

## 基于自发瑞利-布里渊散射测量空气的温度

商景诚<sup>1</sup>, 吴涛<sup>1\*</sup>, 杨传音<sup>1</sup>, 毛崎波<sup>2</sup>, 何兴道<sup>1</sup>

1. 南昌航空大学测试与光电工程学院, 江西省光电检测技术工程实验室, 江西 南昌 330063

2. 南昌航空大学飞行器学院, 江西 南昌 330063

**摘要** 瑞利-布里渊散射的散射截面比拉曼散射大, 因而其在大气散射中实现对大气对流层温度廓线的准确测量方面具有一定的优势, 同时利用瑞利-布里渊散射实现高压环境下温度的准确测量对于航天飞机主引擎状态的监测和超燃发动机燃烧室参数测量方面具有重要意义。基于自发瑞利-布里渊散射分别采用反卷积方法和卷积方法来实现空气在不同压力条件下的温度反演, 研究引起温度反演误差的原因, 并对利用两种方法获得的温度测量结果进行了比较。在利用基于维纳滤波器的反卷积方法对测量光谱直接处理实现温度反演之前, 首先利用反卷积方法对由自发瑞利-布里渊散射模型与仪器函数卷积得到的卷积光谱进行处理获得反卷积光谱, 将反卷积光谱与未经卷积的理论计算光谱进行比较实现温度反演, 并基于温度反演误差小于 1.0 K, 光谱拟合误差相对较小, 光谱处理时间短的参数优化原则对反卷积方法中的关键参数奇异值叠加数进行了优化处理, 得到优化后的奇异值叠加数为 150。随后实验测量了由 532 nm 波长的连续激光激发的纯净空气在温度为 294.0 K, 压强为 1~7 bar 条件下的自发瑞利-布里渊散射光谱, 并结合理论计算光谱和最小  $\chi^2$  值原理对光谱信号散射角进行优化, 优化值为 90.7°, 同时利用反卷积和卷积方法分别对实验测量光谱进行处理实现空气在不同压强下的温度反演。实验结果表明反卷积方法在一定程度上可以提高信号光谱分辨率, 而且利用反卷积和卷积方法均可以实现空气在不同压力(1~7 bar)条件下温度的准确测量, 温度测量的最大误差均小于 2.0 K; 利用反卷积方法的温度反演结果随着气体压强的增大随之得到改善, 实现温度反演测量所需要的光谱处理时间减少; 在空气压强较低( $\leq 2$  bar)时, 由卷积方法获得的温度反演结果要优于反卷积方法, 压强较高( $> 2$  bar)时, 两种方法的温度反演结果相近, 其绝对误差均小于 1.0 K。通过分析得到引起两种方法温度反演误差的原因主要包括环境温度的波动( $\pm 0.2$  K), 散射角存在一定的不确定度以及气体的各已知参数的微量偏差对温度测量结果的影响以及反卷积对光谱噪声的非线性放大引起的光谱扰动对温度测量结果的影响。在实验中可以通过提高测量光谱的信噪比、提高散射角的优化精度及改善反卷积方法来获得更加准确的参数测量结果。

**关键词** 大气散射; 布里渊散射; 瑞利散射; 反卷积

**中图分类号:** O433.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)10-2998-09

### 引言

大气温度廓线的准确测量对于校准大气理论模型, 研究大气环境状态具有重要的意义。目前, 激光雷达探测技术已能实现远距离(105 km)、高空间分辨率(小于 100 m)、高精度(误差小于 1 K)的温度测量<sup>[1]</sup>。大气对流层的温度利用拉曼散射可以实现高时间分辨率、高空间分辨率和高精度的测

量<sup>[2-3]</sup>。但是, 整个拉曼散射的散射截面大概只有瑞利散射截面的 1/50, 在获得高信噪比的散射信号方面存在较大困难<sup>[4]</sup>。高光谱分辨率测温激光雷达利用瑞利散射射线宽与温度的函数关系测量大气温度, 能够有效地测量低层大气温度, 但是如果忽略布里渊散射而仅仅考虑瑞利散射可能会给测量参数带来大约 10% 的误差。因此, 利用自发瑞利-布里渊散射信号实现大气对流层温度的准确测量具有一定的优势和实际意义。另外利用瑞利-布里渊散射实现在高压下的气体温

**收稿日期:** 2018-08-07, **修订日期:** 2018-12-29

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41665001, 61177096, 11464031), 航空科学基金项目(2015ZC56006), 江西省研究生创新专项资金项目(YC2017-S337)资助

**作者简介:** 商景诚, 1989 年生, 南昌航空大学测试与光电工程学院硕士研究生 e-mail: 18160743269@163.com

\* 通讯联系人 e-mail: wutccnu@nchu.edu.cn

度测量在航天飞机主引擎的状态监测和超燃发动机燃烧室参数测量等方面同样具有重要的应用价值<sup>[5]</sup>。自发瑞利-布里渊散射主要是由气体密度波动引起的,因此可以根据瑞利-布里渊散射实现对气体参数的测量,如温度<sup>[6-8]</sup>、压强<sup>[9-10]</sup>、体黏滞系数<sup>[11-16]</sup>等。相干瑞利-布里渊散射是由在气体中两个相交激光束的偶极子力导致气体密度产生波浪式扰动引起的,自发和相干瑞利-布里渊散射都可以用来测量气体参数。目前报道的研究工作主要是将描述瑞利-布里渊散射的理论模型与仪器传递函数卷积后再与测量光谱拟合实现对瑞利-布里渊散射的研究和气体参数的测量,本文将称之为卷积方法。在前期,吴涛等提出了基于维纳滤波器的反卷积方法获得高分辨率的自发瑞利-布里渊散射测量谱线,即将维纳滤波因子与实验测量光谱卷积后再与描述瑞利-布里渊散射的理论模型直接比较,同时利用该方法实现了气体压强的反演测量<sup>[9,17]</sup>。以上反卷积的研究工作并未考虑到反卷积方法中参数的优化问题,也未对该方法用于实现气体温度的测量做进一步研究。

为了提高反卷积方法在空气温度测量方面的准确性,本文首先利用与仪器函数卷积后的 Tenti S6 模型对空气在温度为 294.0 K,压强分别为 1, 3, 5 和 7 bar 条件下的自发瑞利-布里渊散射光谱进行了仿真,进而利用反卷积方法对仿真光谱进行处理并实现温度反演。在此过程中研究奇异值叠加数的变化对反卷积光谱线型、温度反演精度和运算时间的影响,从而对奇异值叠加数进行了优化。实验测量了与理论仿真条件相对应的空气自发瑞利-布里渊散射光谱,并分别利用反卷积方法和卷积方法实现空气温度的反演测量并与实际温度值比较,同时对引起温度反演误差的原因进行了分析和讨论。

## 1 理论与仿真处理

### 1.1 理论模型

自发瑞利-布里渊散射主要是由气体密度波动引起,该密度波动主要包括压力波动和熵波动,压力波动主要引起布里渊散射,其散射波长相对于入射波长发生变化,熵波动引起散射波长与入射波长相同的瑞利散射<sup>[18-19]</sup>。为了实现自发瑞利-布里渊散射的理论描述,通过求解玻尔兹曼方程引入了 Tenti S6 模型和 S7 模型<sup>[20-21]</sup>。其中 Tenti S6 模型是目前对瑞利-布里渊散射描述最为准确的理论散射模型。利用 Tenti S6 模型实现气体参数的反演测量,需要将一些已知参数作为固定输入参量,例如压强  $p$ 、体黏滞系数  $\eta_b$ 、剪切黏滞系数  $\eta_s$  和热传导  $k$  等。其中空气的剪切黏滞系数  $\eta$  和热传导  $k$  可由 Sutherland 公式<sup>[22]</sup> 计算得到,空气的体黏滞系数  $\eta_b$  取  $1.64 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[8]</sup>。

实验中测量的自发瑞利-布里渊散射光谱  $I(f)$  是由理想散射光谱  $S(f)$  与仪器 (Fabry-Perot (F-P) 扫描干涉仪) 传递函数  $\omega(f)$  卷积的结果,同时考虑到待测气体内微量的气溶胶、散射池壁和镜面反射产生的额外窄带光谱结构,最终的实验测量光谱可由式(1)表示<sup>[6]</sup>

$$I(f) = S(f) * \omega(f) = (I_{\text{mol}} S_{\text{mol}}(f) + I_{\text{par}} S_{\text{par}}(f)) * \omega(f) \quad (1)$$

式中  $*$  代表卷积运算符,  $S_{\text{mol}}(f)$  是 Tenti S6 模型描述瑞利布里渊散射的归一化的光谱线型,  $S_{\text{par}}(f)$  是描述窄带光谱结构的 Dirac delta 函数,  $I_{\text{mol}}$  和  $I_{\text{par}}$  是  $S_{\text{mol}}(f)$  与  $S_{\text{par}}(f)$  各自对应的强度,其中 F-P 扫描干涉仪的传递函数  $\omega(f)$  考虑了镜面缺陷<sup>[23]</sup>。

### 1.2 基于维纳滤波器的反卷积处理及相关参数优化

为了消除仪器传递函数对真实瑞利-布里渊散射谱线的影响,实现测量的瑞利-布里渊散射光谱与理论光谱 (Tenti S6 模型) 的直接比较,我们利用维纳滤波器对直接测量的散射光谱进行了反卷积处理。根据维纳滤波器的最佳逼近原理并结合奇异值分解法<sup>[24-25]</sup> 和奇异值截断法<sup>[26]</sup> 求解滤波因子  $G$ , 其结果为

$$G \approx \left( \sum_{i=1}^{m+1-N} \frac{u_i v_i^H}{\sigma_i} \right) W \quad (2)$$

式中  $u_i$  和  $v_i$  表示进行奇异值分解时的左右奇异值向量元,  $\sigma_i$  特征值向量元,  $W$  为 F-P 扫描干涉仪的传递函数。结合式(1)和式(2)即可得到真实的瑞利-布里渊散射光谱。由式(2)可知,当  $\sigma_i$  特征值向量元为较小值(接近于零)时,会引起滤波因子  $G$  的明显变化,引起反卷积光谱的抖动。

维纳滤波因子  $G$  与 F-P 扫描干涉仪的传递函数  $\omega(f)$  卷积可以获得冲击函数  $\delta$ , 由于在求解滤波因子  $G$  的过程中采用了奇异值分解法和奇异值截断法,因此得到的冲击函数  $\delta$  会受到奇异值叠加数的影响。图 1(a) 给出了 F-P 扫描干涉仪的传递函数  $\omega(f)$ , 图 1(b) 给出了奇异值叠加数  $n$  从 10 变化到 500 时得到的冲击函数  $\sigma$  的线型。

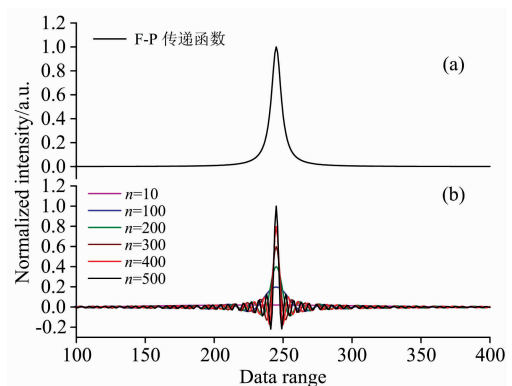


图 1 (a) F-P 扫描干涉仪的传递函数; (b) 奇异值叠加数  $n$  从 10 到 500 所对应的冲击函数

Fig. 1 (a) the transmission function of F-P scanning interferometer; (b) impulse function corresponding to the singular value stacking number ranging from 10 to 500

从图 1 可以看出,不同奇异值叠加数对应的冲击函数线型明显的不同,随着奇异值叠加数的增大,冲击函数线型的线宽变窄,强度增大,边缘抖动更加明显。因此,利用不同奇异值叠加数对应的冲击函数与测量光谱卷积时必然会得到不同的结果,这种猜想在图 2 中也得到了证实。

为了验证上述结论并对奇异值叠加数进行优化,我们利用式(1)并结合 Tenti S6 模型仿真获得空气在温度 294.0 K,压强分别为 1, 3, 5 和 7 bar 下的自发瑞利-布里渊散射光谱,

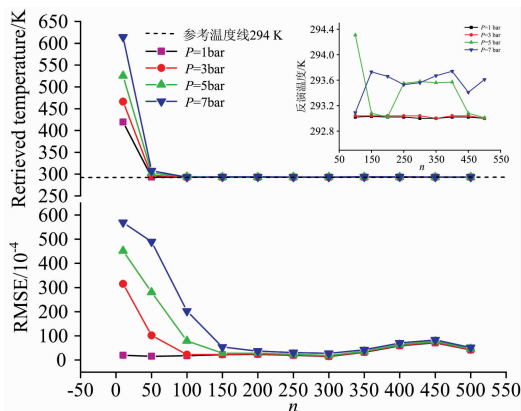


图 2 (a) 压强分别为 1, 3, 5 和 7 bar, 奇异值叠加数  $n$  从 10 变化到 500 时对应的温度反演值; (b) 压强分别为 1, 3, 5 和 7 bar 时, 奇异值叠加数  $n$  从 10 变化到 500 时对应的理想 S6 模型光谱与反卷积光谱之间的均方根误差

Fig. 2 (a) retrieved temperature values at different pressures (1, 3, 5 and 7 bar) and different singular value stacking numbers ranging from 10 to 500; (b) the root-mean-square errors (RMSE) between the ideal S6 model and the deconvolved spectra corresponding to the singular value stacking number ranging from 10 to 500 under the 1, 3, 5 and 7 bar respectively

同时利用不同奇异值叠加数下的反卷积方法对仿真光谱进行处理并与对应条件下的 Tenti S6 模型光谱比较实现温度反演测量。图 2(a)给出了压强分别为 1, 3, 5 和 7 bar, 奇异值叠加数  $n$  从 10 变化到 500 时对应温度反演值的变化, 其右上角插图为奇异值叠加数  $n \geq 100$  时的温度反演结果放大图; 图 2(b)给出了当奇异值叠加数  $n$  从 10 变化到 500 时所对应的两光谱之间的均方根误差 (RMSE) 值。从图 2 中可以看出, 随着奇异值叠加数  $n$  的增加, 温度反演结果更加接近于真实值 (294.0 K), 同时 RMSE 值明显降低。当  $n \geq 100$  时反演的温度与真实值的绝对误差小于 1 K; 当  $n \geq 150$  时 RMSE 值趋于稳定。RMSE 值在  $n > 300$  时存在一定的波动, 这种波动主要是在采用奇异值截断法时,  $n > 300$  时引起反卷积光谱在强度接近于零处的抖动造成的, 对于本实验而言, 我们感兴趣的瑞利-布里渊散射光谱强度要远大于零, 因此这种波动对 RMSE 值的影响可以通过人为选取光谱范围进行忽略。从整体上来看, 当奇异值叠加数  $n \geq 150$  时, 压强为 1~7 bar 下的瑞利-布里渊反卷积光谱与 Tenti S6 模型具有较高的吻合度, 且温度反演绝对误差都小于 1.0 K, 同时高压下的温度反演结果要优于低压下的结果, 这可能是由于高压下的布里渊峰更加突显, 布里渊频移量更容易确定引起的。综合分析可知, 当奇异值叠加数取  $n \geq 150$  时可以获得较好的光谱拟合度和温度反演结果。然而, 在反卷积方法的实际应用过程中, 不仅要考虑参数反演结果的准确性和理论光谱与测量光谱之间的误差等因素, 还要考虑数据处理所用的时间问题。因此, 图 3 给出了使用不同奇异值叠加数的反卷积方法

实现温度反演所用的时间。

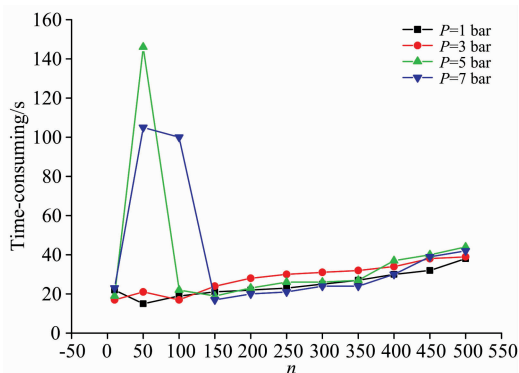


图 3 不同奇异值叠加数的反卷积方法实现温度反演所用的时间

Fig. 3 The time consumption of retrieving temperature using deconvolution method for different singular value stacking numbers

从图 3 可知不同奇异值叠加数的反卷积方法对空气压强为 1, 3, 5 和 7 bar 的理论瑞利-布里渊光谱处理所用时间变化明显且在  $n$  为 150 附近存在较小值。综合考虑图 2 和图 3 的结果, 按照理论温度反演误差小于 1 K, 光谱拟合误差相对较小, 光谱处理时间短的原则, 在利用反卷积方法对测量光谱进行处理时, 取 150 作为优化后的奇异值叠加数。

## 2 实验及数据处理分析

本实验装置图可参考文献[9, 11, 17], 这里仅对其做简要介绍。在室温 294.0 K 的条件下, 利用 532 nm 的连续激光在充入纯净空气的散射池中激发自发瑞利-布里渊散射, 散射池为带有布儒斯特窗的梯形形状并与高精度数字压力表 (KY2010) 相连接对散射池内压力实时显示, 散射池窗片双面都镀有增透膜。实验中, 测量散射角为近  $90^\circ$  方向的瑞利-布里渊散射信号, 利用 F-P 扫描干涉仪 (自由光谱范围 FSR 是 10 GHz) 实现信号鉴频, 采用光子探测器 (SPCM-AQRH-14, Perkin-Elmer) 对信号探测, 使用光子计数卡 (P7882, Fast ComTech) 进行数据采集由计算机对采集数据存储。

根据布里渊频移表达式  $\Delta\nu_b = \pm \frac{2nV}{\lambda} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$  ( $n$  为气体

介质的折射率,  $V = \sqrt{\gamma RT/m}$  为声速,  $\gamma$  为理想气体比热容,  $R$  是气体常数,  $T$  为气体温度,  $m$  为气体分子质量,  $\theta$  为散射角) 可知, 在利用瑞利-布里渊散射实现温度反演测量时, 探测信号散射角的不确定度会对温度测量带来明显的误差, 误差表达式为

$$\Delta T = \frac{\Delta\theta}{\tan(\theta/2)} T \quad (3)$$

在温度为 294.0 K 时, 假定实际散射角为 1.571 rad ( $90^\circ$ ), 根据式 (3) 计算可得散射角不确定度  $\Delta\theta$  为 0.017 rad ( $1^\circ$ ) 引起的温度反演误差约为 5.0 K。因此在对温度进行反演测量前, 对散射角进行优化非常重要。当瑞利-布里渊散射理论模型中的其他参数固定, 只有散射角作为自由参数时, 由  $\chi^2$  描

述的理论模型光谱与实验测量光谱之间的误差是散射角的函数,当  $\chi^2$  取得最小值时对应的散射角即为优化散射角(最小  $\chi^2$  值原理)。 $\chi^2$  的表达式为

$$\chi^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{[I_c(f_i) - I_m(f_i)]^2}{\sigma_i(f_i)^2} \quad (4)$$

式中  $I_c(f_i)$  和  $I_m(f_i)$  分别为卷积后的 Tenti S6 模型的光谱强度和实验测量的瑞利布里渊散射光谱强度,  $\sigma_i(f_i)$  为实验的系统误差,包括背景噪声和探测器的暗计数,  $N$  为独立频率样本数。

我们将空气压强为 5 bar 时测量的自发瑞利-布里渊散射光谱与 F-P 传递函数卷积后的 Tenti S6 模型光谱比较并结合最小  $\chi^2$  值原理对散射角进行优化。图 4 给出了散射角的优化过程。

从图 4 中可以看出随着散射角的变化  $\chi^2$  明显有一个最小值,该最小值对应的散射角  $90.7^\circ$  即为优化值,因此将该角度作为已知参数输入到 Tenti S6 模型中。

为了进一步从实验上验证利用反卷积方法实现空气温度反演的准确性,实验测量了空气在温度为 294.0 K,压强为

1~7 bar 下的自发瑞利-布里渊散射光谱,并分别利用反卷积方法和卷积方法对测量光谱进行处理实现空气温度的反演测量,其中在反卷积方法中采用了理论优化后的奇异值叠加数。图 5 中分别给出了两种方法的频谱比较图以及误差,其

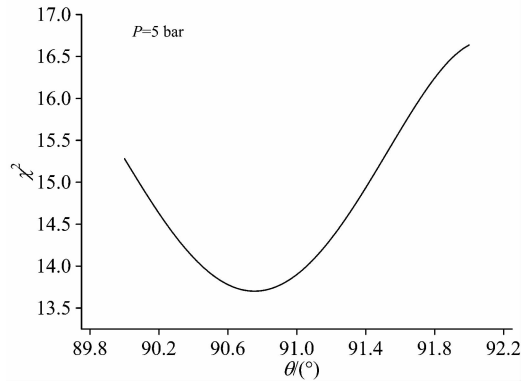
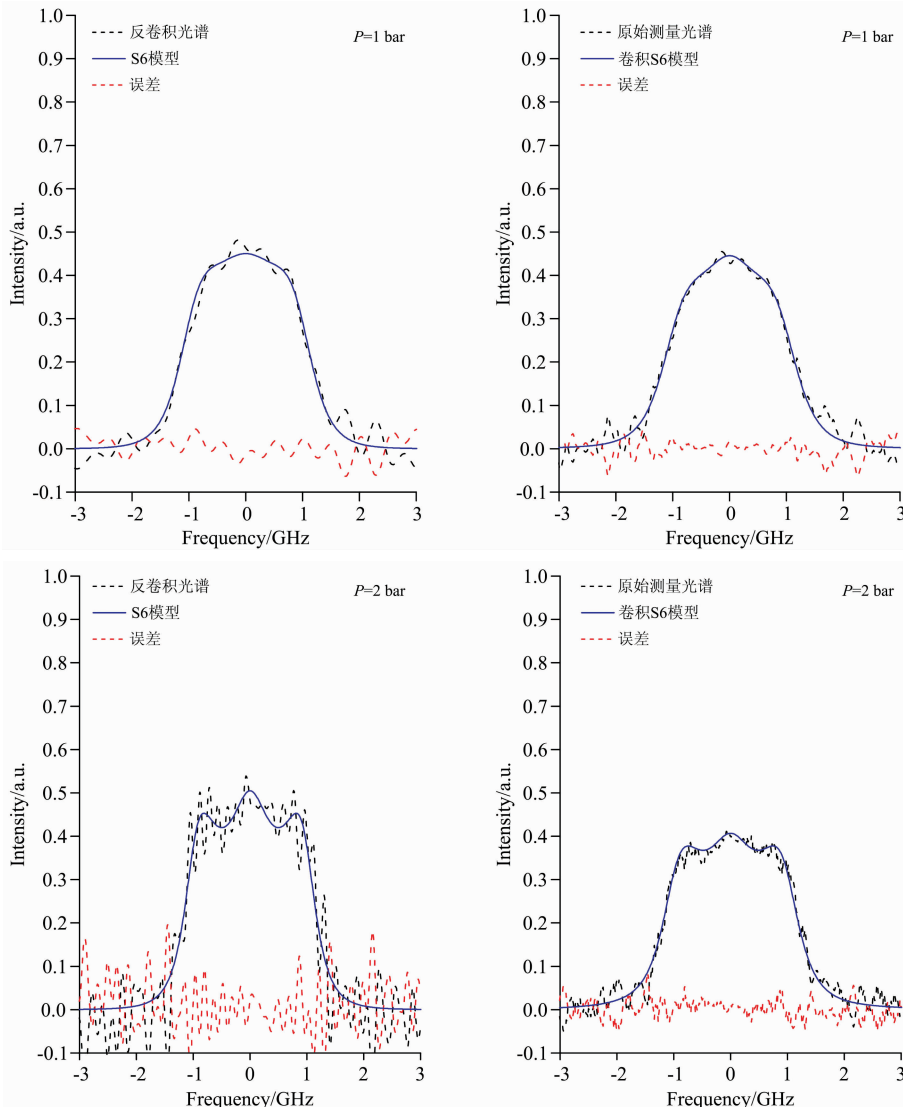
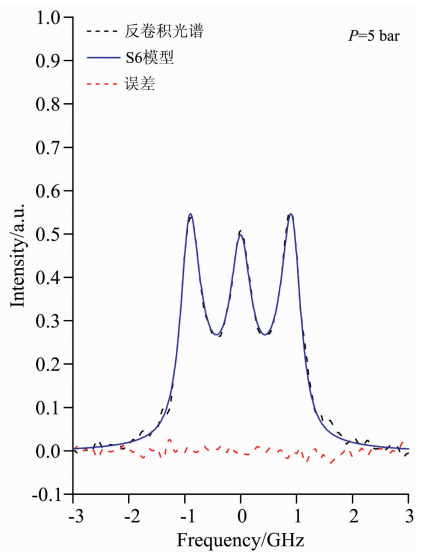
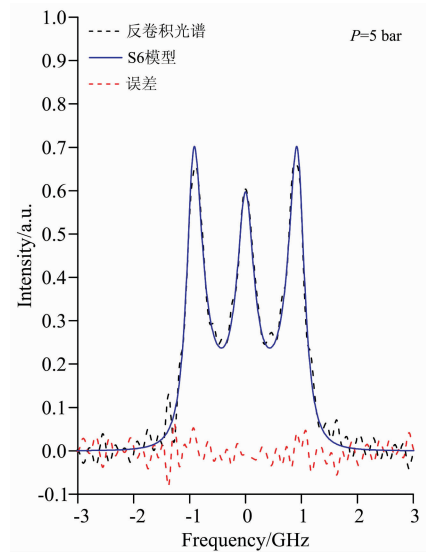
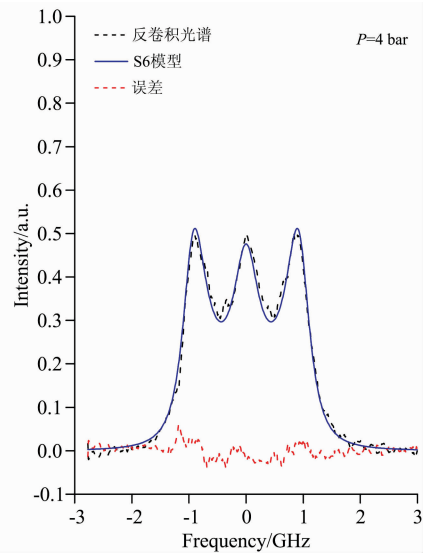
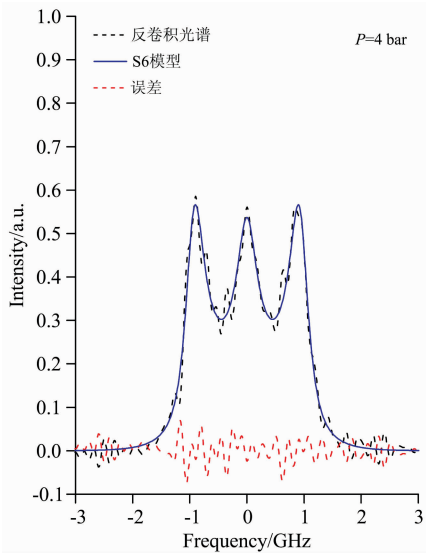
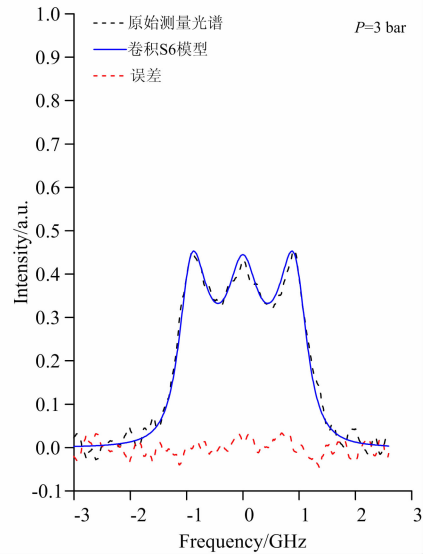
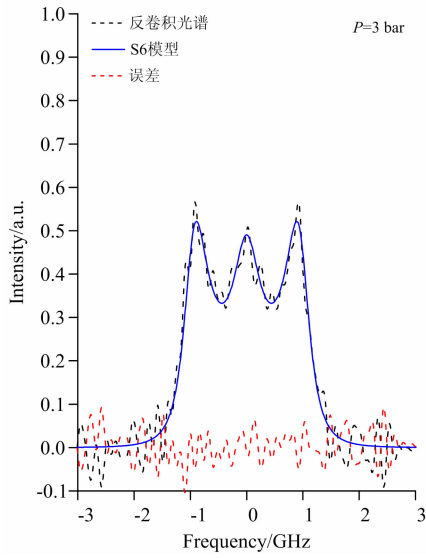


图 4 利用最小  $\chi^2$  值原理优化散射角  
Fig. 4 Optimization of scattering angle by the principle of minimum value of  $\chi^2$





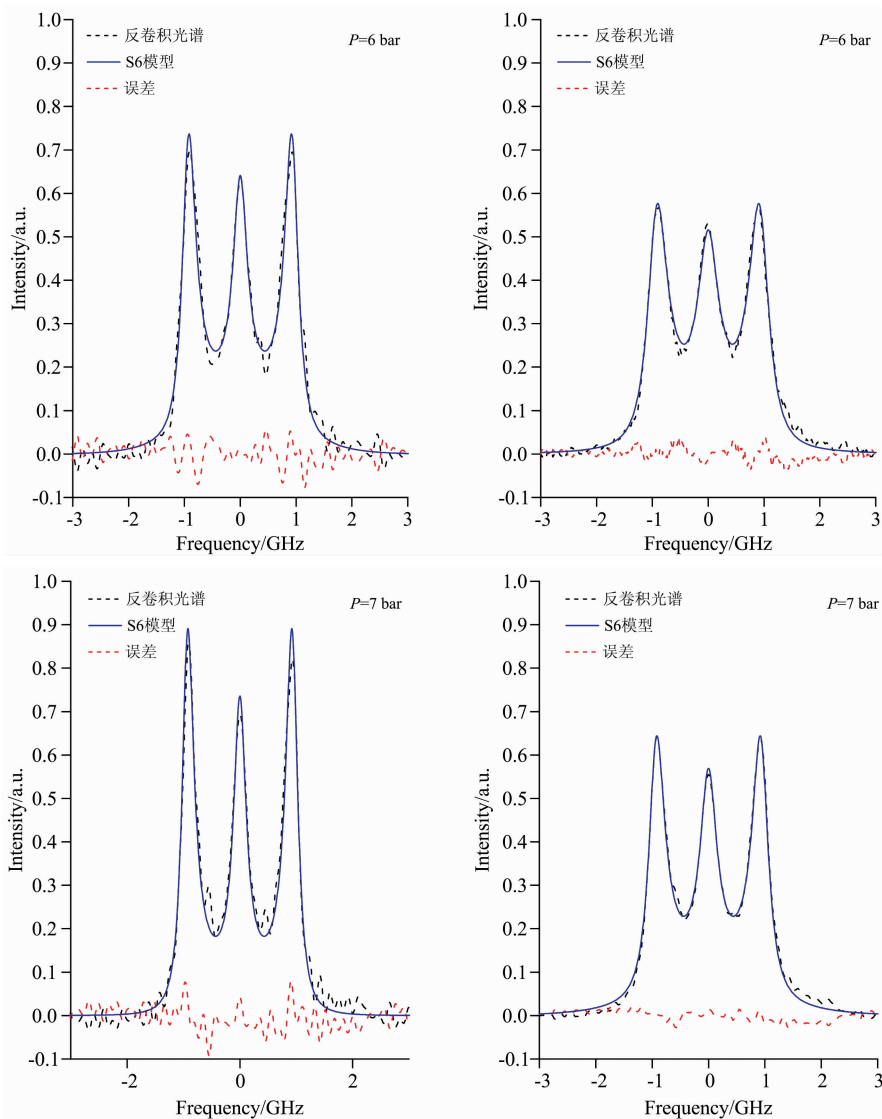


图 5 左列：理想 S6 模型（蓝色实线）和反卷积光谱（黑色虚线）的比较及两者之间的误差（红色虚线）；右列：卷积 S6 模型（蓝色实线）和原始测量光谱（黑色虚线）的比较及两者之间的误差（红色虚线）

Fig. 5 Left column: the comparison between the ideal S6 model (blue line) and deconvolved spectrum (black short dashline), and error between them (red short dashline); right column: the comparison between convolved S6 model (blue line) and original measurement spectrum (black short dash line) and error between them (red short dashline)

中左列为理想 Tenti S6 模型（蓝色实线）和反卷积光谱（黑色虚线）的比较及两者之间的误差（红色虚线）；右列为卷积 Tenti S6 模型（蓝色实线）和原始测量光谱（黑色虚线）的比较及两者之间的误差（红色虚线）。

从图 5 中可以看出，在较宽的压力范围（1~7 bar）内，反卷积方法和卷积方法都能够将测量光谱和理论光谱较好的吻合，而且反卷积方法能够很好的提高瑞利-布里渊散射光谱分辨率，这将有利于参数的准确测量，反卷积方法中理论光谱和反卷积光谱之间的 RMSE 处在 2.0%~7.0%，平均 RMSE 为 3.41%，卷积方法中理论光谱和实验测量光谱之间的 RMSE 处在 0.9%~2.5%，平均 RMSE 为 1.31%，结果表明后者的光谱吻合度优于前者。反卷积光谱的不平滑是引

起前者较大 RMSE 的主要原因，该不平滑性主要是由反卷积过程对光谱噪声非线性放大引起的。

利用两种方法反演得到空气在压强为 1~7 bar 下的温度以及与实际温度的绝对误差和反演温度时的光谱处理时间如图 6 所示。

从图 6(a)中可以看出，利用反卷积方法和卷积方法反演得到的温度与实际温度的最大绝对误差分别为 1.7 和 1.2 K，平均绝对误差分别为 0.9 和 0.7 K，由卷积方法获得温度反演结果在空气压强不大于 2 bar 时要优于反卷积方法获得的结果，而在空气压强大于 2 bar 时两种方法的温度反演结果较为一致。引起两种方法温度反演误差的原因主要包括环境温度的波动（±0.2 K），散射角存在一定的不确定度以及

气体的各已知参数的微量偏差对温度测量结果的影响。该结果表明两种方法都可以实现温度的测量,但反卷积方法在高压( $\geq 4$  bar)下的温度反演结果要优于低压( $< 4$  bar)条件下的结果。这与图 2 中的理论仿真结果[图 2(a)插图]相吻合,主要是由于在低压下的测量光谱信噪比较差,反卷积方法对光谱噪声非线性放大影响光谱线型产生的结果。从图 6(b)中可以看出,利用反卷积方法对实际测量光谱处理并实现温度反演所用的光谱处理时间随着压强的增加而明显减少并逐渐接近于图 3 中给出的在奇异值叠加数为 150 时对理论仿真谱

的处理时间(20 秒左右),但比卷积方法所用时间( $< 10$  s)长。这是因为在利用反卷积方法对原始测量光谱进行处理时会对光谱噪声进行非线性放大,放大的噪声使得到的反卷积光谱比实验原始测量光谱的不平滑性更加明显,该结果也可以从图 5 中看出,而这种不平滑性增加了理想 Tenti S6 模型与反卷积光谱拟合时间,但随着压强的增加,测量光谱的信噪比提高降低了这种非线性放大效应的影响。因此,在实验中可以通过提高测量光谱的信噪比来减少反卷积方法的光谱处理时间并提高参数测量结果的准确性。

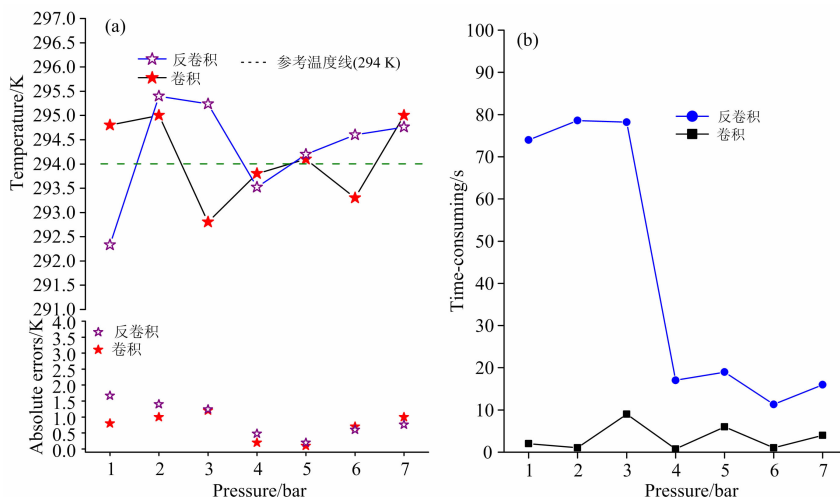


图 6 (a) 不同压力下反卷积和卷积方法的温度反演结果及与实际温度的绝对误差;  
(b) 反卷积和卷积方法反演温度时的光谱处理时间

Fig. 6 (a) the temperature retrieving results by deconvolution and convolution method at different pressures and the absolute error between the retrieved temperature and actual temperature; (b) spectral processing time using deconvolution and convolution method under different pressures

### 3 结论

在理论上对反卷积方法进行了分析,并利用反卷积方法对空气在 294.0 K,压强分别为 1, 3, 5 和 7 bar 下的自发瑞利-布里渊散射的卷积仿真光谱进行了处理,发现奇异值叠加数对反卷积光谱线型、温度反演结果、光谱处理时间具有明显的影响,因此对反卷积的奇异值叠加数进行了优化,优化值为 150。同时,实验测量了与理论仿真条件相对应的压强为 1~7 bar 下空气的自发瑞利-布里渊散射光谱,并分别利用反卷积和卷积方法实现温度反演。结果表明,反卷积方法和卷积方法反演得到的温度与实际温度的最大误差分别为 1.7 和 1.2 K,平均绝对误差分别为 0.9 和 0.7 K,表明两种方法都可以实现温度的准确测量,但反卷积方法的光谱处理

时间、均方根误差值比卷积方法大,这主要是反卷积方法在采用奇异值截断法时对光谱噪声非线性放大引起的。同时,卷积方法在空气压强不大于 2 bar 条件下的温度反演结果精度比反卷积方法更高,随着压强的增加,两种方法的温度反演结果较为一致;反卷积方法在高压( $\geq 4$  bar)下的温度反演结果要优于低压( $< 4$  bar)的结果,且最大温度误差小于 2.0 K,该结果在实际高温环境的气体参数测量及大气激光雷达探测等方面的应用中可以接受的。比较结果表明两种方法都可以在较宽的压力范围下实现气体温度参数的测量,在大气布里渊激光雷达探测和在高温高压环境下航天飞机主引擎的状态监测及超燃发动机燃烧室温度参数的测量等方面具有重要的应用价值。引起温度反演误差的原因主要包括环境温度波动、散射角的不确定度、气体的各已知参数的微量偏差以及反卷积对光谱噪声的非线性放大引起的光谱扰动。

### References

- [1] Alpers M, Eixmann R, Frickebegemann C, et al. *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*, 2004, 4(1): 793.
- [2] Macintyre R, Tan T, Heywood A, et al. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2008, 8(2): 7569.
- [3] Behrendt A, Reichardt J. *Applied Optics*, 2000, 39(9): 1372.
- [4] Witschas B. *Research Topics in Aerospace*, 2012: 69.
- [5] Seasholtz R G. *Structural Integrity and Durability of Reusable Space Propulsion Systems*, 1991: 21.

- [6] Witschas B, Lemmerz C, Reitebuch O. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 1972.
- [7] Witschas B, Gu Z, Ubachs W. *Optics Express*, 2014, 22(24): 29655.
- [8] Gu Z, Witschas B, van de Water W, et al. *Applied Optics*, 2013, 52(19): 4640.
- [9] SHANG Jing-cheng, WU Tao, HE Xing-dao, et al(商景诚, 吴涛, 何兴道, 等). *Acta Physica Sinica(物理学报)*, 2018, 67(3): 037801.
- [10] Gerakis A, Shneider M N, Stratton B C. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(3): 031112.
- [11] WU Tao, SHANG Jing-cheng, HE Xing-dao, et al(吴涛, 商景诚, 何兴道, 等). *Acta Physica Sinica(物理学报)*, 2018, 67(7): 077801.
- [12] Gu Z, Ubachs W. *Journal of Chemical Physics*, 2014, 141(10): 375.
- [13] Vieitez M O, van Duijn E J, Ubachs W, et al. *Physical Review A*, 2010, 82: 043836.
- [14] Gu Z, Ubachs W. *Optics Letters*, 2013, 38(7): 1110.
- [15] Shneider M N, Pan X. *Physical Review A*, 2005, 71(4): 45801.
- [16] Meijer A S, de Wijn A S, Peters M F, et al. *Journal of Chemical Physics*, 2010, 133(16): 164315.
- [17] Wu T, Shang J C, Yang C Y, et al. *AIP Advances*, 2018, 8(1): 015210.
- [18] Boyd R W. *Nonlinear Optics*. 2nd ed. New York: Academic Press, 2003.
- [19] Fabelinskii I L. *Molecular Scattering of Light*. New York: Springer, 1968.
- [20] Boley C D, Desai R C, Tenti G. *Canadian Journal of Physics*, 1972, 50(18): 2158.
- [21] Tenti G, Boley C D, Desai R C. *Canadian Journal of Physics*, 1974, 52(4): 285.
- [22] White F M. *Viscous Fluid Flow*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2006. 287.
- [23] Witschas B, Lemmerz C, Reitebuch O. *Applied Optics*, 2012, 51(25): 6207.
- [24] Golub G H, Reinsch C. *Numerische Mathematik*, 1970, 14(5): 403.
- [25] Henry E R, Hofrichter J. *Methods in Enzymology*, 1992, 210(1): 129.
- [26] Hansen P C. *Society for Industrial and Applied Mathematics*, 1990, 11(3): 503.

## The Temperature Measurement of Air Based on Spontaneous Rayleigh-Brillouin Scattering

SHANG Jing-cheng<sup>1</sup>, WU Tao<sup>1\*</sup>, YANG Chuan-yin<sup>1</sup>, MAO Qi-bo<sup>2</sup>, HE Xing-dao<sup>1</sup>

1. Jiangxi Engineering Laboratory for Optoelectronic Testing Technology, National Engineering Laboratory for on-Destructive Testing and Optoelectronic Sensing Technology and Application, School of Measuring and Optical Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China
2. School of Aircraft, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China

**Abstract** The scattering cross section of Rayleigh-Brillouin is bigger than that of Raman scattering and it hence has an advantage in accurate tropospheric temperature profiling measurement. Moreover, accurate measurement of temperature under high pressure environment using Rayleigh Brillouin scattering is of great significance to monitoring of Space Shuttle Main Engine (SSME) Preburner and the scramjet engine. Both the deconvolution method and the convolution method are used to achieve the temperature retrieving of air under different pressures based on the spontaneous Rayleigh-Brillouin scattering. And the reasons induced the temperature retrieval error are studied and a comparison of temperature measurement between the two methods is made. Before the deconvolution method based on Wiener filter being performed on the measured spectrum directly, the convolved spectra between the spontaneous Rayleigh-Brillouin scattering model and instrument transmission function are deconvolved to obtain the deconvolved spectra and the deconvolved spectra are compared with the theoretical calculation spectra to retrieve temperatures. And the optimized singular value stacking number being 150, which is the key parameter of the deconvolution method, is obtained on account of temperature retrieval error being less than 1.0 K, the relatively unobvious fitting error and the short time consumption of retrieving temperature. And the spontaneous Rayleigh-Brillouin scattering spectra of air induced by the wavelength of 532nm of laser under the pressure of 1~7 bar at the temperature of 294.0 K are measured in experiment and the optimized scattering angle of 90.7° is obtained by the combination of theoretical spectrum and the principle of minimum value of  $\chi^2$ . After that, the deconvolution method and the convolution method are used to retrieve temperatures severally. Experiment results demonstrate that the spectral resolution is improved by using deconvolution method to some extent. Meanwhile, both the deconvolution method and the convolution method have good performance on temperature measurement under different pressures and



the maximum errors between the retrieved temperature and the reference temperature are less than 2.0 K, temperature retrieving results of the deconvolution method are improved and time consumption of retrieving temperature is reduced with the pressure increasing, and temperature retrieving results using convolution method are better than those using the deconvolution method when the air pressure is low ( $\leq 2$  bar), however, the results of both methods are close to each other and the absolute temperature errors are less than 1.0 K when the air pressure is high ( $> 2$  bar). By analysis, it is found that the factors causing the temperature retrieval errors for both methods include the temperature fluctuations ( $\pm 0.2$  K), the effect of uncertainty of scattering angle and the known parameters on temperature retrieving and the spectral disturbances caused by the nonlinear amplification of spectral noise of deconvolution method. The parameter measurement result can be improved in experiment by improving the signal-to-noise ratio of measured spectrum, the accuracy of optimized scattering angle and the deconvolution method.

**Keywords** Atmospheric scattering; Brillouin scattering; Rayleigh scattering; Deconvolution

\* Corresponding author

(Received Aug. 7, 2018; accepted Dec. 29, 2018)

## 第 21 届全国分子光谱学学术会议暨 2020 年光谱年会 (第一轮通知)

由中国光学学会和中国化学会主办的“第 21 届全国分子光谱学学术会议”暨由中国光学学会光谱专业委员会主办的“2020 年光谱年会”将于 2020 年 5 月 15—18 日在成都召开,会议由四川大学分析测试中心承办。

本次大会将秉承前 20 届分子光谱学学术会议之宗旨,以期形成自由研讨的学术氛围,让思想撞击出火花,使创造力泉涌。本次大会也将是我国光谱科学工作者的又一次盛会,将全力展示我国在光谱及相关领域的最新研究进展及取得的成果,增进广大光谱科学工作者及其支持光谱事业人们间的交流与合作,促进我国光谱事业的发展。届时大会组委会将邀请国内外光谱及相关领域的院士、知名专家学者到会作大会报告,同时会议还将组织各类专题讨论和学术交流。

### 征文范围

分子光谱理论研究,红外光谱、拉曼光谱、荧光光谱、磷光光谱、紫外-可见吸收光谱、化学发光等光谱技术在物理、化学、生物、材料科学、表面/界面科学、医药、环境、工业过程、催化学、地学、农林及其他领域的基础理论与应用研究的最新科研成果。

原子光谱、激光光谱、光谱成像等各类光谱技术的最新理论和应用研究成果,同时也欢迎光谱相关技术(如质谱、核磁共振等)的最新应用和研究成果。

### 论文摘要要求

1. 论文内容必须是未在期刊杂志上发表过或其他全国或国际会议宣读过的。
2. 提交论文扩展摘要 1 份,纸张大小用 A4 纸版式(用 Office word 软件排版,页边距为 2 cm,单倍行距)。
3. 扩展摘要按以下顺序排版:文题(三号黑体居中);作者(四号仿宋居中);单位(小四号宋体居中,含所在省市、邮政编码、电子邮址(如有));论文的创新性,研究意义与结果(五号宋体);关键词和主要参考文献(自版芯左起,五号宋体)。文稿中可穿插主要论据的图、表和照片,图题、图注和表题、表注一律用英文表述。摘要的字数,包括图、表,参考文献,总共不能超过 2 个页面。
4. 具体投稿要求可参看模板及《光谱学与光谱分析》征稿简则。稿件一经录用,将由《光谱学与光谱分析》以增刊或会议论文集形式发表。论文摘要模板请参考: <http://www.sinospectroscopy.org.cn/uploads/newsfile/20110928105323.doc>
5. 论文摘要截稿日期:2019 年 12 月 30 日。

### 论文摘要提交方式

欢迎大家通过网站提交论文,请您注册登陆中国光谱网(<http://www.sinospectroscopy.org.cn>),在主页会议会展栏目下本次会议通道,点击会议投稿按提示要求上传您的论文摘要。论文摘要将采用网上评审的方式,你可在网上浏览对您论文的评审结果和修改意见。若通过电子邮件方式提交论文,请发往: [atcpubs@scu.edu.cn](mailto:atcpubs@scu.edu.cn)。

fore, first, HOBC can dramatically compress data. Meanwhile, its coding sequence can retain more information and have higher spectral separability, which can be used for fast identification and classification of spectra with high accuracy. At last, its decoding reconstruct data can also be used for the applications of target recognition and classification etc., theoretically, for the high similarity between the reconstruction spectra and original spectra.

**Keywords** High-order residual quantization; Spectral coding; Binary coding; Quaternary coding; DNA coding

(Received Aug. 27, 2018; accepted Feb. 10, 2019)

\* Corresponding author

(上接 3020 页)

论文摘要提交具体步骤:

1. 请您在光谱网上(<http://www.sinospectroscopy.org.cn>)用真实姓名注册,已经注册的用户,请修正和完善您的个人信息。
2. 点击光谱网会议会展栏目,选择《第 21 届全国分子光谱学学术会议暨 2020 年光谱年会》。
3. 点击会议基本情况下的会议快捷通道中的“会议投稿”。
4. 输入用户名和密码登陆,在页面下选择稿件提交。
5. 按照提示提交稿件。

### 报告形式

为充分利用会议学术交流的效率,会议仍采用“口头报告”和“墙报展示”两种方式进行学术交流。无论是口头报告还是墙报展示,均属大会同等学术交流。为尊重个人意见和便于组委会的安排,请大家在会议注册时,提交“口头报告”或“墙报”的题目。为了鼓励博士、硕士研究生积极参与学术交流活动,本次会议将继续设立“优秀青年论文奖”和“优秀墙报奖”,表彰那些研究水平高、能突出研究内容要点、条理清晰的“口头报告”和“墙报”,大会将给获奖作者颁发优秀论文证书和奖金。同时会议还将邀请国内外知名专家学者就光谱有关学术领域的前沿热点问题作大会报告和主题报告。

主要报告形式有:

1. 大会邀请报告:主要邀请国内外知名专家学者报告光谱分析的前沿技术在各个领域的最新研究进展。
2. 主题邀请报告:本次会议将选择光谱技术的热点应用领域,开设多个专题论坛,邀请在该领域的知名专家作论坛主题报告。
3. 青年论坛报告:为博士、硕士研究生开设交流平台,并评选“优秀青年论文奖”。
4. 口头报告和墙报展示:作为本次会议的主要交流和展示形式。会议统一安排墙报讲解时间,希望作者按时到位讲解。

### 重要时间

论文截稿日期:2019 年 12 月 30 日

第二轮会议通知:2019 年 10 月(开通会议注册系统)

第三轮会议通知:2020 年 4 月

会议召开期:2020 年 5 月 15—18 日

会议组织机构、注册费及缴纳方式、宾馆住宿介绍及住房预定等信息近期将在会议主页上发布,请您经常浏览光谱网上会议主页,了解会议筹备情况和会议具体安排。网址:<http://www.sinospectroscopy.org.cn>

### 产品展示

会议热忱邀请国内外仪器厂商前来展示分子光谱(红外、近红外、拉曼、荧光等)、原子光谱等各类光谱仪以及质谱、核磁等其他相关仪器设备。我们将在本次会议的网站和会议现场提供展出场所,希望各厂商充分利用这次机会展示自己的最新产品。

(下转 3027 页)