

激光外差光谱仪的仪器线型函数研究

卢兴吉 曹振松 谈图 黄印博 高晓明 饶瑞中

Instrument line shape function of laser heterodyne spectrometer

Lu Xing-Ji Cao Zhen-Song Tan Tu Huang Yin-Bo Gao Xiao-Ming Rao Rui-Zhong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 064208 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20181620

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181620>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于多普勒非对称空间外差光谱技术的多普勒测速仿真](#)

Simulation of Doppler velocity measurement based on Doppler asymmetric space heterodyne spectroscopy

物理学报. 2018, 75(14): 140703 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180063>

[偏振型干涉成像光谱仪谱线位置定标方法的研究](#)

Study on the methods of calibrating spectral line position of interference imaging spectrometer

物理学报. 2016, 73(8): 080601 <https://doi.org/10.7498/aps.65.080601>

[激光光源线宽对外差探测性能的影响](#)

Effect of laser linewidth on the performance of heterodyne detection

物理学报. 2016, 73(8): 084206 <https://doi.org/10.7498/aps.65.084206>

[外差式偏振干涉成像光谱技术研究](#)

Heterodyne polarization interference imaging spectroscopy

物理学报. 2017, 74(16): 160702 <https://doi.org/10.7498/aps.66.160702>

[近距离激光外差探测光学极限位移分辨率](#)

Short-range optical limited displacement resolution in laser heterodyne detection system

物理学报. 2017, 74(23): 234208 <https://doi.org/10.7498/aps.66.234208>

激光外差光谱仪的仪器线型函数研究*

卢兴吉¹⁾²⁾ 曹振松^{1)†} 谈图¹⁾ 黄印博¹⁾ 高晓明¹⁾ 饶瑞中¹⁾

1) (中国科学院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院大气光学重点实验室, 合肥 230031)

2) (中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 合肥 230026)

(2018年8月30日收到; 2018年11月6日收到修改稿)

激光外差是一种基于相干探测原理的高灵敏度光谱检测技术, 因其同时具有很高的光谱分辨能力, 被广泛应用于诸多研究领域. 在光谱测量过程中, 仪器线型函数对吸收谱线的平滑作用, 会对气体浓度的反演结果产生影响. 为了获取激光外差光谱仪的仪器线型函数, 基于激光外差原理和信号处理过程, 对影响仪器线型函数的射频滤波带宽和积分时间等参数进行了分析, 获得了仪器线型函数表达式. 利用自行建立的激光外差光谱仪, 多次测量了 3.53 μm 波段内水汽、甲烷的吸收谱线, 分别将射频滤波频域响应函数和本文获得的仪器线型函数耦合进水汽、甲烷柱浓度的反演. 结果表明, 射频滤波带宽为 30 MHz、积分时间分别为 10 ms 和 100 ms 时, 光谱仪的实际分辨率分别约为 0.005 cm^{-1} 和 0.025 cm^{-1} ; 使用仪器线型函数对积分时间为 100 ms 时测量的数据进行反演, 透过率残差平方和与甲烷吸收峰值处的残差分别减小 16% 和 100%, 提高了气体浓度反演的准确度.

关键词: 激光外差, 仪器线型函数, 射频滤波, 透过率光谱

PACS: 42.65.Ky, 78.47.jh, 32.30.Bv, 29.30.-h

DOI: 10.7498/aps.68.20181620

1 引言

激光外差技术在测量气体分子的吸收光谱方面具有高灵敏度、高分辨率等优点, 其光谱分辨能力 ($\nu/\Delta\nu$) 一般高于 10^5 , 可满足大部分气体高分辨率吸收谱线的测量要求^[1,2]. 但在测量过程中, 仪器线型 (instrument line shape, ILS) 函数对吸收谱线的平滑作用, 使得基于光谱测量反演待测气体浓度产生误差^[3-5]. 因此, 在利用激光外差光谱仪进行光谱测量时, 获取测量设备的 ILS 函数进而减小反演误差成为激光外差技术研究中的关键环节. 如: Taguchi 等^[6,7] 使用液氮冷却铅盐激光器搭建了 9.06 μm 激光外差臭氧测量系统, 反演的臭氧浓度与臭氧探空仪具有较好的一致性. 然而, 由于该测量系统对光谱数据的平滑, 难以获得 30 km 高

度以上的臭氧浓度. Weidmann^[8-10] 和 Wilson^[11,12] 等分别利用激光外差测量系统对 9.6 μm 波段内臭氧和 1.573 μm 波段内二氧化碳吸收光谱进行测量, 并将射频 (RF) 滤波器的响应函数耦合进反演过程, 提高了反演精度.

在国内, 谈图等^[13,14] 首次报道了以 4.4 μm 波段窄线宽量子级联激光器为本振光源的激光外差光谱测量装置, 该系统在 RF 滤波带宽为 60 MHz 的情况下, 测量了气体吸收池内不同压强下二氧化碳的吸收线宽, 并通过光谱去卷积得到系统实际的频谱分辨率为 0.0078 cm^{-1} , 分辨率低于所使用的 RF 滤波带宽.

上述激光外差光谱测量系统采用了较大的滤波带宽或积分时间, 虽然可获得较高的信噪比, 但测得的谱线未能准确扣除 ILS 函数的影响, 反演待测气体浓度时会产生较大的偏差; 另外, RF 滤波

* 国家自然科学基金 (批准号: 41205021) 和中国科学院青年创新促进会 (批准号: 2015264) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zscas@aiofm.ac.cn

函数对激光外差光谱仪的 ILS 函数有较大影响, 将其作为 ILS 函数耦合进反演过程, 虽提高了反演精度, 但未考虑积分时间的影响, 反演结果仍存在较大误差. 鉴于上述原因, 激光外差光谱仪的 ILS 函数仍需进一步完善, 从而进一步减小其对反演结果的影响.

本文在前期研究的基础上, 对影响 ILS 函数的 RF 滤波带宽、积分时间内本振光波长变化和锁相放大器的低通滤波带宽等参数进行了详细分析, 获得了激光外差光谱仪的 ILS 函数表达式. 同时, 利用实验室自行搭建的激光外差光谱仪对 3.53 μm 波段内水汽和甲烷的吸收情况进行多次测量, 分别使用滤波器频域响应函数和本文得出的 ILS 函数作为光谱测量系统的 ILS 函数, 对水汽和甲烷柱浓度进行反演. 反演结果表明, 当使用本文给出的 ILS 函数反演气体浓度时, 有效减小了信号拟合时的残差, 进一步提高了反演精度.

2 激光外差光谱仪的仪器线型函数

2.1 激光外差探测原理

激光外差是一种基于相干探测原理的光谱测量技术, 其利用单色激光与宽带光信号混频, 将与激光频率接近的红外信号转移至 RF 范围进行处理, 可得到高分辨率的光谱信息^[13,14]. 激光外差信号处理的流程如图 1 所示.

根据文献 [15—17], 时域上外差电流的大小 i_{IF} 正比于本振光和信号光的乘积:

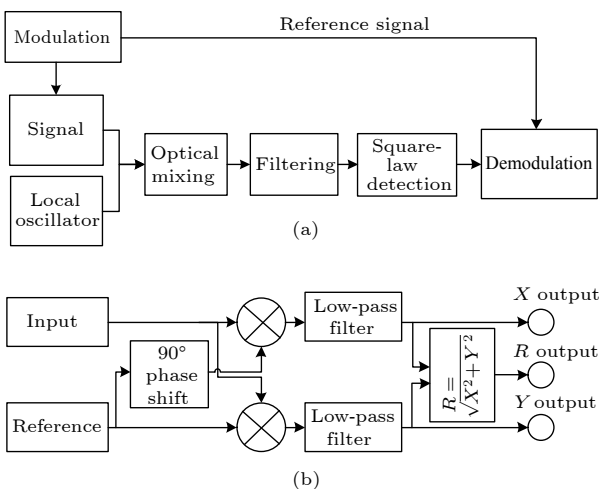


图 1 (a) 激光外差信号处理流程; (b) 信号解调原理图
Fig. 1. (a) Diagram of laser heterodyne signal processing; (b) scheme of signal demodulation.

$$i_{\text{IF}} \propto A_{\text{LO}} \cos(\nu_{\text{LO}}t) \cdot A_{\text{S}} \cos(\nu_{\text{S}}t), \quad (1)$$

式中 A_{LO} 和 A_{S} 分别为本振光和信号电场分量的振幅; ν_{LO} 和 ν_{S} 分别为本振光和信号的频率. 因此, 频域上外差电流大小则正比于二者的卷积:

$$I_{\text{IF}}(\nu) \propto F_{\text{LO}}(\nu) * F_{\text{S}}(\nu), \quad (2)$$

其中 $F_{\text{LO}}(\nu)$ 和 $F_{\text{S}}(\nu)$ 分别为本振光和信号的频域. 外差信号输出探测器后, 经过滤波、检波和解调等处理, 便可获得高分辨率的光谱信号. 外差处理过程中, 由于受到滤波带宽、积分时间等影响, 获得的光谱信号会有一定程度的平滑, 这些参数是激光外差光谱仪 ILS 函数的重要组成部分.

2.2 仪器线型函数

ILS 函数是衡量光谱仪性能的重要参数, 测量光谱信号时由于受到 ILS 函数的影响, 光谱数据存在一定程度的失真. 分析 ILS 函数时, 一般将输入信号设置为冲击函数 (或狄拉克函数), 即 $f_{\text{S}}(t) = \delta(t)$, 冲击函数的频域为常数, 即 $F_{\text{S}}(\nu) = 1$. 目前, 激光外差光谱仪使用的本振光多为窄线宽的分布反馈式 (distributed feedback, DFB) 激光器或量子级联激光器, 理想情况下输出单色光, 因此其频域可表示为狄拉克函数 $F_{\text{LO}}(\nu) = A_{\text{LO}}\delta(\nu_{\text{LO}})$. 根据前述分析, 外差信号在频域上可表示为

$$F'(\nu) = F_{\text{S}}(\nu_{\text{S}}) * F_{\text{LO}}(\nu_{\text{LO}}). \quad (3)$$

由于本振光频域内为冲击函数, 根据卷积定理, 探测器响应带宽内的外差信号为

$$F''(\nu) = A_{\text{LO}}. \quad (4)$$

探测器输出的外差信号经过 RF 滤波器滤波, RF 滤波函数可视为窗函数:

$$H(\nu) = \begin{cases} c, & \nu_{\text{L}} \leq |\nu| \leq \nu_{\text{H}}, \\ 0, & \text{others,} \end{cases} \quad (5)$$

式中 ν_{H} 和 ν_{L} 分别为滤波器通频带的上、下边带截止频率; c 为滤波带宽内的增益, 滤波器通频带内信号衰减很小, 为了便于分析, 令 $c = 1$. 外差信号经过 RF 滤波后为

$$F''(\nu) = A_{\text{LO}}H(\nu). \quad (6)$$

以上是分析一般测量系统 ILS 函数的过程, 由于激光外差光谱仪获得的光谱信号是锁相放大器解调平均的结果, 输入单次狄拉克函数无法求出准确的 ILS 函数. 因此, 假设在锁相放大器积分时间内有持续的冲击函数输入光谱仪中, 积分时间内输入信号即为

$$f_s(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^N \delta \left(t - \left(t_0 - \frac{\tau}{2} + \frac{i}{N} \tau \right) \right), \quad (7)$$

式中 τ 为锁相放大器的积分时间, t_0 表示扫描周期

$$\begin{aligned} F''' &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_{\text{LO}} H \left\{ v - \left[v_{\text{LO}} \left(t - \left(t_0 - \frac{\tau}{2} + \frac{i}{N} \tau \right) \right) - v_s \right] \right\} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_{\text{LO}} H(v) * \delta \left\{ v - \left[v_{\text{LO}} \left(t - \left(t_0 - \frac{\tau}{2} + \frac{i}{N} \tau \right) \right) - v_s \right] \right\} \\ &= A_{\text{LO}} H(v) * \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta \left\{ v - \left[v_{\text{LO}} \left(t - \left(t_0 - \frac{\tau}{2} + \frac{i}{N} \tau \right) \right) - v_s \right] \right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

在积分时间内, 本振波长的变化范围是 $v_{\text{LO}}(t_0 - \tau/2) - v_{\text{LO}}(t_0 + \tau/2)$. 因此, (8) 式中卷积符号后的一项等价于

$$\begin{aligned} &\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta \left[v - \left(v_{\text{LO}} \left(t_0 - \frac{\tau}{2} + \frac{i}{N} \tau \right) - v_s \right) \right] \\ &= \begin{cases} \frac{1}{N} \delta, & v_{\text{LO}}(t_0 - \tau/2) \leq v \leq v_{\text{LO}}(t_0 + \tau/2), \\ 0, & \text{others.} \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

由 (9) 式可知

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta \left[v - \left(v_{\text{LO}} \left(t_0 - \frac{\tau}{2} + \frac{i}{N} \tau \right) - v_s \right) \right]$$

只有在 $v_{\text{LO}}(t_0 - \tau/2) - v_{\text{LO}}(t_0 + \tau/2)$ 波长范围内存在有效信号, 其他范围幅值为 0, 且

$$\begin{aligned} &\int_{v_{\text{LO}}(t_0 - \tau/2)}^{v_{\text{LO}}(t_0 + \tau/2)} \frac{1}{N} \\ &\times \sum_{i=1}^N \delta \left[v - \left(v_{\text{LO}} \left(t_0 - \frac{\tau}{2} + \frac{i}{N} \tau \right) - v_s \right) \right] dv = 1. \end{aligned} \quad (10)$$

因此在积分时间内, 当 $N \rightarrow \infty$ 时, 本振光波长的变化大小为

$$\Delta v = v_{\text{LO}}(t_0 + \tau/2) - v_{\text{LO}}(t_0 - \tau/2). \quad (11)$$

此时可以令

$$\Gamma(v) = \begin{cases} 1, & v_{\text{LO}}(t_0 - \tau/2) < v < v_{\text{LO}}(t_0 + \tau/2), \\ 0, & \text{others.} \end{cases} \quad (12)$$

外差信号经过锁相放大器的解调, 便将原来频域内的信号转换到了时域进行处理. 解调后的外差信号经过锁相放大器内部的低通滤波器滤波后输

内的某一时刻, N 为积分时间内冲击函数的总个数, i 表示积分时间内的第 i 个时刻. 在积分时间内, 函数信号发生器输出的电压信号对本振光波长进行调制, 经过锁相放大器解调平均后的信号为

出 [18,19], 低通滤波器的时域响应为 h_{LP} , 因此激光外差光谱仪的 ILS 函数可表示为

$$ILS = \frac{A_{\text{LO}}}{\Delta v} H(v) * \Gamma(v) * h_{\text{LP}}, \quad (13)$$

式中 A_{LO} 和 Δv 在一般情况下为常数, 可令系统总增益为 G , 则 ILS 函数可简化为

$$ILS = G \cdot H(v) * \Gamma(v) * h_{\text{LP}}. \quad (14)$$

由上述分析结果可以看出, 激光外差光谱仪的 ILS 函数是 RF 滤波函数、本振光波长变化函数和低通滤波函数卷积的结果. 因此, 在已知光谱仪本振光的波长调谐范围与扫描周期、RF 滤波器通频带、锁相放大器的积分时间以及低通滤波器响应的情况下, 可获得准确的 ILS 函数.

3 激光外差光谱仪及其主要参数

实验室建立的 3.53 μm 激光外差光谱仪主要由三部分组成 [20,21]: 太阳跟踪模块、外差光路模块和外差信号处理模块. 利用该光谱仪测量了 3.53 μm 波段内的整层大气透过率谱, 该波段内有多种气体分子的吸收, 其中 HDO (中心波数 $\nu_0 = 2831.8413 \text{ cm}^{-1}$, 线强 $S = 3.014 \times 10^{-24} \text{ cm}^{-1}/(\text{mol} \cdot \text{cm}^2)$) 和 CH_4 (中心波数 $\nu_0 = 2831.9199 \text{ cm}^{-1}$, 线强 $S = 1.622 \times 10^{-21} \text{ cm}^{-1}/(\text{mol} \cdot \text{cm}^2)$) 两种分子的吸收强度合适, 适宜于用作水汽和甲烷浓度的反演. 在实验测量时, 影响 ILS 函数的主要参数如下.

1) 本振光源. 使用 Nanoplus 公司生产的 DFB 带间级联激光器, 该光源在 3.53 μm 波长附近可实现连续无跳模扫描, 激光线宽优于 10 MHz, 因此本振光可看作是理想单色光源. 使用函数信号发生

器输出的三角波信号对本振光波长进行调制, 扫描周期为 24 s, 扫描范围是 2831.70—2832.15 cm^{-1} , 在积分时间分别为 10 ms 和 100 ms 的时, 本振光波长在积分时间内的变化分别为 0.00038 cm^{-1} 和 0.0038 cm^{-1} .

2) RF 滤波带宽. 使用 Minicircuits 公司生产的 RF 滤波器对外差信号滤波, RF 波器的通频带为 25—55 MHz, 因此滤波带宽为 30 MHz, RF 滤波器的频域响应函数为

$$H(\nu) = \begin{cases} 1, & 0.00083 \text{ cm}^{-1} < |\nu| < 0.00183 \text{ cm}^{-1}, \\ 0, & \text{others.} \end{cases} \quad (15)$$

3) 积分时间与低通滤波器. 实验时分别将锁相放大器的积分时间设置为 10 ms 和 100 ms, 根据锁相放大器中的低通滤波带宽与积分时间的函数关系 [18,19], 此时低通滤波带宽的理论值分别为 0.78 Hz 和 7.8 Hz, 考虑到实际滤波带宽具有一定的展宽, 因此计算 ILS 函数时将低通滤波的带宽分别设置为 2 Hz 和 10 Hz, 其时域响应函数分别为

$$h_{lp}(t) = 2/\pi \text{sinc}(2t) \quad \tau = 10 \text{ ms}, \quad (16)$$

$$h_{lp}(t) = 10/\pi \text{sinc}(10t) \quad \tau = 100 \text{ ms}. \quad (17)$$

根据 (14) 式, 将 RF 函数分别与 (16) 和 (17) 式进行卷积可得到积分时间分别为 10 ms 和 100 ms 时的 ILS 函数, 结果如图 2 所示.

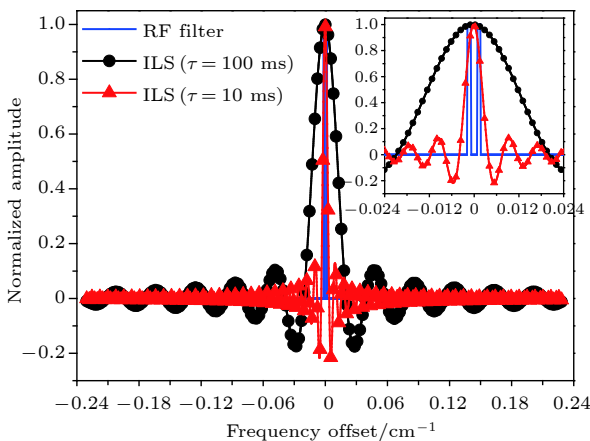


图 2 RF 滤波函数与 ILS 函数

Fig. 2. RF filter function and presented ILS function.

由结果可得: 积分时间为 10 ms 和 100 ms 时, 光谱分辨率分别约为 0.005 cm^{-1} 和 0.025 cm^{-1} . 在扫描周期较大而积分时间很小的情况下, 双边

RF 滤波带宽可近似为光谱仪的光谱分辨率; 而当积分时间较大时, 光谱仪的实际分辨率远小于双边 RF 滤波带宽.

4 实验结果

利用 3.53 μm 激光外差光谱仪测量了合肥地区 2018 年 4 月 10 日 11:30—13:00 约 1.5 h 内的透过率光谱, 积分时间分别为 10 ms 和 100 ms 时测得的其中一组透过率谱如图 3 所示.

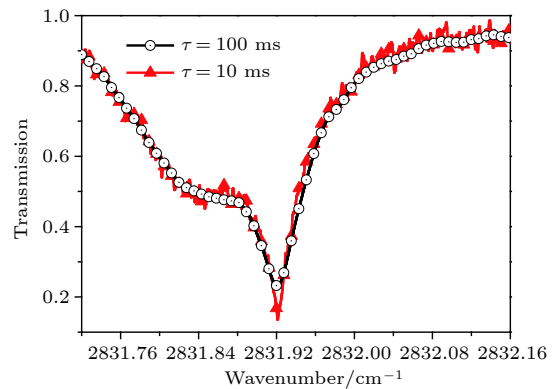


图 3 不同积分时间测量的透过率谱

Fig. 3. Measured transmittance spectra with different integral time.

从测量结果可明显看出, 积分时间为 100 ms 时, 虽然测量结果具有较高的信噪比, 水汽的吸收谱线未被明显平滑, 但甲烷的吸收谱线平滑较为严重. 主要是由于水汽含量的 75% 都集中在距离近地面 4 km 以下的大气中, 吸收线型主要为线宽较宽的 Lorentz 线型; 而甲烷的浓度在整层大气中的分布较为均匀, 因此线宽较窄的 Voigt 和 Gauss 线型对整层的吸收结果也有较大影响.

利用实验获得的不同积分时间情况下的透过率谱数据, 结合合肥地区的大气温、湿、压模式和美国标准大气成分模式对水汽和甲烷柱浓度进行了最小二乘拟合反演 [21], 并将 ILS 函数耦合进反演过程.

在反演水汽和甲烷柱浓度时, 分别使用 RF 滤波函数和本文的 ILS 函数, 并对使用两种函数的反演结果和残差进行比较分析. 其中一组反演的透过率结果和残差比较如图 4 所示.

由反演结果可以看出, 积分时间为 10 ms 时, 系统的光谱分辨率很高, 使用 RF 滤波函数和本

文 ILS 函数得到的反演结果无明显差别. 而积分时间为 100 ms 时, 使用本文的 ILS 函数反演时, 甲烷吸收峰值处的残差值减小至 3.75×10^{-4} , 残差

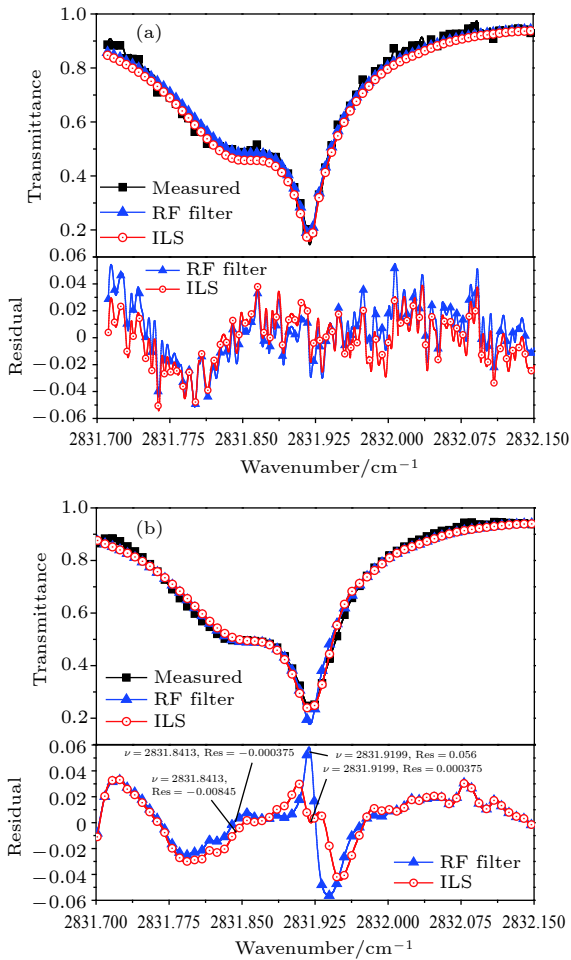


图 4 (a) 积分时间为 10 ms 透过率拟合结果及残差; (b) 积分时间为 100 ms 透过率拟合结果及残差

Fig. 4. (a) Fitting results of transmittance and residuals with $\tau = 10$ ms; (b) fitting results of transmittance and residuals with $\tau = 100$ ms.

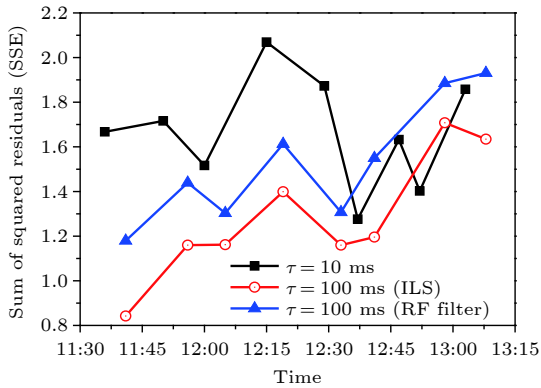


图 5 透过率残差平方和的变化

Fig. 5. Variation of sum of squared residual of transmittance.

比使用 RF 滤波函数时减小约 100%, 而水汽吸收峰值处残差无明显变化. 此外, 残差平方和是反映反演结果准确性的重要指标之一, 因此对 11:30—13:00 时间段内测量的数据使用不同的 ILS 函数进行反演, 残差平方和的结果如图 5 所示.

由反演结果的残差可看出积分时间为 100 ms 时, 使用本文线型函数进行反演的残差平方和平均值为 1.282, 比使用 RF 滤波函数反演时减小了 0.244, 减小约 16%. 水汽和甲烷的柱浓度反演结果如图 6 所示.

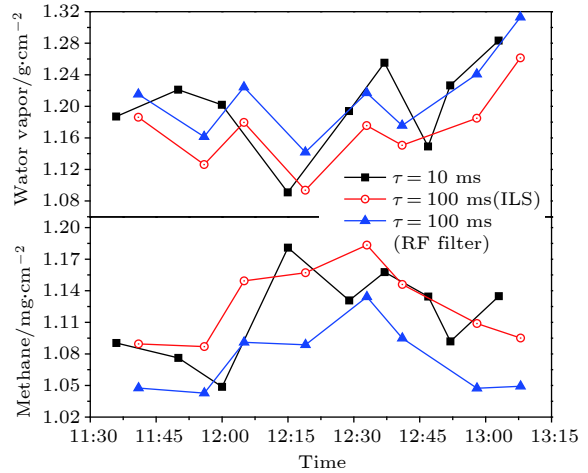


图 6 不同 ILS 函数反演出的水汽和甲烷柱浓度变化

Fig. 6. Variations of water vapor and methane column density inversed with different ILS function.

从水汽和甲烷柱浓度的反演结果可以看出, 在测量时间段内, 不同积分时间情况下, 水汽和甲烷的柱浓度反演结果变化趋势基本一致. 积分时间为 10 ms 时, 水汽柱浓度均值为 1.2 g/cm², 甲烷柱浓度均值为 1.116 mg/cm²; 积分时间为 100 ms, 使用本文 ILS 函数时, 水汽柱浓度的平均值为 1.17 g/cm², 比使用 RF 滤波函数反演时减小了 0.031 g/cm²; 甲烷柱浓度的平均值 1.127 mg/cm², 比使用滤波器函数反演时增加了 0.052 mg/cm², 甲烷的柱浓度的反演结果与积分时间为 10 ms 时的反演结果间的相对误差由 3.7% 减小至 0.98%.

综合上述结果可以得出: 第一, 甲烷等气体的吸收线宽较窄, 光谱测量时更易受 ILS 函数的影响. 因此, 获得准确的 ILS 函数对吸收线宽较窄的气体反演十分重要. 第二, RF 滤波频域响应函数作为外差光谱仪的 ILS 函数, 未考虑积分时间的影响, 反演时存在较大误差; 利用本文获取的 ILS 函

数表达式, 应用在激光外差光谱仪的信号处理上, 有效减小了反演时的透过率残差.

5 结 论

通过对激光外差原理、信号处理过程和影响激光外差光谱仪的 ILS 函数的各个影响因素进行逐一分析, 获得了激光外差光谱仪的 ILS 函数表达式. 将该函数耦合进 3.53 μm 波段内水汽和甲烷柱浓度的反演, 残差平方和比使用 RF 滤波函数时减小 16%; 甲烷吸收峰值处的透过率残差值减小 100%, 水汽吸收峰值处的残差无明显变化, 使用本文 ILS 函数反演进一步减小了拟合的误差. 今后, 将进一步将研究本振光线宽、波长漂移等对 ILS 函数的影响, 并针对 ILS 函数的测量开展研究, 获得激光外差光谱仪实际工作时的 ILS 函数, 为反演气体的浓度廓线奠定基础.

参考文献

- [1] Sonnabend G, Krötz P, Schmittling F, Kostniuk T, Goldstein J, Sornig M, Stupar D, Livengood T, Hewagama T, Fast K, Mahieux A 2012 *Icarus* **217** 856
- [2] Ren Y, Hovenier J N, Higgins R, Gao J R, Klapwijk T M, Shi S C, Bell A, Klein B, Williams B S, Kumar S, Hu Q, Reno J L 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 161105
- [3] Bernardo C J H 2001 *Ph. D. Dissertation* (Wollongong: University of Wollongong)
- [4] Frey M, Hase F, Blumenstock T, Groß J, Kiel M, Tsidu G M, Schäfer K, Sha M K, Orphal J 2015 *Atmos. Meas. Tech.* **8** 3047
- [5] Xiong W, Shi H L, Yu N H 2015 *Spectrosc. Spect. Anal.* **35** 267 (in Chinese) [熊伟, 施海亮, 俞能海 2015 光谱学与光谱分析 **35** 267]
- [6] Taguchi M, Okano S, Fukunishi H, Sasano Y 1990 *Geo. Res. Lett.* **17** 2349
- [7] Fukunishi H, Okano S, Taguchi M, Ohnuma T 1990 *Appl. Opt.* **29** 2722
- [8] Weidmann D, Reburn W J, Smith K M 2007 *Appl. Opt.* **46** 7162
- [9] Weidmann D, Tsai T, Macleod N A, Wysocki G 2011 *Opt. Lett.* **36** 1951
- [10] Tsai T R, Rose R A, Weidmann D, Wysocki G 2012 *Appl. Opt.* **51** 8779
- [11] Wilson E L, McLinden M L, Miller J H, Allan G R, Ott L E, Melroy H R, Clarke G B 2014 *Appl. Phys. B* **114** 385
- [12] Melroy H R, Wilson E L, Clarke G B, Ott L E, Mao J, Ramanathan A K, McLinden M L 2015 *Appl. Phys. B* **120** 609
- [13] Tan T 2015 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [谈图 2015 博士学位论文 (合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所)]
- [14] Tan T, Cao Z S, Wang G S, Wang L, Liu K, Huang Y B, Chen W D, Gao X M 2015 *Spectrosc. Spect. Anal.* **35** 1516 (in Chinese) [谈图, 曹振松, 王贵师, 汪磊, 刘锬, 黄印博, 陈卫东, 高晓明 2015 光谱学与光谱分析 **35** 1516]
- [15] Blaney T G 1975 *Space Sci. Rev.* **17** 691
- [16] Parvitte B, Zéninari V, Thiébeaux C, Delahaigue A, Courtois D 2004 *Spectrochim. Acta A* **60** 1193
- [17] Protopopov V V 2009 *Laser Heterodyning* (Berlin: Springer-Verlag) pp1–103
- [18] Qi C, Huang Y Y, Zhang W S, Zhou D, Wang Y M, Zhu M 2016 *IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* Florence, Italy, October 23–26, 2016 p883
- [19] Remillard P A, Amorelli M C 1993 *US Patent* 52 10484 A
- [20] Cao Y N, Wang R, Wang G S, Zhu G D, Tan T, Wang J J, Liu K, Wang L, Mei J X, Gao X M 2017 *Spectrosc. Spect. Anal.* **37** 3626 (in Chinese) [曹亚南, 王睿, 王贵师, 朱公栋, 谈图, 王晶晶, 刘锬, 汪磊, 梅教旭, 高晓明 2017 光谱学与光谱分析 **37** 3626]
- [21] Lu X J, Cao Z S, Huang Y B, Gao X M, Rao R Z 2018 *Optics Precis. Eng.* **26** 1846 (in Chinese) [卢兴吉, 曹振松, 黄印博, 高晓明, 饶瑞中 2018 光学精密工程 **26** 1846]

Instrument line shape function of laser heterodyne spectrometer*

Lu Xing-Ji¹⁾²⁾ Cao Zhen-Song^{1)†} Tan Tu¹⁾ Huang Yin-Bo¹⁾
Gao Xiao-Ming¹⁾ Rao Rui-Zhong¹⁾

1) (*Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

2) (*Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

(Received 30 August 2018; revised manuscript received 6 November 2018)

Abstract

Laser heterodyne is a kind of technique based on coherent detection with high sensitivity and spectral resolution for spectrum measurements. For these reasons, it has been widely used in many research fields, such as trace gases' detection of earth's or terrestrial planets' atmosphere. However, when the laser heterodyne spectrometer is used for measuring the spectrum, the instrument line shape (ILS) function usually smooth the spectrum, which affects the inversion results of the gas column density. In previous researches, the radio frequency (RF) filter response function was usually used as the ILS, but recent studies indicated that the ILS without consideration of the influence of lock-in amplifier was not precise enough. In order to obtain the ILS function of the laser heterodyne spectrometer, the main factors which influence the ILS are analyzed, including the RF filter bandwidth, integral time and low-pass filter of lock-in amplifier, and the process is based on the principle of laser heterodyne technology and the flow of heterodyne signal processing. The presented ILS is the convolution of RF filter, wavelength variation in the integral time and the low-pass filter. In addition, for testing the effectiveness of the ILS in this paper, the laser heterodyne spectrometer which was built in our laboratory is used for the multiple measurement of the absorption of water vapor and methane in the band of 3.53 μm and the column densities are retrieved with different ILS. The experimental results show that the actual resolutions of the laser heterodyne spectrometer are about 0.005 cm^{-1} and 0.025 cm^{-1} when the integral times are set to be 10 ms and 100 ms respectively. Furthermore, the RF filter response function and the ILS function presented in the paper are respectively used in the procedure of water vapor and methane inversion. The results show that when the ILS function used for the retrieval, the sum of squared residual reduces about 16% and the residuals at the peak of methane absorption reduces almost 100% compared with the scenario when using the RF filter function. Above all, the comprehensive analysis of the laser heterodyne spectrometer in this paper indicates that the ILS function is more precise than pioneering studies and this work will be helpful for retrieving the precise profiles of trace gases.

Keywords: laser heterodyne, instrument line shape function, radio frequency filter, transmittance spectrum

PACS: 42.65.Ky, 78.47.jh, 32.30.Bv, 29.30.-h

DOI: 10.7498/aps.68.20181620

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41205021) and the Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences (Grant No. 2015264).

† Corresponding author. E-mail: zscas@aiofm.ac.cn