

doi:10.3788/gzxb20174603.0311003

# 非对称空间外差光谱仪自适应频率跟踪处理方法

彭翔<sup>1</sup>, 张崑<sup>2</sup>

(1 中国科学院光电技术研究所 光电传感技术研究室, 成都 610209)

(2 上海卫星工程研究所 上海市深空探测技术重点实验室, 上海 201109)

**摘 要:**非对称空间外差光谱技术是一种新型的超高分辨率遥感探测技术, 要求后期的数据处理技术也具有相应的超高准确度. 从数字信号处理的角度, 提出了一种自适应的频率跟踪处理方法, 根据信号的空间频率来插值补偿信号的相位偏移, 并且递归迭代出最接近真实值的相位信息. 经仿真实验对比验证表明, 在噪声干扰强度不大的条件下, 相较于传统傅里叶变换方法, 本文算法对信号频率和相位提取的准确度提高了约 100 倍以上, 能够有效降低非对称空间外差光谱技术的系统误差.

**关键词:**非对称空间外差光谱仪; 数字信号处理; 频率跟踪算法; 迭代补偿; 相位准确度

中图分类号: O438.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)03-0311003-8

## Adaptive Frequency Tracking Processing Method for Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne Spectrometer

PENG Xiang<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>2</sup>

(1 Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

(2 Key Laboratory of Deep Space Exploration Technology, Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne (DASH) spectroscopy is a new hyperspectral remote detection technology, which requires the data processing technology should also have corresponding super high precision. From the viewpoint of digital signal processing, an adaptive frequency tracking method was proposed, which is based on the spatial frequency of the signal to compensate the phase shift of the fringe signal, and recursive iterate to the phase information most close to the real value. Verified by simulation experiment contrast, the results show that, under the low intensity noise condition, the frequency tracking algorithm can improve the accuracy of signal frequency and phase extraction by about more than 100 times to compare with the traditional Fourier transform method, which proves it can effectively reduce the system error of DASH spectroscopy.

**Key words:** Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne spectroscopy; Digital signal processing; Frequency tracking algorithm; Iterative compensation; Phase precision

**OCIS Codes:** 110.2990; 110.2960; 040.2840; 050.5080; 070.2025; 070.2615; 070.4560

## 0 引言

非对称空间外差光谱技术是一种新型超光谱遥感探测技术, 具有超高分辨率、高光通量、无运动部件等优点. 可以通过光谱仪对采集到的干涉图像作分析, 以获取高准确度的光谱信号频率、相位等信息<sup>[1-2]</sup>. 然而, 在实际工程环境中, 由于分束器均匀性、探测器响应线性度、电子线路误差、环境噪声等因素的影响, 将会造成干涉图信号的畸变或带来误差. 对于这些由系统环境所造成的畸变失真, 一方面需要在硬件系统中尽量减

**基金项目:**国家重点基础研究发展计划(No. 2014CB744204)和上海市深空探测技术重点实验室开放课题(No. DS201501-003)资助

**第一作者:**彭翔(1988-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要研究方向为数字信号处理、高精度测量算法等. Email: flying000111222@aliyun.com

**收稿日期:**2016-08-15; **录用日期:**2016-12-09

<http://www.photon.ac.cn>

小其影响,另一方面也需要在后端数据处理环节中进行校正<sup>[3-4]</sup>.

从数据处理的角度分析,需要从周期信号中准确提取基础频率及相位信息.传统的处理方法主要是基于傅里叶变换的相位提取和计算<sup>[5-6]</sup>.此类方法一般需要反复测量,获取相位误差相对于光频率和探测器像元的误差函数曲线,然后进行补偿和校正<sup>[7-8]</sup>,通常测量准确度有限且不具有统一的自适应性.

本文从理论出发,提出一种自适应频率跟踪的方法.在 Matlab 中模拟生成干涉条纹信号,并考虑如条纹倾斜、高频谐波、随机噪声干扰等情况,根据波形空间频率的跟踪映射来获取信号的相位信息.经仿真验证,本文方法较传统方法具有更高的测量准确度和更好的自适应性.

## 1 非对称式空间外差光谱仪

非对称式空间外差光谱仪的结构如图 1,光栅与光轴正交面成 Littrow 角  $\theta$  倾斜放置.轴向光以角  $\theta$  入射到光栅上,某一波数(波长的倒数)的光将以  $\theta$  角沿原方向衍射回来,此波数称为光栅 Littrow 波数. Littrow 波数的光经两光栅衍射后,两出射波面都与光轴垂直,位相差为零,形成零频率的空间干涉条纹.非 Littrow 波数的光经两光栅衍射返回后,传播方向与光轴间有一小的夹角  $\gamma$ .单色的非 Littrow 波数的两波面将有一夹角  $2\gamma$ .不同频率的光从光栅出射时的波面与光轴正交面的夹角  $\gamma$  由光栅方程决定,即

$$\sigma[\sin \theta + \sin(\theta - \gamma)] = m/d \quad (1)$$

式中,  $\sigma$  为入射光的波数,  $m$  为衍射级(通常取  $m=1$ ),  $1/d$  为光栅的刻线密度.

任意波数  $\sigma$  的光束与 Littrow 波数  $\sigma_0$  的光束出射角相差角度  $\gamma$ ,则两光栅出射光波面相差角度为  $2\gamma$ ,故波数为  $\sigma$  的两束光干涉空间频率为

$$k_x = 2\sigma \sin \gamma \approx 4(\sigma - \sigma_0) \tan \theta \quad (2)$$

当入射光为  $B(\sigma)$  时,所得到的干涉图为

$$I(x) = \int_0^{\infty} B(\sigma) (1 + \cos \{2\pi[4(\sigma - \sigma_0)x \tan \theta] + \varphi + \delta\varphi\}) d\sigma \quad (3)$$

式中,  $x$  为像元位置,  $\varphi = 4\pi(\sigma - \sigma_0)\Delta d$  为光谱仪引入的额外相位差,  $\delta\varphi$  为 Doppler 频移引起的相位差.经过傅里叶变换,分离出特征谱线后进行逆变换,计算相位,总相位为虚部与实部之比,即

$$2\pi k_0 x + \varphi_0 + \delta\varphi_0 = \arctan \left( \frac{\Im(I_D^0)}{\Re(I_D^0)} \right) \quad (4)$$

式中左边的前两项为需要定标的零速相位,可通过初始定标来确定.

采用非对称式空间外差光谱仪,是为了引入额外的光程差用于对多普勒速度的解算<sup>[9-10]</sup>.非对称空间外差光谱仪中两分光路的光程并不相同,光谱的微小频移将导致其干涉图样的相移,且相移大小随两干涉光束光程差的增加而增加.相位变化与速率关系为

$$v = \frac{c \cdot \delta\varphi_0}{4\pi \cdot \Delta d \cdot \sigma} \quad (5)$$

由式(4)得到的相位差代入式(5)即可得到速度变化量.从式(5)可以看出,影响速度的测量准确度的相关量有很多,包括谱线波长、可探测的相位准确度和光程差.在相同环境条件下,采用因 Doppler 频移不同的前后两幅图像计算相位差,即可计算出装置所处环境的相对速度差异,此即为利用空间外差光谱仪进行遥感测速的基本原理.对非对称式空间外差光谱仪而言,多普勒频移所引起的干涉条纹的相移为

$$\delta\varphi = \frac{2\pi \cdot v \cdot (2\Delta d)}{c \cdot \lambda} \quad (6)$$

式中,  $v$  为视向速度.假设目标光源谱线的中心波长为  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ,谱线宽度为  $\Delta\lambda = 0.01 \text{ nm}$ ,则其波数为  $\sigma = 1/\lambda$ ,系统中两臂的光程差取  $2\Delta d = 30 \text{ mm}$  时,  $v = 1 \text{ m/s}$  对应的相位差约为  $0.001 \text{ rad}(0.0573^\circ)$ .

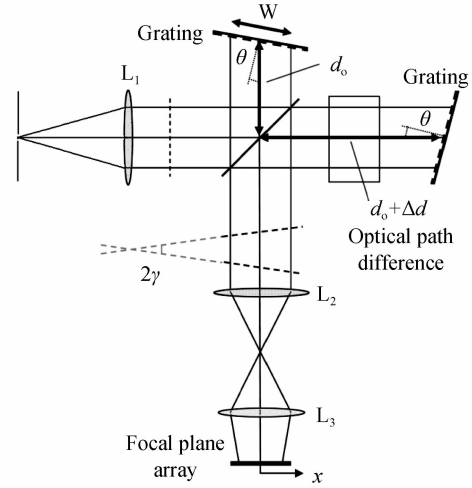


图 1 非对称式空间外差光谱仪结构示意图  
Fig. 1 DASH spectrometer structure diagram

## 2 传统处理方法的局限性

从 CCD 相机采集获得干涉图像后,需要通过处理算法计算出光谱的相位信息. 由干涉条纹图像获取输入信号如图 2,沿  $x$  轴截取一行像素值序列作为输入信号,每一行波形单独运算. 由于某些不确定的干扰因素存在,仅以某一行信号计算的相位结果来代表图像状态会有所偏失,而由所选取一片区域的所有信号得到多个相位作为一组信息会更加全面.

信号处理中,对于稳定的周期信号,最为常用和传统的处理方法就是离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transformation, DFT). 通常,正弦信号表示为

$$I(x) = \sqrt{2} \cdot I_m \cdot \cos(kx + \varphi_0) \quad (7)$$

DFT 变换式为

$$J(n) = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{m=0}^{N-1} I(m) \cdot \exp\left(-j \cdot \frac{2\pi}{N} \cdot n \cdot m\right) \quad (8)$$

式中,  $m$  为输入信号采样点的序号,  $n$  为基频谐波次数,  $n=1$  表示当前基频(频谱分辨率)信号.

对传统方法,首先考虑光谱仪的平场波长定标问题<sup>[11]</sup>. 即获取实际 Littrow 基频波数,可以通过采用不同波长的入射光获取干涉图的相位斜率  $k$  或者干涉条纹空间频率  $f$ ,其本质是确定干涉条纹的基频周期. 然而,由前面描述的几个因素,获取的波形周期  $N$  一般不可能刚好为整数,即一个周期的条纹信号并非等于整数个像素完全采样.

由式(8)的描述,离散傅里叶分析是对整段信号进行,因此所获得的频谱将分散在实际频率周围的各个整数频率点上(相当于傅里叶级数展开). 若要恢复原始信号,则需要反变换所有频率点信号并叠加,但此时误差信号会在一定程度上与有效信号混叠,造成实际有效信号的失真. 同时,由于干涉条纹的倾斜和采样数据的离散性,使得同一干涉图中不同行(截面)信号所计算的相位差存在一定误差(此为算法的测量误差).

为解决该问题,研究者提出基于二维快速傅里叶变换(Fast Fourier Transformation, FFT)后再映射到一维的校正方式<sup>[12]</sup>和以条纹切线方向旋滤波处理的方法<sup>[13]</sup>. 但这类方法在实际应用中困难较大,原因为:1)计算量大;2)准确性取决于条纹倾斜角度的准确测量计算,不具备自动化和通用性;3)实际所求的是两两图像之间对应像素点的相位差,要求前后实验图像的环境条件一致(时间间隔小).

## 3 自适应频率跟踪算法的实现

本课题中关于干涉条纹的处理问题主要难点为:

- 1) 图像条纹的空间频率无法预知,要求处理算法对条纹空间频率具有高度的自适应性;
- 2) 在实际工程中,由于无法保证光谱仪两光栅的刻线方向严格平行,或光路非严格准直等因素,可能使生成的干涉条纹产生倾斜(如图 2),需要处理算法具有对倾斜条纹的适应处理能力;
- 3) 由于光谱线宽、探测器非线性响应、背景噪声等因素的影响(包括一些预处理中没有完全滤除的能量衰减、边沿失真等),所获得的干涉图像实际上是存在多种高频干扰信号的,实际处理中需要将这些干扰项尽可能滤除,或者对它们进行适当处理和校正.

针对这些问题,本文提出自适应频率跟踪处理算法,基于“相位-频率”关系的反馈迭代改进 DFT 变换,具体实现步骤为:

1) 选择光强对比度高且分布较均匀的图像区域,由干涉图像截取输入信号波形,截取图像区域的行数作为一组信号的个数.

2) 对每一个输入信号,提取其空间频率,对应干涉图像中条纹的密度. 由此得到一个周期信号所对应的像素个数  $N$ (通常情况下不会正好是整数),四舍五入获取最为接近的整数  $N_c$ (对应设定信号处理频率  $f_0$ ),此时  $N_c$  作为 DFT 变换的周期点数,因为 DFT 变换只能取整数个点进行处理.

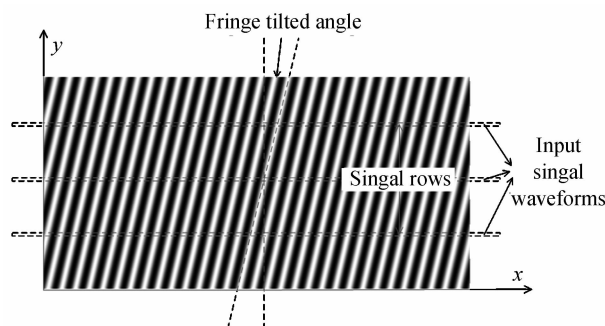


图 2 由干涉图像截取输入信号波形  
Fig. 2 Capture input signal waveform from interference image

3)针对各个不同  $N$  与  $N_c$  之间的差异,采用拉格朗日二次插值,获取基于  $N_c$  的等相位点.即用原始数据模拟出对应于周期  $N_c$  的周波数据,相当于压缩或拉伸原数据波形至  $N_c$  对应的一整周波,保持原波形相位不变,实现对空间频率的跟踪.如图 3.

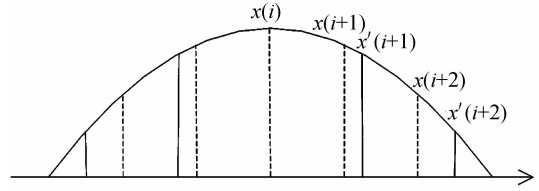


图 3 连续采样点跟频插值示意图

Fig. 3 Frequency tracking signal sampling diagram

4)频率跟踪之后可进行 DFT 变换,求取实虚部,然后获得相位.此时采用余弦、正弦系数分别求

取实虚部(即对基频的 DFT 变换),周期数为  $N_c$ .同时,在实虚部上采用低通滤波器进行滤波<sup>[14]</sup>(相当于在原始信号上使用以  $f_0$  为基准的带通滤波器),消除谐波分量或带外频率等高频误差信号造成的干扰.

[注:采用低通滤波器的原因有两点,1)低通滤波器阶数较低,可减少计算量且能更多地保持信号有效段;2)在实际应用中,其形成的干涉条纹基础周期所占像素个数并非确定不变的(跟实际光谱频率、成像焦距等有关),事先设定带通系数不太可靠,且不利于修改].

5)更新的频率值由当前周波相量与上一周波相量的相位值取差分得到,见式(9).可见频率的精确度取决于相量角度的精确计算,而相量的精确度则取决于频率跟踪的计算和滤波处理的效果.于是此算法构成了一个反馈型的迭代处理方式,初始频率采用直接 DFT 选取的基频值,在信号近似为稳定周期波形的条件下,经数次迭代后可得到接近于真实值的高准确度测量值,如图 4.

$$f(i) = l/N_c + [\alpha(i) - \alpha(i-1)] \cdot l/360 \quad (9)$$

式中,  $i$  为迭代次数的序号,  $l$  为输入信号长度,  $N_c$  为一周期信号所占像素点数,  $f$  为空间频率,  $\alpha$  为相位角度.

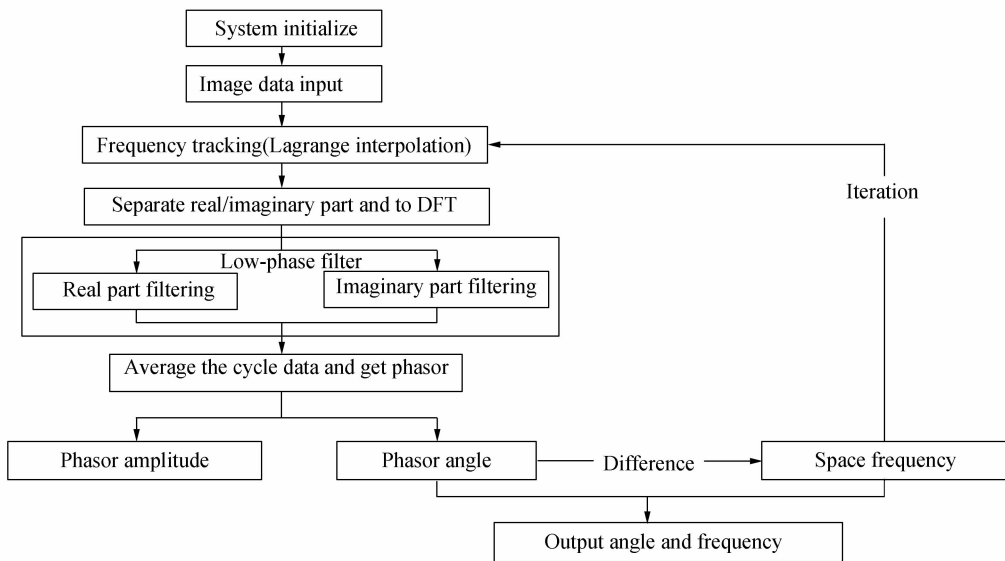


图 4 算法处理流程

Fig. 4 Algorithm processing flow diagram

## 4 仿真结果分析

在 Matlab 仿真平台中,采用人为生成的干涉条纹数据(前后  $30^\circ$  的相位差),在相同条件下使用本文提出的自适应频率跟踪方法与传统傅里叶正反变换方法进行了仿真对比.假设输入为稳定信号,模拟的干涉条纹图像尺寸为  $1024 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ ,选取不同的条纹方向偏移角度(如图 2)、条纹周期尺寸、是否有谐波干扰、背景噪声等因素,分别对比算法效果.由于条纹倾斜以及像素值离散化的因素,由不同行信号计算得到的相位差并不一致.沿  $y$  轴方向自上而下选取中心区域的 256 行信号分别求取相位差,将所得结果按序号连接成曲线,观察算法效果.选取条纹周期  $N=16$  像素,输入相位差理论值  $30^\circ$ ,根据外部噪声的不同情况,对比结果分别如图 5、图 6.其中,图 5 为无噪声条件下两种处理算法的效果对比;图 6 为高斯噪声下两种处理算法的效果对比.

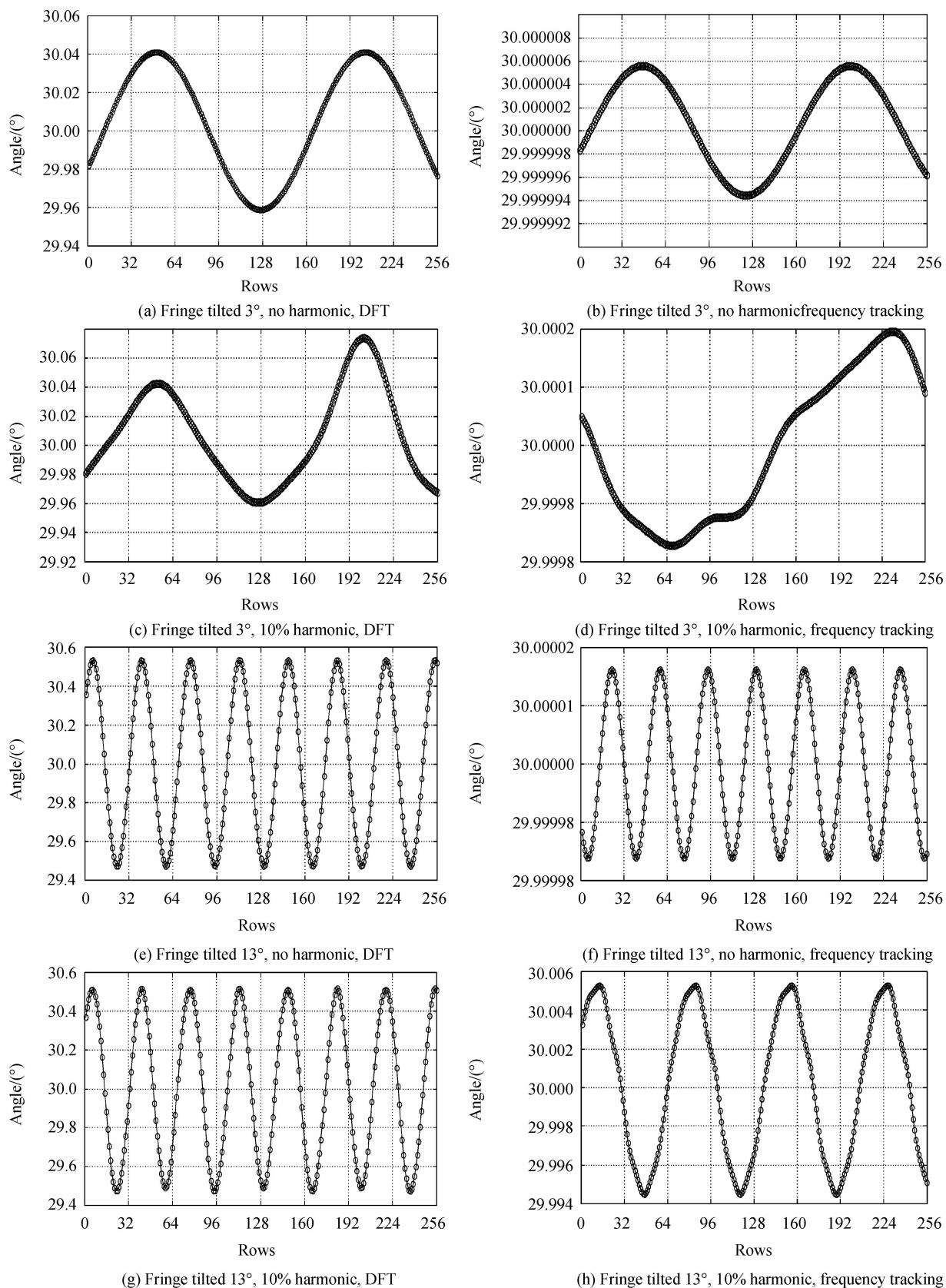


图5 无噪声条件下两种处理算法效果对比  
Fig. 5 Comparison of two algorithms without noise condition

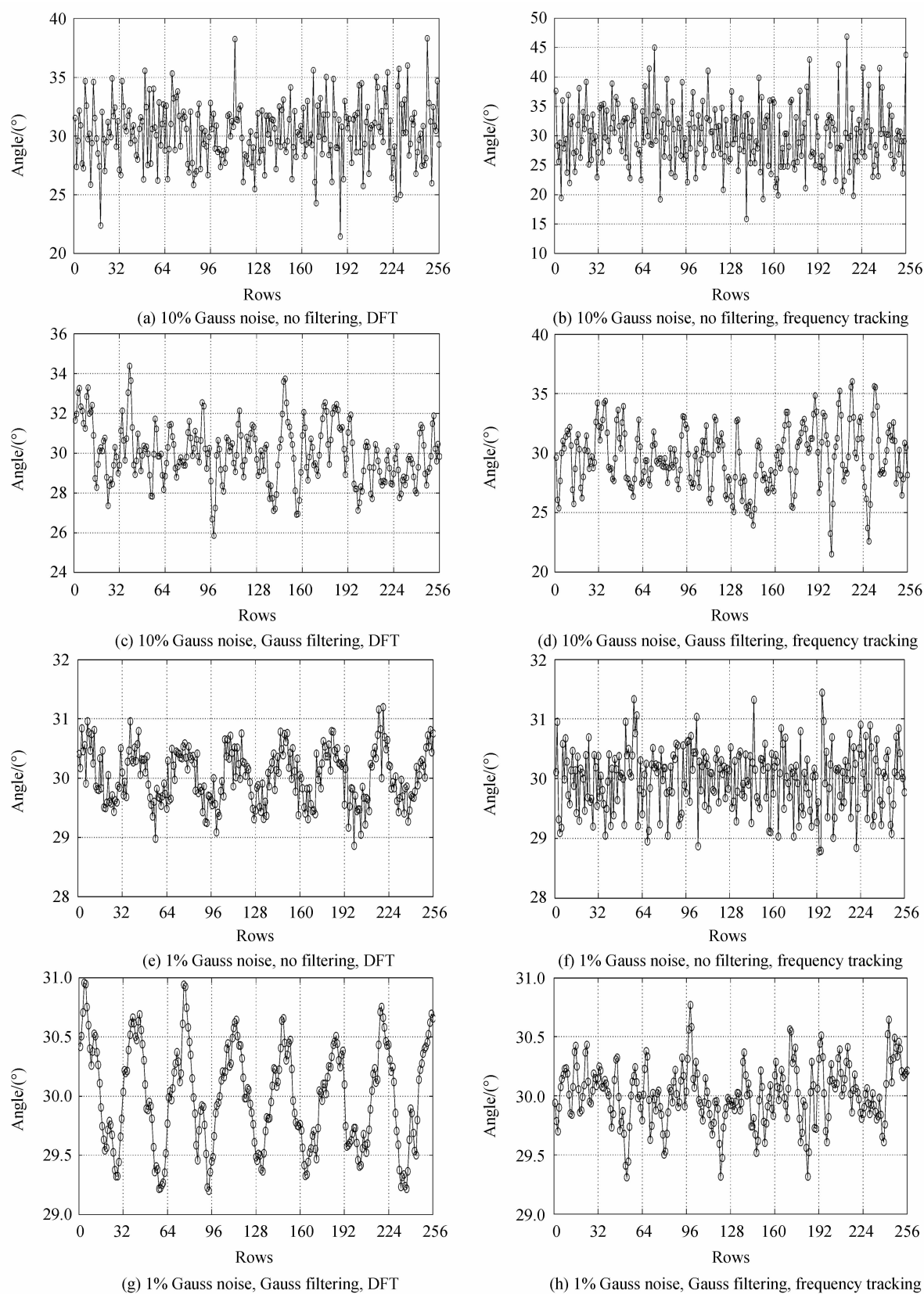


图 6 高斯噪声下两种处理算法效果对比

Fig. 6 Comparison of two algorithms with Gauss noise condition

数据处理结果见表 1.

表 1 数据处理结果  
Table 1 Data processing results

Fig.	Fig. 5(a)	Fig. 5(b)	Fig. 5(c)	Fig. 5(d)	Fig. 5(e)	Fig. 5(f)	Fig. 5(g)	Fig. 5(h)
Mean value/(°)	30.006 6	30.0	30.005 6	30.0	30.013 2	30.0	30.010 7	30.000 3
Standard deviation/(°)	0.027 0	$3.691\ 6 \times 10^{-6}$	0.030 9	$1.254\ 0 \times 10^{-4}$	0.378 7	$1.158\ 7 \times 10^{-5}$	0.368 5	0.003 8
Fig.	Fig. 6(a)	Fig. 6(b)	Fig. 6(c)	Fig. 6(d)	Fig. 6(e)	Fig. 6(f)	Fig. 6(g)	Fig. 6(h)
Mean value/(°)	30.277 8	29.947 8	29.990 6	29.638 3	30.036 9	29.991 2	29.999 6	30.009 9
Standard deviation/(°)	2.400 1	5.082 7	1.467 9	2.533 2	0.454 5	0.515 7	0.433 3	0.246 6

由图 5 中数据可得出:1)在无噪声影响条件下(排除外界环境因素影响),本文提出的自适应频率跟踪方法相对于传统傅里叶正反变换方法具有更高的相位测量准确度;2)图中的相位差波形来自于干涉条纹图像(如图 2)中沿  $x$  轴向截取的不同行信号(沿  $y$  轴自上而下分别计算),说明不同行之间测量值的波动来自于干涉条纹的倾斜(当完全没有倾斜时各行的像素数据完全一致).同时也说明了本文提出的自适应频率跟踪方法能够更好地解决干涉条纹倾斜造成的误差;3)10%幅度的谐波量对自适应频率跟踪方法的相位差计算准确度存在一定干扰(对传统的傅里叶正反变换法而言,条纹倾斜的影响更大),但整体测量准确度仍然足够.说明自适应频率跟踪方法可以应对一定程度的谐波干扰.

由图 6 中数据可得出:1)在有噪声影响条件下,所得的相位差准确度明显下降;噪声越强,误差越大;2)在在噪声较小的条件下(1%高斯噪声),自适应频率跟踪方法的相位误差接近于传统傅里叶正反变换方法的一半;而在噪声较大的条件下(10%高斯噪声),本文提出的自适应频率跟踪方法反而比传统傅里叶正反变换方法的结果误差更大.说明自适应频率跟踪方法对干涉图的成像误差更为敏感,当噪声破坏“稳定波形”信号的前提时,其迭代控制将会使误差愈加发散;3)由于整体方案是基于所得的干涉图像像素信息进行测量的,所以对图像质量和信噪比要求比较高.做好图像预处理工作是一个关键性的环节.

值得注意的是,由实验数据可以看出,当干涉图像的背景噪声较大时,自适应频率跟踪方法比传统傅里叶正反变换方法得到的误差更大.但是,这并不代表自适应频率跟踪方法不行或不适用.由于测量的准确度和稳定度(鲁棒性)本身是相对立的,测量方法越细致(准确度高)则越容易受到环境干扰(不准确).本课题中相位的提取是基于干涉图像中各个像素的灰度值,是无法从来源上区别真实波形与噪声信息的.当背景噪声较大时,两种处理算法误差都过大,均不满足测速方案的准确度要求,只是自适应频率跟踪方法的误差效果更为明显;而背景噪声较小时,传统算法由于在应对条纹倾斜、高频谐波等方面的局限性,使得其测量分辨率比较有限,无法满足课题高准确度测量的要求,此时就需要自适应频率跟踪方法发挥作用.

作一个类比描述,如同温度测量,传统傅里叶变换方法相当于水银温度计,而自适应频率跟踪方法则相当于热敏温度计.热敏温度计测量准确度更高也更为灵敏.当在开放环境中测量时,由于水银温度计灵敏度较低使得多次测量得到的温度值可能更为稳定、标准差更小;而热敏温度计受环境扰动影响较大,使得多次测量所得温度值的误差相对更大.但并不能由此说明热敏温度计的性能就不如水银温度计.当在真空隔热环境下做温度的精细测量时,相信测量人员仍然会选用准确度更高的热敏温度计.而真空隔热的环境要求则相当于本课题中对干涉图像背景噪声的限制程度,需要采用额外的手段加以控制.

## 5 算法局限性

本文的仿真数据来自于 Matlab 中函数生成的模拟干涉条纹数据,为理论波形的分析处理.而在实际实验中,存在各种成像模糊、抖动、噪声光斑等影响,直接进行处理将会大大降低算法的“测量准确度”.即此算法由于测量分辨率较高,对噪声也会更为敏感,即当噪声破坏其测量“稳定波形”的前提时,处理效果会大打折扣.对此种情况,需要事先进行图像去噪、复原等预处理操作,为算法提供一个良好的输入.

与此同时,由于算法的测量分辨率高,对原始数据的准确度要求也很高.直接采用 8 位图像存储格式(0~255 的像素灰度范围)将导致灰度分辨率的截断误差造成相位取值出现明显偏离,从而使算法准确度失去意义(抹除探测准确度).所以,要求实验装置的探测器具有高准确度,且干涉条纹图像最好采用 14 位以上的存储格式,同时要求探测器具有较好的线性度.

本文算法的另一个小缺陷是,由于其核心思想为通过反馈迭代的方式获取超高准确度,使用时就需要保证其迭代的收敛性.当滤波器无法覆盖其数据周期时,算法有可能出现迭代发散的情况而导致计算错误.应

用过程中,需要根据实测的数据长度和周期范围设计合适的低通滤波器.

## 6 结论

本文从数据处理的理论出发,分析了非对称空间外差光谱技术的条纹倾斜、谐波干扰等影响,提出了自适应频率跟踪的处理方法,理论上能够获得更高的干涉图中 Doppler 频移相位差的测量准确度. 该算法目前的局限性在于,当干涉图像存在较大噪声干扰时,误差将会覆盖掉算法的处理准确度. 故后期的主要工作在于根据具体的实验环境,研究干涉图中主要的图像噪声和干扰类型,做好图像去噪、复原等预处理操作,对提高空间外差光谱探测技术的测量准确度有重要意义.

### 参考文献

- [1] ENGLERT C R, BABCOCK D D, HARLANDER J M. Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy (DASH): concept and experimental demonstration[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(29): 7297-7307.
- [2] YE Song, FANG Yong-hua, HONG Jin, *et al.* System design of spatial heterodyne spectrometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(6): 959-964.  
叶松, 方勇华, 洪津, 等, 空间外差光谱仪系统设计[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(6): 959-964.
- [3] XIONG Wei, SHI Hai-liang, WANG Yuan-jun, *et al.* Study on near-infrared spatial heterodyne spectrometer and detection of water vapor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1511-1515.  
熊伟, 施海亮, 汪元钧, 等, 近红外空间外差光谱仪及水汽探测研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1511-1515.
- [4] LAN Tian-ge, XIONG Wei, FANG Yong-hua, *et al.* Research on preprocessing algorithm for infrared spectral signals of biological aerosol[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2742-2747.  
兰天鸽, 熊伟, 方勇华, 等, 生物气溶胶红外光谱信号预处理算法研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2742-2747.
- [5] YE Song, XIONG Wei, QIAO Yan-li, *et al.* Data processing for interferogram of spatial heterodyne spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, **29**(3): 848-852.  
叶松, 熊伟, 乔延利, 等, 空间外差光谱仪干涉图数据处理[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, **29**(3): 848-852.
- [6] WANG Xin-qiang, YE Song, ZHANG Li-juan, *et al.* Study on phase correction method of spatial heterodyne spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, **33**(5): 1424-1428.  
王新强, 叶松, 张丽娟, 等, 空间外差光谱仪相位校正方法的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, **33**(5): 1424-1428.
- [7] SHI Hai-liang, XIONG Wei, LI Zhi-wei, *et al.* Phase error correction of spatial heterodyne spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(3): 313-318.  
施海亮, 熊伟, 李志伟, 等, 空间外差光谱仪相位误差修正[J]. *光学学报*, 2013, **33**(3): 313-318.
- [8] LI Zhi-wei, XIONG Wei, SHI Hai-liang, *et al.* Correction of detector response error for hyperspectral spatial heterodyne interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(5): 1-9.  
李志伟, 熊伟, 施海亮, 等, 超光谱空间外差干涉仪探测器响应误差校正[J]. *光学学报*, 2014, **34**(5): 1-9.
- [9] XIONG Wei, SHI Hai-liang, YU Neng-hai, *et al.* Study on a new method for instrumental line shape measurement of spatial heterodyne interference spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, **35**(1): 267-271.  
熊伟, 施海亮, 俞能海, 等, 空间外差干涉光谱仪仪器线型函数测量新方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, **35**(1): 267-271.
- [10] LI Zhi-wei, XIONG Wei, SHI Hai-liang, *et al.* Study on asymmetric spatial heterodyne spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, **36**(7): 2291-2295.  
李志伟, 熊伟, 施海亮, 等, 非对称空间外差光谱技术研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, **36**(7): 2291-2295.
- [11] YANG Yong, XIONG Wei, YE Qing-hao, *et al.* Experiments of flat-field wavelength calibration of spatial heterodyne spectrometer and its data processing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(10): 2508-2512.  
杨勇, 熊伟, 叶擎昊, 等, 空间外差光谱仪的平场波长定标实验与数据处理[J]. *光学精密工程*, 2013, **21**(10): 2508-2512.
- [12] YE Song, XIONG Wei, WANG Xin-qiang, *et al.* Correction of spatial heterodyne interferogram based on frequency domain analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(5): 1-7.  
叶松, 熊伟, 王新强, 等, 基于频域分析的空间外差干涉图校正方法研究[J]. *光学学报*, 2013, **33**(5): 1-7.
- [13] WANG Xin-qiang, XIONG Wei, YE Song, *et al.* Filtering method for interferogram of spatial heterodyne spectrometer[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, **34**(1): 79-84.  
王新强, 熊伟, 叶松, 等, 空间外差光谱仪干涉图滤波方法研究[J]. *应用光学*, 2013, **34**(1): 79-84.
- [14] IEEE Power & Energy Society. IEEE C37. 118. 1-2011, IEEE standard for synchrophasor measurements for power systems[S]. New York: IEEE-SA Standards Board, 2011.

**Foundation item:** The National Basic Research Program of China (No. 2014CB744204); the Deep Space Exploration Technology Key Laboratory of Shanghai Support Project (No. DS201501-003)