT 和 IDFT, 可以看出, 共轭序列的第一项和中间一项的取值不同, 将会影响 DFT 的结果, 并且这两项并不包含光谱载波信息, 将该两项去除后即为谱项。假设序列  $I(n)$  为采集到的干涉图序列, 其中  $n = 0, 1, \dots, N-1, N$  为干涉图采样点数, 依照(10)式将  $I(n)$  “共轭化”, 得到共轭对称的干涉图序列  $I_s(k)$ ,  $k = 0, 1, \dots, 2N-1$ , 由(6)式和(16)式可以看出,

$$B_s(k) = \text{IDFT}[I_s(k)] - \frac{1}{2N} I_s(0) - \frac{1}{2N} I_s(N) \cos(k\pi), \quad (17)$$

此处得到的光谱数据  $B_s(k)$  同样也为一共轭对称序列, 取其单边, 即可得到正确的光谱数据  $B(n)$ ,  $n = 0, 1, \dots, N-1$ 。这就避免了直接使用 DFT 所产生的复数问题和使用 DCT 所产生的边界条件的问题。更进一步, 对比(16)式和(8)式, 可以发现, FCC 重构方法的重构结果是从共轭干涉图的第二项开始

计算的,而 DCT 方法是从干涉图的第一项开始计算的,对于共轭序列中的第  $N/2+1$  项的影响,DCT 无法将其误差消除,这即是 DCT 方法所得重构结果的误差所在。

## 5 仿真及实验结果

为了验证 FCC 重构方法,首先对模拟的理想干涉图采用该方法进行重构,步骤如下:

1) 生成任意光谱曲线,为了验证计算精度,光谱数据用相对光谱强度表示;

2) 根据对所生成的光谱曲线作傅里叶变换,生成干涉图数据,考虑到普遍的做法,此处生成的干涉

图为单边干涉图;

3) 对生成的干涉图分别采用传统 DFT 方法、DCT 方法和 FCC 方法进行重构,对比重构结果。

连续光谱的仿真结果如图 1,2 所示,图 1(a)为仿真光谱,图 1(b)为由仿真光谱得到的仿真干涉图。分别采用传统的 DFT 方法、DCT 方法和 FCC 方法对干涉图重构,结果如图 2 所示,图 2(a1),(a2),(b1),(b2)和(c1),(c2)分别为采用传统 DFT 方法、传统 DCT 方法和 FCC 方法重构得到的曲线与模拟的标准光谱曲线的比较图,为了便于分析重构结果的细节部分,左上角的小图中对重构结果方框内的部分进行了放大,下同。

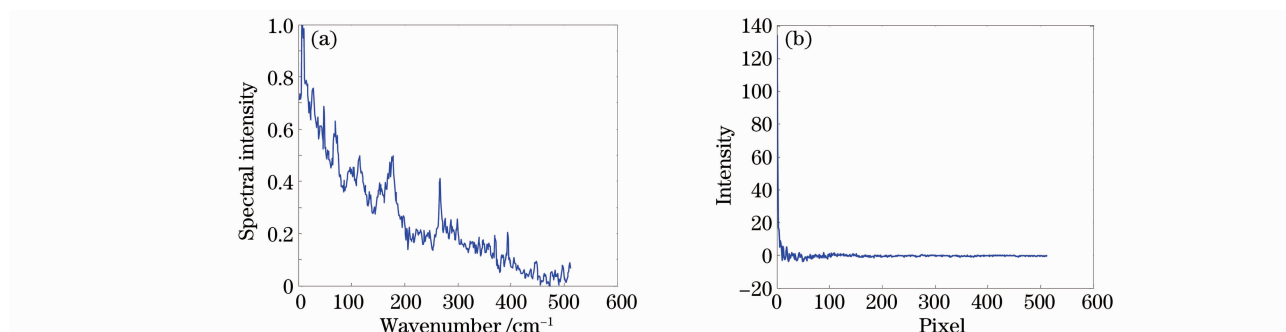


图 1 连续仿真光谱及其干涉图。(a)连续仿真光谱,(b)连续仿真光谱对应干涉图

Fig. 1 Simulated continuous spectrum and interferogram. (a) simulated continuous spectrum, (b) simulated interferogram created from continuous spectrum

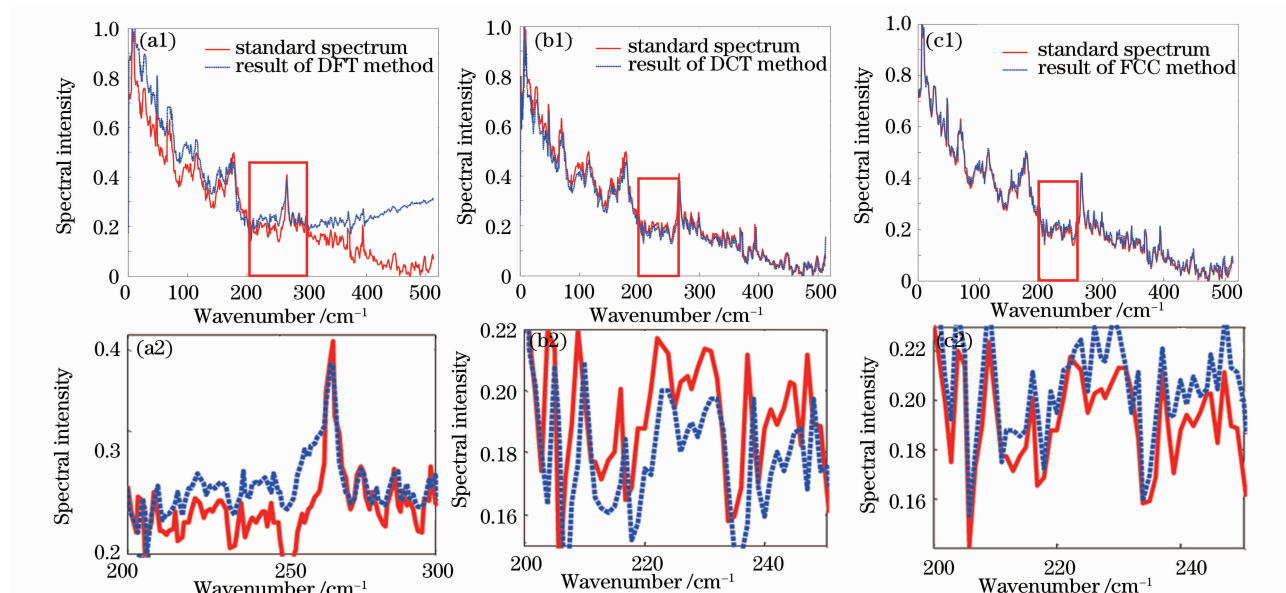


图 2 连续仿真光谱重构结果对比。(a1),(a2)传统 DFT 方法重构结果,(b1),(b2)传统 DCT 方法重构结果,(c1),(c2) FCC 重构结果

Fig. 2 Comparison of reconstructed results of each method. (a1),(a2) reconstructed spectrum using conventional DFT method, (b1),(b2) reconstructed spectrum using conventional DCT method, (c1),(c2) reconstructed spectrum using FCC method

从图 2 中可以看出,对于连续光谱重构,在频率复原精度方面,传统 DFT 方法出现了  $5 \text{ cm}^{-1}$  的偏离, DCT 方法和 FCC 重构方法则基本准确;在谱强度复原精度方面,传统 DFT 方法和 DCT 方法均出现了较大的偏差, FCC 方法所得到的结果则较好地吻合了所设定的光谱曲线。以仿真光谱对应频率处的光谱强度作为基准,以重构结果和基准之间差值的均方根值作为误差评价指标,传统 DFT 方法对于

连续光谱重构的误差为 0.0783, DCT 方法重构结果的误差为 0.0492, FCC 方法重构结果的误差为 0.0112。

图 3 和图 4 是对离散光谱的重构仿真,仿真离散光谱曲线如图 3(a)所示,由该光谱生成的仿真干涉图如图 3(b)所示;分别采用传统的 DFT 方法、DCT 方法和 FCC 方法对干涉图重构,结果如图 4(a1)~(c2)所示。

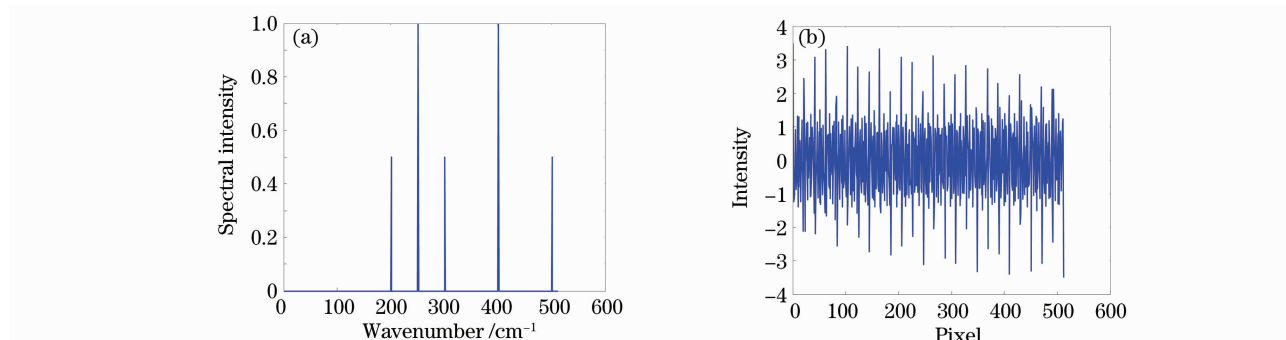


图 3 离散仿真光谱及其干涉图。(a)离散仿真光谱,(b)离散仿真光谱对应干涉图

Fig. 3 Simulated discrete spectrum and interferogram. (a) simulated discrete spectrum, (b) simulated interferogram created from discrete spectrum

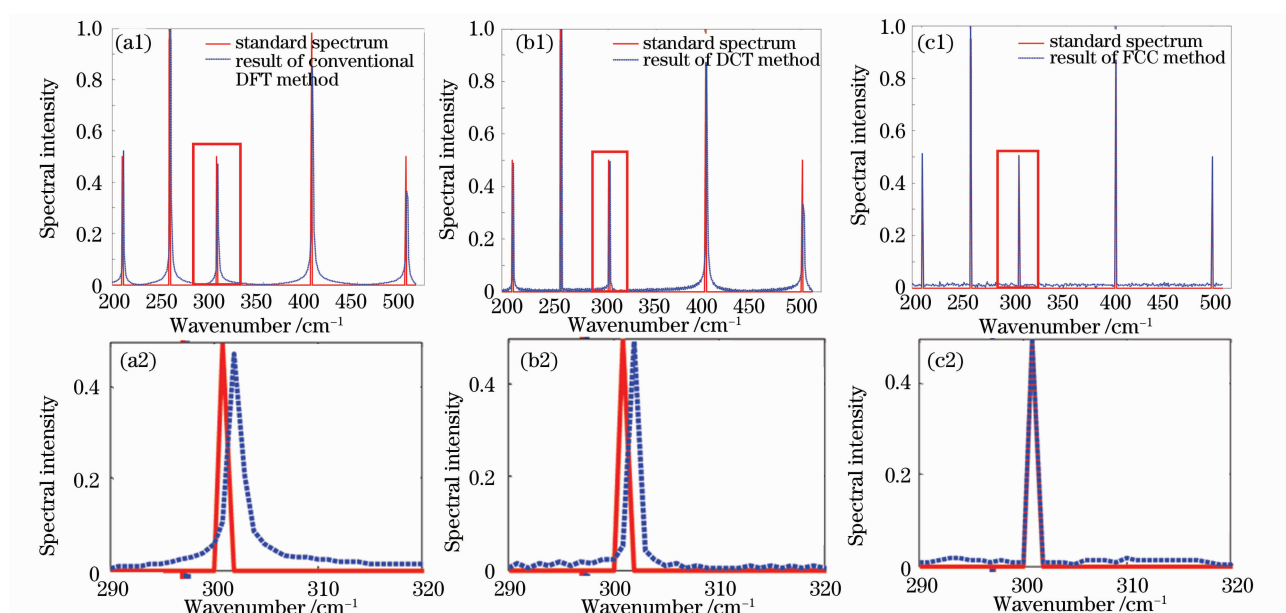


图 4 离散仿真光谱重构结果对比。(a1),(a2)传统 DFT 方法重构结果,(b1),(b2)传统 DCT 方法重构结果,(c1),(c2)共轭校正方法重构结果

Fig. 4 Comparison of reconstructed results of each method. (a1), (a2) reconstructed spectrum using conventional DFT method, (b1), (b2) reconstructed spectrum using conventional DCT method, (c1), (c2) reconstructed spectrum using FCC method

从图 4 中可以看出,对于离散谱,在频率复原精度方面,3 种方法所得的重构光谱峰值都与仿真光谱吻合,但传统 DFT 方法和 DCT 方法所得到的结果相比仿真光谱均有较大程度的展宽;在光谱强度

复原方面,传统 DFT 方法所得结果存在较大的误差,这是因为该方法在取模处理时叠加了多余的虚部信息,而 FCC 方法所得到的结果则与仿真光谱曲线较为吻合,但在非峰值部分存在一些微小波动,这

是由于为了测试方法的准确性,此处并没有对干涉图采取切趾等预处理,而仿真光谱的单色性比较好,所以干涉图的边缘截断比较显著,受 Gibbs 效应影响,会存在微小的波动,但在该仿真中这些波动非常微小,不至于掩盖小强度光谱峰值,因此对重构结果的影响可以忽略。同上文中的指标评价误差,传统 DFT 方法的重构误差为 0.0993,DCT 方法的重构误差为 0.0693,FCC 方法的重构误差为 0.0084。

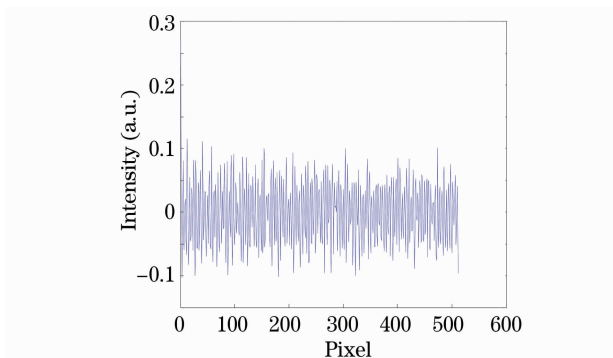


图 5 氦灯干涉图

Fig. 5 Interferogram of helium lamp

进一步进行实际光源光谱重构实验,采用氦灯作为目标光源,利用自行研制的 Sagnac 型干涉成像光谱仪采集干涉图,干涉图曲线如图 5 所示,在此基础上分别用 3 种方法重构光谱,再与紫外近红外色散光谱仪所得到的标准光谱进行对比,分别如图 6(a1)~(c2)所示。

由图 6 可以看出,对于实际光源,3 种方法的频率重构精度都比较理想,传统的 DFT 光谱强度重构精度和光谱分辨率都比较低,某些地方的光谱出现了虚假峰值,而 DCT 方法虽然能够较好的重构出光谱,但其光谱强度误差比较大,使用 FCC 方法则能较准确地重构出光谱。此处由于没有使用干涉图的预处理,因此某些地方出现了些许波动,但重构精度仍然处在可接受的范围内。以紫外近红外色散光谱仪采集到的光谱数据作为基准,以重构光谱和基准光谱之差的均方根值作为误差评价标准,对于氦灯,传统 DFT 方法重构光谱的误差为 0.0483,DCT 方法重构光谱的误差为 0.0572,而 FCC 方法的重构误差为 0.0088。

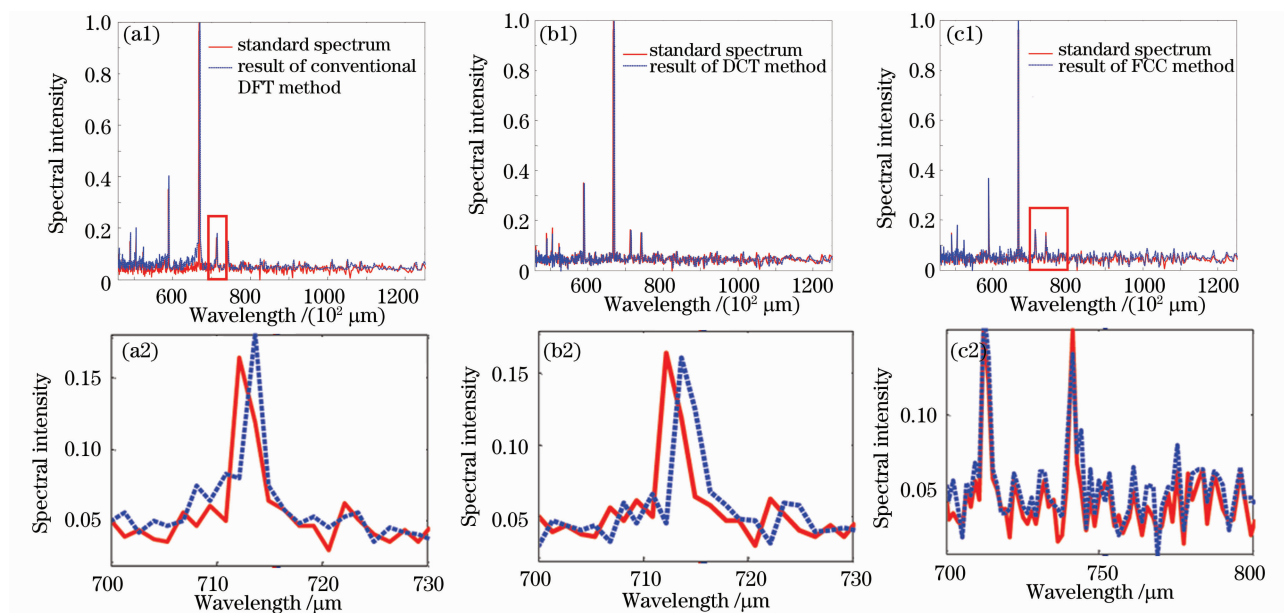


图 6 氦灯光谱重构实验。(a1),(a2)传统 DFT 方法重构结果,(b1),(b2)传统 DCT 方法重构结果,(c1),(c2) FCC 方法重构结果

Fig. 6 Experiment of spectral reconstruction of helium lamp. (a1),(a2) reconstructed spectrum using conventional DFT method, (b1),(b2) reconstructed spectrum using conventional DCT method, (c1),(c2) reconstructed spectrum using FCC method

## 6 结 论

针对干涉成像光谱仪光谱重构中传统 DFT 方法的复数域问题和近年来使用较多的 DCT 方法的边界条件问题,提出了一种 FCC 光谱重构方法,该

方法可以较好的避免上述问题。使用传统 DFT 重构方法、DCT 重构方法和 FCC 重构方法分别对连续光谱和离散光谱进行重构仿真,结果表明,3 种方法的光谱频率复原精度都较好,在光谱强度复原精



度方面,以归一化重构光谱和归一化源光谱对应频率点处光谱强度之差的均方根值为标准评价误差,对于连续仿真光谱重构,FCC 重构方法的结果误差比传统 DFT 方法小 6.7%,比 DCT 方法小 3.8%;对于离散仿真光谱重构,FCC 重构方法的结果误差比传统 DFT 方法小 9.1%,比 DCT 方法小 6.1%;使用氪灯进行实际光源光谱重构实验,FCC 重构方法的结果误差比传统 DFT 方法小 4%,比 DCT 方法的结果小 4.8%。该方法适用于各种结构的傅里叶变换干涉成像光谱仪,如采用傅里叶变换恢复光谱的星载、机载傅里叶变换光谱仪以及光纤傅里叶变换成像光谱仪,具有一致性高、准确性好和计算速度快的特点。

### 参 考 文 献

- 1 E. V. Loewenstein. The history and current status of Fourier transform spectroscopy [J]. *Appl. Opt.*, 1966, **5**(5): 845~854
- 2 Samuel T. Thurman, James R. Fienup. Fizeau Fourier transform imaging spectroscopy: missing data reconstruction [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(9): 6632~6645
- 3 R. Glenn Sellar, J. Bruce Rafert. Fourier-transform imaging spectrometer with a single toroidal optic [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(16): 2931~2933
- 4 S. Kawata, K. Minami, S. Minami. Superresolution of Fourier transform spectroscopy data by the maximum entropy method [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(22): 3593~3598
- 5 P. Luc, S. Gerstenkorn. Fourier transform spectroscopy in the visible and ultraviolet range [J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(9): 1327~1331
- 6 Y. C. Teng, B. S. H. Rayce. Quantitative Fourier transform IR photoacoustic spectroscopy of condensed phases [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(1): 77~80
- 7 Leonid Alekseyev, Evgenii Narimanov, Jacob Khurgin. Super-resolution imaging using spatial Fourier transform infrared spectroscopy[C]. International Quantum Electronics Conference, Nanophotonics and Metamaterial Symposium I 2009, 5
- 8 Francis Theberge, Marc Chateaufneuf, Jacques Dubois *et al.*. Spectral artifacts from non-uniform samples analyzed by terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(13): 10841~10848
- 9 Julia Rentz Dupuis, M. Selim Unlu. Time-domain surface profile imaging via a hyperspectral Fourier transform spectrometer [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(12): 1368~1370
- 10 Jiang Yi. Progress in fiber optic white-light interferometry [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1413~1420  
江 毅. 光纤白光干涉测量术新进展[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1413~1420
- 11 P. Zhao, J-M. Mariotti, V. Conde du Forsto *et al.*. Infrared single-mode fiber-optic Fourier-transform spectrometry and double Fourier interferometry[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(16): 2897~2901
- 12 Li Suning, Zhu Rihong, Shen Hua. Correction effect to spectral resolution of spectrometer caused by counter rotating of Sagnac prism[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 652~657  
李苏宁, 朱日宏, 沈 华. Sagnac 棱镜对旋对光谱仪光谱分辨率影像的校正方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 652~657
- 13 Marco Pisani, Massimo Zucco. Compact imaging spectrometer combining Fourier transform spectroscopy with a Fabry-Perot interferometer[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(10): 8319~8331
- 14 Sisko Maria Eskola, Folke Stenman. Interpolation of spectral data using shift theorem of the discrete Fourier transform[J]. *Appl. Spectroscopy*, 1997, **51**(8): 1179~1184
- 15 R. Heintzmann, K. A. Lidke, T. M. Jovin. Double-pass Fourier transform imaging spectroscopy[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(5): 753~763
- 16 Chen Liwu. The Theoretical Study of the Optical Technology of the Engineering of the Interference Imaging Spectrometer of the CE-1 Satellite[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Science, 2006. 27~35  
陈立武. CE-1 成像光谱仪工程化光学技术理论研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2006. 27~35
- 17 Jin Xizhe. The Study On Imaging Fourier Transform Spectroscopy Technology[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2000. 29~42  
金锡哲. 干涉成像光谱技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2000. 27~35
- 18 Liu Yong, Wu Jiandong, Zhu Ling *et al.*. Spectral recovery in fiber Fourier transform spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1697~1700  
刘 勇, 巫建东, 朱 灵等. 光纤傅里叶变换光谱仪光谱复原技术研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1697~1700
- 19 Wlodzimierz Pogribuy, Marcin Drechny. Discrete cosing transform using modified DPCM [C]. *SPIE*, 2004, **5484**: 653~658
- 20 David Casasent, Demetri Psaltis. Optical Fourier transform techniques for advanced Fourier spectroscopy systems[J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(12): 2034~2037
- 21 Chunjun Zheng, Peng Han, Hongsen Chang. Four-quadrant spatial phase-shifting Fourier transform digital holography for recording of cosine transform coefficients[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(3): 145~147
- 22 T. N. Ruckmongathan. Discrete cosine transform for driving liquid crystal displays [J]. *Journal of Disp. & Technology*, 2009, **5**(7): 243~249
- 23 B. G. Sherlock, Y. P. Kakad, A. Shukla. Rapid update of odd DCT and DST for real-time signal processing[C]. *SPIE*, 2005, **5809**: 464~471
- 24 Robert Reeves. New shift, scaling and derivative properties for the DCT[C]. *SPIE*, 1999, **3653**: 418~428
- 25 Subhash Balam, Dan Schonfeld. New algorithm for computation of DCT through pyramidal addition [C]. *SPIE*, 2005, **5683**: 208~217
- 26 Yingsong Hu, Jiangtao Xi, Joe Chicharo *et al.*. Discrete cosine transform-based shift estimation for fringe pattern profilometry using a generalized analysis model [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(25): 6560~6567
- 27 Gholam-Al, Hossein-Zadeh, Hamid Soltanian-Zadeh. DCT acquisition and reconstruction of MRI[C]. *SPIE*, 1998, **3338**: 398~407