

超光谱空间外差干涉仪探测器响应误差校正

李志伟 熊 伟 施海亮 王先华 叶函函 韦秋叶 乔延利

(中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要 应用于大气 CO₂ 高精度探测的超光谱分辨率空间外差光谱仪, 采用面阵探测器同时采集二维干涉数据。针对面阵探测器响应同时存在的非均匀性和非线性, 分别分析了其对干涉数据及复原光谱的影响, 指出在相同的探测器非均匀性噪声下, 光谱分辨率越高复原光谱噪声越大; 而非线性不但对有效光谱范围内光谱复原精度有影响, 还会产生光谱截止频率外的非零值。阐述了一种多能量等级均匀辐射源的非线性及单一均匀辐射源非均匀性同时校正算法。开展了探测器响应校正实验。探测器数据校正后非均匀性从 4.04% 降至 0.14%; 干涉数据校正后复原的光谱平滑, 大大降低了非均匀噪声, 校正后光谱截止频率之外数据基本为零, 去除了非线性影响。

关键词 遥感; 空间外差; 面阵探测器; 非均匀; 非线性; 干涉图; 光谱图

中图分类号 TP731; TN215 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0530001

Correction of Detector Response Error for Hyperspectral Spatial Heterodyne Interferometer

Li Zhiwei Xiong Wei Shi Hailiang Wang Xianhua Ye Hanhan Wei Qiuye Qiao Yanli

(Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization of Chinese Academy of Sciences, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract The spatial heterodyne spectrometer used for high precision atmospheric CO₂ remote sensing adopts array detector to collect the two-dimensional interferogram at the same time. According to the response nonlinearity and non-uniformity existing in array detector simultaneously, the influence on the interferogram and the recovered spectrum is analyzed respectively. It is pointed out that, at the same detector non-uniform noise, the higher the spectral resolution, the higher noise in recovered spectrum is. The nonlinearity not only impacts the effective spectral range, but also brings nonzero value below the spectral cutoff frequency. A method of correction nonlinearity by several uniform radiances and non-uniformity by a single uniform radiance is reported. The experiments are fulfilled, and the response non-uniformity improves from 4.04% to 0.14%. The recovered spectrum from the corrected interferogram is smooth due to the non-uniformity noise reduction greatly, and the data out of the spectrum cutoff frequency have zero values for correction the response nonlinearity.

Key words remote sensing; spatial heterodyne; array detector; non-uniformity; nonlinearity; interferogram; spectrogram

OCIS codes 230.0040; 070.4790

1 引 言

空间外差干涉光谱技术(SHS)具有超光谱分辨率、无运动部件及高信噪比等技术优点, 具备高精度

大气微量气体浓度探测能力, 在星载大气遥感方面具有广泛的应用潜力^[1-2]。目前, 美国威斯康辛大学、加拿大宇航局等单位针对大气 OH 自由基与水

收稿日期: 2013-12-03; **收到修改稿日期**: 2014-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(41301373)

作者简介: 李志伟(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事超光谱数据修正及处理算法方面的研究。

E-mail: zhiwli@163.com

导师简介: 熊 伟(1975—), 男, 博士, 研究员, 主要从事超光谱大气遥感方面的研究。E-mail: frank@aiofm.ac.cn

(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

汽开展了该技术的探测研究^[3-4],国内中国科学院安徽光学精密机械研究所基于该技术致力于大气温室气体(CO₂、CH₄等)的遥感探测研究^[5-6]。相比于时间型的迈克耳孙干涉仪利用单元探测器对干涉数据点进行分时采样,空间外差干涉光谱仪利用面阵探测器对所有干涉数据点同时采集,大大降低了数据采集时间,减轻了仪器装调压力以及卫星平台稳定性要求^[7]。

理想面阵探测器各像素辐射响应一致,在均匀辐射下输出的数位(DN)值应该相同,并且在固定的积分时间下,其输出DN值大小与入射辐射能量成线性关系。但实际应用中探测器受各种因素影响,均匀辐射下各像素输出的响应不同,并且单个像素输出DN值与其接收的辐射能量不是线性关系,即探测器的响应同时存在非均匀性和非线性^[8]。

探测器响应非均匀性及非线性的存在会对干涉数据造成影响,干涉数据的变化必然导致光谱数据的畸变,为了满足高精度光谱复原的要求必须对探测器响应进行精确校正。Englert等^[9]针对空间外差光谱仪探测器响应的非均匀提出了挡光臂平场方法,这种方法可以同时探测响应的非均匀性及光学系统的瑕疵进行校正。但校正系数需要在干涉仪胶合前确定,而干涉仪胶合过程中两光栅相对位置的变化会导致校正系数的不匹配,并且不能校正非线性。美国海军实验室根据其研制的空间外差光谱仪获取的干涉数据,发现探测器响应非线性会造成测量光谱中出现“鬼线”,但并没有给出响应非线性校正方法^[10]。

本文讨论了探测器响应对干涉数据及复原光谱的影响,阐述了一种探测器响应非线性及非均匀性同时校正的方法,并且利用积分球输出不同辐射等级的均匀面光源对探测器响应进行了校正。利用获取的校正系数对探测器测试数据及空间外差光谱仪干涉数据进行了校正,并且对结果进行了分析评价。

2 非线性与非均匀性对干涉数据及光谱数据的影响分析

2.1 响应非均匀性噪声影响分析

探测器响应的非均匀性对干涉数据的影响表现为乘性噪声,相当于每个干涉数据点乘以一个系数。非均匀性 U 的大小可以表示为^[11]

$$U = \frac{1}{D} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [D(i) - \bar{D}]^2}{N}}, \quad (1)$$

式中 N 为面阵探测器的像素数, \bar{D} 为面阵探测器输出数值均值, $D(i)$ 为第 i 个探测器像素的输出数值。对于空间外差光谱仪而言,其干涉示意图如图1所示,探测器的每一行像素采集一条完整的干涉数据。

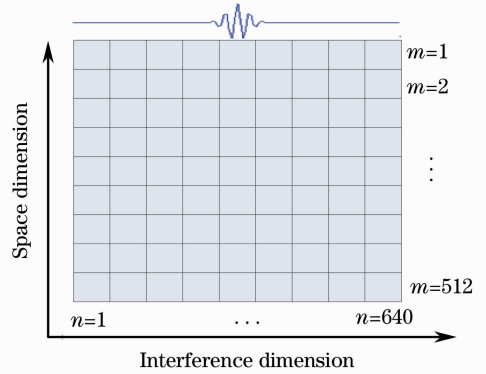


图1 空间外差光谱仪干涉图示意图

Fig. 1 Schematic diagram of interferogram measured by SHS

建立探测器像素输出值的模型为

$$D'_{m,n} = D(1 + \delta_{m,n}), \quad (2)$$

式中 D 为均匀辐射下理想探测器像素的输出数值, m,n 分别为探测器像素的行列序号, $\delta_{m,n}$ 为响应非均匀造成的差异因子,且 $\delta_{m,n}$ 满足平均值为零的正态分布, $D'_{m,n}$ 为各像素输出的实际数值。

以一条干涉数据(一行)为例,仿真出不同响应非均匀性噪声下的光谱数据,如图2(a)所示,空间外差光谱仪光谱范围由滤光片透射范围决定^[12]。因滤光片透射率为高斯型,将透射率大于40%的范围定义为有效光谱范围。响应非均匀性 U 的大小由 $\delta_{m,n}$ 的方差决定。仿真给出不同的非均匀性噪声 U 下光谱数据相对变化,如图2(b)~(e)所示。

由图2可知,空间外差光谱仪干涉数据复原光谱对探测器非均匀噪声极其敏感,约1%的响应非均匀性噪声就会造成复原光谱平均5%以上的偏差。

用LBLRTM仿真出空间外差光谱仪探测范围内不同光谱分辨率的CO₂吸收谱(仿真参数:1976年美国标准大气廓线、垂直观测、太阳天顶角为30°、地表反射率为0.3、大气中CO₂体积分数为380×10⁻⁶),如图3(a)所示。将三条光谱通过傅里叶变换转换为干涉数据,根据(2)式分别对干涉数据加入相同的非均匀性噪声($U=1%$),复原光谱后计算光谱噪声,结果如图3(b)所示,表明光谱分辨率越高引入复原光谱噪声越大,即分辨率越高对探测器非均匀越敏感。

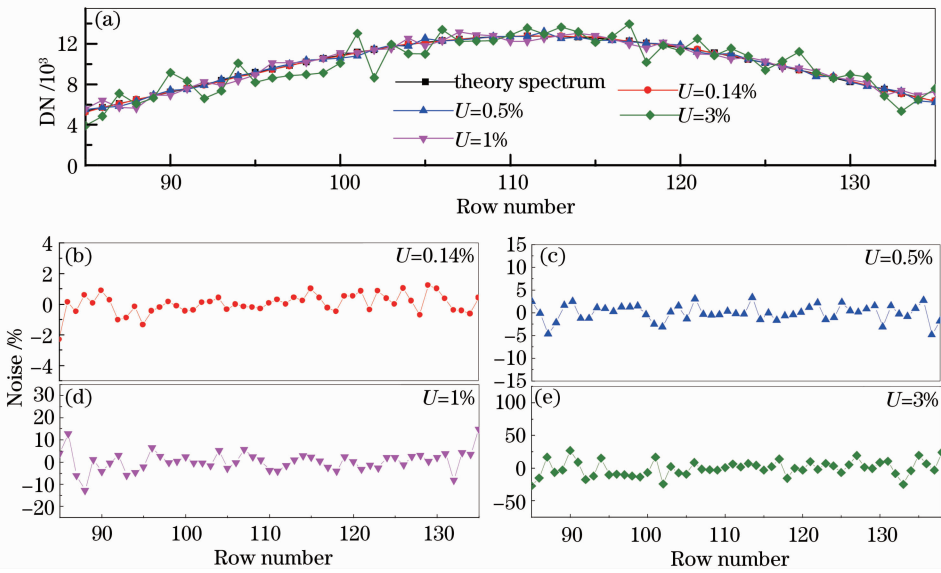


图 2 不同非均匀性噪声下产生的光谱数据噪声

Fig. 2 Spectrum noises caused by different non-uniformity noises

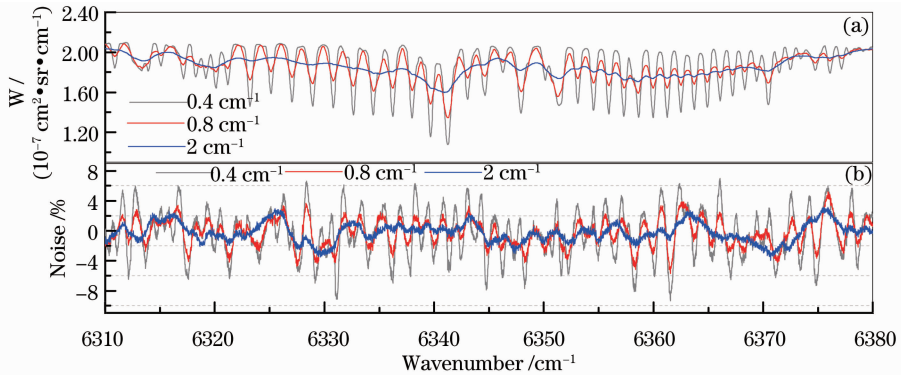


图 3 (a)不同光谱分辨率下的 CO₂ 吸收谱；(b)相同非均匀性噪声 ($U=1\%$) 造成不同光谱分辨率复原光谱噪声

Fig. 3 (a) Absorption spectra of CO₂ with different spectral resolutions; (b) recovered spectrum noises with different spectral resolutions caused by the same non-uniformity noise ($U=1\%$)

空间外差光谱仪光谱分辨率为 0.4 cm^{-1} ，使用的探测器经测试非均匀性约为 4% ，为了满足高精度光谱测量的要求必须对探测器响应非均匀性进行校正。

2.2 响应非线性噪声影响分析

探测器响应非线性表现为在不同入射能量下其响应效率是不同的，一般来说入射能量分布区间越大响应的非线性越严重。对于色散光谱仪及某些成像仪器，探测器各像素间的能量分布相对缓慢变化，并且探测器接收的能量分布区间较小，所以输出数据受探测器响应非线性影响较小。而空间外差光谱仪一条完整干涉数据的动态范围能量分布区间较大，零光程附近的几个数据点的能量分布剧烈变化，并且考虑到仪器接收的辐射能量受时间和空间影响，仪器测量要求的动态范围区间更大^[13]。图 4 给

出了一个典型的近红外探测器响应曲线，干涉数据受探测器响应的非线性影响表现为整体压缩^[14]。

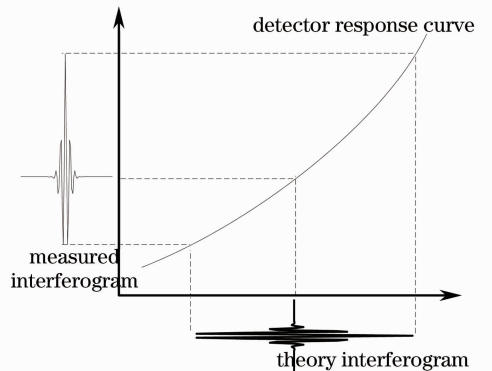


图 4 响应非线性示意图

Fig. 4 Schematic diagram of response nonlinearity

理想的干涉数据 I_t 与实际受非线性影响的测量干涉数据 I_m 的关系可表示为^[15]

$$I_m = I_t + \beta I_t^2 + \gamma I_t^3 + \dots, \quad (3)$$

式中 β, γ 是探测器响应非线性造成的干涉数据畸变系数。忽略高阶项,对(3)式作傅里叶变换,得

$$B_m = B_t + \beta \times B_t \otimes B_t + \gamma \times B_t \otimes B_t \otimes B_t, \quad (4)$$

式中 B_m 为实际测量干涉图复原的光谱数据, B_t 为理论光谱数据, \otimes 表示卷积。实测光谱由理论干涉图复原光谱和理论干涉图的二次方和三次方复原光谱组成。非线性对光谱的影响仿真结果如图 5 所示,其中图 5(a)为理论光谱,图 5(b), (c)分别为受非线性影响造成的二次方和三次方干涉数据复原的光谱,红色框内为有效光谱范围。由图中可以看出二次项主要影响有效光谱范围外的数据,造成光谱截止区域外输出不为零,这可以作为干涉数据是否受非线性影响及校正效果的评价依据。而三次项则影响光谱范围内的数据。最终复原的实测光谱是由三个光谱及 β, γ 决定。

2.3 空间外差光谱仪干涉数据仿真

空间外差光谱仪探测器获取的干涉信号 $I(x)$ 表达式为^[16]

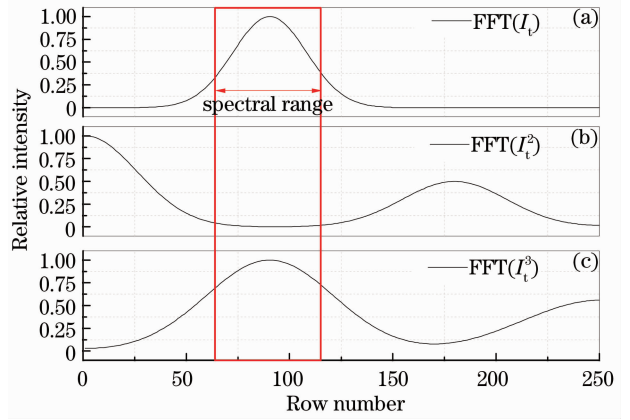


图 5 不同阶干涉数据复原光谱

Fig. 5 Spectra recovered from different order interferograms

$$I(x) = \int_0^{\infty} B(\sigma) \{1 + \cos\{2\pi[4(\sigma - \sigma_0)x \tan \theta]\}\} d\sigma, \quad (5)$$

式中 $B(\sigma)$ 为入射光谱, σ_0 为系统基频, θ 为光栅利特罗角。

结合前文分析,仿真出空间外差光谱仪的理论干涉数据及受探测器响应影响干涉数据,主要仿真参数:光谱范围 $6310 \sim 6375 \text{ cm}^{-1}$; 光栅利特罗角

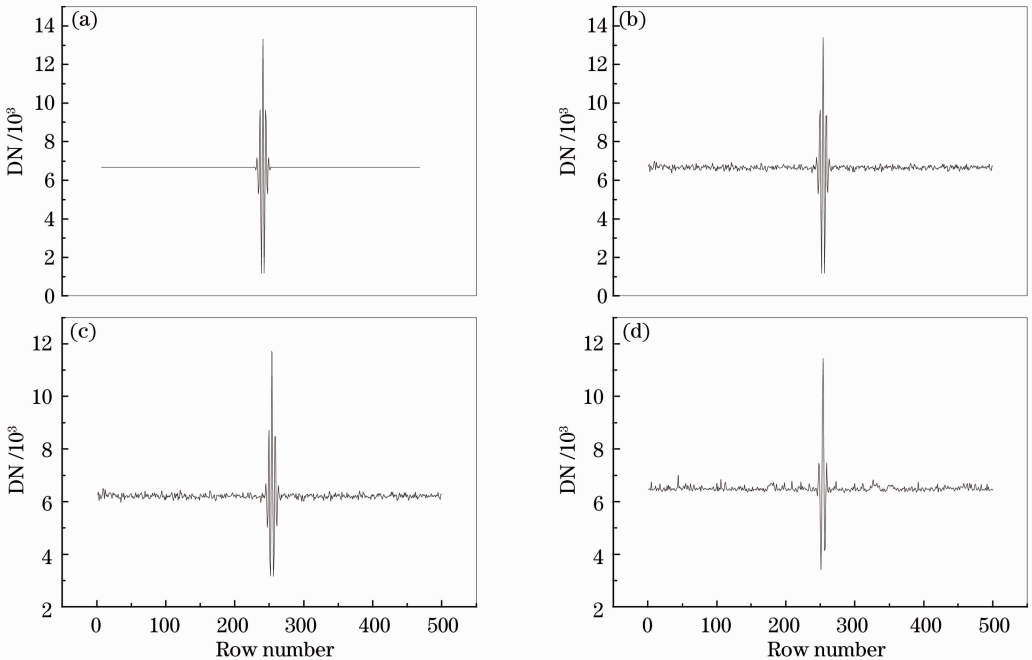


图 6 仿真干涉图与实测干涉图。(a)理论干涉数据;(b)非均匀性影响的干涉数据;(c)非均匀及非线性影响的干涉数据;(d)空间外差光谱仪测量干涉数据

Fig. 6 Simulated interferograms and measured interferogram. (a) Theory interferogram; (b) interferogram influenced by non-uniformity; (c) interferogram influenced by non-uniformity and nonlinearity; (d) interferogram measured by SHS

11.303°;干涉数据采样像素数目 500。仿真干涉图与实测干涉图如图 6 所示。其中图 6(a)为仿真出的理论干涉数据,图 6(b)为只受探测器响应非均匀影响的干涉数据,图 6(c)为探测器响应非均匀性及非线性同时存在的干涉数据,图 6(d)为实际测量的干涉数据。由图 6(a)、(b)的对比看出探测器响应的非均匀造成理论干涉数据叠加非均匀性噪声,而图 6(c)则是因探测器响应非线性引起干涉数据的调制度的降低,与实测干涉数据图 6(d)基本一致。

传统的时间干涉型光谱仪利用单元探测器采集干涉数据,只需要校正非线性。现有的面阵探测器响应校正方法无论是经典的两点校正算法以及在此基础上发展起来的分段两点校正和多项式拟合非均匀性校正方法都针对探测器响应的非均匀。对于空间外差光谱仪而言,干涉数据同时受探测器响应的非线性和非均匀的影响,必须在干涉数据进行任何其他处理(切趾、去除直流分量等)前对因探测器响应引起的干涉数据误差进行校正。

3 探测器响应校正

面阵探测器的某一像素输出为电压值(或电流值),最终经模数转换后输出 DN 值。输出数值大小与探测器像素接收的辐射能量、积分时间和探测器的像素光谱响应效率成正比,即

$$D_i - d_i = E(\lambda) \cdot R_i(\lambda) \cdot t, \quad (6)$$

式中 D_i 为第 i 个像素输出的数值, d_i 为其对应的暗电流, $E(\lambda)$ 为此像素接收的辐射能量, $R_i(\lambda)$ 为其光谱响应效率, t 为积分时间。

3.1 探测器非线性原因分析及校正方法

不同类型的探测器其非线性响应曲线是不同的,同一探测器的不同像素间的非线性响应曲线也不相同。探测器响应的非线性主要来自电阻的串联、探测器像素自身阻抗的作用、与其相连的放大器(前置放大和后续放大)、读出电路中电荷转换过程和模数转换的过程等^[17]。注意到所有这些都是与入射光波长无关的,因此可以将探测器第 i 个像素的光谱响应效率 $R_i(\lambda)$ 分成独立的两部分:一是非线性因子 $r_i^L(E)$, $r_i^L(E)$ 只与像素接收辐射能量 E 相关,而与入射光波长无关;二是光谱响应 $S_i(\lambda)$, $S_i(\lambda)$ 只与入射光波长相关,而与像素接收辐射能量无关。因此(6)式可化为

$$D_i - d_i = E(\lambda) \cdot S_i(\lambda) \cdot r_i^L(E) \cdot t. \quad (7)$$

如果通过改变入射到探测器的辐射能量等级,测得一系列探测器输出 $D_i[E_k(\lambda)]$ (其中 $k = 1, 2,$

$3, \dots$)。选取某一辐射能量 $E_{k_0}(\lambda)$ 下的数据 $D_i[E_{k_0}(\lambda)]$ 为基准,即令此时的 $r_i^L(E)$ 为 1,这样在另一辐射能量 $E_{k_0+1}(\lambda)$ 下探测器输出 $D_i[E_{k_0+1}(\lambda)]$ 与 $r_i^L(E)$ 相对变化就可以作为这个像素在此入射能量下的非线性校正的系数。在 $D_i[E_{k_0}(\lambda)]$ 与 $D_i[E_{k_0+1}(\lambda)]$ 间隔较小的情形下,两个能量之间的非线性校正系数可以通过插值求得。

3.2 探测器非均匀性校正

由(7)式可知,在均匀辐射照射条件下,固定积分时间内探测器不同像素输出 DN 值不同与探测器各像素暗电流、非线性校正系数和光谱响应效率相关。对于特定探测器其暗电流数据即为无光照条件下探测器输出数值,非线性校正系数可以通过 3.1 节中描述的方法得到,这样由(7)式得

$$S_i(\lambda) = \frac{D_i - d_i}{E(\lambda) \cdot r_i^L(E) \cdot t}. \quad (8)$$

如果把面阵探测器各像素的平均光谱响应 $\overline{S(\lambda)}$ 作为探测器响应的目标值。同样可以把 $S_i(\lambda)$ 分成两部分:一个是整个探测器的平均光谱响应效率 $\overline{S(\lambda)}$;另一个是各像素实际光谱响应与平均光谱响应的差异系数 $r_i^U(\lambda)$ 。因此,(8)式可变为

$$r_i^U(\lambda) = \frac{D_i - d_i}{E(\lambda) \cdot r_i^L(E) \cdot \overline{S(\lambda)} \cdot t}. \quad (9)$$

将(7)式代入(9)式,得

$$r_i^U(\lambda) = \frac{D_i - d_i}{r_i^L(E) \cdot \left(\frac{D_i - d_i}{r_i^L(E)} \right)}. \quad (10)$$

由(10)式可知,可以通过单一的均匀辐射下各像素响应的数字 DN 值、对应的暗电流数值和相应的非线性校正系数就可以确定探测器响应非均匀性校正系数。

以上分析可以得出:探测器响应的非线性与入射光波长无关,即对某一特定探测器可以通过任意不同辐射能量等级的均匀辐射源照射探测器,记录其输出 DN 值及暗电流数据,就可以确定其非线性校正系数,并且校正系数也适用于其他辐射源照射下此探测器的非线性校正。而从(9)式可以得出探测器响应的非均匀性是与入射光波长相关的,可以通过逐波长扫描求出各波长下的非均匀性校正系数。但实际中往往采用(10)式的方式,即通过滤光片光谱带宽选择作用,保证用于计算探测器非均匀性校正系数的辐射源与探测器实际工作中接收的辐射源具有相同的波长分布。

4 探测器响应校正实验及结果分析

根据第 3 节理论分析对空间外差光谱仪的探测器开展响应校正实验,实验装置如图 7 所示。利用积分球系统提供不同辐射亮度等级的均匀辐射源。参考欧洲机器视觉协会(EMVA)发布的用于测量及标定图像传感器参数的 1288 标准^[18-19]。为了保证探测器各像素接收相同的能量需保证探测器与积分球口的距离大于积分球口直径的 8 倍。一般测量探测器 50%饱和左右的数据以及暗电流数据。为了保证实验获取探测器非均匀性校正系数与探测器实际使用中接收的辐射源波长范围相同,可以选择在积分球口加相应的滤光片。同时为了减小杂散光的影响,实验需要在暗室中完成,并且保持实验环境温度、湿度的稳定。由于探测器响应的非线性与入射光波长无关,因此可以同时完成非线性和非均匀性校正实验。

4.1 探测器响应校正系数计算

空间外差光谱仪的探测器模数转换量化位数为 14 位(DN 值范围 0~16384),探测器响应非线性校正系数实验 DN 值在 1000~13500 范围内,共采集 33 组不同辐射亮度等级的数据,每组数据采集 100

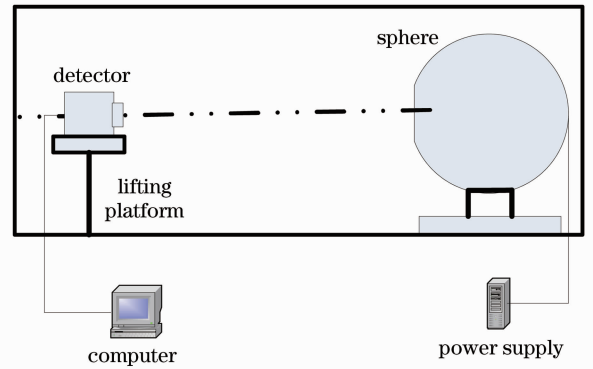


图 7 探测器响应校正实验系统示意图

Fig. 7 Schematic diagram of detector response correction system

幅用来平均降低随机噪声,同时每组采集相应的暗电流数据。

通过(6)式计算出面阵探测器每个像素的非线性校正系数,一般选取探测器响应动态范围的 50%~70%之间的一组数据为基准计算非线性校正系数。以第 20 组数据(DN 值约为 7000)为基准。其中一个像素(200, 250),计算出的非线性校正系数如图 8(a)所示,其非线性补偿前后的响应曲线如图 8(b)所示。图 8(c)为部分像素校正前的响应曲

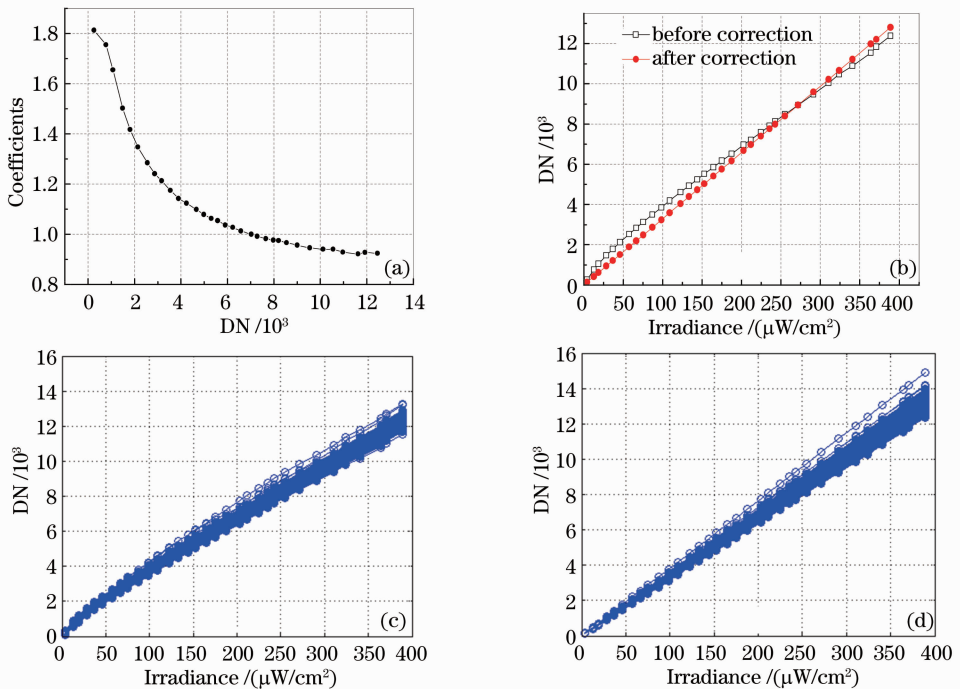


图 8 探测器响应非线性校正。(a) (200,250)像素的非线性校正系数;(b) (200,250)像素校正前后响应曲线;(c)部分像素非线性校正前响应曲线;(d)部分像素非线性校正后响应曲线

Fig. 8 Detector response nonlinearity corrections. (a) Nonlinearity correction coefficient of pixel (200, 250); (b) non-correction and correction response curves of pixel (200, 250); (c) response curve of partial pixels before nonlinearity correction; (d) response curve of partial pixels after nonlinearity correction

线,每一条点线图表示一个像素的实际响应曲线。图 8(d)为这些像素非线性校正后的响应曲线。校正后的像素输出 DN 值与探测器像素面的辐照度成线性关系,各曲线斜率不同是由于非均匀性造成的。

由(9)式可知,可以通过非线性校正实验中任一辐射亮度下非线性补偿后的数据计算出探测器的非均匀校正系数。同样选取第 20 组非线性补偿后的数据计算非均匀性校正系数,结果如图 9 所示。

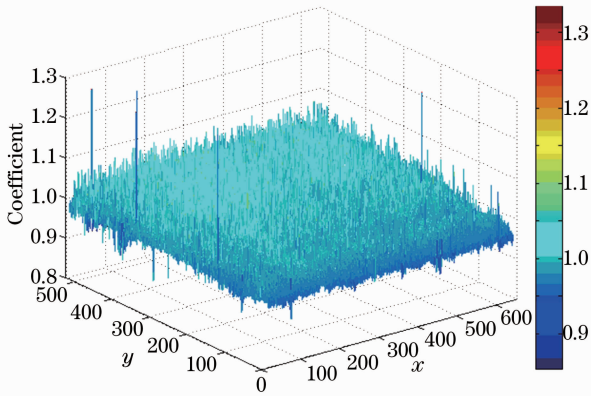


图 9 非均匀性校正系数

Fig. 9 Coefficient of non-uniformity correction

将非线性系数应用于各组非线性校正后的探测器数据,结果如图 10 所示。图中每个圆点代表一个均匀辐射下探测器所有像素的响应,可以看出校正后所有像素响应一致且与接收辐射量成线性关系。

4.2 探测器数据及干涉数据校正

将 4.1 节中获取的非线性校正系数及非均匀性校正系数分别代入用于计算校正系数的探测器测试数据以及空间外差光谱仪干涉数据,结果如图 11、12 所示。根据(1)式分别计算图 11 中探测器响应

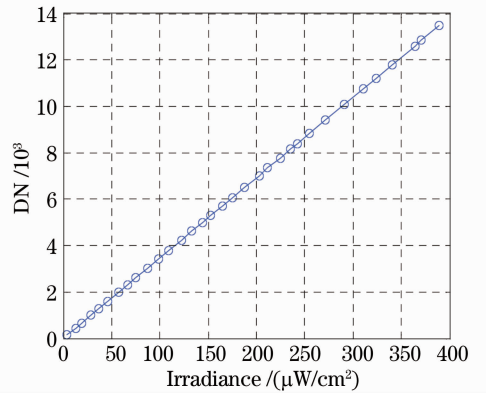


图 10 探测器所有像素校正后响应曲线
Fig. 10 Response curve of all detector pixels after correction

校正前后的非均匀性^[20]。

图 10 中探测器数据校正后各像素响应趋于一致,非均匀性由校正前的 4.04%降至 0.14%。图 11、12 校正后探测器各像素的响应仍不完全一致,是因为探测器还存在其他噪声(光子噪声、热噪声等)、辐射源的不稳定性、非均匀性等因素。由 2.1 节的仿真结果可知,0.14%的非均匀噪声会引入复原光谱 0.2%左右的噪声,可以在后续的数据处理及定标予以继续消减。图 11、12 中探测器数据和干涉数据整体幅值的降低是因为对非线性进行补偿。分别对校正前后的干涉数据复原光谱,如图 13 所示。

由本文第 2 节的分析可知,探测器响应的非均匀会造出复原光谱的振荡噪声,而响应非线性会造成滤光片截止光谱之外的数据不为零,如图 13 中蓝色光谱所示。校正后光谱(红色)曲线平滑,并且截止光谱之外的数据基本为零,说明探测器响应校正效果理想,大大的提高了复原光谱的精度。

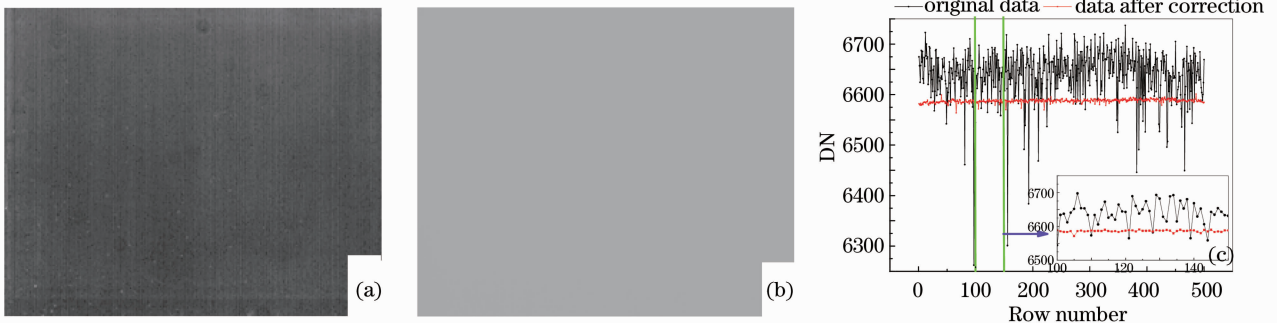


图 11 校正系数应用于探测器数据。(a)探测器原始数据(非均匀性 4.04%);(b)校正后数据(非均匀性 0.14%);
(c)单行数据校正前后对比

Fig. 11 Detector data with the application of correction coefficients. (a) Original data of detector ($U=4.04\%$); (b) data after correction ($U=0.14\%$); (c) comparison of single-line data before and after correction

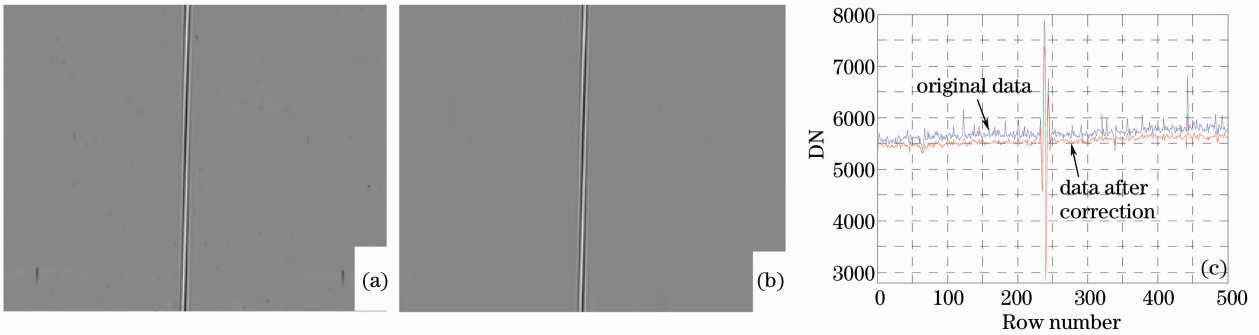


图 12 校正系数应用于干涉数据。(a)原始干涉数据;(b)探测器响应校正后干涉数据;
(c)单行干涉数据校正对比

Fig. 12 Interferogram with the application of correction coefficients. (a) Original interferogram; (b) interferogram after detector response correction; (c) comparison of single-line interferogram data before and after correction

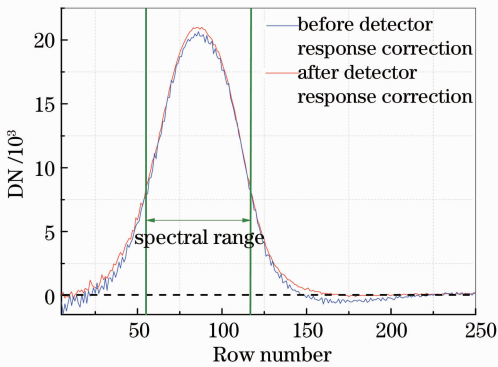


图 13 探测器响应校正前后光谱

Fig. 13 Spectra before and after detector response correction

5 结 论

空间干涉光谱技术降低了数据采集时间,但超光谱分辨率及大动态范围的干涉数据对面阵探测器的响应非线性及非均匀极其敏感。通过仿真分析得出,面阵探测器响应的非均匀性和非线性同时存在,造成复原光谱数据叠加了快变的起伏噪声和缓变的基线噪声。探测器响应非线性只与入射能量相关而与波长无关,因此可以采用多个不同等级的均匀辐射源对探测器响应非线性进行校正,非线性校正后可通过单一均匀辐射源对响应非均匀性进行校正。对实际探测器数据及干涉数据进行校正,探测器数据校正后非均匀性从 4.04% 降至 0.14%,校正后干涉数据复原光谱平滑且滤光片截止光谱之外数值为零,为大气 CO₂ 探测奠定了基础。

参 考 文 献

1 Walter Harris, Fred Roesler, Lotfi Ben-Jaffel, *et al.*. Applications of spatial heterodyne spectroscopy for remote sensing of diffuse UV-vis emission line sources in the solar system

[J]. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 2005, 144: 973–977.

2 Christoph R Englert, David D Babcock, John M Harlander. Spatial heterodyne spectroscopy for long-wave infrared: first measurements of broadband spectra [J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(10): 105602.

3 John M Harlander, Fred L Roesler, Joel G Cardon, *et al.*. SHIMMER: a spatial heterodyne spectrometer for remote sensing of Earth's middle atmosphere [J]. *Appl Opt*, 2002, 41(7): 1343–1352.

4 Christoph R Englert, Michael H Stevens, David E Siskind, *et al.*. Spatial heterodyne imager for mesospheric radicals on STPSat-1 [J]. *J Geophysical Research*, 2010, 115 (D20): D20306.

5 Ye Song, Fang Yonghua, Hong Jin, *et al.*. System design of spatial heterodyne spectrometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(6): 959–964.

叶松, 方勇华, 洪津, 等. 空间外差光谱仪系统设计[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(6): 959–964.

6 Xiong Wei, Shi Hailiang, Wang Yuanjun, *et al.*. Study on NIR spatial heterodyne spectrometer and detection of water vapor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(5): 1511–1515.

熊伟, 施海亮, 汪元钧, 等. 近红外空间外差光谱仪及水汽探测研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(5): 1511–1515.

7 H Suto, A Kuze, M Nakajima, *et al.*. Airborne SWIR FTS for GOSAT validation and calibration [C]. *SPIE*, 2008, 71060: 71060M.

8 Zhou Huixin, Wei Yajiao, Qin hanlin, *et al.*. Kalman-filtering nonuniformity correction algorithm based on nonlinear model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(2): 378–381.

周慧鑫, 魏亚皎, 秦翰林, 等. 基于非线性模型的卡尔曼滤波非均匀性校正算法[J]. *光学学报*, 2009, 29(2): 378–381.

9 Christoph R Englert, John M Harlander. Flat fielding in spatial heterodyne spectroscopy [J]. *Appl Opt*, 2006, 45(19): 4583–4590.

10 Christoph R Englert, J Timothy Bays, Jeffrey C Owtrsky, *et al.*. SHIM-free Breadboard Instrument Design, Integration, and First Measurements [R]. *NAVAL Research Lab Washington PC*, 2005.

11 Yin Shimin, Xiang Libin, Zhou Jinsong, *et al.*. Research on nonuniformity correction of IRFPA based on radiation source scaling [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(55): 992–995.

殷世民, 相里斌, 周锦松, 等. 辐射源定标红外焦平面阵列非均匀性校正算法研究[J]. *光子学报*, 2008, 37(55): 992–995.

12 Shi Hailiang, Fang Yonghua, Wu Jun, *et al.*. Study on spectral calibration of a novel interferometric spectrometer with supper-

- resolution capability [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0528002.
- 施海亮, 方勇华, 吴军, 等. 新型超分辨干涉型光谱仪光谱定标研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0528002.
- 13 D B Chase. Nonlinear detector response in FT-IR [J]. *Appl Opt*, 1984, 38(4): 491-494.
- 14 Anne Kleinert. Correction of detector nonlinearity for the balloonborne Michelson interferometer for passive atmospheric sounding [J]. *Appl Opt*, 2006, 45(3): 425-431.
- 15 Lars Fiedler, Stuart Newman, Stephan Bakan. Correction of detector nonlinearity in Fourier transform spectroscopy with a low-temperature blackbody [J]. *Appl Opt*, 2005, 44(25): 5332-5340.
- 16 Shi Hailiang. Research on Calibration of Spatial Heterodyne Spectrometer [D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2012.
- 施海亮. 空间外差光谱仪定标技术研究 [D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2012.
- 17 Alejandro Ferrero, Joaquin Campos, Alicia Pons. Correction of photoresponse nonuniformity for matrix detectors based on prior compensation for their nonlinear behavior [J]. *Appl Opt*, 2006, 45(11): 2422-2427.
- 18 Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras (EMVA Standard 1288) [S]. European Machine Vision Association, 2010.
- 19 Xiu Jihong, Huang Pu, Li Jun, *et al.*. Non-uniformity correction of large area color CCD aerial mapping camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0711003.
- 修吉宏, 黄浦, 李军, 等. 大面阵彩色 CCD 航测相机成像非均匀性校正[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0711003.
- 20 Xie Xufen, Zhang Wei, Zhi Xiyang, *et al.*. Scence-based assessment method for nonuniformity of infrared focal plane array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0604001.
- 谢蓄芬, 张伟, 智喜洋, 等. 基于场景的红外焦平面阵列非均匀性评价方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0604001.

栏目编辑: 史敏