

文章编号: 1672-8785(2017)06-0013-06

红外傅里叶光谱仪的干涉图 模型研究及应用

李振宇^{1,2,3} 张磊^{1,2,3} 杨敏珠^{1,2,3} 韩昌佩^{2,3*}

(1. 中国科学院大学, 北京 100049;

2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

3. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

摘 要: 介绍了红外傅里叶光谱仪干涉图的获取原理和过程。基于 MATLAB 软件, 首次采用将数值积分技术结合离散傅里叶变换的方法对干涉图特性进行了建模和计算, 得到了不同温度黑体辐射所对应的干涉图, 并对其直流偏置、最大值以及相对最小值等特征进行了分析。定量给出了相对最小值与直流偏置之间的线性关系, 并从试验数据上对其进行了验证。在国内首次从干涉图特性的角度分析了大气垂直探测仪系统的背景噪声。然后对通过在 CTIA 型读出电路中引入减法电路来提高动态范围的方法进行了可行性分析。结果表明, 该方法并不具有可行性。

关键词: 红外傅里叶光谱仪; 干涉图模型; 直流偏置; 背景噪声

中图分类号: TH744.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.06.003

Study and Application of Interferogram Model of Infrared Fourier Transform Spectrometer

LI Zhen-yu^{1,2,3}, ZHANG Lei^{1,2,3}, YANG Min-zhu^{1,2,3}, HAN Chang-pei^{2,3*}

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

3. CAS Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai 200083, China)

Abstract: The interferogram acquisition principle and process of infrared Fourier spectrometers were presented. On the basis of MATLAB, modeling and calculation of the characteristics of interferograms were carried out by combining numerical integration with discrete Fourier transform for the first time. The interferograms corresponding to different temperature blackbody radiation were obtained and their direct component, maximum value and relative minimum value were analyzed. The linear relationship between the relative minimum value and the direct component was given quantitatively and was verified by comparing experimental data. The background noise of an atmospheric vertical detector system was analyzed in terms of the characteristics of interferograms for the first time in China. Then, the feasibility of using the subtraction circuit in CTIA to improve the dynamic range of the detector was analyzed. The result showed that the method was not feasible.

Key words: Infrared Fourier Transform Spectrometer; interferogram model; direct component; background noise

收稿日期: 2017-03-07

作者简介: 李振宇(1992-), 男, 安徽亳州人, 硕士研究生, 主要研究方向为红外傅里叶光谱仪信息获取技术。

E-mail: zhiai7siya@163.com

* 通讯作者: E-mail: changpei_han@mail.sitp.ac.cn

0 引言

1948 年, Pierre Jacquinot 指出了傅里叶光谱仪的“Jacquinot 优点”(高光通量); 1951 年, Peter Fellgett 发现了傅里叶光谱仪的“Fellgett 优点”(多通道)^[1]。此后, Cooley-Tukey 发明了快速傅里叶变换技术, 使傅里叶变换光谱学及干涉成像光谱技术研究得到了快速发展^[2]。21 世纪初, 世界气象组织提出了大气探测的新目标: 湿度探测的准确度为 10% ~ 15%; 温度探测的准确度为 1 K; 对流层的垂直分辨率为 1 ~ 2 km^[3]。傅里叶光谱仪采用新型干涉分光技术, 先测量入射辐射的干涉信号, 然后对其进行傅里叶变换, 最终可得到入射辐射的光谱分布。干涉分光技术具有光谱分辨率高、光通量高、波数准确度高等一系列显著优势^[4]。在目前国外研制的主流大气光谱探测系统中, 最具代表性的是被动大气探测用迈克尔逊干涉仪 (Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding, MIPAS)、红外大气探测干涉仪 (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer, IASI)、穿轨迹红外探测仪 (Cross-track Infrared Sounder, CrIS) 和地球同步成像傅里叶变换光谱仪 (Geosynchronous Imaging Fourier Transform Spectrometer, GIFTS)。它们均采用干涉分光技术。我国研制的大气垂直探测仪基于傅里叶干涉分光, 使用面阵探测器进行大气观测^[5]。

本文对迈克尔逊干涉式红外傅里叶光谱仪的信号获取过程进行介绍, 并利用离散傅里叶变换以及数值积分技术对干涉图进行建模, 以避免由复杂的干涉积分公式带来的困难。通过分析干涉图中的直流偏置、最大值、相对最小值等特征, 定量给出相对最小值与直流偏置之间的近似线性关系。在国内首次从干涉图特性的角度分析大气垂直探测仪的背景噪声, 从而为提高探测仪系统的动态范围和信噪比提供一定的理论基础。

1 红外傅里叶光谱仪的干涉信号获取原理

迈克尔逊红外傅里叶光谱仪所用的干涉仪由动镜、定镜、分束器以及探测器等几部分组

成, 它在本质上还是迈克尔逊干涉仪。其中, 干涉分光系统采取动镜式时间调制傅里叶干涉分光的方式。入射光束被分束器分成等光强的两束光, 它们分别经动镜和定镜反射后在探测器上汇合相干。当动镜沿光轴来回做匀速直线运动时, 两条光束的光程差会发生周期性变化, 从而形成干涉信号^[6]。

经动镜和定镜返回的光束之间存在相位差。若两束光的光强相等, 在探测器一侧相干叠加后的光强则为

$$I' = 2I \cdot (1 + \cos \delta) = 4I \cdot \cos^2(\delta/2) \quad (1)$$

式中, I 为光束的光强; δ 为两条光束的相位差。也就是说, 两束光强相等的相干光经干涉叠加后的最大强度为单束光光强的 4 倍, 最小强度为零。

若目标源是多色光源, 入射的准直光束的光强随波数的光谱分布函数为 $B(\nu)$, 光束的光程差为 x , 则两束波数为 $\nu \sim \nu + d\nu$ 的单色光叠加后的光强为

$$dI' = 2B(\nu) \cdot (1 + \cos 2\pi\nu x) \cdot d\nu \quad (2)$$

两束多色光相干叠加后的光强为

$$I'(x) = \int_0^\infty 2B(\nu)d\nu + \int_0^\infty 2B(\nu) \cos(2\pi\nu x)d\nu \quad (3)$$

当两束光的光程差为零时, 干涉强度取到最大值:

$$I'(0) = 4 \int_0^\infty B(\nu)d\nu \quad (4)$$

利用式 (4) 将式 (3) 改为

$$\begin{aligned} I'(x) &= \frac{1}{2}I'(0) + \int_0^\infty 2B(\nu) \cos(2\pi\nu x)d\nu \\ &= \frac{1}{2}I'(0) + I(x) \end{aligned} \quad (5)$$

由此可见, 干涉图的强度 $I'(x)$ 由两部分组成: 一部分与光程差无关, 即 $\frac{1}{2}I'(0)$ 为一个直流偏置 (直流量), 其值为 $2 \int_0^\infty B(\nu)d\nu$; 另一部分 $I(x)$ 是光程差的函数, 称为干涉图函数, 即干涉图的交流信号 (交流量):

$$I(x) = \int_0^\infty 2B(\nu) \cos(2\pi\nu x)d\nu \quad (6)$$

式(6)中的被积函数为偶函数, 可改为

$$I(x) = \int_{-\infty}^{\infty} B(\nu) \cos(2\pi\nu x) d\nu \quad (7)$$

式(7)表明, 干涉图的交流量 $I(x)$ 可用傅里叶积分表达为许多频率的分量之和, 各个频率分量的谱密度即为该波数的单色光的光强^[7]。

2 红外傅里叶光谱仪的干涉图建模分析

在傅里叶光谱仪定标试验中, 光源信号是标准黑体辐射。在真空或者空气中, 可认为平行光束或细光束的光强度等于其辐射通量密度。在进行干涉图建模时, 光谱分布函数 $B(\nu)$ 可用普朗克公式代替。黑体辐射普朗克定律可表示为

$$M_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad (8)$$

式中, M_λ 为光谱辐射出射度 ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$); λ 为波长 (μm), $\lambda = 1/\nu$; c_1 为第一辐射常数, $c_1 = 2\pi hc^2 = 3.7415 \times 10^4 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$; c_2 为第二辐射常数, $c_2 = ch/k = 1.43879 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ ^[7]; T 为温度 (K)。

在实际的傅里叶光谱仪中, 测量干涉信号时光程差只能在有限区间 $[-L, +L]$ 内, 而我们目标探测的频率也只是在一个波数范围 $[\nu_1, \nu_2]$ 之中。大气垂直探测仪所用红外傅里叶光谱仪的中波红外通道的波段范围为 $1650 \sim 2250 \text{ cm}^{-1}$, 探测的干涉图光程差范围为 $-0.8 \sim 0.8 \text{ cm}$ 。

将式(6)所示的干涉图的交流量写成离散傅里叶变换公式的形式:

$$I(n\Delta x) = \sum_{\nu=\nu_1}^{\nu_2} 2B(\nu) \cos(2\pi\nu n\Delta x) \quad (9)$$

式中, Δx 为采样间隔; n 取整数; 光程差 $n\Delta x$ 的范围为 $[-L, +L]$, 采集电路以等光程差间隔 Δx 对干涉图进行采样^[8]; 波数 ν 在 $[\nu_1, \nu_2]$ 区间内以一定的波数间隔 $\Delta\nu$ 离散累加, 把干涉图强度转换成许多频率的分量之和, 相当于是用数值积分表达原积分公式。

同理, 干涉图的直流流量可表示为

$$\frac{1}{2}I'(0) = \sum_{\nu=\nu_1}^{\nu_2} 2B(\nu) \quad (10)$$

将式(8)代入式(10)和式(9), 而不是直接将其代入式(5)。这样做可以避免由黑体辐射规律的复杂性导致的相应积分计算的困难。基于 MATLAB 仿真计算, 分别计算了干涉图的直流部分和交流部分。为了尽可能地模拟出比较平滑的中波波段干涉图, 最小光程差间隔 Δx 取 $0.08 \mu\text{m}$, 光程差 $n\Delta x$ 的范围为 $-0.8 \sim 0.8 \text{ cm}$; 波数间隔 $\Delta\nu$ 取 0.01 cm^{-1} , 相对于目前 0.625 cm^{-1} 大小的仪器分辨率, 已足够精细; 波数 ν 的取值范围为 $1650 \sim 2250 \text{ cm}^{-1}$; 温度 T 在 100 K 至 340 K 内均匀取 50 个值。计算 50 幅不同黑体温度条件下的干涉图。

将 50 幅干涉图的交流量绘制在一幅图上, 如图 1 所示。其中, 类似正弦曲线的不同曲线代表不同温度黑体辐射所对应的干涉图。对所有干涉图的最高点进行了归一化, 并截取图形的一部分进行了放大显示, 包含零光程差的位置。从图 1 中可以看出, 曲线已足够光滑, 图像以零光程差点为中心呈现对称性; 干涉强度呈现出由零光程差点向两侧递减的趋势。

干涉图是在直流偏置上叠加交流信号而形成的。图 2 为通过建模所得的某一温度黑体辐射的干涉图, 其特点与实测干涉图一致。图 2 定义了以下几个特征量: 干涉图的最大强度值为 I_{max} ; 直流偏置的强度为 I_{dc} , 由式(5)可知, 其值为 I_{max} 的二分之一; 干涉图的最小强度值为 I_{min} ; 相对最小值为 I'_{min} , 其值为 I_{dc} 与 I_{min} 之差, 即

$$I'_{min} = I_{dc} - I_{min} \quad (11)$$

将所有黑体温度条件下的干涉图的最大值 I_{max} 和直流流量 I_{dc} (共 50 对数据) 提取出来, 然后绘制 $I_{max} - I_{dc}$ 关系图。可以发现, 图形为一条过零点的直线, 其线性关系为 $I_{max} = 2I_{dc}$, 该结果与式(4)及式(5)一致。

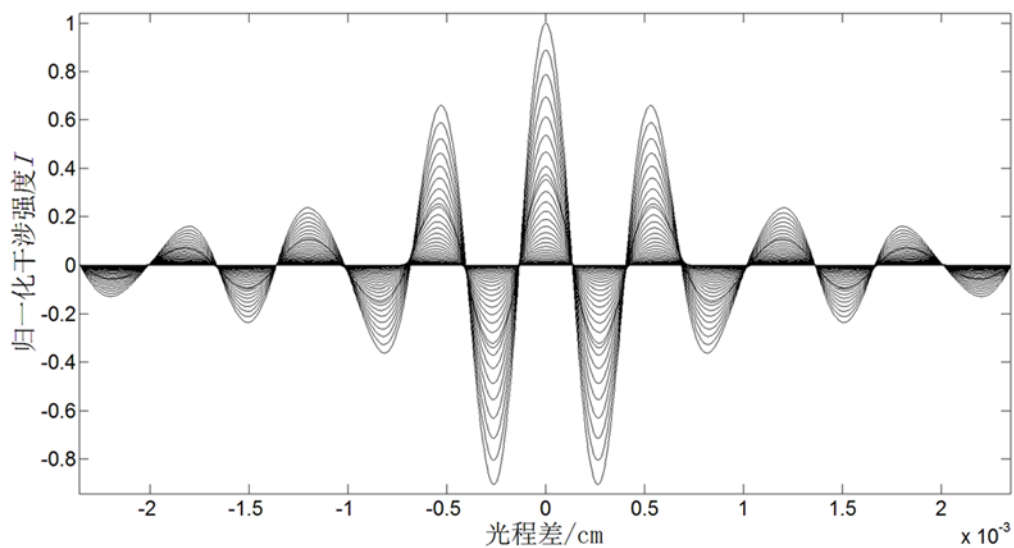


图 1 50 幅不同温度黑体辐射所对应干涉图的交流量

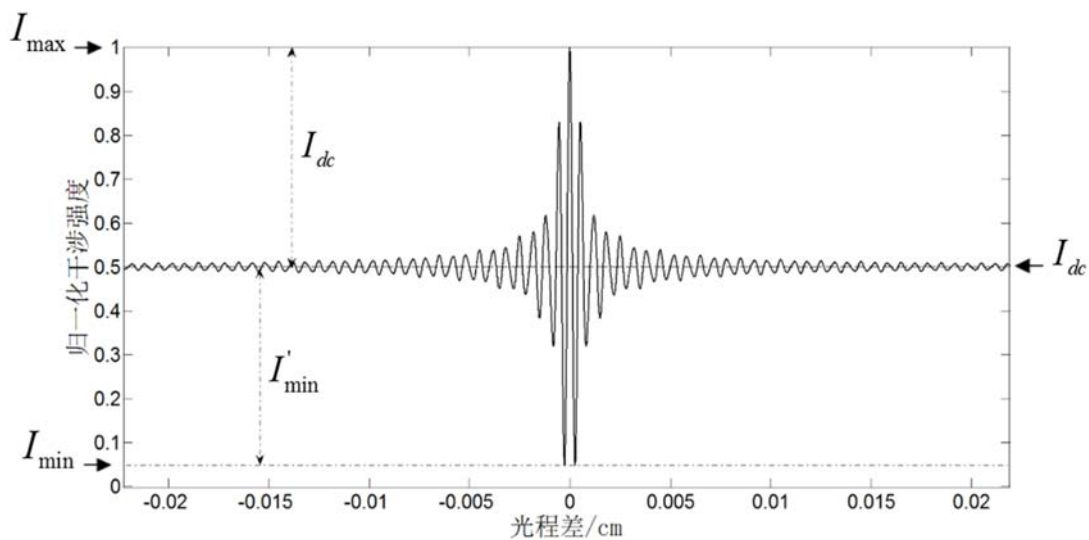
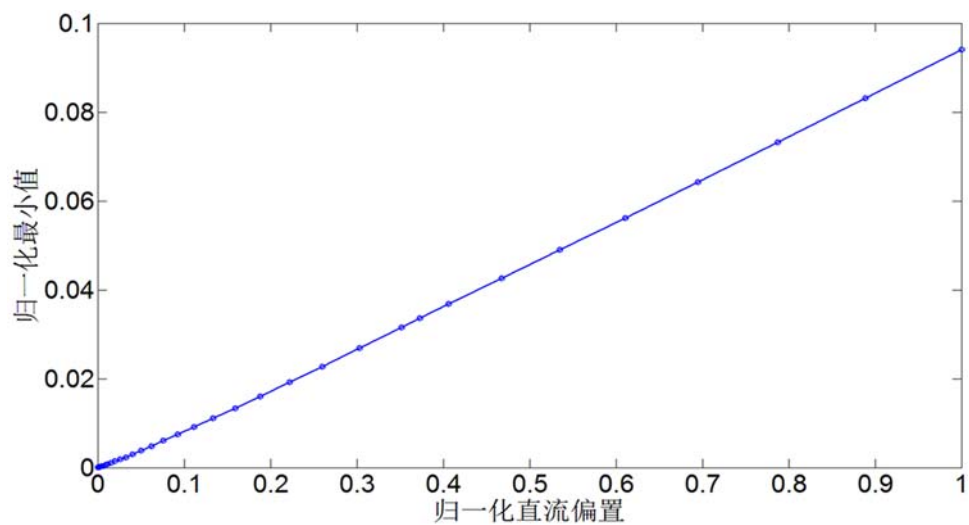
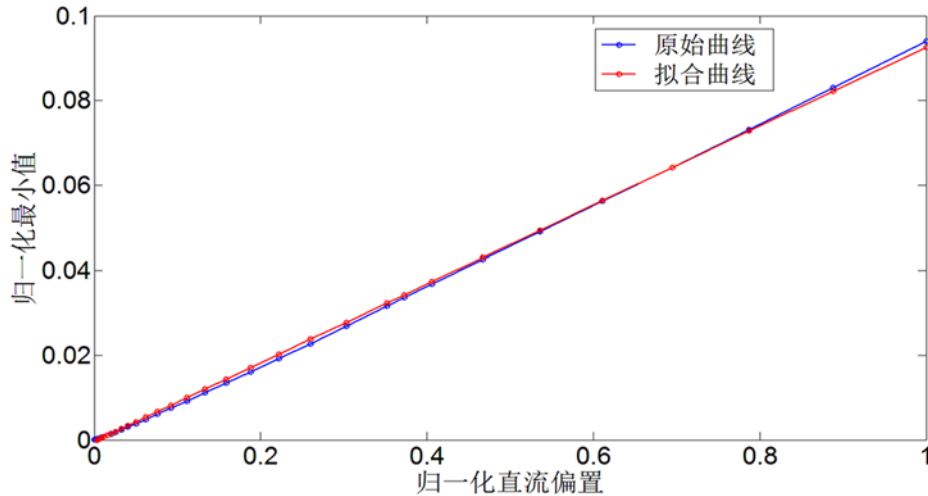


图 2 包含直流量和交流量的完整干涉图

图 3 最小值 I_{min} 随直流量 I_{dc} 变化的关系图

图 4 最小值 I_{min} 随直流量 I_{dc} 变化的关系图及线性拟合图

将所有黑体温度条件下的干涉图的最小值 I_{min} 和直流量 I_{dc} (共 50 对数据) 提取出来, 然后绘制出 $I_{min}-I_{dc}$ 关系图。可以发现, 该图形极其近似为一条过零点的直线。于是用 I_{dc} 中的最大值对 I_{min} 和 I_{dc} 进行归一化, 进而绘制出归一化后的 $I_{min}-I_{dc}$ 关系图 (见图 3)。然后用最小二乘法进行线性拟合。如图 4 所示, 拟合优度接近 1, 两条线吻合得很好; 蓝色实线表示 I_{min} 随 I_{dc} 变化的关系, 红色实线为拟合后的过零点直线, 其线性函数关系为

$$I_{min} = 0.0928 I_{dc} \quad (12)$$

结合式 (11) 可得相对最小值:

$$I'_{min} = 0.9072 I_{dc} \quad (13)$$

式 (13) 表明, 任意温度黑体的辐射只要在经过傅里叶光谱仪后进行干涉, 所形成的干涉图强度的相对最小值与直流偏置之间便近似成线性关系。

3 分析与应用

3.1 大气垂直探测仪的背景噪声分析

干涉式大气垂直探测仪是傅里叶光谱仪的应用实例。假设探测仪是一个线性系统, 仪器背景噪声的强度为 I_b 。为匹配采集系统, 在探测仪的信号获取模块中人为地给干涉信号叠加了

一个固定强度的信号。该信号也会包含在我们所计算的背景噪声 I_b 中。则有

$$\begin{cases} I_{dc} + I_b = I_{dc_m} \\ I_{max} + I_b = I_{max_m} \\ I_{min} + I_b = I_{min_m} \\ I'_{min} = I_{dc} - I_{min} \end{cases} \quad (14)$$

进而可得:

$$I'_{min} = I_{dc_m} - I_{min_m} \quad (15)$$

式 (14) 和式 (15) 中, I_{dc_m} 、 I_{min_m} 和 I_{max_m} 分别为测量直流偏置、测量最小值和测量最大值, 它们均为大气垂直探测仪的实测数据; I_{dc} 、 I_{min} 和 I_{max} 分别为不含背景噪声 I_b 的理论直流偏置、理论最小值和理论最大值; I'_{min} 为相对最小值。

由式 (15) 可知, 相对最小值 I'_{min} 可用 I_{dc_m} 和 I_{min_m} 算得; 结合式 (13) 可计算出理论直流偏置 I_{dc} ; 根据 $I_b = I_{dc_m} - I_{dc}$ 可计算出 I_b 。这种计算方法适用于任意温度黑体辐射所产生的干涉图。

根据由探测仪中波段中心像元探测的各个黑体温度所对应的干涉图, 得到测量直流偏置 I_{dc_m} 和测量最小值 I_{min_m} ; 由式 (15) 计算出相应的 I'_{min} 值; 根据式 (13) 得到相应的理论直流偏置 I_{dc} , 然后通过将其与 I_{dc_m} 进行对比, 计算出 I_b ; 由式 (11) 得到理论最小值 I_{min} ; 根据 $I_{max} = 2I_{dc}$ 和 $I'_{max} = I_{max} + I_b$, 得出计算最大值

表 1 各个黑体温度条件下的干涉图所对应的 I'_{min} 、 I_{dc} 、 I_b 、 I_{min} 和 η

黑体温度	I'_{min}	I_{dc}	I_b	I_{min}	η
101	418.618	461.439	1446.761	42.823	1.30%
180	439.387	484.333	1429.667	44.946	2.01%
210	448.234	494.085	1453.015	45.851	0.97%
250	618.150	681.382	1494.018	63.232	1.80%
265	762.124	840.084	1540.616	77.960	1.62%
280	1002.800	1105.379	1603.621	102.580	1.54%
295	1347.900	1485.780	1711.020	137.880	1.11%
300	1498.000	1651.235	1751.065	153.235	1.19%
302	1556.100	1715.278	1782.122	159.178	0.91%
305	1679.200	1850.970	1791.030	171.770	1.17%
310	1859.500	2049.713	1860.987	190.213	0.74%
330	2913.400	3211.420	2108.180	298.020	0.75%
340	3645.700	4018.629	2271.471	372.929	1.13%

I'_{max} 。由以上理论分析以及式 (14) 可知, I'_{max} 和 I_{max-m} 应该十分接近。通过计算两者的百分误差 η 可知, η 非常小, 在 1% 左右。这就可验证上述建模理论结果以及计算出的大气垂直探测仪背景噪声 I_b 的正确性 (详见表 1)。其中, 黑体温度的单位为 K; η 为百分误差; 其余物理量的单位为 DN, 即采集系统量化码的均值。

3.2 通过将减法电路用于 CTIA 型读出电路来提高动态范围的可行性分析

CTIA 型红外焦平面器件读出电路采用电容反馈跨阻抗放大电路, 在高增益差分放大器的反相端引入电容反馈, 相当于一个积分器^[9]。这种电路结构通常用于红外傅里叶光谱仪的焦平面探测器。受积分电容容量的限制, 在长积分时间条件下工作时容易造成信号饱和, 进而影响系统的动态范围。

由于探测到的干涉信号的最小值并不为零, 最初设想在 CTIA 电路中引入减法电路, 整体降低信号电压, 延缓积分电容饱和, 以提高系统的动态范围。由上述计算结果以及干涉图的最小值位置可知, 最小值 I_{min} 还不到直流量 I_{dc} 的十分之一, 且不足最大值 I_{max} 的二十分之一。即使从整体上降低信号电压也并不能显著

提高探测器的动态范围。而且由于 CTIA 型读出电路的集成度非常高, 为每个放大器引入减法电路的难度极大。因此, 通过在 CTIA 型读出电路中引入减法电路来提高系统动态范围的意义不大, 并不具有可行性。

4 结束语

本文系统介绍了迈克尔逊红外傅里叶光谱仪干涉图的获取原理和过程。首次采用将数值积分技术结合离散傅里叶变换的方式对干涉图特性进行了建模和计算, 分析了干涉图的直流偏置、最大值以及相对最小值等特征, 并定量给出了相对最小值 I'_{min} 和直流偏置量 I_{dc} 之间的近似线性关系。在国内首次从干涉图特性的角度分析了大气垂直探测仪系统的背景噪声, 且方法简便。通过对比不同黑体温度下干涉图的最大计算值和最大实测值可知, 百分误差在 1% 左右, 验证了 I'_{min} 与 I_{dc} 之间近似线性关系的正确性。然后对通过在 CTIA 型读出电路中引入减法电路来提高探测仪动态范围的方法进行了可行性分析。结果表明, 该方法并不具有可行性。综上所述, 本文能够为改善探测仪系统的噪声及动态范围提供一定的理论基础。

(下转第 29 页)