



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105548072 A

(43) 申请公布日 2016. 05. 04

(21) 申请号 201510886059. X

(22) 申请日 2015. 12. 04

(71) 申请人 东南大学

地址 210096 江苏省南京市玄武区四牌楼 2 号

(72) 发明人 周宾 程禾尧 李可 许康

(74) 专利代理机构 南京苏高专利商标事务所 (普通合伙) 32204

代理人 李倩

(51) Int. Cl.

G01N 21/39(2006. 01)

G01K 11/00(2006. 01)

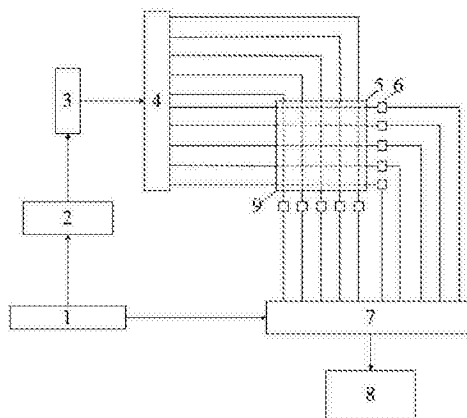
权利要求书4页 说明书9页 附图3页

(54) 发明名称

一种同时测量高温气体二维瞬态温度场和浓度场的方法

(57) 摘要

本发明公开了一种结合超光谱与波长调制来同时测量高温气体二维瞬态温度场和浓度场的方法,该方法通过在待测高温区域布置激光阵列,对待测区域进行超光谱扫描,获得水蒸气吸收谱线信息,并使用数字锁相技术解调得到其各次谐波信号,然后对其进行扣除背景的一次谐波归一化处理,提取信号的最大幅值,来进行区域温度场和水蒸气浓度场的测量,测量过程中,需要对待测区域进行网格离散化处理,通过在网格各行、各列分别布置激光束,对待测气体的特征谱线进行波长调制方式下的宽光谱扫描,借助智能寻优算法实现对温度场、气体浓度场的反演。本发明的测量方法结合了超光谱与波长调制光谱技术,特别适用于在恶劣的工业现场实现高温气体二维温度场和浓度场的监测。



1.一种同时测量高温气体二维瞬态温度场和浓度场的方法,其特征在于,包括如下操作步骤:

步骤一,测量信号的采集:

首先,待测二维区域的形状为 $L \times D$ 的矩形区域,根据待测二维区域的形状和大小,同时结合温度、气体组分浓度的空间分辨率要求,对待测二维区域进行网格离散化,划分成 $M \times N$ 的网格,每个网格分别对应一个温度和浓度待测值,总的待测值数目为 $2 \times M \times N$ ;

其次,根据上述待测值的数目,从HITRAN数据库中选择 $I$ 条相应气体的特征吸收谱线,其中 $I \geq \lceil 2 \times M \times N / (M + N) \rceil$ ,并提取各谱线在参考温度下线强度 $S(T_0)$ 、跃迁低态能级 $E''$ 、分子配分函数 $Q(T)$ 的系数 $[a, b, c, d]$ ,第 $r$ 条特征吸收谱线的中心波长记为 $\lambda_r$ ;其中, $r$ 取值为 $1 \sim I$ 中的整数;

然后,由主时钟控制函数发生器产生周期性的低频扫描信号,同时叠加周期性的高频驱动信号,加载到由傅里叶域锁模激光器组成的激光器系统上,以调制激光器的输出频率,激光器系统产生的激光束通过单模光纤传输,经复用器输出 $M+N$ 个信道的激光束,其中 $M$ 条激光束实现对待测区域每行进行扫描, $N$ 条激光束对待测区域每列进行扫描;

最后,使用激光穿过用氮气吹扫的待测区域,得到 $M$ 个行背景光强,记为 $I_0(i)$ ,得到 $N$ 个列背景光强,记为 $I_0(j)$ ,然后将调制后的激光穿过待测高温区域,经气体吸收后的激光由光电探测器检测到相应的 $M$ 个行透射光强,记为 $I_t(i)$ , $N$ 个列透射光强,记为 $I_t(j)$ ,数据采集卡对光电探测器输出信号进行采集,并将实验数据保存在计算机以便进行后期处理;其中, $i$ 取值为 $1 \sim M$ 中的整数, $j$ 取值为 $1 \sim N$ 中的整数;

步骤二,测量信号处理,获取测量信号峰值:

经过数字锁相、低通滤波过程处理测量的背景光强、透射光强,并对其进行扣除背景的一次谐波归一化处理,提取测量谐波信号在第 $r$ 条特征吸收谱线处的峰值,记为 $p_{i,r}, p_{j,r}$ ;

步骤三,仿真信号处理,获取仿真信号峰值:

假设待测区域初始温度场、浓度场分布,计算得到仿真的透射光强,并对仿真透射光强进行参数设置相同的数字锁相、低通滤波过程,得到仿真的扣除背景后经一次谐波归一化的二次谐波信号,提取仿真谐波信号在第 $r$ 条特征吸收谱线处的峰值,记为 $K_{i,r}, K_{j,r}$ ;

步骤四,二维瞬态温度场、浓度场的求解:

使用测量信号峰值 $p_{i,r}, p_{j,r}$ 与仿真信号峰值 $K_{i,r}, K_{j,r}$ 之间的相对偏差作为目标函数进行迭代寻优计算,迭代直至目标函数收敛为止,其目标函数如下:

$$D(X, T) = \sum_{r=1}^I \sum_{i=1}^M \frac{(K_{i,r} - p_{i,r})^2}{K_{i,r}^2} + \sum_{r=1}^I \sum_{j=1}^N \frac{(K_{j,r} - p_{j,r})^2}{K_{j,r}^2} \quad (1);$$

式中, $X, T$ 为迭代计算出的浓度场、温度场, $D(X, T)$ 为实际测量信号峰值 $p_{i,r}, p_{j,r}$ 与仿真信号峰值 $K_{i,r}, K_{j,r}$ 之间的偏差。

2.根据权利要求1所述同时测量高温气体二维瞬态温度场和浓度场的方法,其特征在于,所述步骤二的具体处理步骤为:

首先使用数字锁相技术处理背景光强 $I_0(i), I_0(j)$ 和实际测量的透射光强 $I_t(i), I_t(j)$ ,分别得到信号第 $i$ 行、第 $j$ 列处 $n$ 次谐波的 $x$ 分量和 $y$ 分量展开式,展开式如式(2)所示,其中, $n$ 取值为1或2:

$$\begin{aligned}
x_{nf}^0(i) &= I_0(i) \cdot \cos(n \cdot 2\pi f_m t) & y_{nf}^0(i) &= I_0(i) \cdot \sin(n \cdot 2\pi f_m t) \\
x_{nf}^0(j) &= I_0(j) \cdot \cos(n \cdot 2\pi f_m t) & y_{nf}^0(j) &= I_0(j) \cdot \sin(n \cdot 2\pi f_m t) \\
x_{nf}(i) &= I_t(i) \cdot \cos(n \cdot 2\pi f_m t) & y_{nf}(i) &= I_t(i) \cdot \sin(n \cdot 2\pi f_m t) \\
x_{nf}(j) &= I_t(j) \cdot \cos(n \cdot 2\pi f_m t) & y_{nf}(j) &= I_t(j) \cdot \sin(n \cdot 2\pi f_m t)
\end{aligned} \tag{2};$$

其次,经低通滤波器提取各信号的谐波分量,如式(3)所示:

$$\begin{aligned}
X_{nf}^0(i) &= \text{lowpass filter}(x_{nf}^0(i)) & Y_{nf}^0(i) &= \text{lowpass filter}(y_{nf}^0(i)) \\
X_{nf}^0(j) &= \text{lowpass filter}(x_{nf}^0(j)) & Y_{nf}^0(j) &= \text{lowpass filter}(y_{nf}^0(j)) \\
X_{nf}(i) &= \text{lowpass filter}(x_{nf}(i)) & Y_{nf}(i) &= \text{lowpass filter}(y_{nf}(i)) \\
X_{nf}(j) &= \text{lowpass filter}(x_{nf}(j)) & Y_{nf}(j) &= \text{lowpass filter}(y_{nf}(j))
\end{aligned} \tag{3};$$

得到的第*i*行、第*j*列处背景光强信号和透射光强信号的幅值,可以分别表示为式(4):

$$\begin{aligned}
R_{nf}^0(i) &= \sqrt{(X_{nf}^0(i))^2 + (Y_{nf}^0(i))^2} \\
R_{nf}^0(j) &= \sqrt{(X_{nf}^0(j))^2 + (Y_{nf}^0(j))^2} \\
R_{nf}(i) &= \sqrt{(X_{nf}(i))^2 + (Y_{nf}(i))^2} \\
R_{nf}(j) &= \sqrt{(X_{nf}(j))^2 + (Y_{nf}(j))^2}
\end{aligned} \tag{4};$$

最后,对得到的第*i*行和第*j*列谐波信号,分别进行扣除背景的一次谐波归一化处理,得到:

$$S_{2f/1f}(i) = \sqrt{\left[ \left( \frac{X_{2f}(i)}{R_{1f}(i)} \right) - \left( \frac{X_{2f}^0(i)}{R_{1f}^0(i)} \right) \right]^2 + \left[ \left( \frac{Y_{2f}(i)}{R_{1f}(i)} \right) - \left( \frac{Y_{2f}^0(i)}{R_{1f}^0(i)} \right) \right]^2} \tag{5};$$

$$S_{2f/1f}(j) = \sqrt{\left[ \left( \frac{X_{2f}(j)}{R_{1f}(j)} \right) - \left( \frac{X_{2f}^0(j)}{R_{1f}^0(j)} \right) \right]^2 + \left[ \left( \frac{Y_{2f}(j)}{R_{1f}(j)} \right) - \left( \frac{Y_{2f}^0(j)}{R_{1f}^0(j)} \right) \right]^2} \tag{6};$$

记 $S_{2f/1f}(i)$ 、 $S_{2f/1f}(j)$ 在第*r*条特征吸收谱线处的信号分别为 $S_{2f/1f}(i, \lambda_r)$ 、 $S_{2f/1f}(j, \lambda_r)$ ,其中,*r*取值为1~*I*中的整数,然后分别提取各条谱线扣除背景的一次谐波归一化的二次谐波信号的峰值,记为 $p_{i,r}$ 、 $p_{j,r}$ :

$$\begin{aligned}
p_{i,r} &= \max \left[ S_{2f/1f}(i, \lambda_r) \right] \\
p_{j,r} &= \max \left[ S_{2f/1f}(j, \lambda_r) \right]
\end{aligned} \tag{7}。$$

3. 根据权利要求1所述同时测量高温气体二维瞬态温度场和浓度场的方法,其特征在于,所述步骤三的具体处理步骤为:

首先,采用各行、各列网格的待测温度、气体浓度离散值,结合Beer-Lambert定律,对于第*r*条激光,其中,*r*取值为1~*I*中的整数,穿过待测区域得到的气体吸光度为:

$$\alpha(i,r) = P \cdot \Delta d \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^I X_{i,j} S(T_{i,j}, \lambda_r) \phi(\lambda_k - \lambda_r) \quad i = 1, 2, \dots, M; \quad (8);$$

$$\alpha(j,r) = P \cdot \Delta l \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^I X_{i,j} S(T_{i,j}, \lambda_r) \phi(\lambda_k - \lambda_r) \quad j = 1, 2, \dots, N; \quad (9);$$

式中,  $\alpha(i,r)$  是第  $r$  条谱线下第  $i$  行的吸光度,  $\alpha(j,r)$  是第  $r$  条谱线下第  $j$  列的吸光度,  $P$  为气体压力,  $X_{i,j}$  为第  $i$  行第  $j$  列单元格内的水蒸气组分浓度,  $S(T_{i,j}, \lambda_i)$  为线强在波长为  $\lambda_i$ 、温度为  $T_{i,j}$  时的值,  $\phi(\lambda_k - \lambda_r)$  为谱线  $\lambda_r$  所对应的线型函数在波长  $\lambda_k$  处的值, 根据测量环境中的温度、压力条件从 Gauss 线型、Lorentz 线型和 Voigt 线型中选择其中一种,  $\Delta d = D/M$ 、 $\Delta l = L/N$  分别为行间距和列间距;

其次, 结合气体吸光度与无吸收条件下实际测量的背景光强获取各行各列的仿真行透射光强  ${}^s I_t(i)$ 、列透射光强  ${}^s I_t(j)$ :

$$\begin{aligned} {}^s I_t(i) &= I_0(i) \cdot \exp \left[ - \sum_{r=1}^I \alpha(i,r) \right] \\ &= I_0(i) \cdot \exp \left\{ - \sum_{r=1}^I \left[ P \cdot \Delta d \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^I X_{i,j} S(T_{i,j}, \lambda_r) \phi(\lambda_k - \lambda_r) \right] \right\} \end{aligned} \quad (10);$$

$$\begin{aligned} {}^s I_t(j) &= I_0(j) \cdot \exp \left[ - \sum_{r=1}^I \alpha(j,r) \right] \\ &= I_0(j) \cdot \exp \left\{ - \sum_{r=1}^I \left[ P \cdot \Delta l \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^I X_{i,j} S(T_{i,j}, \lambda_r) \phi(\lambda_k - \lambda_r) \right] \right\} \end{aligned} \quad (11);$$

再使用数字锁相技术处理仿真透射光强  ${}^s I_t(i)$ 、 ${}^s I_t(j)$ , 得到该信号在第  $i$  行、第  $j$  列处  $n$  次谐波的  $x$  分量和  $y$  分量展开式,  $n$  取值为 1 或 2:

$$\begin{aligned} {}^s x_{nf}(i) &= {}^s I_t(i) \cdot \cos(n \cdot 2\pi f_m t) & {}^s y_{nf}(i) &= {}^s I_t(i) \cdot \sin(n \cdot 2\pi f_m t) \\ {}^s x_{nf}(j) &= {}^s I_t(j) \cdot \cos(n \cdot 2\pi f_m t) & {}^s y_{nf}(j) &= {}^s I_t(j) \cdot \sin(n \cdot 2\pi f_m t) \end{aligned} \quad (12);$$

然后, 经低通滤波器提取各信号的谐波分量:

$$\begin{aligned} {}^s X_{nf}(i) &= \text{lowpass filter}({}^s x_{nf}(i)) & {}^s Y_{nf}(i) &= \text{lowpass filter}({}^s y_{nf}(i)) \\ {}^s X_{nf}(j) &= \text{lowpass filter}({}^s x_{nf}(j)) & {}^s Y_{nf}(j) &= \text{lowpass filter}({}^s y_{nf}(j)) \end{aligned} \quad (13);$$

第  $i$  行、第  $j$  列处仿真透射光强信号的幅值可以表示为式(14):

$$\begin{aligned} {}^s R_{nf}(i) &= \sqrt{({}^s X_{nf}(i))^2 + ({}^s Y_{nf}(i))^2} \\ {}^s R_{nf}(j) &= \sqrt{({}^s X_{nf}(j))^2 + ({}^s Y_{nf}(j))^2} \end{aligned} \quad (14);$$

式中,  $f_m$  是调制频率,  ${}^s R_{nf}(i)$  是第  $i$  行透射谐波信号,  ${}^s R_{nf}(j)$  是第  $j$  列透射谐波信号; 最后, 对仿真得到的谐波信号进行扣除背景的一次谐波归一化处理, 得到下式:

$${}^s S_{2f/nf}(i) = \sqrt{\left[ \left( \frac{{}^s X_{2f}(i)}{{}^s R_{1f}(i)} \right) - \left( \frac{X_{2f}^0(i)}{R_{1f}^0(i)} \right) \right]^2 + \left[ \left( \frac{{}^s Y_{2f}(i)}{{}^s R_{1f}(i)} \right) - \left( \frac{Y_{2f}^0(i)}{R_{1f}^0(i)} \right) \right]^2} \quad (15);$$

$${}^s S_{2f/1f}(j) = \sqrt{\left[ \left( \frac{{}^s X_{2f}(j)}{{}^s R_{1f}(j)} \right) - \left( \frac{X_{2f}^0(j)}{R_{1f}^0(j)} \right) \right]^2 + \left[ \left( \frac{{}^s Y_{2f}(j)}{{}^s R_{1f}(j)} \right) - \left( \frac{Y_{2f}^0(j)}{R_{1f}^0(j)} \right) \right]^2} \quad (16);$$

记 ${}^s S_{2f/1f}(i)$ 、 ${}^s S_{2f/1f}(j)$ 在第 $r$ 条特征吸收谱线处的信号为 ${}^s S_{2f/1f}(i, \lambda_r)$ 、 ${}^s S_{2f/1f}(j, \lambda_r)$ ,其中, $r$ 取值为 $1 \sim I$ 中的整数,然后分别提取各条谱线扣除背景的一次谐波归一化二次谐波信号的峰值,记为 $K_{i,r}$ 、 $K_{j,r}$ :

$$\begin{aligned} K_{i,r} &= \max \left[ {}^s S_{2f/1f}(i, \lambda_r) \right] \\ K_{j,r} &= \max \left[ {}^s S_{2f/1f}(j, \lambda_r) \right] \end{aligned} \quad (17)。$$

## 一种同时测量高温气体二维瞬态温度场和浓度场的方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种结合超光谱与波长调制来同时测量高温气体二维瞬态温度场和浓度场的方法,属于激光吸收光谱领域。

### 背景技术

[0002] 在科学研究和工程应用中,气体在某些特定区域的温度、浓度参数是研究某些特定设备的工作过程和性能参数、测量和控制物质状态与行为、提高能源利用率的重要物理参数。实现对气体温度场、浓度场的实时有效监测对保证系统的正常运行、环保、节能和安全都具有重要意义。

[0003] 目前,气体温度测量技术主要分为两大类:接触式测量和非接触式测量。虽然接触式气体温度测量方法经过工程实践检验,在其适用范围内具有结果可信、成本低廉和使用简单等优点,但由于接触式测量过程中物理探针会侵入待测区域,进而对被测对象的温度产生影响,因此,测量结果一般需要谨慎校正;而且由于受到制作材料的限制,在高温、高压等场合均无法使用,这限制了其适用范围;再者,由于接触式测量一般进行单点温度的测量,缺乏足够的空间和时间分辨率,而众多瞬态温度场的描述需要多点非接触式测量技术,比如电厂锅炉内部的温度场分布、发动机燃烧室内的温度场分布等,这些瞬态场的分布靠接触式的单点测量是不可能完成的。相比之下,需要发展非接触式温度测量方法。非接触式测量方法克服了接触式测量方法的缺陷,具有测量仪器无需侵入待测区域、温度不受外界因素干扰等优点。

[0004] 激光吸收光谱技术是气体传感检测应用方面最为强大的工具之一,利用其高灵敏度、高光谱分辨率、快速响应性以及非侵入性的特点,基于此项技术的气体检测系统在现场测量应用方面具有显著的优势。基于直接吸收法的传统超光谱技术测量高温气体二维瞬态温度场、浓度场的方法,使用积分吸收率计算值和测量值之间的相对误差作为目标函数进行迭代寻优计算,只适用于气体浓度较大、吸收率较高、现场干扰较小、可以拟合基线的情况,然而在许多环境恶劣的工业应用场合,如流化床中的颗粒物,气化炉中的煤粉颗粒和飞灰,会发生光散射,导致非吸收性损耗较大并且时刻变化,同时由于存在谱线干扰,拟合基线存在困难。以上因素均导致基于直接吸收法的传统超光谱技术难以应用。

### 发明内容

[0005] 本发明所要解决的技术问题是提供一种结合超光谱与波长调制来同时测量高温气体二维瞬态温度场和浓度场的方法,该测量方法特别适用于在恶劣的工业现场实现高温气体二维温度场和浓度场的监测。

[0006] 为解决上述技术问题,本发明所采用的技术方案为:

[0007] 一种同时测量高温气体二维瞬态温度场和浓度场的方法,包括如下操作步骤:

[0008] 步骤一,测量信号的采集:

[0009] 首先,待测二维区域的形状为 $L \times D$ 的矩形区域,根据待测二维区域的形状和大小,

同时结合温度、气体组分浓度的空间分辨率要求,对待测二维区域进行网格离散化,划分成  $M \times N$  的网格,每个网格分别对应一个温度和浓度待测值,总的待测值数目为  $2 \times M \times N$ ;

[0010] 其次,根据上述待测值的数目,从 HITRAN 数据库中选择  $I$  条相应气体的特征吸收谱线,其中  $I \geq \lceil 2 \times M \times N / (M + N) \rceil$ ,并提取各谱线在参考温度下线强度  $S(T_0)$ 、跃迁低态能级  $E''$ 、分子配分函数  $Q(T)$  的系数  $[a, b, c, d]$ ,第  $r$  条特征吸收谱线的中心波长记为  $\lambda_r$ ;其中,  $r$  取值为  $1 \sim I$  中的整数;

[0011] 然后,由主时钟控制函数发生器产生周期性的低频扫描信号,同时叠加周期性的高频驱动信号,加载到由傅里叶域锁模激光器组成的激光器系统上,以调制激光器的输出频率,激光器系统产生的激光束通过单模光纤传输,经复用器输出  $M+N$  个信道的激光束,其中  $M$  条激光束实现对待测区域每行进行扫描,  $N$  条激光束对待测区域每列进行扫描;

[0012] 最后,使用激光穿过用氮气吹扫的待测区域,得到  $M$  个行背景光强,记为  $I_0(i)$ ,得到  $N$  个列背景光强,记为  $I_0(j)$ ,然后将调制后的激光穿过待测高温区域,经气体吸收后的激光由光电探测器检测到相应的  $M$  个行透射光强,记为  $I_t(i)$ ,  $N$  个列透射光强,记为  $I_t(j)$ ,数据采集卡对光电探测器输出信号进行采集,并将实验数据保存在计算机以便进行后期处理;其中,  $i$  取值为  $1 \sim M$  中的整数,  $j$  取值为  $1 \sim N$  中的整数;

[0013] 步骤二,测量信号处理,获取测量信号峰值:

[0014] 经过数字锁相、低通滤波过程处理测量的背景光强、透射光强,并对其进行扣除背景的一次谐波归一化处理,提取测量谐波信号在第  $r$  条特征吸收谱线处的峰值,记为  $p_{i,r}$ 、 $p_{j,r}$ ;

[0015] 步骤三,仿真信号处理,获取仿真信号峰值:

[0016] 假设待测区域初始温度场、浓度场分布,计算得到仿真的透射光强,并对仿真透射光强进行参数设置相同的数字锁相、低通滤波过程,得到仿真的扣除背景一次谐波归一化二次谐波信号,提取仿真谐波信号在第  $r$  条特征吸收谱线处的峰值,记为  $K_{i,r}$ 、 $K_{j,r}$ ;

[0017] 步骤四,二维瞬态温度场、浓度场的求解:

[0018] 使用测量信号峰值  $p_{i,r}$ 、 $p_{j,r}$  与仿真信号峰值  $K_{i,r}$ 、 $K_{j,r}$  之间的相对偏差作为目标函数进行迭代寻优计算,迭代直至目标函数收敛为止,其目标函数如下:

$$[0019] \quad D(X, T) = \sum_{r=1}^I \sum_{i=1}^M \frac{(K_{i,r} - p_{i,r})^2}{K_{i,r}^2} + \sum_{r=1}^I \sum_{j=1}^N \frac{(K_{j,r} - p_{j,r})^2}{K_{j,r}^2} \quad (1);$$

[0020] 式中,  $X$ 、 $T$  为迭代计算出的浓度场、温度场,  $D(X, T)$  为实际测量信号峰值  $p_{i,r}$ 、 $p_{j,r}$  与仿真信号峰值  $K_{i,r}$ 、 $K_{j,r}$  之间的偏差。

[0021] 其中,所述步骤二的具体处理步骤为:

[0022] 首先使用数字锁相技术处理背景光强  $I_0(i)$ 、 $I_0(j)$  和实际测量的透射光强  $I_t(i)$ 、 $I_t(j)$ ,分别得到信号第  $i$  行、第  $j$  列处  $n$  次谐波的  $x$  分量和  $y$  分量展开式,展开式如式(2)所示,其中,  $n$  取值为 1 或 2:

$$[0023] \quad x_{nf}^0(i) = I_0(i) \cdot \cos(n \cdot 2\pi f_m t) \quad y_{nf}^0(i) = I_0(i) \cdot \sin(n \cdot 2\pi f_m t)$$

$$[0024] \quad x_{nf}^0(j) = I_0(j) \cdot \cos(n \cdot 2\pi f_m t) \quad y_{nf}^0(j) = I_0(j) \cdot \sin(n \cdot 2\pi f_m t) \quad (2);$$

$$[0025] \quad x_{nf}(i) = I_t(i) \cdot \cos(n \cdot 2\pi f_m t) \quad y_{nf}(i) = I_t(i) \cdot \sin(n \cdot 2\pi f_m t)$$

$$[0026] \quad x_{nf}(j) = I_t(j) \cdot \cos(n \cdot 2\pi f_{nt}) \quad y_{nf}(j) = I_t(j) \cdot \sin(n \cdot 2\pi f_{nt})$$

[0027] 其次,经低通滤波器提取各信号的谐波分量,如式(3)所示:

$$[0028] \quad X_{nf}^0(i) = \text{lowpass filter}(x_{nf}^0(i)) \quad Y_{nf}^0(i) = \text{lowpass filter}(y_{nf}^0(i))$$

$$[0029] \quad X_{nf}^0(j) = \text{lowpass filter}(x_{nf}^0(j)) \quad Y_{nf}^0(j) = \text{lowpass filter}(y_{nf}^0(j)) \quad (3);$$

$$[0030] \quad X_{nf}(i) = \text{lowpass filter}(x_{nf}(i)) \quad Y_{nf}(i) = \text{lowpass filter}(y_{nf}(i))$$

$$[0031] \quad X_{nf}(j) = \text{lowpass filter}(x_{nf}(j)) \quad Y_{nf}(j) = \text{lowpass filter}(y_{nf}(j))$$

[0032] 得到的第*i*行、第*j*列处背景光强信号和透射光强信号的幅值表示为式(4):

$$[0033] \quad R_{nf}^0(i) = \sqrt{(X_{nf}^0(i))^2 + (Y_{nf}^0(i))^2}$$

$$[0034] \quad R_{nf}^0(j) = \sqrt{(X_{nf}^0(j))^2 + (Y_{nf}^0(j))^2} \quad (4);$$

$$R_{nf}(i) = \sqrt{(X_{nf}(i))^2 + (Y_{nf}(i))^2}$$

$$[0035] \quad R_{nf}(j) = \sqrt{(X_{nf}(j))^2 + (Y_{nf}(j))^2}$$

[0036] 最后,对得到的第*i*行和第*j*列谐波信号,分别进行扣除背景一次谐波归一化处理,得到:

$$[0037] \quad S_{2f/1f}(i) = \sqrt{\left[\left(\frac{X_{2f}(i)}{R_{1f}(i)}\right) - \left(\frac{X_{2f}^0(i)}{R_{1f}^0(i)}\right)\right]^2 + \left[\left(\frac{Y_{2f}(i)}{R_{1f}(i)}\right) - \left(\frac{Y_{2f}^0(i)}{R_{1f}^0(i)}\right)\right]^2} \quad (5);$$

$$[0038] \quad S_{2f/1f}(j) = \sqrt{\left[\left(\frac{X_{2f}(j)}{R_{1f}(j)}\right) - \left(\frac{X_{2f}^0(j)}{R_{1f}^0(j)}\right)\right]^2 + \left[\left(\frac{Y_{2f}(j)}{R_{1f}(j)}\right) - \left(\frac{Y_{2f}^0(j)}{R_{1f}^0(j)}\right)\right]^2} \quad (6);$$

[0039] 记 $S_{2f/1f}(i)$ 、 $S_{2f/1f}(j)$ 在第*r*条特征吸收谱线处的信号分别为 $S_{2f/1f}(i, \lambda_r)$ 、 $S_{2f/1f}(j, \lambda_r)$ ,其中,*r*取值为1~*I*中的整数,然后分别提取各条谱线扣除背景一次谐波归一化二次谐波信号的峰值,记为 $p_{i,r}$ 、 $p_{j,r}$ :

$$[0040] \quad p_{i,r} = \max[S_{2f/1f}(i, \lambda_r)]$$

$$[0041] \quad (7).$$

$$[0042] \quad p_{j,r} = \max[S_{2f/1f}(j, \lambda_r)]$$

[0043] 其中,所述步骤三的具体处理步骤为:

[0044] 首先,采用各行、各列网格的待测温度、气体浓度离散值,结合Beer-Lambert定律,对于第*r*条激光,其中,*r*取值为1~*I*中的整数,穿过待测区域得到的气体吸光度为:

$$[0045] \quad \alpha(i, r) = P \cdot \Delta d \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^I X_{i,j} S(T_{i,j}, \lambda_r) \phi(\lambda_k - \lambda_r) \quad i = 1, 2, \dots, M; \quad (8);$$

$$[0046] \quad \alpha(j, r) = P \cdot \Delta l \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^I X_{i,j} S(T_{i,j}, \lambda_r) \phi(\lambda_k - \lambda_r) \quad j = 1, 2, \dots, N; \quad (9);$$

[0047] 式中, $\alpha(i, r)$ 是第*r*条谱线下第*i*行的吸光度, $\alpha(j, r)$ 是第*r*条谱线下第*j*列的吸光度,*P*为气体压力, $X_{i,j}$ 为第*i*行第*j*列单元格内的水蒸气组分浓度, $S(T_{i,j}, \lambda_i)$ 为线强在波长为



$\lambda_i$ 、温度为 $T_{i,j}$ 时的值， $\phi(\lambda_k - \lambda_r)$ 为谱线 $\lambda_r$ 所对应的线型函数在波长 $\lambda_k$ 处的值，根据测量环境中的温度、压力条件从Gauss线型、Lorentz线型和Voigt线型中选择其中一种， $\Delta d = D/M$ 、 $\Delta l = L/N$ 分别为行间距和列间距；

[0048] 其次，对于特定谱线 $\lambda_i$ ，线强 $S(T)$ 为温度的函数：

$$[0049] \quad S(T, \lambda_i) = S(T_0, \lambda_i) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \exp\left[-\frac{hcE_i''}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \times \left[\frac{1 - \exp(-hc^2/kT\lambda_i)}{1 - \exp(-hc^2/kT_0\lambda_i)}\right] \quad (10);$$

[0050] 将已知的参考温度下线强 $S(T_0)$ 、低状态能级 $E''$ 、普朗克常数 $h$ 、光速 $c$ 、波尔兹曼常数 $k$ 、相应格子温度和分子配分函数代入式(10)得到格子线强值 $S[T_{i,j}, \lambda_i]$ ，其中分子配分函数 $Q(T)$ 由查得的参数 $[a, b, c, d]$ 代入式(11)计算得到：

$$[0051] \quad Q(T) = a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3 \quad (11);$$

[0052] 然后，结合气体吸光度与无吸收条件下实际测量的背景光强获取各行各列的仿真行透射光强 ${}^s I_t(i)$ 、列透射光强 ${}^s I_t(j)$ ：

$$[0053] \quad \begin{aligned} {}^s I_t(i) &= I_0(i) \cdot \exp\left[-\sum_{r=1}^I \alpha(i, r)\right] \\ &= I_0(i) \cdot \exp\left\{-\sum_{r=1}^I \left[P \cdot \Delta d \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^I X_{i,j} S(T_{i,j}, \lambda_r) \phi(\lambda_k - \lambda_r)\right]\right\} \end{aligned} \quad (12);$$

$$[0054] \quad \begin{aligned} {}^s I_t(j) &= I_0(j) \cdot \exp\left[-\sum_{r=1}^I \alpha(j, r)\right] \\ &= I_0(j) \cdot \exp\left\{-\sum_{r=1}^I \left[P \cdot \Delta l \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^I X_{i,j} S(T_{i,j}, \lambda_r) \phi(\lambda_k - \lambda_r)\right]\right\} \end{aligned} \quad (13);$$

[0055] 再使用数字锁相技术处理仿真透射光强 ${}^s I_t(i)$ 、 ${}^s I_t(j)$ ，得到该信号在第 $i$ 行、第 $j$ 列处 $n$ 次谐波的 $x$ 分量和 $y$ 分量展开式， $n$ 取值为1或2：

$$[0056] \quad {}^s X_{nf}(i) = {}^s I_t(i) \cdot \cos(n \cdot 2\pi f_m t) \quad {}^s Y_{nf}(i) = {}^s I_t(i) \cdot \sin(n \cdot 2\pi f_m t)$$

$$[0057] \quad (14);$$

$$[0058] \quad {}^s X_{nf}(j) = {}^s I_t(j) \cdot \cos(n \cdot 2\pi f_m t) \quad {}^s Y_{nf}(j) = {}^s I_t(j) \cdot \sin(n \cdot 2\pi f_m t)$$

[0059] 然后，经低通滤波器提取各信号的谐波分量：

$$[0060] \quad {}^s X_{nf}(i) = \text{lowpass filter}({}^s X_{nf}(i)) \quad {}^s Y_{nf}(i) = \text{lowpass filter}({}^s Y_{nf}(i))$$

$$[0061] \quad (15);$$

$$[0062] \quad {}^s X_{nf}(j) = \text{lowpass filter}({}^s X_{nf}(j)) \quad {}^s Y_{nf}(j) = \text{lowpass filter}({}^s Y_{nf}(j))$$

[0063] 第 $i$ 行、第 $j$ 列处仿真透射光强信号的幅值可以表示为式(16)：

$$[0064] \quad \begin{aligned} {}^s R_{nf}(i) &= \sqrt{({}^s X_{nf}(i))^2 + ({}^s Y_{nf}(i))^2} \\ {}^s R_{nf}(j) &= \sqrt{({}^s X_{nf}(j))^2 + ({}^s Y_{nf}(j))^2} \end{aligned} \quad (16);$$

[0065] 式中， $f_m$ 是调制频率， ${}^s R_{nf}(i)$ 是第 $i$ 行透射谐波信号、 ${}^s R_{nf}(j)$ 是第 $j$ 列透射谐波信号；

[0066] 最后，对仿真得到的谐波信号进行扣除背景一次谐波归一化处理，得到下式：

$$[0067] \quad {}^s S_{2f/1f}(i) = \sqrt{\left[ \left( \frac{{}^s X_{2f}(i)}{{}^s R_{1f}(i)} \right) - \left( \frac{X_{2f}^0(i)}{R_{1f}^0(i)} \right) \right]^2 + \left[ \left( \frac{{}^s Y_{2f}(i)}{{}^s R_{1f}(i)} \right) - \left( \frac{Y_{2f}^0(i)}{R_{1f}^0(i)} \right) \right]^2} \quad (17);$$

$$[0068] \quad {}^s S_{2f/1f}(j) = \sqrt{\left[ \left( \frac{{}^s X_{2f}(j)}{{}^s R_{1f}(j)} \right) - \left( \frac{X_{2f}^0(j)}{R_{1f}^0(j)} \right) \right]^2 + \left[ \left( \frac{{}^s Y_{2f}(j)}{{}^s R_{1f}(j)} \right) - \left( \frac{Y_{2f}^0(j)}{R_{1f}^0(j)} \right) \right]^2} \quad (18);$$

[0069] 记 ${}^s S_{2f/1f}(i)$ 、 ${}^s S_{2f/1f}(j)$ 在第 $r$ 条特征吸收谱线处的信号为 ${}^s S_{2f/1f}(i, \lambda_r)$ 、 ${}^s S_{2f/1f}(j, \lambda_r)$ ，其中， $r$ 取值为 $1 \sim I$ 中的整数，然后分别提取各条谱线扣除背景一次谐波归一化二次谐波信号的峰值，记为 $K_{i,r}$ 、 $K_{j,r}$ ：

$$[0070] \quad K_{i,r} = \max[{}^s S_{2f/1f}(i, \lambda_r)]$$

$$[0071] \quad (19)。$$

$$[0072] \quad K_{j,r} = \max[{}^s S_{2f/1f}(j, \lambda_r)]$$

[0073] 有益效果：相对于现有高温气体二维瞬态温度场和浓度场的测量方法，本发明的测量方法结合了超光谱与波长调制光谱技术，不仅具有良好的噪声抑制特性，对弱吸收具有更高的灵敏度，而且更适用于非吸收性损耗较大且基线难以拟合环境下的高温高压气体二维温度场和浓度场的测量；因此本发明的测量方法对于在恶劣的工业现场中实现准确检测高温火焰的燃烧诊断具有重要意义；另外，本发明测量方法中所使用的测量装置采用傅里叶域锁模激光器，该激光器具有高扫描速度、宽扫描范围和低噪声的特点，其可以实现宽光谱的快速扫描。

## 附图说明

[0074] 图1是本发明测量方法所使用的测量装置系统结构原理图；

[0075] 图2是本发明测量方法中待测区域网格划分以及激光器扫描示意图；

[0076] 图3是本发明测量方法中温度场和浓度场的求解算法流程图；

[0077] 图4为本发明测量方法得到的待测区域二维温度场的效果图；

[0078] 图5为本发明测量方法得到的待测区域二维浓度场的效果图；

[0079] 其中，主时钟1、函数发生器2、激光器3、复用器4、待测区域准直器5、光电探测器6、数据采集卡7、计算机8、聚光透镜固定架构9。

## 具体实施方式

[0080] 根据下述实施例，可以更好地理解本发明。然而，本领域的技术人员容易理解，实施例所描述的内容仅用于说明本发明，而不应当也不会限制权利要求书中所详细描述的本发明。

[0081] 如图1~3所示，本发明同时测量高温气体二维瞬态温度场和浓度场的方法，包括如下具体实施步骤：

[0082] 步骤一，使用波长调制方法，探测得到待测二维区域每行、每列的信号：

[0083] 首先，根据待测二维区域的形状（假设为 $L \times D$ 的矩形区域）和大小，结合温度、气体组分浓度的空间分辨率要求，对待测二维区域进行网格离散化，划分成 $M \times N$ 的网格，每个网格分别对应一个温度和浓度待测值，总的待测值数目为 $2 \times M \times N$ ，并根据网格划分方式，在

待测区域上安装用于固定超光谱激光发射和采集元件的空间架构9;

[0084] 其次,根据上述待测值的数目,从HITRAN数据库中选择I条相应气体的特征吸收谱线,其中 $I \geq \lceil 2 \times M \times N / (M + N) \rceil$ ,并提取参考温度下线强度 $S(T_0)$ 、跃迁低态能级 $E''$ 、分子配分函数 $Q(T)$ 的系数 $[a, b, c, d]$ ,并记第 $r$  ( $r=1, 2 \dots I$ )条特征吸收谱线的中心波长为 $\lambda_r$ ;

[0085] 然后,由主时钟1控制函数发生器2产生周期性的低频扫描信号,同时叠加周期性的高频驱动信号,加载到由傅里叶域锁模激光器(FDML)3组成的激光器系统上,以调制激光器3的输出频率,激光器系统产生的激光束通过单模光纤传输,经复用器4输出为满足实验要求的 $M+N$ 个信道的激光束,其中 $M$ 条激光束实现对待测区域每行进行扫描, $N$ 条激光束对待测区域每列进行扫描;

[0086] 最后,使用激光穿过用氮气吹扫的待测区域,得到 $M$ 个行背景光强,记为 $I_0(i)$  ( $i=1, 2 \dots M$ ),得到 $N$ 个列背景光强,记为 $I_0(j)$  ( $j=1, 2 \dots N$ ),然后将激光穿过待测高温区域,经气体吸收后的激光由光电探测器6检测到相应的 $M$ 个行透射光强,记为 $I_t(i)$  ( $i=1, 2 \dots M$ ),得到 $N$ 个列透射光强,记为 $I_t(j)$  ( $j=1, 2 \dots N$ ),数据采集卡7对光电探测器6输出信号进行采集,并将实验数据保存在计算机8以便进行后期处理;

[0087] 步骤二,测量信号处理,获取测量信号峰值:

[0088] 利用包含了待测区域温度场、浓度场信息的透射光强,并使用数字锁相程序以及具有合适带宽的低通滤波器来提取不同谐波处的波长调制信号,避免了傅里叶分析方法表征激光调制强度的需要,完整地记录了所有测量信息。

[0089] 首先,使用数字锁相技术处理背景光强 $I_0(i)$ 、 $I_0(j)$ 和实际测量的透射光强 $I_t(i)$ 、 $I_t(j)$ ,分别得到信号第 $i$ 行、第 $j$ 列处 $n$  ( $n=1, 2$ )次谐波的 $x$ 分量和 $y$ 分量展开式:

$$[0090] \quad x_{nf}^0(i) = I_0(i) \cdot \cos(n \cdot 2\pi f_m t) \quad y_{nf}^0(i) = I_0(i) \cdot \sin(n \cdot 2\pi f_m t)$$

$$[0091] \quad x_{nf}^0(j) = I_0(j) \cdot \cos(n \cdot 2\pi f_m t) \quad y_{nf}^0(j) = I_0(j) \cdot \sin(n \cdot 2\pi f_m t) \quad (1);$$

$$[0092] \quad x_{nf}(i) = I_t(i) \cdot \cos(n \cdot 2\pi f_m t) \quad y_{nf}(i) = I_t(i) \cdot \sin(n \cdot 2\pi f_m t)$$

$$[0093] \quad x_{nf}(j) = I_t(j) \cdot \cos(n \cdot 2\pi f_m t) \quad y_{nf}(j) = I_t(j) \cdot \sin(n \cdot 2\pi f_m t)$$

[0094] 然后,经低通滤波器提取各信号的谐波分量:

$$[0095] \quad X_{nf}^0(i) = \text{lowpass filter}(x_{nf}^0(i)) \quad Y_{nf}^0(i) = \text{lowpass filter}(y_{nf}^0(i))$$

$$[0096] \quad X_{nf}^0(j) = \text{lowpass filter}(x_{nf}^0(j)) \quad Y_{nf}^0(j) = \text{lowpass filter}(y_{nf}^0(j)) \quad (2);$$

$$[0097] \quad X_{nf}(i) = \text{lowpass filter}(x_{nf}(i)) \quad Y_{nf}(i) = \text{lowpass filter}(y_{nf}(i))$$

$$[0098] \quad X_{nf}(j) = \text{lowpass filter}(x_{nf}(j)) \quad Y_{nf}(j) = \text{lowpass filter}(y_{nf}(j))$$

[0099] 那么,第 $i$ 行、第 $j$ 列处背景光强信号和透射光强信号的幅值可以分别表示为:

$$[0100] \quad R_{nf}^0(i) = \sqrt{(X_{nf}^0(i))^2 + (Y_{nf}^0(i))^2}$$

$$[0101] \quad R_{nf}^0(j) = \sqrt{(X_{nf}^0(j))^2 + (Y_{nf}^0(j))^2} \quad (3);$$

$$R_{nf}(i) = \sqrt{(X_{nf}(i))^2 + (Y_{nf}(i))^2}$$

$$[0102] \quad R_{nf}(j) = \sqrt{(X_{nf}(j))^2 + (Y_{nf}(j))^2}$$

[0103] 接着,使用归一化的方法可以在一定程度上消除激光光束的散射、非吸收引起的传输损耗以及由于光学器件的机械振动导致的光传输变化,同时,对于波长调制方法下背景信号相对于吸收信号较大的情况,可以在归一化的基础上减扣除背景信号以提高信噪比、降低浓度检测下限,对得到的第*i*行和第*j*列谐波信号,分别进行扣除背景一次谐波归一化处理,可以得到:

$$[0104] \quad S_{2f/1f}(i) = \sqrt{\left[\left(\frac{X_{2f}(i)}{R_{1f}(i)}\right) - \left(\frac{X_{2f}^0(i)}{R_{1f}^0(i)}\right)\right]^2 + \left[\left(\frac{Y_{2f}(i)}{R_{1f}(i)}\right) - \left(\frac{Y_{2f}^0(i)}{R_{1f}^0(i)}\right)\right]^2} \quad (4);$$

$$[0105] \quad S_{2f/1f}(j) = \sqrt{\left[\left(\frac{X_{2f}(j)}{R_{1f}(j)}\right) - \left(\frac{X_{2f}^0(j)}{R_{1f}^0(j)}\right)\right]^2 + \left[\left(\frac{Y_{2f}(j)}{R_{1f}(j)}\right) - \left(\frac{Y_{2f}^0(j)}{R_{1f}^0(j)}\right)\right]^2} \quad (5);$$

[0106] 最后,记 $S_{2f/1f}(i)$ 、 $S_{2f/1f}(j)$ 在第*r*( $r=1, 2 \dots I$ )条特征吸收谱线处的信号为 $S_{2f/1f}(i, \lambda_r)$ 、 $S_{2f/1f}(j, \lambda_r)$ ,然后分别提取各条谱线扣除背景一次谐波归一化二次谐波信号的峰值,记为 $p_{i,r}$ 、 $p_{j,r}$ :

$$[0107] \quad p_{i,r} = \max[S_{2f/1f}(i, \lambda_r)]$$

$$[0108] \quad (6)。$$

$$[0109] \quad p_{j,r} = \max[S_{2f/1f}(j, \lambda_r)]$$

[0110] 步骤三,仿真信号处理,获取仿真信号峰值:

[0111] 当激光穿过不同网格时,由于各网格内的气体浓度、温度等参数不同,从而导致了激光强度衰减不同,其探测到的包含温度和浓度信息的 $S_{2f/1f}$ 信号也不同,通过假设待测区域每个格子的温度、气体浓度,结合已知参数,仿真得到不同阶数的谐波信号:

[0112] 采用各行、各列网格的待测温度、气体浓度离散值,结合Beer-Lambert定律,对于第*r*( $r=1, 2 \dots I$ )条激光,穿过待测区域得到的气体吸光度可以写成为:

$$[0113] \quad \alpha(i, r) = P \cdot \Delta d \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^I X_{i,j} S(T_{i,j}, \lambda_r) \phi(\lambda_k - \lambda_r) \quad i = 1, 2 \dots M; \quad (7);$$

$$[0114] \quad \alpha(j, r) = P \cdot \Delta l \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^I X_{i,j} S(T_{i,j}, \lambda_r) \phi(\lambda_k - \lambda_r) \quad j = 1, 2 \dots N; \quad (8);$$

[0115] 式中, $\alpha(i, r)$ 是第*r*条谱线下第*i*行的吸光度, $\alpha(j, r)$ 是第*r*条谱线下第*j*列的吸光度, $P$ 为气体压力(atm), $X_{i,j}$ 为第*i*行第*j*列单元格内的水蒸气组分浓度, $S(T_{i,j}, \lambda_i)$ 为线强在波长为 $\lambda_i$ 、温度为 $T_{i,j}$ 时的值( $\text{cm}^{-2} \text{atm}^{-1}$ ), $\phi(\lambda_k - \lambda_r)$ 为谱线 $\lambda_r$ 所对应的线型函数在波长 $\lambda_k$ 处的值(cm), $\Delta d = D/M$ 、 $\Delta l = L/N$ 分别为行间距和列间距;

[0116] 对于特定谱线 $\lambda_i$ ,线强 $S(T)$ 为温度的函数,可由下式确定:

$$[0117] \quad S(T, \lambda_i) = S(T_0, \lambda_i) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \exp\left[-\frac{hcE_i''}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \times \left[\frac{1 - \exp(-hc^2/kT\lambda_i)}{1 - \exp(-hc^2/kT_0\lambda_i)}\right] \quad (9);$$

[0118] 将参考温度下线强 $S(T_0)$ 、低状态能级 $E''$ 、普朗克常数 $h$ 、光速 $c$ 、波尔兹曼常数 $k$ 、相应格子温度、分子配分函数等代入上式(9)即可得到格子线强值 $S[T_{i,j}, \lambda_i]$ ,对于分子配分函数 $Q(T)$ 的计算,将步骤一中查得的参数 $[a, b, c, d]$ 代入下式:

$$[0119] \quad Q(T) = a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3 \quad (10);$$

[0120] 对于线型函数 $\phi(\lambda - \lambda_i)$ ,需根据测量环境中的温度、压力条件从三种线型(Gauss

线型、Lorentz线型、Voigt线型)中选择,将确定表达式代入上式(7)、(8)计算即可;

[0121] 结合气体吸光度与无吸收条件下实际测量的背景光强获取各行各列的仿真行透射光强 ${}^sI_t(i)$ 、列透射光强 ${}^sI_t(j)$ :

$$\begin{aligned} [0122] \quad {}^sI_t(i) &= I_0(i) \cdot \exp \left[ -\sum_{r=1}^I \alpha(i,r) \right] \\ &= I_0(i) \cdot \exp \left\{ -\sum_{r=1}^I \left[ P \cdot \Delta d \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^I X_{i,j} S(T_{i,j}, \lambda_r) \phi(\lambda_k - \lambda_r) \right] \right\} \end{aligned} \quad (11);$$

$$\begin{aligned} [0123] \quad {}^sI_t(j) &= I_0(j) \cdot \exp \left[ -\sum_{r=1}^I \alpha(j,r) \right] \\ &= I_0(j) \cdot \exp \left\{ -\sum_{r=1}^I \left[ P \cdot \Delta l \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^I X_{i,j} S(T_{i,j}, \lambda_r) \phi(\lambda_k - \lambda_r) \right] \right\} \end{aligned} \quad (12);$$

[0124] 使用数字锁相技术处理仿真透射光强 ${}^sI_t(i)$ 、 ${}^sI_t(j)$ ,得到该信号在第*i*行、第*j*列处 $n(n=1,2)$ 次谐波的x分量和y分量展开式:

$$\begin{aligned} [0125] \quad {}^sX_{nf}(i) &= {}^sI_t(i) \cdot \cos(n \cdot 2\pi f_m t) & {}^sY_{nf}(i) &= {}^sI_t(i) \cdot \sin(n \cdot 2\pi f_m t) \\ [0126] \end{aligned} \quad (13);$$

$$[0127] \quad {}^sX_{nf}(j) = {}^sI_t(j) \cdot \cos(n \cdot 2\pi f_m t) \quad {}^sY_{nf}(j) = {}^sI_t(j) \cdot \sin(n \cdot 2\pi f_m t)$$

[0128] 然后,经低通滤波器提取各信号的谐波分量:

$$\begin{aligned} [0129] \quad {}^sX_{nf}(i) &= \text{lowpass filter}({}^sX_{nf}(i)) & {}^sY_{nf}(i) &= \text{lowpass filter}({}^sY_{nf}(i)) \\ [0130] \end{aligned} \quad (14);$$

$$[0131] \quad {}^sX_{nf}(j) = \text{lowpass filter}({}^sX_{nf}(j)) \quad {}^sY_{nf}(j) = \text{lowpass filter}({}^sY_{nf}(j))$$

[0132] 第*i*行、第*j*列处仿真透射光强信号的幅值可以表示为:

$$\begin{aligned} [0133] \quad {}^sR_{nf}(i) &= \sqrt{\left( {}^sX_{nf}(i) \right)^2 + \left( {}^sY_{nf}(i) \right)^2} \\ {}^sR_{nf}(j) &= \sqrt{\left( {}^sX_{nf}(j) \right)^2 + \left( {}^sY_{nf}(j) \right)^2} \end{aligned} \quad (15);$$

[0134] 式中, $f_m$ 是调制频率, ${}^sR_{nf}(i)$ 是第*i*行透射谐波信号、 ${}^sR_{nf}(j)$ 是第*j*列透射谐波信号;

[0135] 为了消除光强波动影响,对仿真得到的谐波信号进行扣除背景一次谐波归一化处理,得到式(16)、(17):

$$[0136] \quad {}^sS_{2f/1f}(i) = \sqrt{\left[ \left( \frac{{}^sX_{2f}(i)}{{}^sR_{1f}(i)} \right) - \left( \frac{X_{2f}^0(i)}{R_{1f}^0(i)} \right) \right]^2 + \left[ \left( \frac{{}^sY_{2f}(i)}{{}^sR_{1f}(i)} \right) - \left( \frac{Y_{2f}^0(i)}{R_{1f}^0(i)} \right) \right]^2} \quad (16);$$

$$[0137] \quad {}^sS_{2f/1f}(j) = \sqrt{\left[ \left( \frac{{}^sX_{2f}(j)}{{}^sR_{1f}(j)} \right) - \left( \frac{X_{2f}^0(j)}{R_{1f}^0(j)} \right) \right]^2 + \left[ \left( \frac{{}^sY_{2f}(j)}{{}^sR_{1f}(j)} \right) - \left( \frac{Y_{2f}^0(j)}{R_{1f}^0(j)} \right) \right]^2} \quad (17);$$

[0138] 记 ${}^sS_{2f/1f}(i)$ 、 ${}^sS_{2f/1f}(j)$ 在第*r*( $r=1,2,\dots,I$ )条特征吸收谱线处的信号为 ${}^sS_{2f/1f}(i, \lambda_r)$ 、 ${}^sS_{2f/1f}(j, \lambda_r)$ ,然后分别提取各条谱线扣除背景一次谐波归一化二次谐波信号的峰值,记为 $K_{i,r}$ 、 $K_{j,r}$ :

[0139]  $K_{i,r} = \max[S_{2f/1f}(i, \lambda_r)]$

[0140] (18);

[0141]  $K_{j,r} = \max[S_{2f/1f}(j, \lambda_r)]$

[0142] 步骤四, 二维瞬态温度场、浓度场的求解:

[0143] 在波长调制光谱中, 待测区域温度、浓度信息与谐波信号的高度相关, 使用测量信号峰值  $p_{i,r}$ 、 $p_{j,r}$  与仿真信号峰值  $K_{i,r}$ 、 $K_{j,r}$  之间的相对偏差作为目标函数进行迭代寻优计算, 迭代直至目标函数收敛为止 (小于设定精度值, 如  $10^{-5}$ ), 其目标函数如下:

$$[0144] \quad D(X, T) = \sum_{r=1}^L \sum_{i=1}^M \frac{(K_{i,r} - p_{i,r})^2}{K_{i,r}^2} + \sum_{r=1}^L \sum_{j=1}^N \frac{(K_{j,r} - p_{j,r})^2}{K_{j,r}^2} \quad (19);$$

[0145] 式中,  $X$ 、 $T$  是迭代计算出的浓度场、温度场,  $D(X, T)$  为测量信号峰值  $p_{i,r}$ 、 $p_{j,r}$  与仿真信号峰值  $K_{i,r}$ 、 $K_{j,r}$  之间的偏差。

[0146] 图4~图5分别为本发明测量方法对标准平面火焰燃烧炉的温度场和水蒸气浓度场重建的效果图。

[0147] 由图4~图5可以看出, 本发明测量方法通过结合超光谱与波长调制光谱技术, 抗干扰能力好, 不仅对噪声具有更好的抑制性, 且对弱吸收也具有更高的灵敏度, 尤其适用于非吸收性损耗较大且基线难以拟合环境下的高温气体二维温度场和浓度场的测量。

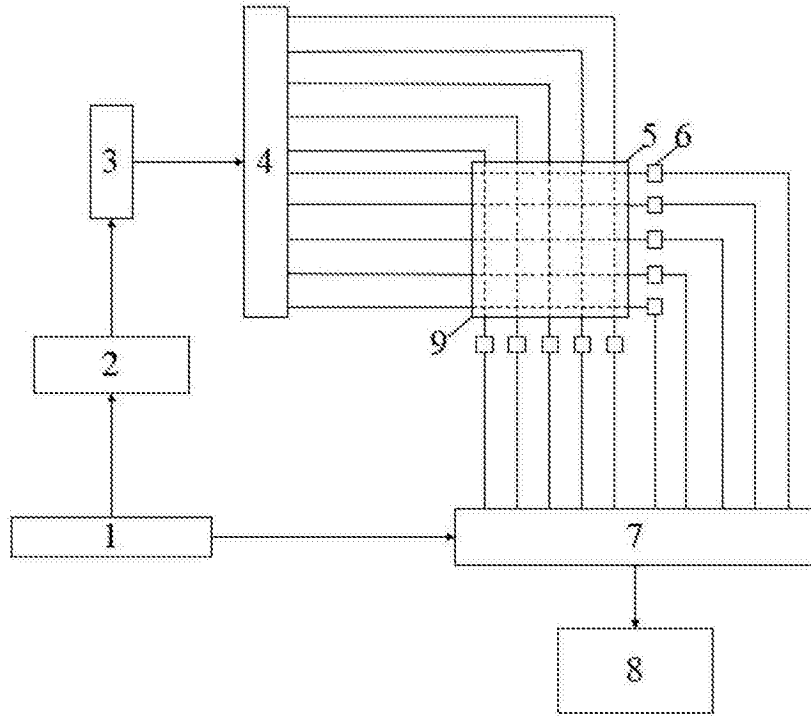


图1

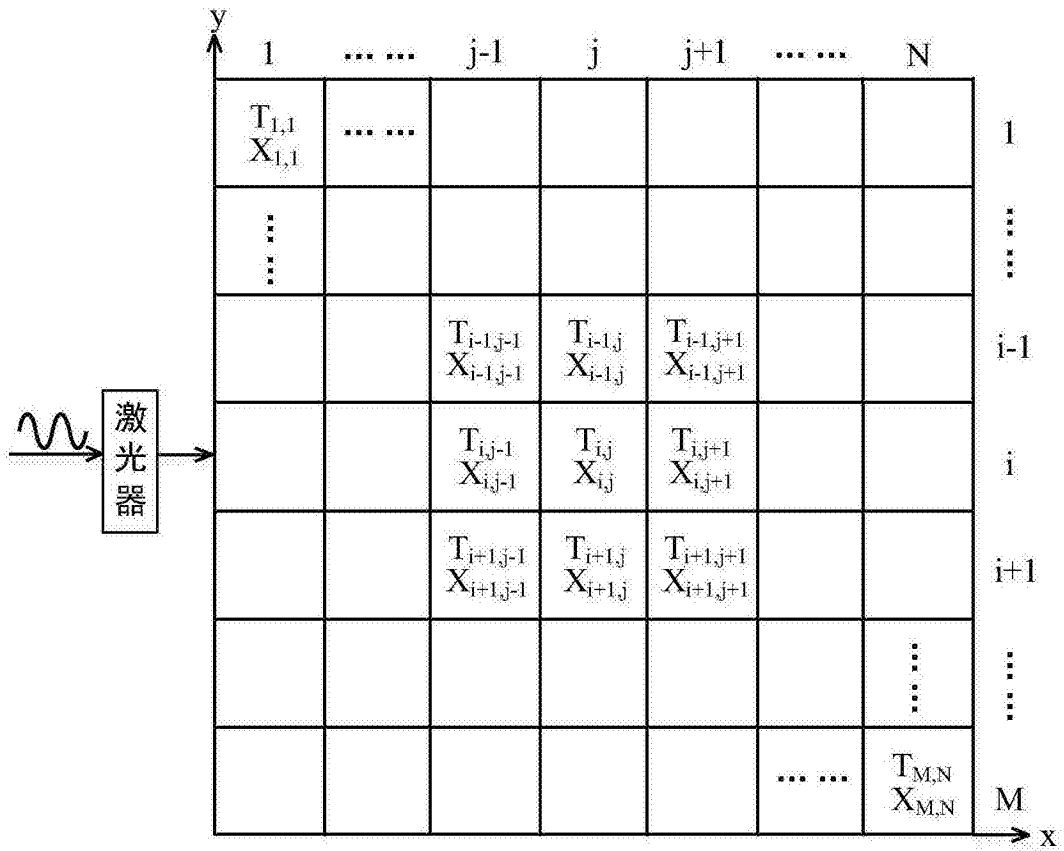


图2

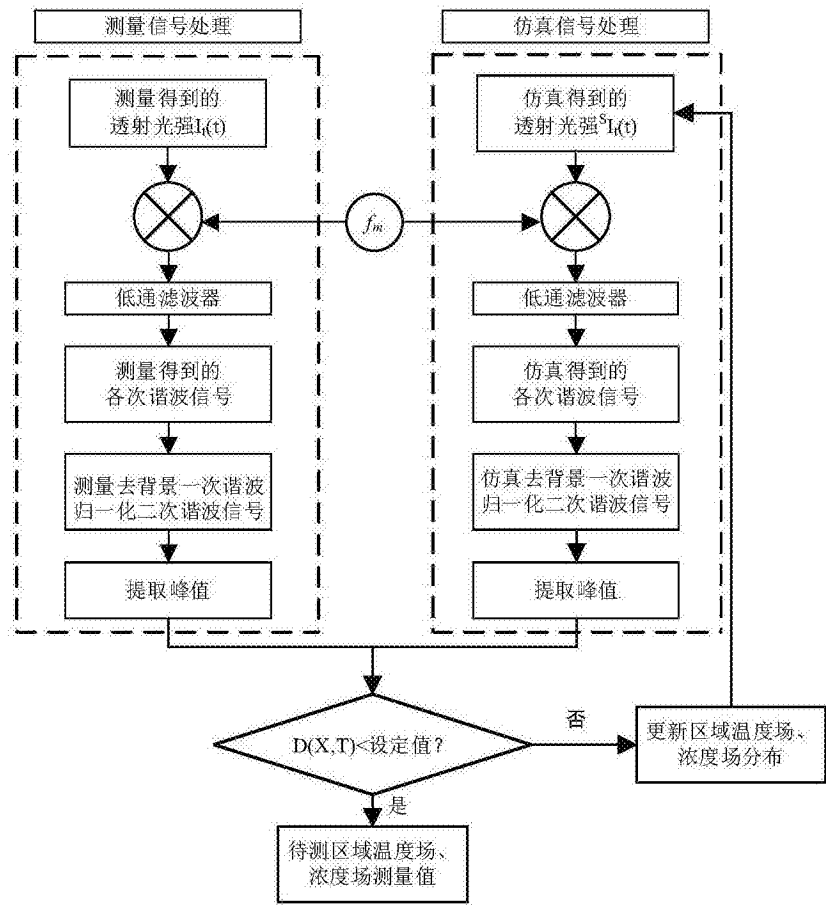


图3



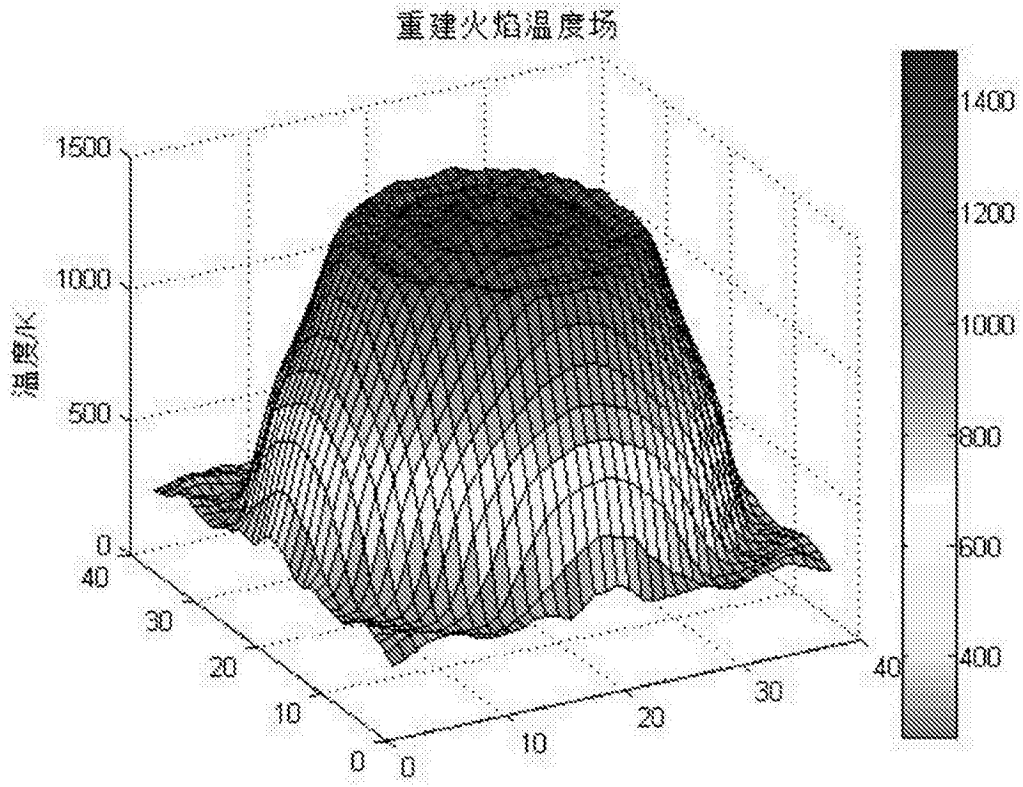


图4

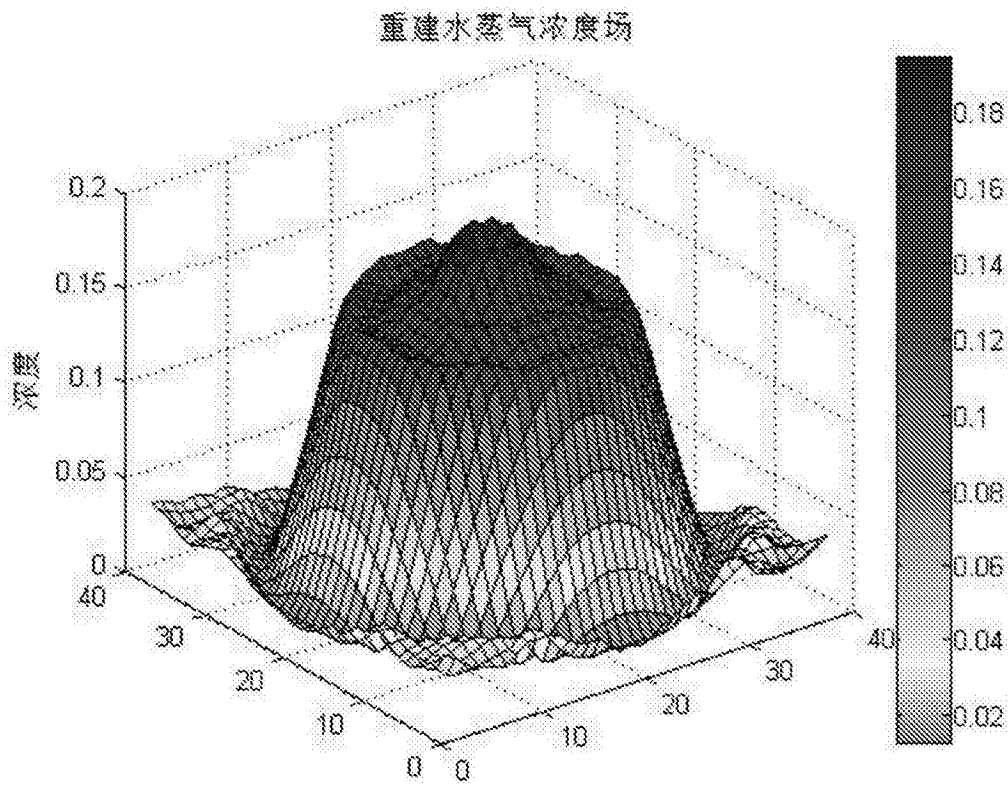


图5