

全景双谱段红外成像干涉光谱测量反演仪器

吕金光 梁静秋 赵百轩 赵莹泽 郑凯丰 陈宇鹏 王维彪 秦余欣 陶金

Panoramic bispectral infrared imaging interference spectrum measurement inversion instrument

LV Jin-guang, LIANG Jing-qiu, ZHAO Bai-xuan, ZHAO Ying-ze, ZHENG Kai-feng, CHEN Yu-peng, WANG Wei-biao, QIN Yu-xin, TAO Jin

引用本文:

吕金光, 梁静秋, 赵百轩, 赵莹泽, 郑凯丰, 陈宇鹏, 王维彪, 秦余欣, 陶金. 全景双谱段红外成像干涉光谱测量反演仪器[J]. *中国光学*, 2022, 15(5): 1092-1104. doi: 10.37188/CO.2022-0114

LV Jin-guang, LIANG Jing-qiu, ZHAO Bai-xuan, ZHAO Ying-ze, ZHENG Kai-feng, CHEN Yu-peng, WANG Wei-biao, QIN Yu-xin, TAO Jin. Panoramic bispectral infrared imaging interference spectrum measurement inversion instrument[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(5): 1092-1104. doi: 10.37188/CO.2022-0114

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0114>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

傅立叶变换型线偏振干涉成像系统分析与设计

Analysis and design of Fourier transform polarization interference imaging system

中国光学 (中英文). 2019, 12(3): 638 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0638>

信息光学视角下菲涅耳双棱镜干涉的研究

Investigation of Fresnel biprism interference from the perspective of information optics

中国光学 (中英文). 2019, 12(1): 122 <https://doi.org/10.3788/CO.20191201.0122>

基于OLED微显示器和变形目镜的全景显示技术

Panoramic display technology based on OLED micro-display and anamorphic eyepiece

中国光学 (中英文). 2018, 11(4): 684 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0684>

光谱成像技术在海域目标探测中的应用

Application of spectral imaging technology in maritime target detection

中国光学 (中英文). 2017, 10(6): 708 <https://doi.org/10.3788/CO.20171006.0708>

长时程双光子成像技术

Long-time two-photon imaging technology

中国光学 (中英文). 2018, 11(3): 337 <https://doi.org/10.3788/CO.20181103.0337>

双波段芯片集成封装组件的低温光谱定量化

Low temperature spectroscopy quantification of integrated dual band chip package

中国光学 (中英文). 2017, 10(6): 744 <https://doi.org/10.3788/CO.20171006.0744>

文章编号 2097-1842(2022)05-1092-13

全景双谱段红外成像干涉光谱测量反演仪器

吕金光*, 梁静秋*, 赵百轩, 赵莹泽, 郑凯丰, 陈宇鹏, 王维彪, 秦余欣, 陶金
(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: 为了满足工业污染排放及突发安全事故对在线实时监测分析仪器的迫切需求, 提出了全景双谱段红外成像干涉光谱测量反演仪器。通过双通道干涉系统、双谱段成像系统及方位俯仰轴系的协同设计, 实现目标场景图像光谱信息的大视场、宽谱段、高分辨率测量。首先, 根据傅立叶光学理论, 建立了干涉成像光谱的标量衍射理论模型; 然后, 基于宽带采样与窄带采样理论, 对双通道干涉系统进行采样设计, 并在分析干涉成像特点的基础上, 对双谱段成像系统进行光学设计; 最后, 研制了原理样机, 并开展了烟囱排放气体烟羽的遥测实验。该仪器可以实现 $360^\circ \times 60^\circ$ 大视场空间场景中 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 中长波红外光谱范围内 $4\ \text{cm}^{-1}$ 分辨率的光谱测量, 满足排放监测定性识别与定量分析的应用要求。

关键词: 成像干涉光谱仪; 双通道干涉; 双谱段成像; 全景; 采样

中图分类号: O433.1 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2022-0114

Panoramic bispectral infrared imaging interference spectrum measurement inversion instrument

LV Jin-guang*, LIANG Jing-qiu*, ZHAO Bai-xuan, ZHAO Ying-ze, ZHENG Kai-feng,
CHEN Yu-peng, WANG Wei-biao, QIN Yu-xin, TAO Jin

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

* Corresponding author, E-mail: jinguanlv@163.com; liangjq@ciomp.ac.cn

Abstract: In order to satisfy the urgent needs of on-line real-time monitoring and analysis instrument for industrial pollution emission and sudden safety accidents, a panoramic bispectral infrared imaging interference spectrum measurement inversion instrument is proposed. Through the collaborative design of dual channel interference system, dual spectral imaging system, azimuth and elevation axis system, the measurement of image spectrum information of target scene with large field of view, wide spectral band and high resolution is realized. First, based on Fourier optics theory, the scalar diffraction theoretical model of interference ima-

收稿日期: 2022-06-03; 修订日期: 2022-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61805239, No. 61627819, No. 61727818); 中国科学院青年创新促进会基金(No. 2018254); 吉林省科技发展计划(No. 20190303063SF, No. 20180201024GX, No. 20150520101JH)
Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61805239, No. 61627819, No. 61727818);
Foundation of Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences (No. 2018254); Science and Technology Development Project of Jilin Province (No. 20190303063SF, No. 20180201024GX, No. 20150520101JH)

ging spectrum is established. Then based on broadband sampling and narrowband sampling theory, the sampling design of dual channel interference system is carried out. Based on the analysis of the interference imaging characteristics, the optical design of the dual band imaging system is carried out. Finally, the principle prototype is completed, and the telemetry experiment of the gas plume emitted by the chimney is carried out. The instrument can realize spectral measurement with resolution of 4 cm^{-1} in large field of view by $360^\circ \times 60^\circ$ and wide spectral range from $3\sim 5 \mu\text{m}$ to $8\sim 12 \mu\text{m}$. The instrument can satisfy the application requirements of qualitative identification and quantitative analysis for gas emission monitoring.

Key words: imaging interference spectrometer; dual channel interference; dual spectral imaging; panoramic; sampling

1 引言

近年来,随着国民经济的发展与科学技术水平的提高,环境污染以及工业生产事故频发,环境保护与安全生产形势日益严峻,迫切需要可用于有毒有害物质排放、化学品泄漏、易燃易爆物质突发性燃烧爆炸、工业生产过程控制的在线实时监测分析仪器。工业污染排放以及突发安全事故现场具有场景范围大、环境复杂、存在多污染点、特征污染物成份复杂未知以及现场变化迅速等特点,这使得传统的检测分析仪器很难满足现场在线实时监测分析的应用需求。红外成像光谱仪器通过图像与光谱的有机融合,兼具成像与光谱测量功能,可进行现场污染气体排放分布、成份及含量信息的测量,是现场监测的有力工具。

傅立叶变换红外光谱仪已经在物理表征、化学分析、生物制药等领域得到了广泛的应用^[1-2],其多通道、高通量、波数精度高、杂散光影响小等优势使其特别适用于工业污染排放及突发安全事故监测分析^[3]。目前普遍应用的傅立叶变换红外光谱仪主要采用时间调制方式,高精度的动镜驱动使得其在稳定性、大视场、实时性应用方面存在一定的局限性。针对当前国内外对于环境适应性强,且能够满足大视场、宽光谱、高分辨在线实时监测分析的红外成像光谱仪器的迫切需求,本课题组提出一种全景双谱段红外成像干涉光谱测量反演仪器^[4-5],采用双通道干涉系统与双谱段成像系统配合方位俯仰轴系,实现大视场、宽谱段、高分辨率的图谱测量。通过系统物理建模、干涉采样设计、成像光学设计以及光谱标定等,完成了全景双谱段红外成像干涉光谱测量反演仪器的研制。

2 系统结构及工作原理

2.1 系统结构

图1为全景双谱段红外成像干涉光谱测量反演仪器系统结构图。仪器由望远成像系统、切换反射镜、双通道干涉系统、分色镜、中长波红外中继成像系统、滤光片轮和中长波红外面阵探测器等组成。仪器中的双通道干涉系统是整个仪器的核心,分为宽光谱干涉系统和精细光谱干涉系统两个通道,通过切换反射镜进行两个干涉通道的选通。两个干涉通道的干涉系统均为静态干涉系统,均由分束器、平面反射镜和多级微反射镜组成,但所采用的多级微反射镜具有不同的结构参数。

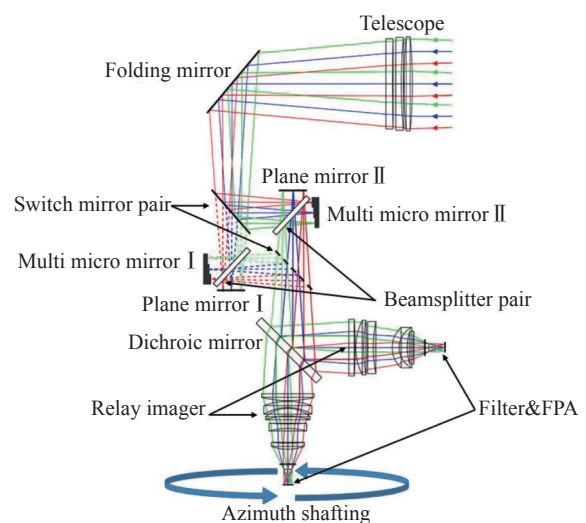


图1 全景双谱段红外成像干涉光谱测量反演仪器原理图
Fig. 1 Schematic diagram of panoramic bispectral infrared imaging interference spectrum measurement inversion instrument

2.2 系统工作原理

望远成像系统将来自被测目标场景的入射光场成像到双通道干涉系统中, 双通道干涉系统中的多级微反射镜利用其结构特点对成像光场进行分布式相位调制。设入射光的波数为 ν , 多级微反射镜的阶梯高度为 d , 则多级微反射镜第 n 级阶梯对成像光场进行调制产生的光程延迟量为 $\delta(n)=2nd$, 由此产生的相位调制量为

$$\varphi(n) = 2\pi\nu\delta(n) = 4\pi\nu nd \quad (1)$$

成像光场被平面镜反射和被多级微反射镜调制后经分束器再次相遇并发生干涉。利用分色镜将干涉光场分成中波红外和长波红外两个谱段, 两个谱段的干涉光场分别经各自的中继成像系统在探测器上形成干涉图像。设目标物点 (x, y) 在多级微反射镜第 n 个阶梯上所对应的干涉图像强度为 $I(x, y, n)$, 且该物点的光谱为 $S(x, y, \nu)$, 则根据傅立叶变换光谱学原理, 干涉图像强度可以表示为

$$I(x, y, n) = \int_0^{\infty} S(x, y, \nu) \exp(j4\pi\nu nd) d\nu \quad (2)$$

不同视场的目标成像在多级微反射镜的不同阶梯上, 由于不同的阶梯引入不同的相位调制量, 因此来自不同视场的目标光场受到不同干涉级次的相位调制, 继而经中继成像系统在探测器上形成受干涉条纹调制的目标场景图像。将整个仪器沿垂直于阶梯的方向进行扫描, 便可使特定目标依次遍历所有阶梯的相位调制, 既而产生干涉图像帧序列, 即三维数据立方。将所采集的干涉图像剪切为对应各个特定干涉级次的图像单元, 将相同级次的图像单元按时间顺序依次拼接, 便可以得到场景全景图像; 将相同物点的图像单元按阶梯顺序依次拼接, 便可以得到物点干涉图函数, 然后通过离散傅立叶变换便可以获得相应物点的复原光谱^[5-6]。

2.3 系统工作模式

在工业污染排放及突发安全事故监测中, 有时侧重于多污染物的定性识别, 有时侧重于某一特定污染物的定量分析。为此, 全景双谱段红外成像干涉光谱测量反演仪器采取宽光谱测量与精细光谱测量两种工作模式, 两种工作模式通过反射镜进行切换。对于宽光谱测量模式, 将切换反射镜选通到宽光谱干涉通道, 由于宽光谱干涉通

道中的多级微反射镜对光程差的采样频率较高, 较高的采样频率对应较宽的光谱带宽, 因此可以覆盖整个光谱范围内的光谱测量。对于精细光谱测量模式, 将切换反射镜选通到精细光谱干涉通道, 由于精细光谱干涉通道中的多级微反射镜对光程差的采样频率较低, 因此可以形成较大的采样长度, 从而实现较高的光谱分辨率。采样频率越低, 系统的测量带宽就越窄, 而气体的吸收光谱属于窄带光谱, 因此通过滤光片切换以实现不同气体吸收光谱的高分辨率测量。

在日常工业污染排放监测及突发事故危险目标排查任务中, 有时需要仪器在大视角范围内进行全方位的广域监测, 有时又需要对重点目标进行高时间分辨率的凝视监测。为此, 全景双谱段红外成像干涉光谱测量反演仪器设有方位与俯仰轴系扩大仪器的覆盖范围。对于全景广域监测, 方位电机带动仪器可整体 360° 周视旋转, 既可实现对被测场景的连续多幅干涉成像, 又可实现大角度全方向覆盖。在俯仰方向上可根据实际需求选择条带俯仰角度, 当完成一个全方位条带扫描后, 俯仰电机带动俯仰轴系转动至下一条带区域进行周视扫描。这种工作方式是连续的, 获得的图像光谱数据在空间上可以实现无缝拼接。对于重点目标凝视监测, 仪器通过驱动俯仰、方位轴系的伺服机构, 使其对重点目标进行凝视干涉成像, 从而达到对重点目标进行高时间分辨率监控的目的。这种工作方式是阶跃的, 获得的数据为多个重点目标的图像光谱信息。

3 物理建模与光学设计

3.1 物理建模

望远成像系统对远距离目标场景进行成像, 设其口径为 D_1 , 焦距为 f , 入射光的波长为 λ , 根据傅立叶光学理论, 其相干传递函数为

$$H_1(f_{x1}, f_{y1}) = \text{circ} \left(\frac{2\lambda f}{D_1} \sqrt{f_{x1}^2 + f_{y1}^2} \right) \quad (3)$$

式中 circ 为圆域函数, f_{x1} 和 f_{y1} 为中间像面的空间频率, x_1 和 y_1 为中间像面的空间坐标。

目标场景 $u_{g0}(x_1, y_1)$ 的中间像场为

$$u_1(x_1, y_1) = \text{FT}^{-1} \{ \text{FT}[u_{g0}(x_1, y_1)] H_1(f_{x1}, f_{y1}) \} \quad (4)$$

式中 FT 和 FT^{-1} 分别为傅立叶变换和傅立叶逆变换。

多级微反射镜对中间像场进行分布式相位调制, 其阶梯高度为 d , 阶梯级数为 N , 阶梯宽度为 a , 调制函数可以表示为

$$M(x_1, y_1) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp(j4\pi nvd) \text{rect}\left(\frac{x_1 - a/2 - na}{a}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{x_1}{Na}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1}{Na}\right), \quad (5)$$

式中 rect 为矩形函数。中间像场的调制像场为

$$u_2(x_1, y_1) = u_1(x_1, y_1)M(x_1, y_1) \quad (6)$$

中继成像系统对中间像场和调制像场在探测器上进行二次成像, 设其出瞳口径为 D_2 , 出瞳距为 z , 垂轴放大率为 β , 其相干传递函数为

$$H_2(f_{x2}, f_{y2}) = \text{circ}\left(\frac{2\lambda z}{D_2} \sqrt{f_{x2}^2 + f_{y2}^2}\right), \quad (7)$$

式中 f_{x2} 和 f_{y2} 为探测器像面的空间频率, x_2 和 y_2 为探测器像面的空间坐标。

中间像场和调制像场形成的二次像场为

$$u_{i1}(x_2, y_2) = FT^{-1}\{FT[u_{g1}(x_2, y_2)]H_2(f_{x2}, f_{y2})\}, \quad (8)$$

$$u_{i2}(x_2, y_2) = FT^{-1}\{FT[u_{g2}(x_2, y_2)]H_2(f_{x2}, f_{y2})\}, \quad (9)$$

其中 $u_{g1}(x_2, y_2) = u_1(x_2/\beta, y_2/\beta)/\beta$ 和 $u_{g2}(x_2, y_2) = u_2(x_2/\beta, y_2/\beta)/\beta$ 为几何光学理想像, $x_2 = \beta x_1$, $y_2 = \beta y_1$ 。

两个二次像场发生干涉, 干涉图像强度为

$$I(x_2, y_2) = |u_{i1}(x_2, y_2) + u_{i2}(x_2, y_2)|^2 \quad (10)$$

仪器沿着垂直于阶梯的方向进行周视扫描, 采集干涉图像序列。将每一帧干涉图像沿阶梯的方向剪切为干涉图像单元, 并将相同目标场景 (x_0, y) 的干涉图像单元沿阶梯级次顺序拼接, 得到干涉图函数

$$I_{in}(x_0, y, n) = I(x_2, y_2, n)|_{x_2=x_0, y_2=y} \quad (11)$$

通过对其进行离散傅立叶变换, 得到复原光谱

$$S(x_0, y, \nu) = \sum_n I_{in}(x_0, y, n) \exp(-j4\pi nvd) \quad (12)$$

对于多级微反射镜来说, 其阶梯高度 d 决定

了干涉图光程差的采样步长 Δ ^[7-8]。 Δ 是多级微反射镜阶梯高度的两倍, 即 $\Delta = 2d$ 。对于 N 个阶梯来说, 干涉图光程差的采样长度为 $2Nd$, 则根据离散傅立叶变换理论, 复原光谱的理论光谱分辨率为 $R = 1/(2Nd)$ 。对复原光谱的波数坐标以理论光谱分辨率为波数间隔进行离散采样, 令 $\nu = m/(2Nd)$, 其中 m 为波数采样序数, 从而得到离散复原光谱为

$$S(x_0, y, m) = \sum_n I_{in}(x_0, y, n) \exp\left(-j\frac{2\pi}{N} mn\right) \quad (13)$$

3.2 双通道干涉系统设计

3.2.1 宽光谱干涉通道设计

对于宽光谱干涉通道, 设整个宽谱段光谱信号的最大波数为 ν_{\max} (对应最小波长 λ_{\min}), 根据经典 Nyquist 采样定理, 在通过离散光程差对干涉图像进行采样时, 为了不使复原光谱在离散傅立叶变换运算中发生光谱混叠, 干涉系统的采样频率 f_s 应大于等于光谱信号最大波数的二倍, 即

$$f_s \geq 2\nu_{\max} \quad (14)$$

采样步长是采样频率的倒数, 即 $\Delta = 1/f_s$, 因此对于宽光谱干涉通道来说, 干涉系统的采样步长 Δ 应小于等于光谱信号最小波长的一半, 即

$$\Delta \leq \frac{\lambda_{\min}}{2} \quad (15)$$

因此, 宽光谱干涉通道中的多级微反射镜的阶梯高度 d 应满足如下要求, 即

$$d \leq \frac{\lambda_{\min}}{4} \quad (16)$$

由于仪器的光谱范围覆盖 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\ \mu\text{m}$, 宽光谱干涉通道采用 $64\ \text{cm}^{-1}$ 的光谱分辨率, 因此将宽光谱干涉通道中多级微反射镜的阶梯高度设计为 $d=0.625\ \mu\text{m}$, 阶梯级数设计为 $N=160$ 。

3.2.2 精细光谱干涉通道设计

对于精细光谱干涉通道来说, 为了实现高的光谱分辨率, 需要增加干涉系统光程差的采样长度。由于大多数气体的吸收光谱是由一系列带宽较窄的分立谱带组成, 属于带通信号, 根据带通信号的 Shannon 采样定理, 带通信号可以通过折叠移位将其频移到低频波数区域进行采样, 此时带通信号的采样频率不再取决于整个宽谱段光谱的最大波数。由于折叠移位后带通信号的最高波数

被频移到了低频波数区域,因此可以以较低的采样频率进行采样。低频采样对应着多级微反射镜可以使用较高的阶梯高度,从而可以获得高的光谱分辨率。

为了保证带通干涉信号在离散傅立叶变换光谱复原时不发生光谱混叠,干涉系统的采样频率应大于等于带通光谱被折叠移位后的最大波数。对于某一带通光谱信号,设其最高波数为 ν_H (对应最短波长 λ_S),最低波数为 ν_L (对应最长波长 λ_L),带宽 $B=\nu_H-\nu_L$,根据离散傅立叶变换的周期性和对称性,对该带通光谱信号进行折叠移位,然后以一系列低于 Nyquist 频率 ($f_N=2\nu_H$) 的采样频率对其进行采样。为了不发生光谱混叠,当折叠级次为 k 时,干涉系统的采样频率 f'_s 必须满足以下条件

$$\frac{2\nu_H}{k} \leq f'_s \leq \frac{2\nu_L}{k-1}, \quad (17)$$

式中折叠级次 $k=1,2,\dots, [\nu_H/B]$, $[\cdot]$ 表示取整。

折叠频率 f_f 为采样频率的一半,即 $f_f=f'_s/2$,而采样步长 $d'=1/(2f_f)$,因此对于精细光谱干涉通道来说,干涉系统的采样步长 d' 应满足关系

$$\frac{k-1}{2} \lambda_L \leq d' \leq \frac{k}{2} \lambda_S. \quad (18)$$

因此,精细光谱干涉通道中的多级微反射镜的阶梯高度 d' 应满足如下要求,即

$$\frac{k-1}{4} \lambda_L \leq d' \leq \frac{k}{4} \lambda_S. \quad (19)$$

由于大多数目标气体的吸收光谱属于窄带光谱信号^[9-11],将中长波红外光谱范围内气体窄带光谱信号的光谱测量带宽限定在 $B=200\text{ cm}^{-1}$ 范围内,精细光谱干涉通道采用 4 cm^{-1} 的光谱分辨率,因此将精细光谱干涉通道中的多级微反射镜的阶梯高度设计为 $d'=10\text{ }\mu\text{m}$,同样将阶梯级数设计为 $N=160$,并根据式 (19) 确定光谱测量谱带的上下限。

确定了宽光谱干涉通道和精细光谱干涉通道中多级微反射镜的阶梯高度和阶梯级数后,利用建立的光场传输物理模型进行数值计算^[6]。多级微反射镜的阶梯宽度越小,越有利于仪器的小型化,但中长波红外波段过窄的阶梯宽度会存在衍射效应。为了兼顾系统体积,并抑制衍射引起的杂散光的影响,通过物理模型计算分析,将多级微

反射镜的阶梯宽度设计为 $a=0.2\text{ mm}$,阶梯长度设计为 32 mm 。

3.3 双谱段成像系统设计

3.3.1 成像系统总体设计

整个成像系统是一个二次成像系统,双通道干涉系统位于二次成像系统的一次像面上。望远成像系统将目标成像到多级微反射镜上,多级微反射镜作为一次像面对目标像场进行调制反射后,由中继成像系统再次成像到面阵探测器上。整体系统采用制冷型焦平面探测器 FPA (Focal Plane Array),整体系统的 F 数即为焦平面探测器的 F 数,即 $F_{\text{sys}}=F_{\text{FPA}}$ 。根据多级微反射镜单元宽度 a 与面阵探测器像元尺寸 p 的比例关系,中继成像系统的垂轴放大率 $\beta=-2p/a$,从而得到望远成像系统的 F 数为 $F_{\text{tel}}=-F_{\text{sys}}/\beta$ 。设整体系统的视场角为 ω ,则望远成像系统的焦距 $f=Na/[2\tan(\omega/2)]$,从而整体系统的焦距 $f_{\text{sys}}=-\beta f$,进而得到整体系统的口径 $D=f_{\text{sys}}/F_{\text{FPA}}=-\beta f/F_{\text{FPA}}$ 。根据以上设计过程,由于焦平面探测器的 F 数 $F_{\text{FPA}}=2$,像元尺寸 $p=30\text{ }\mu\text{m}$,阵列数目为 320×256 ,整体系统的视场角为 $\omega=2.75^\circ$,故中继成像系统的垂轴放大率 $\beta=-0.3$,整体系统的 F 数 $F_{\text{sys}}=2$,焦距 $f_{\text{sys}}=200\text{ mm}$,口径 $D=100\text{ mm}$,瞬时视场角为 0.15 mrad 。

3.3.2 望远成像系统设计

望远成像系统将被测目标场景成像到平面反射镜和多级微反射镜上,从而得到两个相干像场。为了保证各阶梯面所对应的相干像场之间光程差的稳定性,成像光束的主光线需要与每一个阶梯面保持正入射关系^[12]。因此,望远成像系统需要采用像方远心光路结构,保证各视场的主光线以接近垂直的角度正入射到各级阶梯的表面。

入射到多级微反射镜的光束有一定的锥角,如图 2 所示。除了主光线正入射,其他光线都以不同的夹角入射,虽然反射光线不沿原路径返回,但是会沿着相对于主光线准对称的入射光线返回,因此从整个光束角度看,其仍可以近似是沿着原路径返回,只不过由于镜像作用,反射像点相对于入射像点会产生两倍阶梯高度大小的光程差。反射像点引入的光程差对于干涉来说是必要的,但对于成像来说会导致像点因离焦而发生弥散,降低图像的空间分辨率。由于图像重构只是利用零级阶梯的干涉图像单元进行拼接,因此边缘弥散像元并不会影响重构图像。而光谱重构时由于

气体扩散的浓度梯度较小, 无需过高的空间分辨率, 因此对重构光谱也不太会产生太大的影响。

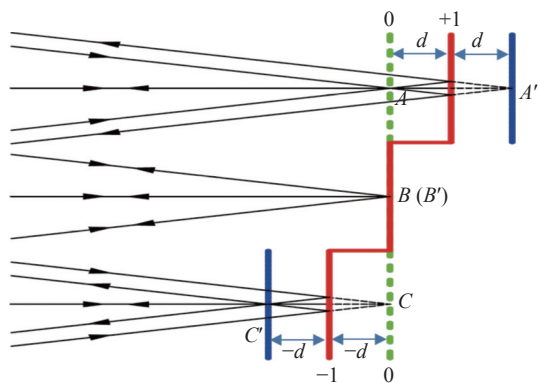


图2 多级微反射镜对像场的光程调制示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the image field modulation by multi micro mirror

望远成像系统对中波红外和长波红外双谱段的光场进行共口径成像, 因此需要实现中长波红外宽谱段消色差。同时在望远成像光路中含有一对由分束器和补偿板构成的平行平板, 因此还需要消除由于平行平板倾斜放置引起的像散。通过不同材料的组合来实现宽谱段消色差, 同时在系统中引入柱面来平衡分束器和补偿板带来的像散。系统中部分镜片表面采用非球面设计, 以增加设计自由度, 减少镜片的数量, 提高光学透过率。将孔径光阑设置在系统物方焦面处, 实现像方远心光路设计。望远成像系统的优化设计结果如图3所示。

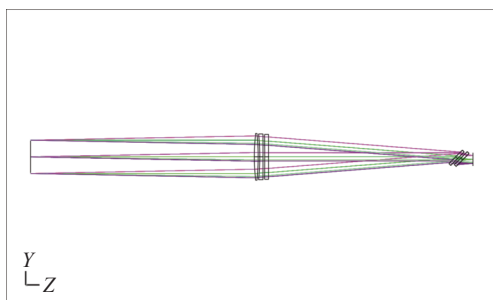


图3 望远成像系统的优化设计图

Fig. 3 Optical design drawing of the telescopic imaging system

3.3.3 中继成像系统设计

中继成像系统将平面反射镜与多级微反射镜处的两个一次像场再次成像到面阵探测器上。由于中波红外和长波红外分别由两个独立的面阵探测器接收, 所以需要采用分色镜对光场进行分

光^[12]。为了与望远成像系统进行孔径衔接与光束耦合, 并保持光程差的稳定性, 入射光束的主光线必须垂直于阶梯面, 因此中继成像系统需要采用物方远心光路结构, 保证各视场的主光线沿着各级阶梯表面的法线出射。同时, 由于使用红外制冷探测器, 红外制冷探测器内部设置有冷光阑, 中继成像系统需要保证系统的孔径光阑与红外制冷探测器的冷光阑相匹配。探测器冷光阑匹配设计不仅可以避免光学元件和机械部件自身辐射的热杂光进入探测器, 同时还可以阻挡多级微反射镜衍射引起的杂散光。

由于多级微反射镜与平面反射镜的镜像作用, 分束器与补偿板构成的平行平板对同样存在于中继成像光路中, 因此同样需要校正由倾斜分束器与补偿板引入的像散。对于长波中继成像系统还需要考虑分色镜引入的像散。同样采用柱面镜进行平行平板的消像散设计, 同时将中继成像系统的部分镜面使用非球面来校正其余的单体像差。分别将两个制冷探测器的冷光阑作为两个中继成像系统的孔径光阑, 并设置在系统的像方焦面处, 实现物方远心光路设计, 并保证冷光阑匹配。中波和长波中继成像系统的优化设计结果分别如图4和图5所示。

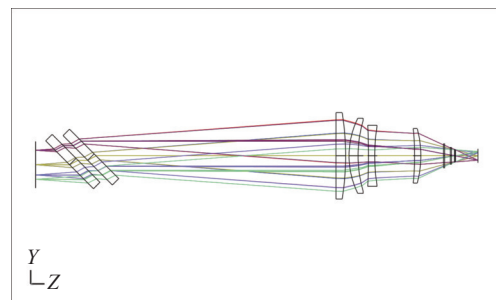


图4 中波红外中继成像系统的优化设计图

Fig. 4 Optical design drawing of MWIR relay imaging system

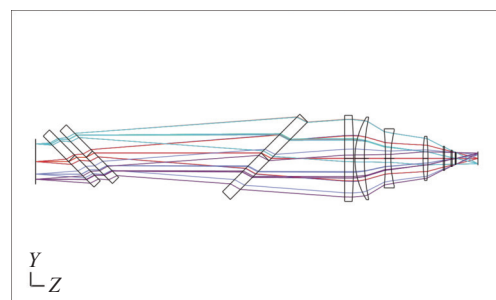


图5 长波红外中继成像系统的优化设计图

Fig. 5 Optical design drawing of LWIR relay imaging system

3.3.4 整体成像系统设计优化

将望远成像系统分别与中波和长波中继成像系统进行光路拼接,并进行整体成像系统设计的优化。同时,为了使仪器可以适应不同的工作温度,提高环境适应性,还需要对整体成像系统进行无热化设计。将望远成像系统的像面与中继成像系统的物面重合,并使制冷探测器的冷光阑与望远成像系统的入瞳保持共轭,实现整体成像系统的拼接。中波红外成像通道通过中继成像系统透镜及镜筒材料之间的热匹配实现消热差设计;长波红外成像通道通过在中继成像系统透镜表面引入衍射面,通过折衍混合设计实现被动消热差。中波红外和长波红外成像通道的光学设计优化结果分别如图 6 和图 7 所示。

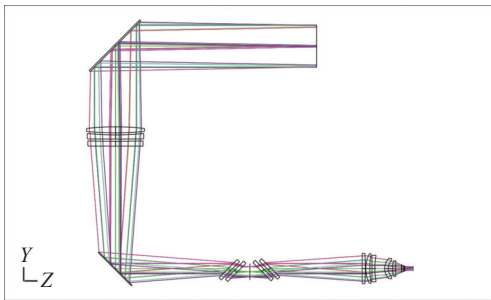


图 6 中波红外成像通道的光学设计图

Fig. 6 Optical design of MWIR imaging channel

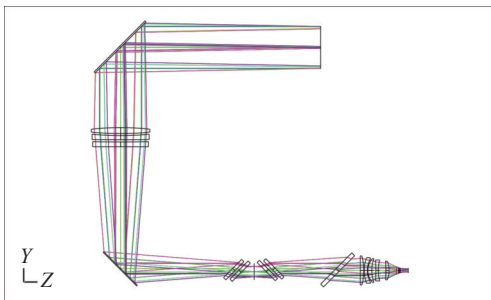


图 7 长波红外成像通道的光学设计图

Fig. 7 Optical design of LWIR imaging channel

对于光学设计优化后的整体成像系统,采用调制传递函数 MTF (Modulation Transfer Function) 对其进行像质评价。中波红外和长波红外成像通道的调制传递函数如图 8 和图 9 所示。

根据调制传递函数曲线,中波红外成像通道在特征频率 17 lp/mm 处各视场的 MTF 值大于 0.73,长波红外成像通道在特征频率 17 lp/mm 处各视场的 MTF 值大于 0.55,传递函数曲线均接近于衍射极限,因此两个成像通道的像质均满足设计需求。

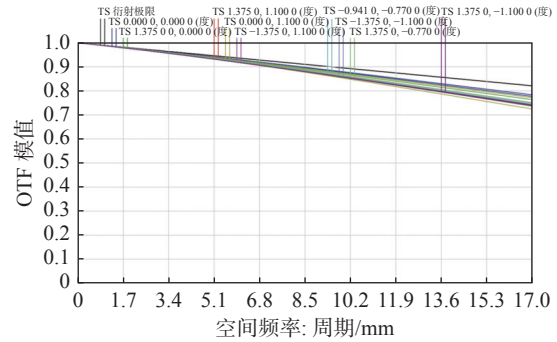


图 8 中波红外成像通道的调制传递函数

Fig. 8 MTF of MWIR imaging channel

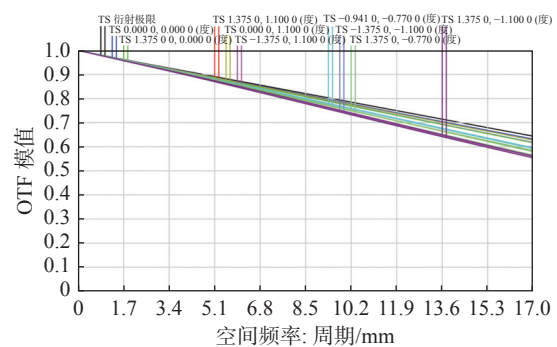


图 9 长波红外成像通道的调制传递函数

Fig. 9 MTF of LWIR imaging channel

3.4 系统光路耦合与结构设计

全景双谱段红外成像干涉光谱测量反演仪器的光学系统是由双谱段成像系统和双通道干涉系统之间通过光路匹配构成,将双谱段成像系统和双通道干涉系统之间进行光场耦合,如图 10 所示。对整个光路进行光线追迹,图中给出了宽光谱干涉通道 3 个视场的光线追迹结果,精细光谱干涉通道的光线追迹可以通过切换反射镜的开启与闭合来实现。

全景双谱段红外成像干涉光谱测量反演仪器的光学系统由结构系统和电控系统进行支撑和控制。结构系统主要由俯仰轴系、方位轴系、光学镜组支撑以及整机结构支撑等组成;俯仰轴系与方位轴系由俯仰和方位伺服电机进行驱动和控制。俯仰轴系可以实现对目标场景的 $\pm 30^\circ$ 指向和定位,方位轴系可以实现对目标场景的 360° 全景扫描。两个轴系配合可实现 $360^\circ \times 60^\circ$ 的大视场空间场景的全景监测。

对设计完成的双通道干涉系统、双谱段成像系统及结构电控系统进行了加工、检测与组装,完成了整机集成测试。测试表明,仪器可以实现

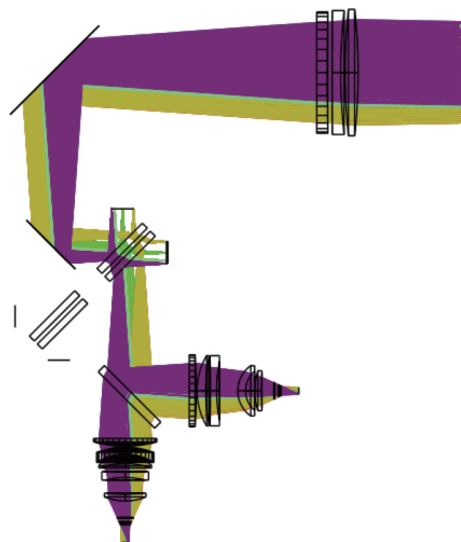


图 10 双通道干涉系统与双谱段成像系统的光路耦合
Fig. 10 Optical path coupling between the dual channel interference system and the dual spectral imaging system

360°×60°大视场空间场景中 3~5 μm 和 8~12 μm 中长波红外光谱范围内 4 cm⁻¹ 分辨率的光谱测量。全景双谱段红外成像干涉光谱测量反演仪器样机如图 11 所示。



图 11 全景双谱段红外成像干涉光谱测量反演仪器样机
Fig. 11 Prototype of the infrared imaging interference spectrometer

3.5 光谱分辨率测试

在宽光谱干涉通道测量了液体乙腈样品, 其透过率光谱如图 12(彩图见期刊电子版) 所示。其中黑色曲线为标准光谱, 数据源自上海有机化

学研究所化学光谱数据库。采用半峰全宽 (Full Width at Half Maxima, FWHM) 表征复原谱线的光谱分辨率, 在仪器响应波段内乙腈的主吸收峰位于 2246 cm⁻¹, FWHM 为 22 cm⁻¹。红色曲线为实测乙腈光谱, 吸收峰位于 2252.4 cm⁻¹, FWHM 为 51.5 cm⁻¹, 光谱分辨率达到了设计要求。

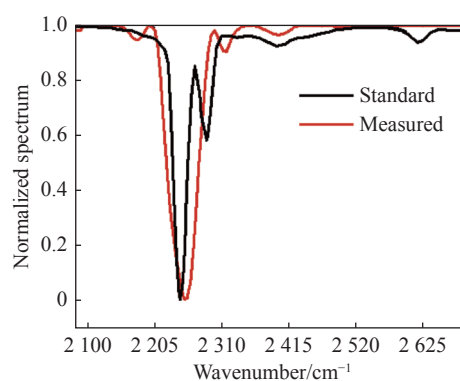


图 12 乙腈样品的测量透过率光谱
Fig. 12 Measured transmittance spectra of acetonitrile

在精细光谱干涉通道测量了氨气样品, 其透过率光谱如图 13(彩图见期刊电子版) 所示。黑色曲线为标准光谱, 数据源自 NIST 光谱数据库。在窄带范围内氨气的吸收峰位于 1215.3 cm⁻¹, FWHM 为 4 cm⁻¹。红色曲线为实测氨气光谱, 吸收峰位于 1212.6 cm⁻¹, FWHM 为 4 cm⁻¹, 光谱分辨率达到了设计要求。对于光谱峰位漂移, 通过系统光谱标定可以予以校正。

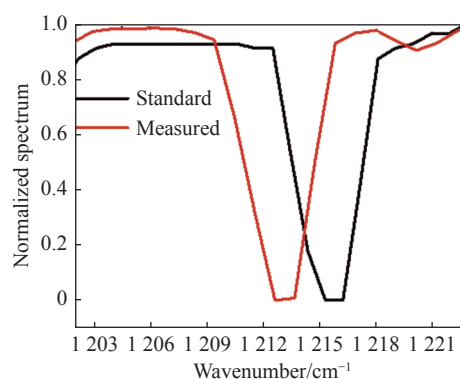


图 13 氨气样品的测量透过率光谱
Fig. 13 Measured transmittance spectra of ammonia

4 系统光谱标定

4.1 光谱波数标定

双通道干涉系统是整个仪器的核心, 两个干

涉通道中分束器、平面反射镜、多级微反射镜以及用于两个干涉通道切换的反射镜的位置误差均会导致光谱峰位的漂移,因此需要进行光谱波数标定^[13-15]。采用多个窄带滤光片,通过测量不同窄带滤光片的透射谱,拟合透射光谱曲线,然后利用最小二乘法拟合得到增益系数 a_1 和偏置系数 a_0 ,从而获得光谱波数与采样序数的标定关系

$$\nu = a_1 m + a_0 \quad (20)$$

通过光谱波数标定,得到两个干涉通道内各

窄带滤光片的光谱透射曲线如图 14(彩图见期刊电子版)所示。宽光谱干涉通道标定后的归一化光谱曲线如图 14(a)和图 14(b)所示,最大波数漂移出现在中心波长 $8.688 \mu\text{m}$,即 1151 cm^{-1} 处,标定后位于 1147.1 cm^{-1} 处,偏差量为 0.34% 。精细光谱干涉通道标定后的归一化光谱曲线如图 14(c)和图 14(d)所示,最大波数漂移出现在中心波长 $4.515 \mu\text{m}$,即 2204.8 cm^{-1} 处,标定后位于 2207.7 cm^{-1} 处,偏差量为 0.32% 。可以看出,通过光谱波数标定,可以实现对波数偏差的有效校正。

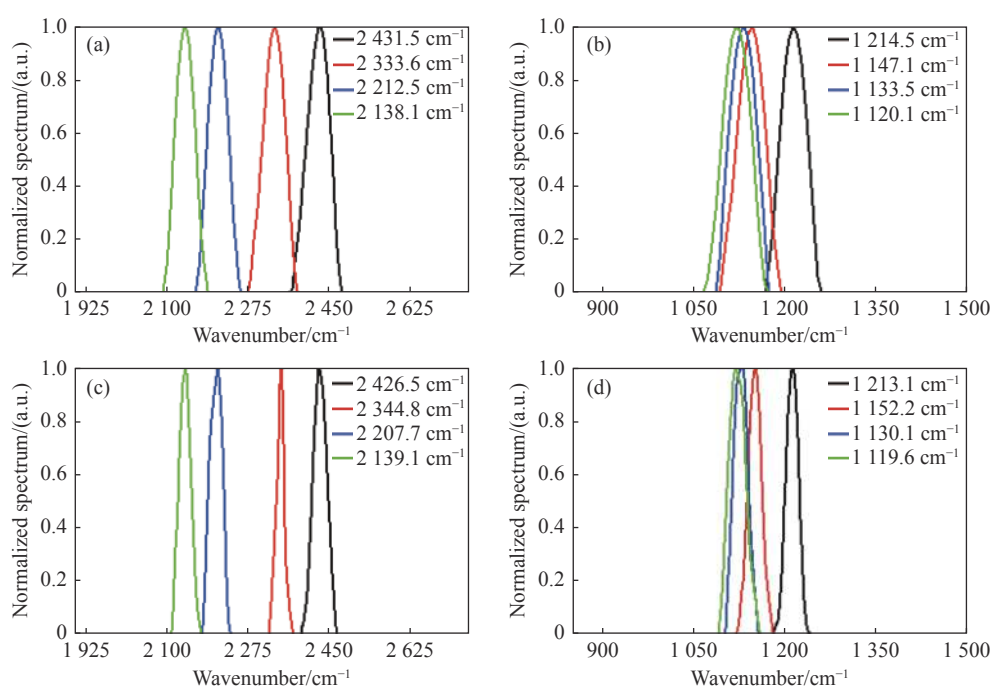


图 14 波数标定后的滤光片透射光谱

Fig. 14 Filter transmission spectrum by wavenumber calibration

4.2 光谱辐亮度标定

透镜材料的透射特性、分束器和分光镜的分光特性、探测器的光谱响应、仪器光机结构的自身辐射等都会对入射辐射的光谱特性产生影响,因此需要进行光谱辐亮度标定^[13-15]。对于某一特定温度 T 的黑体,其标准黑体辐亮度为

$$L(\nu) = \frac{2hc^2\nu^3}{\exp[hc\nu/(k_B T)] - 1} \quad (21)$$

式中 h 为普朗克常数, c 为光速, k_B 为玻尔兹曼常数。

测量不同温度下黑体的数字亮度谱,将其与标准黑体辐亮度线性拟合得到增益系数 A_1 和偏

置系数 A_0 ,则数字亮度谱与标准辐亮度谱的标定关系为

$$S(\nu) = A_1(\nu)L(\nu) + A_0(\nu) \quad (22)$$

利用该仪器测量的数字亮度谱如图 15(彩图见期刊电子版)所示,将其与标准黑体辐亮度谱进行拟合得到的标定系数,如图 16(彩图见期刊电子版)所示,其中蓝色曲线为增益系数,红色曲线为偏置系数。利用辐亮度标定系数得到标定后的黑体辐亮度谱如图 17(a)(彩图见期刊电子版)所示,并将其与理论值进行比较,计算各温度点平均残差比,如图 17(b)(彩图见期刊电子版)所示。可以看出,各光谱通道的残差比均小于 0.5% ,表明通

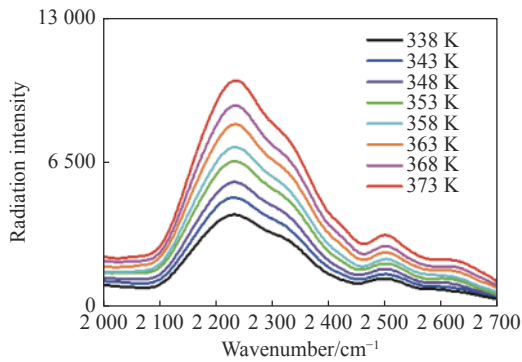


图 15 系统测量数字亮度谱

Fig. 15 Digital number spectrum measured by system

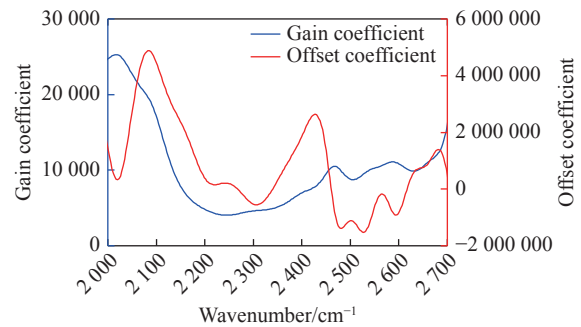


图 16 辐亮度标定系数

Fig. 16 Radiance calibration coefficient

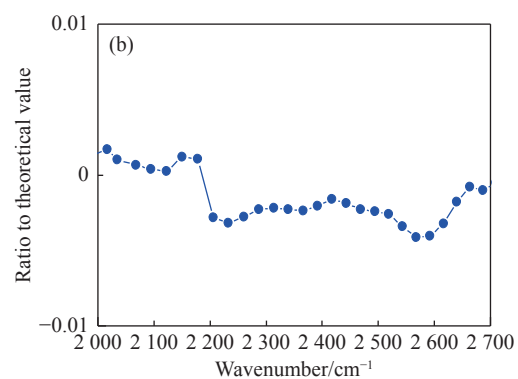
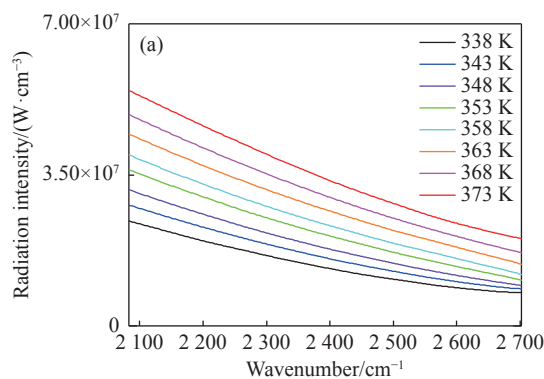


图 17 辐亮度标定后的黑体辐射谱及平均残差比

Fig. 17 Blackbody spectrum after radiance calibration and average residual ratio

过光谱辐亮度标定, 可以实现对辐亮度值的有效校正。

5 遥测实验与结果

5.1 光谱遥测与反演方法

全景双波段红外成像干涉光谱测量反演仪器用于对目标场景进行远距离遥测, 对于气体烟羽排放的测量模型如图 18 所示, 仪器探测到的辐射量包括穿过气体烟羽的背景辐射量和气体烟羽自身的辐射量的总和^[16]。

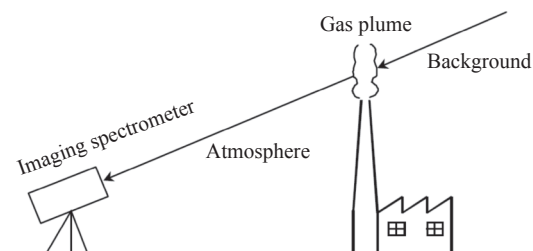


图 18 系统对于气体烟羽排放的遥测模型

Fig. 18 Telemetry model of the system for gas plume emission

设背景的温度为 T_b , 背景的辐亮度为 L_b , 气体的温度为 T_g , 气体的透过率为 τ , 气体的发射率为 ε , 气体的黑体辐亮度为 L_g , 前景大气的透过率为 τ_a , 则仪器探测到的辐亮度可以表示为

$$L(\nu) = L_b(\nu, T_b)\tau(\nu)\tau_a(\nu) + \varepsilon(\nu)L_g(\nu, T_g)\tau_a(\nu) \quad (23)$$

对于背景, 一般都具有灰体特性, 其辐亮度可由黑体辐射定律和发射率参数给出。而对于气体烟羽, 其发射率等于吸收率, 而吸收率和透过率之间满足能量守恒, 故发射率 $\varepsilon(\nu) = 1 - \tau(\nu)$, 因此探测辐亮度为

$$L(\nu) = L_b(\nu, T_b)\tau(\nu)\tau_a(\nu) + [1 - \tau(\nu)]L_g(\nu, T_g)\tau_a(\nu) \quad (24)$$

由此可以求解出气体烟羽的透过率, 即

$$\tau(\nu) = \frac{L(\nu) - L_g(\nu, T_g)\tau_a(\nu)}{L_b(\nu, T_b)\tau_a(\nu) - L_g(\nu, T_g)\tau_a(\nu)} \quad (25)$$

根据式 (25), 若要得到气体烟羽的透过率, 需要确定背景和气体烟羽的温度。根据普朗克黑体辐射公式, 等效温度谱与辐亮度谱之间的关系为

$$T(\nu) = \frac{h\nu}{k_B \ln [2hc^2\nu^3/L(\nu) + 1]} \quad (26)$$

基于等效温度谱,选取无气体吸收的透明光谱段和具有气体强吸收线的饱和吸收光谱段,用以确定背景和气体烟羽的温度。若背景温度高于气体烟羽的温度,则在无气体吸收透明光谱段 $T_b = T(\nu)|_{\max}$, 在气体饱和吸收光谱段 $T_g = T(\nu)|_{\min}$; 若气体烟羽的温度高于背景温度,则在气体饱和吸收光谱段 $T_g = T(\nu)|_{\max}$, 在无气体吸收透明光谱段 $T_b = T(\nu)|_{\min}$ 。由背景和气体烟羽的温度,根据普朗克公式,可以得到背景和气体烟羽的黑体辐射亮度 L_b 和 L_g 。然后选择具有气体弱吸收线的光谱段,计算气体烟羽的透过率。

根据朗伯比尔定律,气体烟羽的理论透过率为

$$\tau_0(\nu) = \exp \left[- \sum_i \alpha_i(\nu) C_i \right] \quad (27)$$

其中 i 为气体烟羽中所含组分的序数, α_i 为吸收系数, $C_i = \int_0^l c_i(z) dz$ 为柱浓度, 其是浓度 c_i 对光程长度 l 沿光路路径 z 的积分。

因此,对于线性光谱可以采用吸光度谱标定的浓度反演方法。首先配制各气体组分不同浓度的标准气体,测量不同浓度标准气的透过率谱,并将其转化为吸光度谱 A , 然后将吸光度与浓度进行最小二乘拟合得到吸收增益系数 α 和偏置系数 β , 从而获得各气体组分浓度与吸光度谱的标定关系

$$A_i(\nu) = -\ln \tau_i(\nu) = \alpha_i(\nu) C_i + \beta_i(\nu) \quad (28)$$

将气体烟羽的测量吸光度谱与各组分的吸收标定系数进行多元线性回归,反演出各组分的柱浓度。

对于非线性光谱,可以采用透过率谱合成校准的浓度反演方法。首先通过 Hitran 数据库获得各气体组分的吸收线强,逐线求和得到线强函数 S_i 。然后将线强函数与高斯线形函数 f_G 及洛伦兹线形函数 f_L 进行卷积积分得到吸收系数,并利用吸收系数,计算合成校准透过率谱。最后为了使合成校准透过率谱的光谱分辨率与测量透过率谱的光谱分辨率相匹配,需要将其与仪器线形函数 f_I 进行卷积积分,最终得到的合成校准透过率谱为

$$\tau'_0(\nu) = \exp \left\{ - \sum_i [S_i(\nu) * f_G(\nu) * f_L(\nu)] C_i \right\} * f_I(\nu) \quad (29)$$

其中 $S_i(\nu) = \sum_j S_{i,j} \delta(\nu - \nu_{i,j})$ 为线强函数, j 为谱线序数, δ 为狄拉克函数, $\nu_{i,j}$ 和 $S_{i,j}$ 分别为第 j 条谱线对应的波数和线强。

对于傅立叶变换光谱仪,仪器线形函数 f_I 可以采用

$$f_I(\nu) = \frac{1}{\Delta\nu} \text{sinc} \left(\frac{\nu}{\Delta\nu} \right) \quad (30)$$

其中 sinc 为辛格函数, $\Delta\nu$ 为仪器的实际光谱分辨率。

对卷积积分进行离散采样,并使积分采样步长小于谱线半宽度,从而卷积积分被离散为线性卷积,然后利用循环卷积进行数值计算。

经过卷积计算之后,合成校准透过率谱的光谱分辨率下降。但由于积分采样步长过小,导致合成校准透过率谱产生过采样,因此需要对合成校准透过率谱进行重采样,通过插值计算,使其与测量透过率谱具有相同的波数间隔与波数坐标 ν_m 。

创建优化函数 E , 如式 (31) 所示,将气体烟羽的测量透过率谱与合成校准透过率谱进行非线性最小二乘数据拟合,利用列文伯格-马夸尔特算法求解非线性最小二乘问题,反演出气体各组分的柱浓度。

$$E(C_1, C_2, \dots, C_i, \dots) = \min \left\{ \sum_m [\tau(\nu_m) - \tau'_0(\nu_m)]^2 \right\} \quad (31)$$

5.2 系统遥测实验

采用全景双谱段红外成像干涉光谱测量反演仪器对远距离热电厂烟囱排放的气体烟羽进行遥测。烟囱排放的气体烟羽的温度高于环境背景温度,因此其辐射量要高于环境背景的辐射量。通过对目标场景进行全景扫描,获取干涉图像数据立方体。通过图像剪切和图像拼接处理,得到目标场景的红外全景图像,如图 19 所示。

从红外全景图像上能明显看到烟囱排放的气体烟羽的空间分布特征。选取全景图像中烟囱的气体烟羽排放区域,对区域中各点对应的干涉图像单元进行条纹拼接与光谱复原,并经光谱辐射标定,获得被测目标的辐亮度谱,然后利用光谱遥测与反演模型反演排放气体的浓度分布。尝试针



图 19 红外全景图像

Fig. 19 Infrared panoramic image

对排放气体烟羽中的 CO_2 组分, 通过浓度反演得到其在全景图像中的浓度分布如图 20(彩图见期刊电子版) 所示。

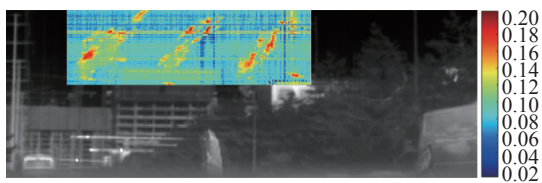


图 20 热烟羽的气体浓度反演图像

Fig. 20 Inversion image of gas concentration of gas plume

虽然对烟囱排放的热烟羽中气体组分的浓度

进行了反演, 但不同气体不同谱段光谱的定量分析十分复杂, 其反演精度还有待进一步研究。同时由于测试条件、大气干扰、环境因素等的影响, 若想达到一个很高的反演精度和很低的检测限, 还需要对反演算法做进一步改进和完善。

6 结 论

本文面向工业污染排放及突发安全事故监测对目标场景图像光谱数据在线实时测量的迫切需求, 提出了全景双谱段红外成像干涉光谱测量反演仪器, 介绍了仪器结构和工作原理, 进行了物理建模、干涉系统设计、成像系统设计与结构设计, 并对仪器进行了光谱波数与辐亮度标定。最终研制了原理样机, 并对烟囱排放的气体烟羽进行了遥测。该仪器可以实现 $360^\circ \times 60^\circ$ 大视场空间场景中 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 中长波红外光谱范围内 $4\ \text{cm}^{-1}$ 分辨率的光谱测量, 满足排放监测定性识别和定量分析的应用。

参考文献:

- [1] 程久庚, 苏朝晖. 原子力-红外光谱定量分析聚1-丁烯/聚丙烯共混物的相区组成[J]. *应用化学*, 2022, 39(2): 266-271.
CHENG J G, SU ZH H. Quantitative analysis of phase composition of poly (1-butene)/polypropylene blends by atomic force microscopy-infrared[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2022, 39(2): 266-271. (in Chinese)
- [2] 张春晖, 刘西京, 章蓉, 等. 蒙药葶苈不同提取物的红外光谱[J]. *应用化学*, 2021, 38(3): 271-275.
ZHANG CH H, LIU X J, ZHANG R, *et al.*. Infrared spectrum about the different extracts of fructus piperis longi[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2021, 38(3): 271-275. (in Chinese)
- [3] 张琳, 朱顺官, 冯红艳, 等. 基于干涉图解析的被动式遥感FTIR分析[J]. *应用化学*, 2009, 26(4): 467-470.
ZHANG L, ZHU SH G, FENG H Y, *et al.*. Interpretation of passive remote sensing FTIR spectra based on interferogram[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2009, 26(4): 467-470. (in Chinese)
- [4] 高健华, 梁静秋, 吕金光, 等. 基于多级微反射镜的时空联合调制傅里叶变换成像光谱仪: 原理及数据处理[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(12): 3932-3939.
GAO J H, LIANG J Q, LV J G, *et al.*. A stepped mirror based temporally and spatially modulated imaging Fourier transform spectrometer: principle and data processing[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(12): 3932-3939. (in Chinese)
- [5] 吕金光, 梁静秋, 梁中翥, 等. 基于多级微镜的傅里叶变换成像光谱仪干涉成像系统分析与设计[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(5): 1554-1559.
LV J G, LIANG J Q, LIANG ZH ZH, *et al.*. Analysis and design of interference imaging system in Fourier transform imaging spectrometer based on multi-micro-mirror[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(5): 1554-1559. (in Chinese)
- [6] 吕金光, 赵百轩, 梁静秋, 等. 像场调制傅里叶变换成像光谱仪的建模与实验研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(18): 1811002.
LV J G, ZHAO B X, LIANG J Q, *et al.*. Modeling and experiment of image field modulated Fourier transform imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(18): 1811002. (in Chinese)
- [7] 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): 277-298.

- LIANG J Q, LIANG ZH ZH, LV J G, *et al.*. Micro spatial modulation Fourier transform infrared spectrometer[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 277-298. (in Chinese)
- [8] GAO J H, LIANG ZH ZH, LIANG J Q, *et al.*. Spectrum reconstruction of a spatially modulated Fourier transform spectrometer based on stepped mirrors[J]. *Applied Spectroscopy*, 2017, 71(6): 1348-1356.
- [9] LACAN A, BRÉON F M, ROSAK A, *et al.*. A static Fourier transform spectrometer for atmospheric sounding: concept and experimental implementation[J]. *Optics Express*, 2010, 18(8): 8311-8331.
- [10] 朱军, 刘文清, 刘建国, 等. 基于光谱波段优化选择的FTIR测量与分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, 27(4): 679-682.
- ZHU J, LIU W Q, LIU J G, *et al.*. FTIR measurement and analysis based on the selection of optimized spectral band[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, 27(4): 679-682. (in Chinese)
- [11] 戴铁, 郑有飞, 石广玉. 利用红外辐射光谱反演大气CO₂浓度的理论研究[J]. *气象与环境科学*, 2008, 31(1): 1-5.
- DAI T, ZHENG Y F, SHI G Y. Theoretic study on the retrieval of atmospheric CO₂ concentrations from infrared emitting spectrum[J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2008, 31(1): 1-5. (in Chinese)
- [12] REN J, LV J G, ZHAO B X, *et al.*. Optical design and investigation of a dual-interference channels and bispectrum static Fourier-transform imaging spectrometer based on stepped micro-mirror[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 81871-81881.
- [13] ZHAO B X, LV J G, REN J, *et al.*. Data processing and performance evaluation of a tempo-spatially mixed modulation imaging Fourier transform spectrometer based on stepped micro-mirror[J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 6320-6335.
- [14] 赵云, 吕金光, 秦余欣, 等. 微型傅立叶变换光谱仪的优化设计与实验研究[J]. *中国光学*, 2020, 13(2): 411-425.
- ZHAO Y, LV J G, QIN Y X, *et al.*. Optimization design and experimental study of micro-Fourier transform spectrometer[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(2): 411-425. (in Chinese)
- [15] 安玲坪, 王爽, 张耿, 等. 大孔径静态干涉成像光谱仪径向畸变导致的谱线偏移误差的校正[J]. *中国光学*, 2021, 14(2): 382-389.
- AN L P, WANG SH, ZHANG G, *et al.*. Corrective method for spectral offset error caused by radial distortion in the large aperture static imaging spectrometer[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 382-389. (in Chinese)
- [16] GRIFFITH D W T, JAMIE I M. Fourier transform infrared spectrometry in atmospheric and trace gas analysis[M]//MEYERS R A. Encyclopedia of Analytical Chemistry: Applications, Theory and Instrumentation. New Jersey: John Wiley & Sons, Ltd. , 2006.

作者简介:



吕金光(1984—),男,吉林蛟河人,博士,副研究员,博士生导师,中国科学院青年创新促进会会员,2008年于吉林大学获得学士学位,2013年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事相干光谱成像与光学信息处理方面的研究。
E-mail: jinguanglv@163.com



梁静秋(1962—),女,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,1984年于吉林大学获得学士学位,2003年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位。主要从事微光机电系统、红外光谱技术及红外光学仪器方面的研究。E-mail: liangjq@ciomp.ac.cn