

对称楔形干涉高光谱成像的光谱复原方法

柏财勋 李建欣 孟鑫 周建强 沈燕 王昊

南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

摘要 干涉型高光谱成像技术可以探测目标的空间信息以及光谱特性,在生物医学、材料分析、食品安全和文物考古等领域发挥着重要作用。基于对称楔形干涉腔的高光谱成像方法为光谱探测提供了一种新的技术途径,通过分析系统的干涉原理和工作方式,研究其光谱复原方法。提出干涉图像的校正补偿算法,较好地消除了像面暗斑对光谱复原的影响。针对系统整体推扫的工作方式,研究了基于局部相位相关的快速亚像素图像配准算法,能准确提取目标点干涉数据。对系统光谱传递矩阵进行讨论,提出基于矩阵反演的光谱复原方法。研制原理样机,对场景目标进行光谱成像实验,得到了初步的复原结果。

关键词 光谱学; 高光谱成像; 光谱复原法; 亚像素配准

中图分类号 O433

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0230004

Spectrum Recovery Method for Hyperspectral Imaging Based on Symmetric Wedgy Interferometric Cavity

Bai Caixun Li Jianxin Meng Xin Zhou Jianqiang Shen Yan Wang Hao

*School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210094, China*

Abstract Interferometric hyperspectral imaging can obtain the spatial information and spectral characteristics of the target. It plays an important role in many fields such as biomedicine, material analysis, food safety and cultural relic archaeology. The interferometric hyperspectral imaging based on symmetric wedgy cavity provides a new method for spectral detection. By analyzing the interference principle and working mode, the spectrum recovery method is studied. In order to eliminate the effect of image-plane macula on spectrum recovery, an interferogram correction algorithm is proposed. A fast subpixel image registration algorithm based on local phase correlation can realize accurate extraction of the interference data in holistic push-broom mode. A spectrum recovery method based on matrix inversion is presented by discussing the systemic spectral transfer matrix. A prototype is developed for a spectral imaging experiment and the preliminary recovered results are obtained with the proposed spectrum recovery method.

Key words spectroscopy; hyperspectral imaging; spectrum recovery method; subpixel image registration

OCIS codes 300.6170; 110.4234; 120.3180; 300.6190

1 引言

干涉成像光谱技术是一种重要的光谱探测技术,通过在成像系统中加入干涉调制组件,采集得到探测目标的干涉调制图像。然后利用干涉信息和光谱信息之间的物理关系复原光谱信息,最终获取探测目标的图谱信息。近年来国内外的科研人员针对该技术相继提出了各具特色的技术方案^[1-12],采用不同的干涉调制方式,改变干涉信息和光谱信息之间的物理关系。利用采集到的干涉光强信息,可反演得到探测目标的光

收稿日期: 2015-07-08; 收到修改稿日期: 2015-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(61475072, 61205016, U1231112)、教育部博士点基金(20123219120021, 20133219110008)

作者简介: 柏财勋(1991—),男,博士研究生,主要从事成像光谱偏振技术方面的研究。E-mail: baicaixun@163.com

导师简介: 李建欣(1977—),男,博士,副教授,主要从事精密光学测试与干涉成像光谱技术等方面的研究。

E-mail: ljx@vip.163.com(通信联系人)

谱信息。因此如何准确地获取探测目标的干涉光强信息以及精确建立干涉信息与光谱信息的物理关系是干涉成像光谱技术的关键。

基于对称楔形干涉腔的高光谱成像方法是一种新型的光谱探测技术,对称楔形干涉腔为其干涉调制组件,入射光束在腔内发生多光束干涉调制,最终在探测器靶面上获得带有干涉调制信息的图像^[13]。在分析系统干涉成像原理及工作方式的基础上,研究其干涉数据的提取和反演,发现系统存在3个亟待解决的关键技术问题。首先,系统的成像面位于干涉腔后腔面上,腔面上的疵病会对成像效果产生较大影响。其次,系统采用整体推扫的工作方式,采集到的干涉图像序列具有干涉条纹位置不变,目标像跟随系统推扫而产生偏移的特征。为了准确地提取同一目标点的干涉信息,同时消除由于推扫平台自身振动对采集干涉数据准确度的影响,需要对干涉图像序列进行高精度的图像配准处理。目前基于相位相关的亚像素图像配准算法在处理干涉图像的平移、旋转和尺度变换时能得到非常好的效果^[14-16],但由于需要对图像进行全局插值处理,提高配准精度的同时,增加了数据的存储空间及运算时间,需要研究一种快速亚像素图像配准技术来实现干涉图像的高效精确配准。最后,由于系统基于多光束干涉的原理,传统的傅里叶变换光谱反演方法无法精确地复原光谱信息^[17-20],需要针对该系统的光谱传递矩阵研究一种更加精确的光谱复原算法。本文针对干涉图像的补偿校正,图像快速亚像素配准以及基于矩阵反演的光谱复原算法展开研究,逐一解决系统中存在的3个技术问题。

2 光谱成像系统

2.1 基本思路

干涉成像光谱复原技术是基于对光强信息的干涉调制,因此干涉器是其核心部件。由于法布里-珀罗(F-P)干涉器具有直线光路、体积紧凑的优点,为实现仪器小型化提供了有利条件。所研究的高光谱成像系统采用对称楔形干涉器作为光程调制组件,系统原理框图如图1所示。入射光束通过成像物镜成像进入对称楔形干涉器,由于干涉器楔形腔面上镀制反射膜,光束在干涉器后腔面上进行多光束干涉调制和成像,中继镜将该像重新转接到探测器靶面上。系统中只需要2个物镜,具备直线光路、体积紧凑的特点。由于楔形腔的间隔是线性渐变的,因此不同视场角的光束被不同的光程差所调制,实现了干涉光程差与视场角的关联调制,在探测器靶面上得到经过相干调制的目标图像。该方法属于时空联合调制型干涉方法,需要通过仪器的整体推扫,提取每个物点的干涉信息,从而复原出成像目标的光谱信息。

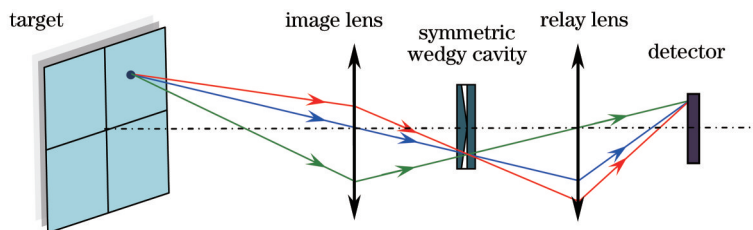


图1 基于对称楔形干涉腔的高光谱成像系统

Fig.1 Hyperspectral imaging system based on symmetric wedgy interferometric cavity

2.2 系统参数

根据高光谱系统的成像调制原理,设计并搭建了实验样机,样机尺寸(包括成像物镜和CCD)为250 mm × 90 mm × 90 mm,如图2所示。样机中器件光谱镀膜范围为450~700 nm,干涉腔楔角为20',探测器像元

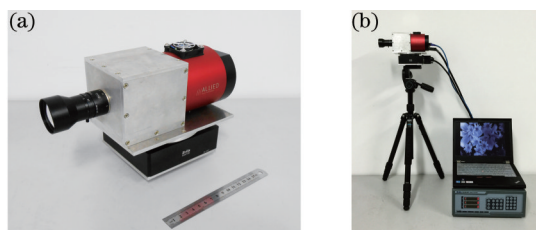


图2 (a) 实验样机主机; (b) 实验样机整机

Fig.2 (a) Principal part of experimental prototype; (b) complete experimental prototype

尺寸为 $6.45\ \mu\text{m}$, 像元数量为 $1280\ \text{pixel} \times 1024\ \text{pixel}$, 最大光程差达到 $48\ \mu\text{m}$, 在 $700\ \text{nm}$ 处光谱分辨率优于 $5.1\ \text{nm}$ 。干涉器内表面镀制 40% 的反射膜, 其光能传输效率优于 40%。成像物镜焦距为 $100\ \text{mm}$, 中继镜系统为 1:1 成像, 有效焦距为 $30\ \text{mm}$, 物(像)距为 $19.2\ \text{mm}$ 。整个装置安装在电控转台 RAK100 上, 其角度步进精度为 0.00125° , 可以完成高精度成像推扫。

2.3 成像效果

系统采用整体推扫的工作方式采集干涉数据, 实验装置对场景目标进行推扫获得干涉数据的过程如图 3 所示。整体推扫的工作方式决定了采集到的干涉图像序列具有视场中条纹位置不变, 目标场景随着电控转台旋转移动的特征, 场景目标的干涉图像序列如图 4 所示, 可以看出推扫过程中, 目标场景在视场中从右向左移动。因此在提取同一探测点不同光程差调制下的干涉信息时, 需要对干涉图像序列进行快速精确的图像配准。

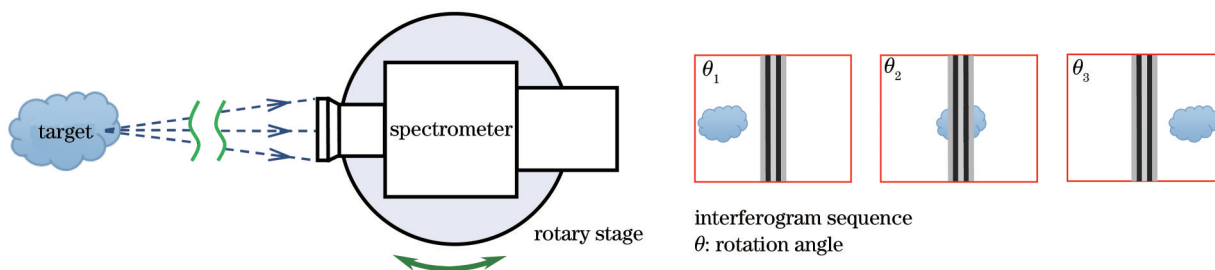


图 3 实验装置采集数据示意图

Fig.3 Schematic of data collection by the experimental device

系统的成像面位于干涉腔的后腔面上, 因此后腔面的表面光洁度对成像质量的影响较大。此外, 干涉图像中的中心零级条纹处于对称楔板和平行平板的接触位置, 受加工工艺和装调过程中应力的影响, 对称楔板 2 个楔面相交的棱可能存有疵病, 从而导致零级条纹中产生中心暗斑, 影响光谱复原效果。干涉图 4(b) 中圆形框标记处为干涉器后腔面疵病产生的腔面暗斑; 矩形框则标出了由于对称楔板棱上存有疵病, 导致零级条纹中出现的中心暗斑。针对以上问题, 围绕干涉图像的补偿校正以及快速亚像素级图像配准展开研究。该系统的光谱复原数据处理流程如图 5 所示。

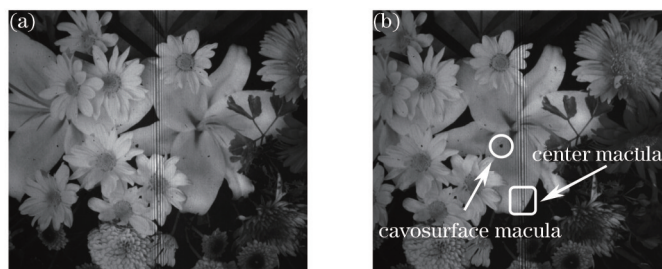


图 4 干涉图像序列

Fig.4 Interferogram sequence

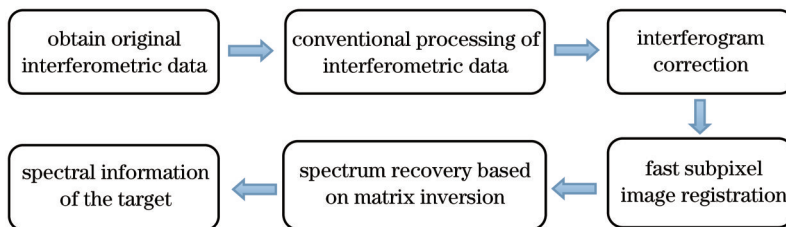


图 5 数据处理流程图

Fig.5 Flow chart of data processing

3 干涉图像补偿校正

系统采集到的干涉图像序列中由于零级条纹的中心暗斑以及腔面暗斑的影响, 无法准确地获取场景目

标不同光程差调制下的干涉信息,因而无法复原出真实的光谱信息,影响最终的光谱复原结果。零级条纹中存在中心暗斑,会导致零级条纹亮度低于其他级次的条纹亮度,在对干涉信息进行傅里叶变换时,无法正确提取到零光程差调制下的干涉信息,导致复原的光谱信息出现错误,在复原的光谱图像中表现为横向的条带。由于干涉腔后腔面上疵病导致图像中出现的腔面暗斑同样会产生错误的干涉信息,影响复原光谱信息的准确性。针对以上问题,研究一种对干涉数据进行补偿校正的方法,消除干涉图像中的像面暗斑影响,提高光谱复原的准确性。

在相同光源照射下,系统对白色背景成像,获取一幅像素为 $m \times n$ 的干涉图像,提取其中一行像素的灰度值,如图 6(a)所示。由于图像中心暗斑的存在,导致零级亮条纹的灰度值低于其他级次的亮条纹灰度值。将此图像第 x 行、第 y 列的像素灰度值设为 $I_s(x,y)$,标准函数 H 为

$$H(y) = \frac{1}{m} \sum_{x=0}^{m-1} I_s(x,y), \quad x = 0, 1, \dots, m-1; y = 0, 1, \dots, n-1. \quad (1)$$

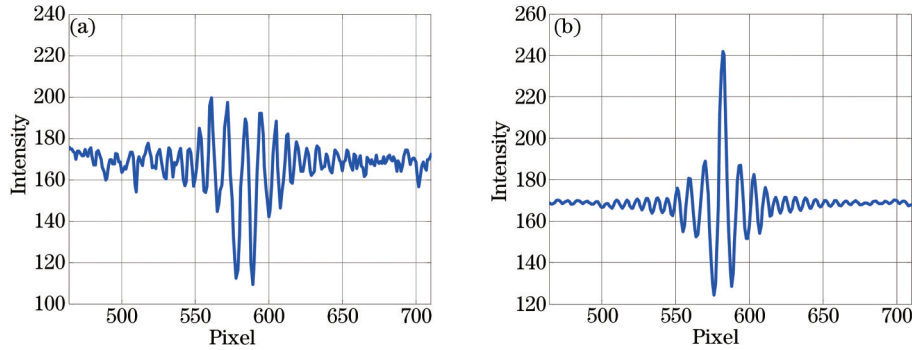


图 6 (a) 校正前干涉信息; (b) 标准函数曲线

Fig.6 (a) Interferometric information without correction; (b) standard function

由于中心暗斑的影响,零级亮条纹的灰度值略低于其真实值,需要对其零级条纹进行调整,根据零级条纹中无暗斑时的灰度值对标准函数曲线进一步修正,乘以系数函数 α ,其定义为

$$\alpha(y) = \begin{cases} 1.2, & \{y | \text{Column pixel coordinates of zero order fringes}\} \\ 1, & \{y | \text{Column pixel coordinates of other order fringes}\} \end{cases}. \quad (2)$$

图 6(b)给出了调整后的标准函数曲线,由标准函数可以计算出干涉图像中每个像素点的灰度校正因子。利用该校正因子对干涉图像序列进行修正,可消除干涉图像中心暗斑以及腔面暗斑的影响。设第 x 行、第 y 列的像素灰度补偿校正因子为 $C(x,y)$,则

$$C(x,y) = \alpha(y)H(y)/I_s(x,y). \quad (3)$$

最后利用像素灰度补偿校正因子 $C(x,y)$ 对原始干涉图像 $I_1(x,y)$ 进行补偿校正,得到校正后的干涉图像 $I_c(x,y)$ 为

$$I_c(x,y) = C(x,y)I_1(x,y). \quad (4)$$

4 干涉图像的快速亚像素配准

4.1 相位相关法

系统采用整体推扫方式采集到的干涉图像序列中包含着场景目标不同光程差调制下的干涉信息,为了提取某一目标点的干涉调制信息,需要确定该目标点在图像序列中的位置,因此对干涉图像序列进行配准是干涉数据提取的关键所在。

假设干涉图像光强 $I(x,y)$ 的傅里叶变换形式为 $F(u,v)$,根据傅里叶变换原理可知, $I(x-x_0,y-y_0)$ 进行傅里叶变换后得到 $F(u,v)\exp[-j(ux_0 + vy_0)]$,其中 j 为虚部单位。若第一幅干涉图像 I_1 的二维光强分布函数为 $I_1(x,y)$,那么相对于首幅图像偏移量为 (x_0,y_0) 的干涉图像 I_2 的二维光强分布函数为

$$I_2(x,y) = I_1(x-x_0,y-y_0). \quad (5)$$

(5)式的傅里叶变换形式为

$$I_2(u, v) = I_1(u, v) \exp[-j(ux_0 + vy_0)] . \quad (6)$$

定义互功率谱为

$$\text{Corr}(u, v) = \frac{I_1(u, v)I_2^*(u, v)}{|I_1(u, v)I_2^*(u, v)|} = \exp[j(ux_0 + vy_0)] . \quad (7)$$

将互功率谱函数进行逆傅里叶变换处理即可得到冲激函数 $\delta(x - x_0, y - y_0)$,峰值的位置即为待配准图像相对于参考图像的偏移量 (x_0, y_0) ,根据偏移量对待配准图像进行相应移动处理,即可完成图像的平移配准过程。图7展示了干涉图像序列的采样过程,根据图像配准得到的偏移参数构造新的图像数据存储空间,使得同一目标点的像位于图像序列相同的像素位置,可以方便准确地提取该点的干涉信息。

4.2 快速亚像素图像配准

干涉图像配准是将包含有相同场景目标的图像进行几何对准的过程,像素级的图像配准技术已无法满足干涉数据的精确提取,而亚像素级配准技术则能实现干涉图像的高精度配准^[21]。基于局部上采样的快速亚像素图像配准技术弥补了全局上采样技术中运算数据激增的缺陷,节约存储空间,提高了干涉图像配准效率。

快速亚像素级干涉图像配准技术首先需要利用传统的相位相关法找到2幅干涉图像全局互功率谱的初始峰值位置 (x_0, y_0) ,然后以其为中心选取一个尺度为 $b \text{ pixel} \times b \text{ pixel}$ (通常 $1 < b < 2$) 的插值区域,再利用局部上采样矩阵傅里叶变换技术,在互功率谱附近插值区域内进行上采样,设定上采样的尺度因子为 k ,则干涉图像配准的精度可达到 $1/k \text{ pixel}$,实现亚像素级配准。局部上采样过程可得到干涉图像插值区域的互功率谱峰值位置为 $(\Delta x_0, \Delta y_0)$,最后对初始配准结果进行亚像素级修正,可得到干涉图像亚像素级偏移量为

$$\begin{cases} \tilde{x}_0 = x_0 + \Delta x_0/k \\ \tilde{y}_0 = y_0 + \Delta y_0/k \end{cases} . \quad (8)$$

该方法结合了像素级相位相关技术和亚像素级局部相位相关技术,在实现干涉图像高精度配准的同时,大大减小了对存储空间的需求,提高了数据处理的效率。利用处理结果对待配准的干涉图像序列进行平移变换,然后按照采集时间顺序重叠排列,即可快速准确提取到探测目标的干涉数据。

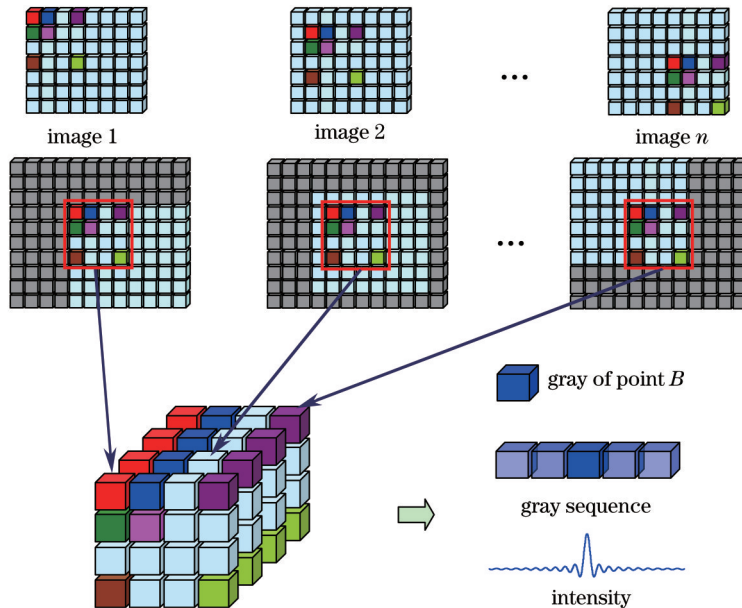


图7 干涉图像序列配准和采样示意图

Fig.7 Registering and sampling of interferogram sequence

5 干涉数据的反演

传统的干涉成像光谱系统的光谱复原技术主要建立在傅里叶变换基础上,因为其光强调制原理是双光束干涉,干涉信息与光谱信息之间严格满足傅里叶变换对的关系。而对称楔形干涉腔的高光谱成像系统是

基于多光束干涉,其干涉信息与光谱信息间的物理关系较为复杂,无法通过傅里叶变换处理精确得到目标的光谱信息,需要研究系统的光谱传递矩阵^[22],利用矩阵反演的方法来实现光谱的精确复原。

当系统入射光源为单色光时,透射光线在探测器上的强度表达式为

$$I_1 = I_0 \frac{(1-R)^2}{1+R^2-2R\cos(2\pi\sigma\Delta)}, \quad (9)$$

式中 I_0 为光源光强, R 为干涉器腔面反射率, σ 为光源波数, Δ 为光程差。如果进入成像系统的光源波数范围为 $\sigma_{\min} \sim \sigma_{\max}$, 则探测器上接收到的光强为

$$I = \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} \frac{(1-R)^2}{1+R^2-2R\cos(2\pi\sigma\Delta)} B(\sigma) d\sigma. \quad (10)$$

在推扫探测过程中,需要探测器对像点光强进行离散采样,获取目标点 N 个光程差下的干涉光强 $I_i (i=0,1,\dots,N-1)$, 离散光强表达式为

$$\begin{aligned} I_1 &= \sum_{j=0}^{M-1} \frac{(1-R)^2}{1+R^2-2R\cos(2\pi\sigma_j\Delta_1)} B(\sigma_j) \\ I_2 &= \sum_{j=0}^{M-1} \frac{(1-R)^2}{1+R^2-2R\cos(2\pi\sigma_j\Delta_2)} B(\sigma_j), \\ &\vdots \\ I_N &= \sum_{j=0}^{M-1} \frac{(1-R)^2}{1+R^2-2R\cos(2\pi\sigma_j\Delta_N)} B(\sigma_j) \end{aligned} \quad (11)$$

式中 $B(\sigma_j) (j=0,1,\dots,M-1)$ 为未知的光谱信息, $\Delta_i (i=0,1,\dots,N-1)$ 为采样光程差,其表达式为

$$\Delta_i = 2Px_i \tan \alpha, \quad (12)$$

式中 P 为探测器像元尺寸, x_i 为物点对应的不同光程差调制下采样像点相对于该点在零光程差调制时像点位置的横向偏移量, α 为对称楔形干涉腔的楔角。

离散采样光强表达式可以改写为

$$I = KB, \quad (13)$$

式中光强矩阵 $I = (I_0, I_1, \dots, I_{N-1})^T$, 光谱矩阵 $B = [B(\sigma_0), B(\sigma_1), \dots, B(\sigma_{M-1})]^T$, 即

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ \vdots \\ I_{N-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K(0,0) & K(0,1) & \cdots & K(0,M-1) \\ K(1,0) & K(1,1) & \cdots & K(1,M-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K(N-1,0) & K(N-1,1) & \cdots & K(N-1,M-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B(\sigma_0) \\ B(\sigma_1) \\ \vdots \\ B(\sigma_{M-1}) \end{bmatrix}. \quad (14)$$

传递矩阵 K 的表达式为

$$K(i,j) = \frac{(1-R)^2}{1+R^2-2R\cos(4\pi P\sigma_j x_i \tan \alpha)}. \quad (15)$$

通过反演求解矩阵方程(14)式,可求得光谱矩阵 B 。根据上述理论分析对光谱复原方法进行了仿真,分别讨论理想情况和添加噪声时复原光谱信息的准确度。假设探测波段的范围为 450~700 nm,干涉器腔面反射率为 40%,谱段数为 50 个,采样点数为 640 个。图 8(a)为原始光谱信息(OS),图 8(b)为干涉信息无噪声影响时复原得到的光谱信息(RS)。可以看出在理想情况下,通过矩阵反演可以精确地复原出原始光谱信息。但实际获取的干涉信息由于探测器暗电流、转台振动以及系统杂散光等因素的影响会带有噪声。当干涉信号的信噪比(SNR)分别为 60 dB 和 50 dB 时,仿真复原得到的光谱信息如图 8(c)和 8(d)所示。

从上述仿真结果可以看出,当信噪比为 60 dB 时,通过求解光谱矩阵可以较好地复原出原始光谱信息,而当信噪比为 50 dB 时,复原结果较差。定义光谱复原的均方根误差(RMSE)为

$$f_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M [B_{\text{RS}}(j) - B_{\text{OS}}(j)]^2}, \quad (16)$$

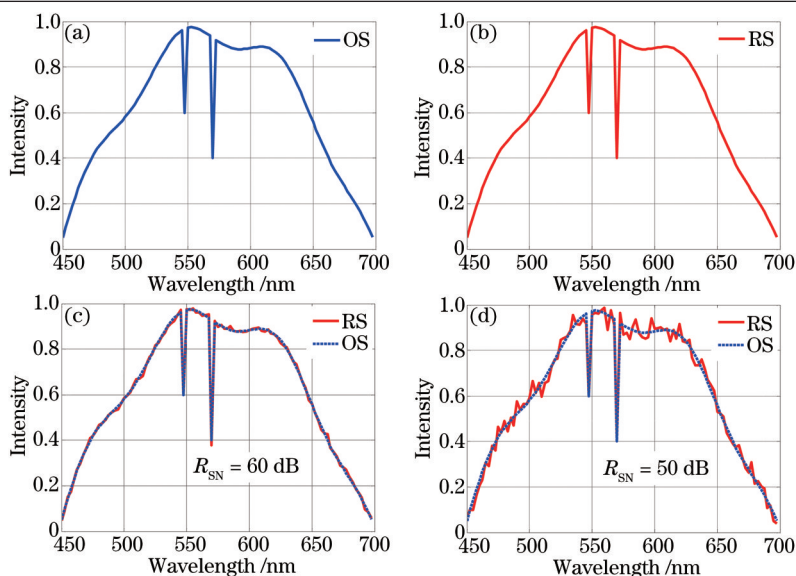


图8 光谱信息。(a) 原始光谱; (b) $R_{SN}=0$ dB; (c) $R_{SN}=60$ dB; (d) $R_{SN}=50$ dB

Fig.8 Spectral information. (a) Original spectrum; (b) $R_{SN}=0$ dB; (c) $R_{SN}=60$ dB; (d) $R_{SN}=50$ dB

式中 B_{OS} 为原始光谱矩阵, B_{RS} 为复原光谱矩阵。随着干涉信号信噪比的提高,光谱复原的均方根误差变化曲线如图9所示。由图中曲线可以看出,若要较准确地复原出原始的光谱信息,即光谱复原的均方根误差小于0.01时,干涉信号的信噪比应大于55 dB,对噪声的控制要求较高。

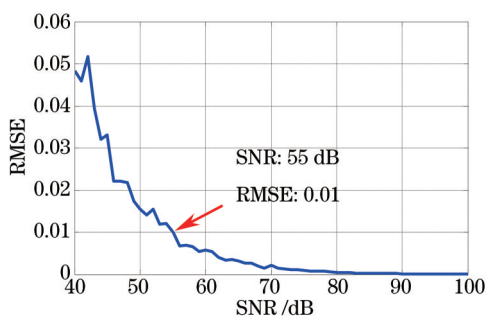


图9 不同信噪比时光谱复原的均方根误差曲线

Fig.9 Curve of RMSE at different SNR

6 实验结果

根据系统干涉调制的原理,搭建了基于对称楔形干涉腔的高光谱成像系统。首先利用波长为531.2 nm和653.6 nm的两束激光作为光源进行光谱成像实验,采集到的干涉图像及复原结果如图10所示,利用波长为531.2 nm的激光对系统进行初步定标。由于干涉数据可能存在采样误差,在光谱反演时需要进行相位修正^[23],最终复原得到另一激光的波长为654.2 nm,波长复原误差为0.6 nm。

在整体推扫的工作方式下对目标场景进行成像实验,共采集到1120幅干涉图像。首先对干涉图像进行校正处理,图11(a)为白色背景的干涉条纹图像,根据(1)式和(2)式,计算得到该视场的校正因子。图11(a)矩形虚线框区域的灰度校正因子的二维分布图像如图11(b)所示,其中中心暗斑区域 A_1 和腔面暗斑区域 A_2 、 A_3 对应的灰度校正因子较大。该过程同时对照明光源进行了均匀处理,校正后的白背景干涉图像如图11(c)所示。图11(d)为校正后的干涉图像,从图中可以看出,图4(b)中原有的中心暗斑和腔面暗斑均得到较好的修正。

对实验采集到的干涉图像序列进行1/1000 pixel精度的配准处理,水平和垂直的像素偏移量如图12所示,可利用此偏移量对干涉图像作相应的几何变换。经过快速亚像素图像配准处理后的干涉图像序列如图13所示,可以看出该图像序列具有背景图像位置不变,干涉条纹位置移动的特点。在此基础上,可以十分容易地提取同一物点的干涉信息,完成干涉数据重构。

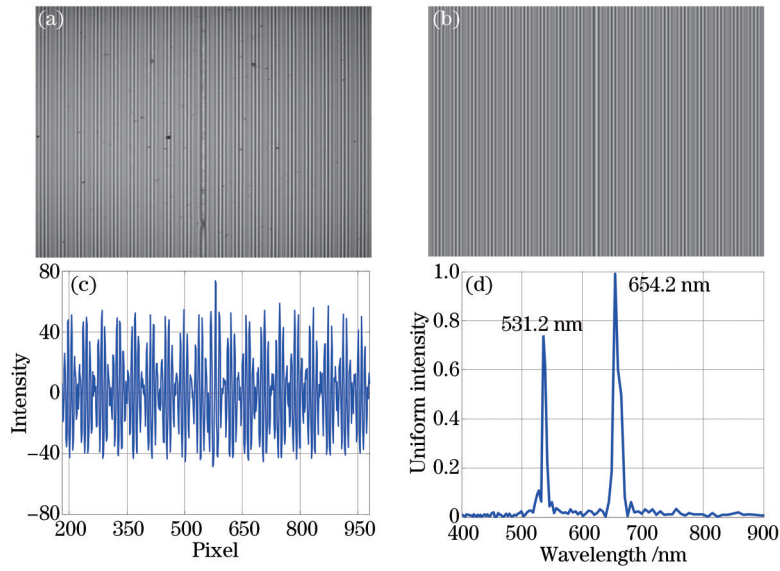


图 10 (a) 原始激光干涉图; (b) 校正图像; (c) 干涉数据曲线; (d) 复原谱线

Fig.10 (a) Original laser interferogram; (b) corrected interferogram; (c) interference data; (d) recovered spectrum

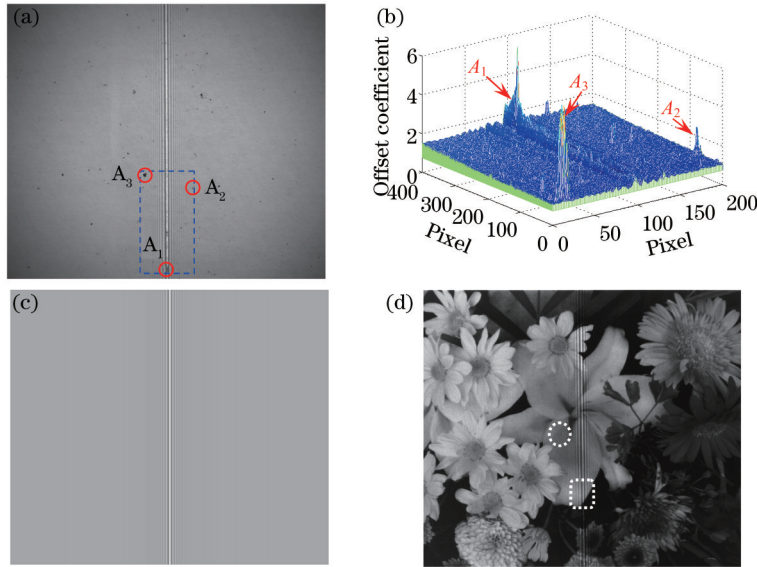


图 11 (a) 原始干涉背景; (b) 补偿校正系数; (c) 校正干涉背景; (d) 校正图像

Fig.11 (a) Original interferometric background; (b) offset coefficient; (c) corrected interferometric background; (d) corrected image

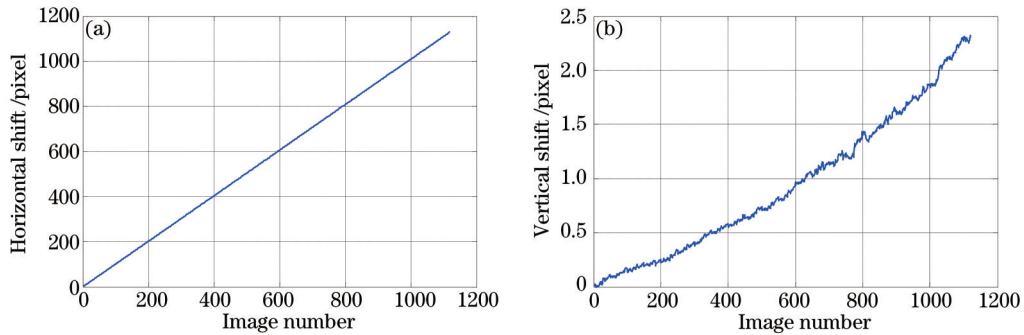


图 12 图像序列水平和竖直偏移量

Fig.12 Horizontal shift and vertical shift of image sequence

提取场景目标每一点在不同光程差调制下的干涉信息,再根据基于矩阵求解的光谱复原算法,得到目标的光谱信息。图 14(a)展示了从重构的干涉数据立方体中提取的某一列场景目标点的干涉信息,可以看出

条纹对比度较好,且图像配准效果较为理想。图 14(b)为右上角红色花瓣区域的光谱信息,场景目标的复原光谱图像如图 14(c)、(d)所示,对应的波长分别为 512 nm 和 594 nm。

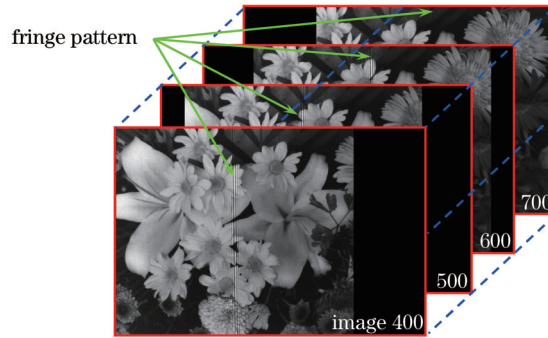


图 13 亚像素配准后的干涉图像序列

Fig.13 Interferogram sequence with subpixel image registration

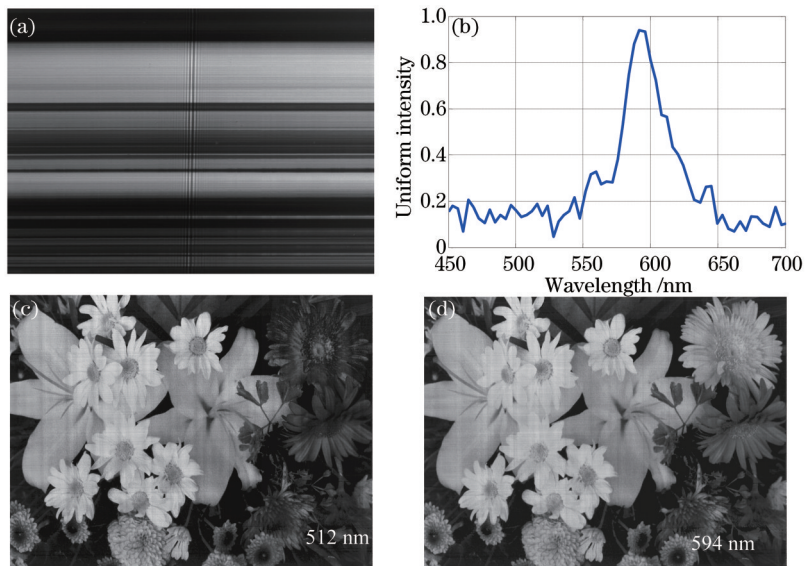


图 14 成像目标的复原光谱图像

Fig.14 Recovered spectral images of the imaged target

7 结 论

讨论了基于对称楔形干涉腔的高光谱成像系统的基本原理,设计并搭建实验样机,介绍了系统采集数据的工作方式。针对系统成像以及提取干涉数据时存在的技术难点展开研究,采用图像校正的方法较好地消除了腔面暗斑的影响,研究了基于局部相位相关的快速亚像素图像配准算法,并对干涉图像序列进行高精度配准处理,解决了场景目标干涉数据的提取技术难点。给出系统的光谱传递矩阵,提出了基于矩阵反演的光谱复原算法,在获得初步实验结果的同时,验证了算法的可行性。较好地解决了基于对称楔形干涉腔的高光谱成像系统在光谱复原时的 3 个技术难点。

参 考 文 献

- 1 Cabib D, Buckwald R A, Garini Y, *et al.*. Spatially resolved Fourier transform spectroscopy (spectral imaging): A powerful tool for quantitative analytical microscopy[C]. SPIE, 1996, 2678: 278-291.
- 2 Harvey A R, Holmes D W F. Birefringent Fourier-transform imaging spectrometer[J]. Optics Express, 2004, 22(12): 5368-5374.
- 3 Horton R F. Optical design for a high etendue imaging Fourier transform spectrometer[C]. SPIE, 1996, 2819: 300-315.
- 4 Lucey P G, Akagi J. A Fabry-Perot interferometer with a spatially variable resonance gap employed as a Fourier transform spectrometer [C]. SPIE, 2011, 8048: 80480K.
- 5 Gillard F, Ferrec Y, Guerineau N, *et al.*. Angular acceptance analysis of an infrared focal plane array with a built-in stationary Fourier

- transform spectrometer[J]. *JOSA A*, 2012, 29(6): 936-944.
- 6 Li Jianxin, Meng Xin, Zhou Wei, *et al.*. Image plane interferometric hyperspectral imaging based on re-imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1230001.
李建欣, 孟 鑫, 周 伟, 等. 基于二次成像的像面干涉高光谱成像方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1230001.
- 7 Li Jianxin, Zhou Wei, Meng Xin, *et al.*. Hyperspectral microscopic imaging based on image plane interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1211005.
李建欣, 周 伟, 孟 鑫, 等. 基于像面干涉的高光谱显微成像方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1211005.
- 8 Dong Ying, Xiangli Bin, Zhao Baochang. Lateral shearing interferometer in large aperture static imaging spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, 28(11): 991-995.
董 瑛, 相里斌, 赵葆常. 大孔径静态干涉成像光谱仪中的横向剪切干涉仪[J]. *光子学报*, 1999, 28(11): 991-995.
- 9 Zhang Chunmin, Zhao Baochang, Xiangli Bin, *et al.*. Analysis and calculation of throughput of the polarization interference imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(2): 192-197.
张淳民, 赵葆常, 相里斌, 等. 偏振干涉成像光谱仪通量的分析与计算[J]. *光学学报*, 2001, 21(2): 192-197.
- 10 Li Jie, Zhu Jingping, Zhang Yunyao, *et al.*. Spectral zooming birefringent imaging spectrometer[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(2): 024205.
李 杰, 朱京平, 张云尧, 等. 光谱分辨率可调的新型干涉成像光谱技术研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(2): 024205.
- 11 Xue Qingsheng. Optical system design of large relative-aperture and wide field of view spaceborne imaging spectrometer[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(3): 0316003
薛庆生. 星载大相对孔径宽视场成像光谱仪光学系统设计[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0316003.
- 12 Ren Zhong, Liu Guodong, Huang Zhen. A spectrometer splitting-light system based on volume phase holographic transmission grating [J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(6): 0608004.
任 重, 刘国栋, 黄 振. 一种体相位全息透射式光栅的光谱仪分光系统[J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0608004.
- 13 Bai Caixun, Li Jianxin, Meng Xin, *et al.*. Hyperspectral imaging based on symmetric wedgy interferometric cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0811002.
柏财勋, 李建欣, 孟 鑫, 等. 基于对称楔形干涉腔的高光谱成像方法[J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0811002.
- 14 Liu Xiaochun, Zhong Tao, Yu Qifeng, *et al.*. Multi-modal image registration based on local frequency information using modified simplex-simulated annealing algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0615002.
刘晓春, 钟 涛, 于起峰, 等. 基于局部频率信息和单纯型-模拟退火的异源图像配准[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0615002.
- 15 Yang Sa, Yang Chunling. Image registration algorithm based on sparse random projection and scale-invariant feature transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 1110001.
杨 飒, 杨春玲. 基于压缩感知与尺度不变特征变换的图像配准算法[J]. *光学学报*, 2014, 34(11): 1110001.
- 16 Gao Yingying, Yang Jianfeng, Ma Xiaolong, *et al.*. Interference image registration based on Fourier-Mellin algorithm[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(9): 1415-1420.
高莹莹, 杨建峰, 马晓龙, 等. 基于 Fourier-Mellin 算法的干涉图像配准[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(9): 1415-1420.
- 17 Li Suning, Zhu Rihong, Gao Zhishan, *et al.*. Fourier conjugate correction spectral reconstruction for Fourier-transform spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 0412010.
李苏宁, 朱日宏, 高志山, 等. 共轭傅里叶变换校正成像光谱重构[J]. *光学学报*, 2011, 31(4): 0412010.
- 18 Meng Xin, Li Jianxin, Zhu Rihong, *et al.*. Compressive sampling recovery method of narrow-band hyperspectral interferometric imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 33(1): 0130001.
孟 鑫, 李建欣, 朱日宏, 等. 窄带高光谱干涉成像的压缩采样复原方法[J]. *光学学报*, 2012, 33(1): 0130001.
- 19 Xiangli Bin, Yuan Yan, Lü Qunbo. Spectral transfer function of the Fourier transform spectral imager[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(8): 5399-5405.
相里斌, 袁 艳, 吕群波. 傅里叶变换光谱成像仪光谱传递函数研究[J]. *物理学报*, 2009, 58(8): 5399-5405.
- 20 Meng Xin, Li Jianxin, Li Suning, *et al.*. Recovery algorithm of image plane interference imaging spectrometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 41(8): 1-6.
孟 鑫, 李建欣, 李苏宁, 等. 像面干涉成像光谱技术中复原方法的研究[J]. *红外与激光工程*, 2013, 41(8): 1-6.
- 21 Sicairos M G, Thurman S T, Fienup J R. Efficient subpixel image registration algorithms [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(2): 156-158.
- 22 Du Shusong, Wang Yongmei, Tao Ran. Multiple beam interferential spectral imaging technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0830003.
杜述松, 王咏梅, 陶 然. 多光束干涉光谱成像技术[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0830003.
- 23 Ren W Y, Zhang C M, Mu T K, *et al.*. Spectrum reconstruction based on the constrained optimal linear inverse methods[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2580-2582.