

傅里叶变换光谱仪探测器非线性影响及其校正方法

杨敏珠^{1,2}, 邹曜璞^{1,2}, 张磊^{1,2}, 韩昌佩²

(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 红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

摘要: 针对傅里叶变换光谱仪探测器引起的非线性进行研究, 阐述了非线性的产生、分析了非线性对光谱的影响以及介绍了两种校正二次项非线性的方法: 卷积法和迭代法。并采用这两种方法对干涉图进行二次非线性校正, 然后在卷积法与迭代法的基础上提出一种更适用于实际数据的新方法。最后采用这三种方法对模拟数据以及实际采集数据分别进行非线性校正, 实验数据说明校正后非线性能得到抑制。并且通过对比发现, 新的校正方法有较好的精度及更快的速度。

关键词: 傅里叶变换光谱仪; 非线性校正; 卷积法和迭代法

中图分类号: TH744.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1023001

Nonlinear effects of the Fourier transform spectrometer detector and its correction

Yang Minzhu^{1,2}, Zou Yaopu^{1,2}, Zhang Lei^{1,2}, Han Changpei²

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

2. Key Laboratory of Infrared Detection and Imaging Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The non-linearity caused by the detector of the Fourier transform spectrometer was studied, and the influence of non-linearity on the spectrum was discussed. The quadratic non-linearity correction methods were also discussed: convolution method and iterative method. Then the two methods were used to correct the nonlinear data. A new method which is more suitable for practical data was proposed based on both convolution method and iterative method. Finally, the three methods were used to correct the non-linearity of the simulated data and the actual data. The experimental data shows that the nonlinear performance of the data after correction was restrained. And it was found that compared with the other two methods, the new method has better accuracy and faster speed.

Key words: Fourier transform spectrometer; non-linearity correction; convolution method and iterative method

收稿日期: 2017-02-10; 修订日期: 2017-03-20

基金项目: 中国科学院上海技术物理研究所创新基金(Q-DX-79)

作者简介: 杨敏珠(1991-), 女, 博士生, 主要从事傅里叶变换光谱仪数据处理及压缩方面的研究。Email: 15821372732@163.com

导师简介: 韩昌佩(1979-), 男, 研究员, 博士, 主要从事航天光学载荷整机集成标定, 高精度扫描机构控制技术、遥感信息定量化等方面的研究。Email: changpei_han@mail.sitp.ac.cn

0 引言

时间调制型傅里叶变换光谱仪以迈克尔逊干涉仪为原型^[1],通过动镜的运动产生光程差,生成时间域上的干涉图,经过傅里叶变换后能够得到相应的频域上的光谱图。星上的傅里叶变换光谱仪能够获取来自地球辐射的干涉信息,傅里叶变换后再根据红外大气辐射传输模型,进一步反演可得到大气温湿度和水汽垂直廓线等气象学所需数据,以及大气化学组分、重要痕迹气体和温室气体浓度分布等环境研究所需数据。这对数值天气预报等气象学、环境和全球气候变化等研究具有重要意义^[2]。

根据世界气象组织(WMO)对大气探测所提出的温度准确度 1 K、湿度准确度 10%和垂直分辨率 1 km 的要求,美国超光谱环境探测器(Hyperspectral Environmental Sensor, HES)的研究报告指出,探测器和 ADC(Analog-to-Digital Converter)的非线性应优于 0.005^[3]。可见,非线性对后期数据的准确性是有影响的。需指出,若是在所采集的数据已能够达到甚至是优于指标要求的情况下,非线性的影响自是可以忽略不计,但随着日后指标要求的进一步提高,对数据的准确性要求也会越来越高,此时非线性便是不可忽略的了。

非线性的存在会引起复原光谱信噪比降低。一般来说,非线性效应受到仪器工作温度、探测器光学系统的结冰厚度或雾气、探测器工作温度、探测器使用时间、模数转换器工作温度等因素影响。其中,非线性最主要的来源是探测器。

文中对更准确的数据获取进行了探索,就非线性的最主要来源:探测器的非线性进行研究。解释其物理来源、分析了非线性对光谱所造成的影响,侧重对二次项非线性进行校正,分别采用了两种方法:卷积法与迭代法对干涉图进行非线性校正,比较这两种方法的优劣,并提出一种结合两种方式优点的校正方法。

1 探测器非线性的来源与影响

1.1 探测器非线性理论分析

碲镉汞(Mercury Cadmium Telluride, MCT)探

测器输出信号包括与光程差无关的直流分量和与光程差有关的交流分量,如图 1 所示。对光电导(Photoconductive, PC)和光生伏特(Photo Voltaic, PV)型的 MCT 探测器,输出信号与入射辐射强度理论上呈线性关系,但当入射辐射过大时,探测器饱和,造成输出信号的非线性。

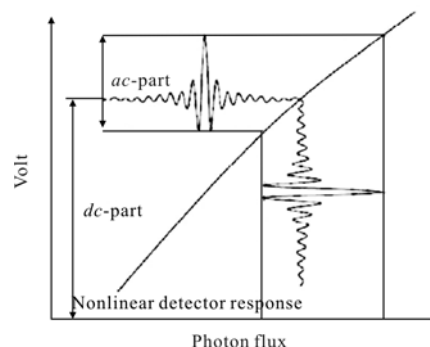


图1 干涉数据的非线性

Fig.1 Nonlinear of interferometric data

PC 和 PV 型探测器的非线性均满足 Reine^[4]提出的探测器模型,即入射辐射强度与光生导带电子浓度关系满足:

$$Q=C_1\Delta n+C_2(\Delta n)^2+C_3(\Delta n)^3+\cdots \quad (1)$$

式中: Q 为入射光辐射强度; Δn 为光生导带电子浓度; C_1 、 C_2 、 C_3 为系数。

测量干涉图光强 I_m 与光生导带电子浓度 Δn 成正比,理想干涉图光强 I_i 与入射光辐射强度 Q 成正比,于是可以推得测量干涉图光强 I_m 与理想干涉图光强 I_i 存在如下关系:

$$I_i=I_m+a_2I_m^2+a_3I_m^3+\cdots \quad (2)$$

式中: a_2 、 a_3 均为待定系数。

由公式(2)可知,理想干涉图光强 I_i 可表示为非线性干涉图光强 I_m 与其系列高次项的叠加。

根据傅里叶变换光谱仪干涉光强度 I 的表达式^[2],并结合普朗克定律,利用 matlab 能够模拟出波段为[1 500 cm⁻¹, 2 500 cm⁻¹]、温度为 340 K 的理想干涉数据,作 FFT (Fast Fourier Transformation) 得其频谱图并作归一化后如图 2 所示,一起列出的还有 I^2 、 I^3 、 I^4 单独作用下经 FFT 变换归一化后所得双边频谱图^[5]。以此来分析各高次项非线性对理想频谱的影响。

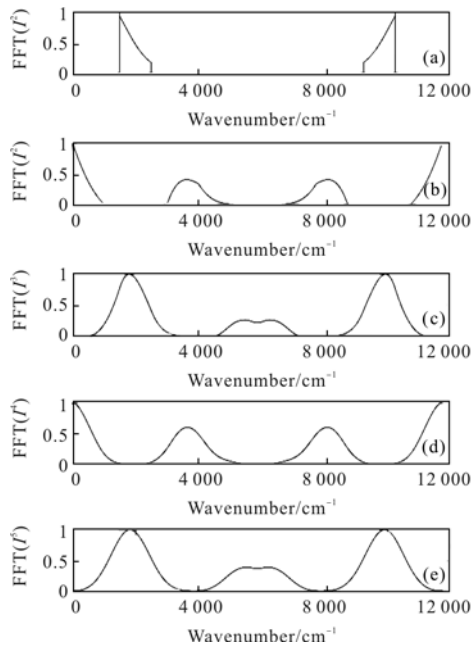


图 2 各次项单独的光谱曲线

Fig.2 Spectrum curves of every item

图 2 中,它们共用同一个横坐标[0,12 000],单位为波数 cm^{-1} 。由于是双边光谱图,其光谱图是对称的,所以重点观察左半部分。最上面一幅图说明理想光谱在 $1\,500 \sim 2\,500 \text{ cm}^{-1}$ 之间。图 2(a)~(e)分别是 I^2, I^3, I^4 以及 I^5 经 FFT 后的光谱图,可知偶次幂非线性效应引起的光谱缺陷分布大致相同,奇次幂项引起的光谱缺陷分布大致相同。观察发现二次项光谱缺陷大致分布在横坐标[0,1 000]和[3 000,5 000];三次项缺陷大致分布在[500,3 500]和[4 500,7 500],囊括了理想光谱所在的波段[1 500,2 500],并且在该波段的光谱幅度与理想光谱幅度趋势大致相同,所以三次项对 [1 500,2 500] 段光谱的影响可以理解为该波段内原本的光谱幅度乘了一个缩放因子。另外,随着幂的增加,其光谱缺陷分布范围在逐步向两侧外延,就比如由图中很明显的看出,5 次幂引起的光谱高频部分的缺陷范围由三次项的[4 500,7 500]扩展至了[4 000,8 000]。总的来说,高次幂对光谱的带内和带外均会造成影响,对带外光谱的影响图中很明显,表现为光谱的畸变,对带内光谱的影响一般表现为对光谱幅度引入一个缩放因子。在图中偶次幂对带内光谱的影响并未表现出来,文中会就由二次项引起的带内光谱畸变做详细分析。所有级次的非线性都会对带内和带外信号都有影响,但三次及以上

分量通常都相对较小,因此在文中仅考虑二次项非线性的分析与校正。

1.2 探测器二次项非线性的影响分析

根据上述分析,只考虑二次项非线性,则公式(2)可改为:

$$I_i = I_m + a_2 I_m^2 \quad (3)$$

探测器的输出信号包括与光程差无关的直流分量和与光程差有关的交流分量(见图 1),公式(3)可改为:

$$I_{iac} + I_{idc} = I_{mac} + I_{mdc} + a_2 (I_{mac} + I_{mdc})^2 \quad (4)$$

式中: I_{idc} 为 I_i 的直流部分; I_{iac} 为的交流部分; I_{mdc} 为 I_m 的直流部分; I_{mac} 为 I_m 的交流部分。

在频域,直流量表现在横坐标为 0 处,故单纯的直流量对光谱无影响,于是将公式(4)展开并将其中单独存在的直流量去掉得:

$$I_{iac} = I_{mac} + a_2 I_{mac}^2 + 2a_2 I_{mac} I_{mdc} \quad (5)$$

两边进行 FFT 得其在频域的关系式:

$$S_{iac} = (1 + 2a_2 I_{mdc}) S_{mac} + a_2 S_{mac} \otimes S_{mac} \quad (6)$$

式中: S_{iac} 代表 I_{iac} 做 FFT 所得的光谱; S_{mac} 则是由 I_{mac} 做 FFT 所得的光谱。

结合公式(6)及图 2 的分析可得二次项非线性对光谱的影响,公式(6)的卷积项 $a_2 S_{mac} \otimes S_{mac}$ 是纯粹由时域上的平方项引起,它造成了带外的两处缺陷,有低频和高频两处畸变,如图 3(a)所示。另外,在实际情况下,部分辐射被探测器系统反射所引起的双调制(Double Passing)现象^[5]也会对高频部分造成影

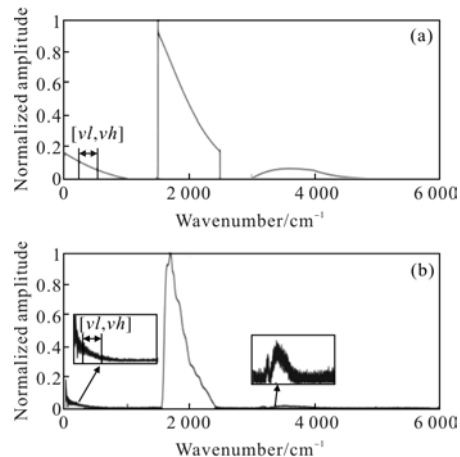


图 3 非线性光谱图

Fig.3 Nonlinear spectrum

响,如图 3(b)所示的实际 340 K 中波光谱图中高频部分所示;公式(6)的乘积项 $(1+2a_2I_{mac})S_{mac}$ 是对带内理想光谱 S_{iac} 进行了缩放,缩放因子为 $1+2a_2I_{mac}$:

$$S_{iac}=(1+2a_2I_{mac})S_{mac} \quad (7)$$

注意公式(7)仅对带内光谱有效。与公式(6)并不矛盾。

2 探测器二次项非线性校正方法

二次项非线性校正的关键是精确计算非线性校正系数 a_2 和对应直流分量 I_{mdc} ,其中直流分量可通过对干涉图求平均估算得来。而关于 a_2 的计算方式两种,一种较为直接的卷积法,另一种是不断逼近的迭代法。其理论基础均理想光谱带外光谱畸变为 0。

2.1 卷积法

根据分析,带外的光谱畸变由且仅由卷积项 $a_2S_{mac} \otimes S_{mac}$ 产生。高频带外光谱还混入了双调制效应所造成的光谱缺陷,而复原光谱横坐标为 0 处附近存在 $1/f$ 噪声^[5]和残余直流分量贡献。于是如图 3 所示,截取使用低波数段 $[vl,vh]$ 上的光谱幅度值数据对 a_2 进行估算。采用该方法^[5-6]对模拟数据以及实际中波干涉数据进行非线性校正。

采用 matlab 模拟受二次项影响的干涉图,引入 10^{-5} 的二次项非线性^[7],其归一化后的干涉图如图 4(a)所示,对干涉图进行 FFT 后归一化,得到对称的双边光谱图如图 4(b)所示。

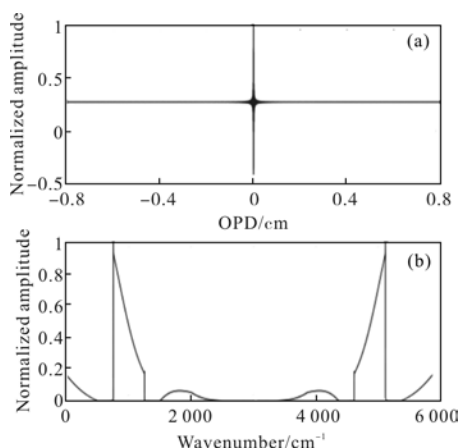


图 4 模拟非线性干涉图及其光谱图

Fig.4 Nonlinear simulation interferogram and its spectrum

经分析,在理想光谱的情况下,带外的 $[vl,vh]$ 上

的光谱幅度应该为 0,那么根据公式(6)有:

$$0=(1+2a_2I_{mdc})S_{mac}+a_2S_{mac} \otimes S_{mac} \quad (8)$$

公式(8)仅在 $[vl,vh]$ 上成立,根据此式可得:

$$a'_2[vl,vh]=-\frac{S_{mac}[vl,vh]}{S_{mac}[vl,vh] \otimes S_{mac}[vl,vh]} \quad (9)$$

代入可得:

$$a_2[vl,vh]=\frac{a'_2}{1-2a'_2I_{mdc}} \quad (10)$$

根据公式(9)确定 a_2 为负,根据公式(7), $(1+2a_2I_{mdc}) < 1, S_{iac} < S_{mac}$,得出结论,二次项非线性对带内光谱的影响是使其光谱幅度增大。使用雅克比扰动法^[5]对 $a_2[vl,vh]$ 拟合最终可得 a_2 值。

表 1 列出了分别引入 8×10^{-6} 、 9×10^{-6} 、 10^{-5} 、 1.1×10^{-5} 、 1.2×10^{-5} 非线性的模拟数据和一个实际数据采用卷积法求得的 $|a_2|$ 值,及其引入非线性的相对误差,可用来描述卷积法的精度,数据均保留三位小数。

表 1 卷积法求值 $|a_2|$

Tab.1 $|a_2|$ calculated by convolution

Introduction non-linear/ 10^{-5}	$ a_2 /10^{-5}$	Error
0.8	0.799	0.175%
0.9	0.898	0.178%
1	0.998	0.17%
1.1	1.098	0.173%
1.2	1.198	0.175%
Experimental data	0.996	-

最后,可由公式(4)得理想干涉图,公式(7)得理想带内光谱。图 5(a)所示是带有 10^{-5} 非线性的模拟数据校正前后的光谱进行归一化后对比图,图 5(b)

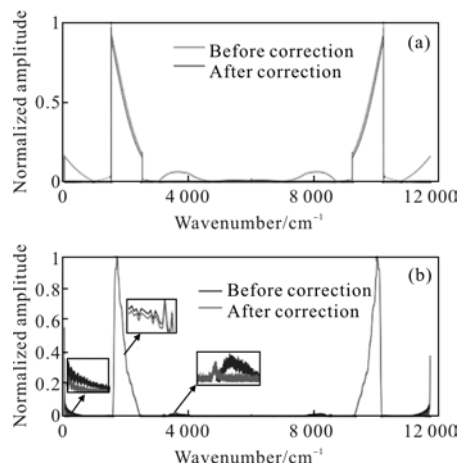


图 5 卷积法校正前后

Fig.5 Before and after convolution correction

所示是实际数据校正前后的光谱幅度归一化后的对比图。可发现校正后带外的光谱畸变有了很大的改善,得到了很好的抑制。校正后的带内光谱幅度较校正前有所减小。

2.2 迭代法

迭代法可用于二次,三次或更高次项非线性校正系数的计算。

采用它进行二次项系数校正,其主要步骤^[5]如下:

(1) I_m 经傅里叶变换得到对应复数光谱;将复原复数光谱的带外光谱信号置零,如上考虑,置零波段同样为 $[v_l, v_h]$,得到经带外光谱缺陷置零处理光谱;

(2) 置零处理光谱经逆傅里叶变换得到修正干涉图 $I_{\text{修正}}$;

(3) 对于干涉图 I_m 和修正干涉图 $I_{\text{修正}}$ 的实部做二项式拟合,得到拟合系数 a_2 ;

(4) 利用获取的拟合系数 a_2 对原始干涉图进行非线性校正;

(5) 重复上述步骤直至符合要求。

经三次迭代后修正的模拟干涉图和实际干涉图经傅里叶变换后再归一化处理得光谱如图 6 所示,图 6(a)画出了带有 10^{-5} 的非线性的模拟数据经过三次迭代的光谱,可见每经过一次迭代,其带外非线性就被抑制一点,其中三次迭代时抑制最明显。理论上,随着迭代次数增多,其带外非线性畸变部分的光谱幅度值就越来越接近 0。图 6(b)的实际光谱数据趋势是和模拟数据一样的。

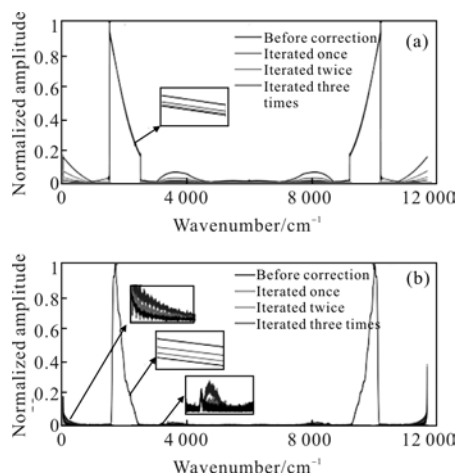


图 6 三次迭代校正前后

Fig.6 Before and after three iterations

迭代在达到满意的值前可以无限制进行下去。图 7 是带有 10^{-5} 的引入了二次项非线性的模拟数据以及实际数据处理过程中 a_2 随迭代次数(500)变化的趋势图。

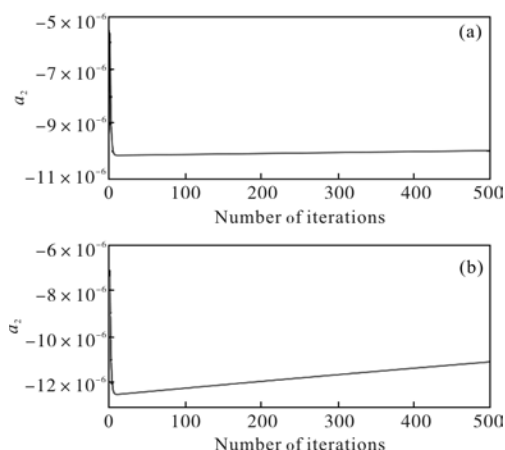


图 7 模拟数据和实际数据处理过程中 a_2 随迭代次数的变化

Fig.7 a_2 of simulated data and experimental data change with the iterations during the process

模拟数据和实际数据相同, a_2 刚开始随着迭代次数的增加而减小, 在一个临界点之后开始始终递增直至 a_2 的值无限趋近于 0, 由于每次进行二项式拟合时, I_m 始终不变, 所以过了临界点之后的值会与临界点之前的值重复, 并没有实际意义。根据数据模拟, 在临界点之前, 随着迭代次数的增加, 其带外畸变不断变小, 于是, 根据理论分析在迭代法中取临界点的值作为 a_2 的估算值。

表 2 是引入不同非线性的情况下模拟数据以及实际数据的迭代极限次数以及对应的 $|a_2|$ 值, 还列举了模拟数据采用迭代法所求非线性的误差, 可用来描述迭代法的精度, 数据均保留三位有效小数。

表 2 迭代法求值 $|a_2|$

Tab.2 $|a_2|$ calculated by iteration

Introduction non-linear/ 10^{-5}	Limited times of iterations	$ a_2 /10^{-5}$	Error
0.8	13	0.808	0.959%
0.9	13	0.911	1.211%
1	12	1.015	1.48%
1.1	12	1.119	1.755%
1.2	12	1.224	2.033%
Experimental data	10	1.25	—

3 新的校正方法

3.1 卷积法与迭代法的优劣

对比发现,卷积法由理论直接推导而成,只需一次便可以使非线性得到很好的校正,其相对误差小,但是卷积法所得到的 a_2 求出来一开始是一个 $[vl,vh]$ 的数组,需要进一步对 a_2 数组使用算法复杂的雅克比扰动法使其收敛成一个值,而在实际使用过程中由于噪声的影响, a_2 数组跨度较大,不易收敛,更加大了算法难度。

迭代法算法简单,缺点在于迭代法没办法一步到位,需要通过不停的修正迭代直到达到满意值,误差比卷积法来的大(见表 1、表 2)。根据理论可将临界点的值作为最终的 a_2 值。但在实际处理过程中,噪声会在迭代过程中影响判断,如图 6(b)所示的实际数据迭代,其趋势和模拟数据一致,但二次迭代的带外畸变光谱和三次迭代的带外光谱已几乎难以分辨。直接采用临界点值作为 a_2 值的方法用在实际数据中会引入更大的误差。

3.2 新方法概述

根据上述情况,结合两种方式提出一种更适用于实际数据非线性校正的方式:

采用卷积法估算出 a_2 的范围,是一个数组,选取其中的最大值、最小值以及平均值;将最大最小值作为迭代法的阈值,采用迭代法进行迭代,最后从符合条件的迭代值中选择一个与平均值误差最小的值作为最终的 a_2 。若迭代过程中没有落到该阈值内的迭代值,则选取迭代两端值分别与平均值对比,选取误差较小的。

如表 3 所列是模拟数据(10^{-5} 非线性)与实际数

表 3 模拟数据和实际数据非线性校正系数表

Tab.3 Coefficients of simulated data and experimental data nonlinear correction

Method data	Convolution/ 10^{-5}			Iteration/ 10^{-5}	
	Max	Min	Avg	5	6
Simulated data	0.999	0.996	0.998	0.998	1.007
Experimental data	0.624	2.22	1.007	2	3
				0.993	1.13

据采用新方法校正过程中卷积法与迭代法系数的列表,数据均保留三位有效小数。

对模拟干涉数据进行校正时,由卷积法得出范围为 $[9.96 \times 10^{-6}, 9.99 \times 10^{-6}]$,再经过迭代法,迭代 5 次有 $|a_2|=9.98 \times 10^{-6}$,迭代 6 次有 $|a_2|=1.007 \times 10^{-5}$ 。选取在阈值范围内的 9.98×10^{-6} 作为 $|a_2|$ 。与实际引入非线性 10^{-5} 很接近,直接带入公式(4)可得校正后的光谱图,其校正图可参考图 5(a)。

对实际中波数据进行校正时,如表 2 所示,由卷积法得出范围为 $[6.24 \times 10^{-6}, 2.22 \times 10^{-5}]$,由于噪声等一系列的影响,其跨度比较大;表 2 可得在第 10 次迭代时达到极限 1.25×10^{-5} 。首先对修正范围为 $[6.239 5 \times 10^{-6}, 1.25 \times 10^{-5}]$,同时,将大于 1.25×10^{-5} 的数据当做噪点全部剔除,对剩下的数据再进行一次求平均得 $1.007 2 \times 10^{-5}$ 。迭代两次有 9.93×10^{-6} ,迭代三次有 1.13×10^{-5} ,根据原则,选取前者作为 $|a_2|$ 的值。其校正图可参考图 5(b)。

3.3 新旧方法对比

新方法是為了能够更好地进行实际数据的非线性校正而提出的基于卷积法与迭代法的一种改进方法,表 4 是列举了新方法在引入不同非线性的情况下模拟数据以及一个实际数据的性能指标,包括迭代次数、对应的值,以及模拟数据所求非线性的误差,数据均保留三位有效小数。

表 4 新方法计算值 $|a_2|$

Tab.4 Calculated $|a_2|$ by new method

Introduction non-linear/ 10^{-5}	Number of iterations	$ a_2 /10^{-5}$	Error
0.8	6	0.796	0.525%
0.9	6	0.897	0.378%
1	6	0.998	0.21%
1.1	6	1.099	0.064%
1.2	5	1.201	0.075%
Experimental data	3	0.993	—

对比表 1、表 2、表 4 的性能指标得出,在运算速度方面,迭代法每一次迭代都需要一次 FFT 和一次 iFFT,所以迭代时间与迭代次数成正比,新方法通过卷积法的估测范围,迭代次数减少了将近一半,能够节省大量迭代时间;在计算结果方面,和迭代法相

比,新方法所求非线性的误差较小,说明它有着更好的精度,和卷积法对比则没有明显的优势。

4 结 论

文中采用 Reine 提出的探测器的模型对探测器非线性进行分析,建立了理想干涉图光强与实际干涉图光强的联系。通过对比模拟理想干涉图 I 及其不同次方经过 FFT 后的光谱图,分析了不同次项的非线性对带内外光谱的影响,其中二次项非线性对光谱的影响是使带外光谱畸变,使带内光谱幅度增大。采用卷积法和迭代法两种方法对二次项非线性进行校正后,带外光谱畸变得到抑制,带内光谱幅度减小。这两种算法各有优点,卷积法精确,迭代法简单。结合两者提出一种新的校正方式,新方法能更好的适用于实际数据的二次项非线性校正。实验数据证明新方法有着较快的速度以及较高的精度。

参考文献:

- [1] Zhang Chunmin. Interference Imaging Spectroscopy [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
张淳民. 干涉成像光谱技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] Zhou Shichun. Introduction to Advanced Infrared Optoelectronic Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)
周世椿. 高级红外光电工程导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [3] Li J, Sun F, Schmit T, et al. Study of the hyperspectral environmental suite (HES) on GOES-R[C]//20th International Conference on IIPS, 2004: 21.
- [4] Broudy R M, Reine M B. Advances in HgCdTe infrared focal plane technology [C]//21st Annual Technical Symposium. International Society for Optics and Photonics, 1979: 62-68.
- [5] Liu Jiaqing. Research on real-time data processing techniques for infrared interferometer [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
刘加庆. 红外干涉仪器实时数据处理技术研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2014.
- [6] Goddard Space Flight Center. Algorithm theoretical basis document for the cross track infrared sounder sensor data records[EB/OL].(2014-12-23)[2016-8-7]. http://www.star.nesdis.noaa.gov/jpss/documents/ATBD/D0001-M01-S01-002_JPSS_ATBD_CrIS-SDR_C.pdf.
- [7] Zavyalov V V, Fish C S, Bingham G E, et al. Preflight assessment of the cross-track infrared sounder (CrIS) performance[C]//SPIE Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2011, 8176: 817606.