

引用格式: YU Ting-ting, FENG Yu-tao, FU Di, *et al.* Analysis of Influence of Spike on Phase Retrieval Accuracy of Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne Spectrometer and Correction Method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(12):1230001
于婷婷,冯玉涛,傅頔,等. 冲击噪声对多普勒差分干涉仪相位反演精度影响分析及校正方法[J]. 光子学报, 2020, 49(12): 1230001

冲击噪声对多普勒差分干涉仪相位反演精度影响分析及校正方法

于婷婷^{1,2}, 冯玉涛¹, 傅頔¹, 王轩^{1,2}, 孙晨^{1,2}, 白清兰¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 光谱成像技术重点实验室, 西安 710019)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 多普勒差分干涉仪通过测量干涉条纹的相位变化反演大气风速, 由于 CCD 探测器会受到宇宙射线干扰和 CCD 自身存在的热像元, 干涉图上会形成位置和强度随机的冲击噪声, 严重影响风速反演精度. 本文探讨了冲击噪声各参数对多普勒差分干涉仪相位反演精度的理论影响, 并对冲击噪声进行修正, 针对干涉图冲击噪声的特点, 基于多普勒差分干涉仪相位反演模型, 建立了相位误差与冲击噪声特征参数之间的理论模型, 分析指出冲击噪声的强度、位置、峰宽对相位反演精度影响规律, 并利用实验数据进行验证. 结果表明, 相位反演误差随冲击噪声的位置呈周期性变化, 与冲击噪声强度和峰宽呈正相关. 提出一种最近邻比较与加窗中值滤波结合的干涉数据冲击噪声校正算法, 能够有效修正冲击噪声点, 且不会对原始干涉数据产生影响, 校正后冲击噪声引起的相位误差减小 90% 以上, 有助于提高后续干涉数据处理的精度.

关键词: 光谱学; 多普勒差分干涉仪; 相位反演; 冲击噪声; 干涉图测量; 傅里叶变换

中图分类号: TH744

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204912.1230001

Analysis of Influence of Spike on Phase Retrieval Accuracy of Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne Spectrometer and Correction Method

YU Ting-ting^{1,2}, FENG Yu-tao¹, FU Di¹, WANG Xuan^{1,2}, SUN Chen^{1,2}, BAI Qing-lan¹

(1 *Key Laboratory of Spectral Imaging Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer can be used to retrieve the atmospheric wind speed by measuring the phase frequency shift of interference fringes. Because of the interference from cosmic rays and "hot pixels" in CCD, some spikes that have random location and intensity occur on the interferogram. The presence of such spikes can seriously affect the accuracy of wind speed retrieval. In this paper, the theoretical influence of various parameters of spike on the phase inversion accuracy of doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer is discussed, and the spike correction method is proposed. Based on the characteristics of the spike and the phase retrieval model of doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer, a theoretical model between the phase error and the intensity and position of the spike is established. The influence of the intensity, position and width of the spike on the phase retrieval accuracy is analyzed and verified by experiments. The results show that the phase retrieval

基金项目: 国家自然科学基金 (No.41005019), 中国科学院西部青年学者 (No.XAB 2016A07), 陕西省自然科学基金基础研究计划 (No.2019JQ-931)

第一作者: 于婷婷 (1993—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为干涉图像处理. Email: yutingting2016@opt.cn

导师 (通讯作者): 冯玉涛 (1980—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为光谱成像技术. Email: fytciom@126.com

收稿日期: 2020-07-20; 录用日期: 2020-09-27

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

error varies periodically with the position of the spike, and is positively correlated with the intensity and peak width of spike. A new method of spike correction based on nearest neighbor comparison and windowed median filter is proposed. The new method can effectively correct the spike without affecting the original interference data. The phase error caused by the spike after correction is reduced by more than 90%, which will help to improve the accuracy of subsequent interference data processing.

Key words: Spectroscopy; Doppler asymmetric spatial heterodyne spectrometer; Phase retrieval; Spike; Interferogram measurements; Fourier transform

OCIS Codes: 300.6300; 010.0280; 030.4280; 100.5070; 120.3180

0 引言

中高层大气层中的物理、化学和辐射等过程与日地关系、全球变化和环境变化等都有着重要的关系,日益成为研究人员关注的焦点^[1].大气风场不仅是表征大气动力学和热力学特征的重要参数,也是影响大气动力学、热学结构、物质、能量分布及其时空变化的重要因素.因此,探测研究大气风场对航空航天、无线电通信、预报天气和大气成分研究等都具有重大意义^[2-3].

多普勒差分干涉光谱技术是一种新型的针对中高层大气风场的被动式风场探测技术,由 HARLANDER J M 等于 2006 年提出^[4-6].多普勒差分干涉仪通过反演干涉图相位变化计算中高层大气气辉谱线的多普勒频移,进而实现大气风速测量^[7].干涉图数据质量直接影响相位反演精度,冲击噪声是降低原始干涉图数据质量的重要因素之一.冲击噪声主要由探测器“热像元”、宇宙高能粒子激发等因素引起,其具有强度高、出现位置随机和峰宽较窄的特点^[8-9].冲击噪声会导致干涉图中出现许多虚假的、极大的峰值,其强度通常比干涉图强度大几倍甚至几十倍,会对反演相位造成很大的误差,最终极大影响风速反演的准确度.此外,由于碰撞过程的高度随机性,导致冲击噪声在干涉图中随机分布,这大大增加了冲击噪声去除的复杂性^[10].因此,冲击噪声去除成为多普勒差分干涉仪干涉图预处理过程中的必要环节之一,研究干涉图冲击噪声与反演相位之间的理论关系,建立二者之间定量的理论模型,分析冲击噪声强度、位置、峰宽等特征对相位反演精度的影响,对提高相位反演精度是非常重要的.

理论方面,ENGLERT C R 等于 2010 年首次提出冲击噪声对干涉仪反演相位的影响^[11],但国内外并未有相关学者建立冲击噪声与反演相位误差间的理论模型.冲击噪声校正方面,利用软件的方法去除冲击噪声的应用较为广泛,具体实现方法有多项式滤波、加权均值滤波、中值滤波、最邻近域插值、全变分法、离散小波变换方法等^[12-16].以上方法均是基于整幅干涉图数据处理,冲击噪声剔除效率高,但是会对非冲击噪声区域产生影响,对后续数据处理过程造成额外误差.ENGLERT C R 等采用了阈值判断与邻阈数值直接替代或剔除结合的方案^[17].YE Qing-hao 等提出了一种全局阈值判断与加窗技术相结合的算法^[18].本文基于多普勒差分干涉仪的基本原理,根据相位反演方法,结合原始干涉图的表达式以及冲击噪声的模型,建立了冲击噪声与反演相位误差间的理论模型;针对干涉图数据特点以及冲击噪声的形成机理,分析了几种校正冲击噪声的方法,提出了最优的冲击噪声校正算法.利用实验室研制的多普勒差分干涉仪获取干涉数据,开展冲击噪声修正实验,从而验证算法的有效性.

1 理论推导分析

1.1 多普勒差分干涉仪原理

多普勒差分干涉仪对大气风速探测主要是基于探测气辉谱线的多普勒频移来实现的.其结构与迈克尔逊干涉仪相似,不同之处在于将两臂的反射镜替换成闪耀光栅,去掉了运动部件,提高了系统的稳定性.干涉仪其中一臂增加了一定的偏置量,增大了光程差,提高了风速测量的灵敏度.多普勒差分干涉仪的光学原理如图 1.

来自光源的入射光经准直和滤光后,由分束器分成两束等强度的光到达两个干涉臂末端的光栅面,受到光栅衍射的两束光在分束器会聚,形成干涉条纹,最终在探测器上成像.在探测器上记录的干涉图表示为^[19]

$$I(x) = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} B(\sigma) \left\{ 1 + \cos \left\{ 2\pi \times \left[4(\sigma - \sigma_1) \tan \theta_1 \right] x + 4\pi \Delta d \sigma \right\} \right\} d\sigma \quad (1)$$

式中, $B(\sigma)$ 是入射光谱函数, x 是探测器上的位置(定义 $x=0$ 为探测器的中心点), σ 为入射光波数, σ_L 为 Littrow 波数, θ_L 为 Littrow 角, Δd 为干涉仪一臂的偏置量.

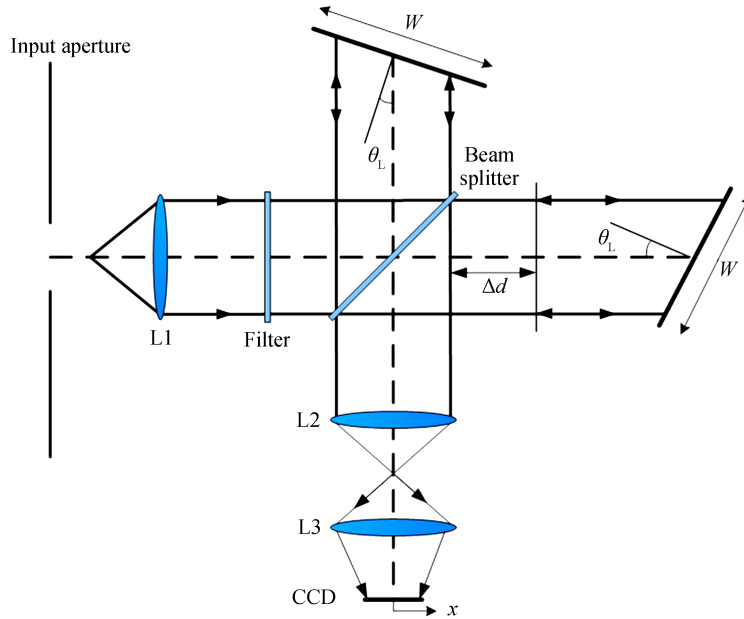


图1 多普勒差分干涉仪原理

Fig.1 Schematic of the Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer

多普勒差分干涉仪相位反演的数据处理流程如图 2^[7].

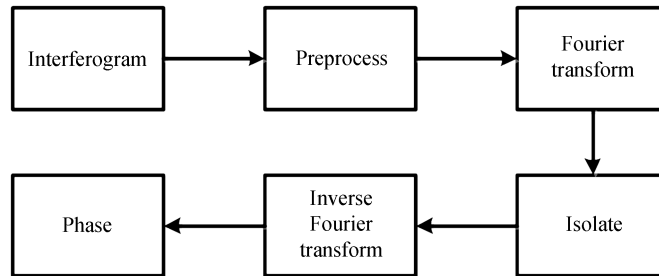


图2 相位反演流程

Fig.2 Flow chart of phase retrieval

原始干涉图的质量直接影响相位反演的精度.这是由于原始干涉图中存在暗电流和偏置电压、各像元之间响应不一致、干涉条纹畸变等问题.因此,在进行相位反演前对干涉图进行预处理是十分有必要的.相应的预处理过程主要包括干涉图噪声去除、平场校正、相位畸变校正等^[17].经过预处理后的干涉图亮度可以由式(1)简化表示为

$$\begin{aligned}
 I(x) &= \sum_j S_j \left[1 + E_j(x) \cos(2\pi\kappa_j x + \phi_j + \delta\phi_j) \right] \\
 &= \sum_j S_j \left\{ 1 + \frac{1}{2} E_j(x) \left\{ \exp[i(2\pi\kappa_j x + \phi_j + \delta\phi_j)] + \exp[-i(2\pi\kappa_j x + \phi_j + \delta\phi_j)] \right\} \right\}
 \end{aligned} \tag{2}$$

式中, j 为通过滤光片的目标谱线的序号, S_j 为与谱线的亮度成正比的辐亮度函数, $E_j(x)$ 为与谱线线形有关的包络函数, $\kappa_j = 4(\sigma_j - \sigma_L) \tan\theta_L$, 表示为波数 σ_j 对应的空间外差频率, $\phi_j = 4\pi(\sigma_j - \sigma_L)\Delta d$, 表示为干涉仪一臂偏置产生的相位项, $\delta\phi_j$ 为多普勒频移引起的相移.对于波数为 σ_0 的某一特定目标,经过数据反演流程后干涉图的绝对相位表示为

$$\varphi = \arctan \left\{ \frac{T(x) \otimes \left[\frac{1}{2} S_0 E_0(x) \sin(2\pi k_0 x + \Phi_0 + \delta\varphi_0) \right]}{T(x) \otimes \left[\frac{1}{2} S_0 E_0(x) \cos(2\pi k_0 x + \Phi_0 + \delta\varphi_0) \right]} \right\} = \arctan \left\{ \frac{\Im [I'(x)]}{\Re [I'(x)]} \right\} \quad (3)$$

式中, $\Im [I'(x)]$ 和 $\Re [I'(x)]$ 分别为 $I'(x)$ 的虚部和实部, $T(x)$ 为单一谱线提取窗函数 $t(\sigma)$ 的逆傅里叶变换, \otimes 为卷积运算.

1.2 冲击噪声对反演相位影响分析

根据冲击噪声的特点, 叠加单点冲击噪声的单频干涉图 $I_n(x)$ 可以表示为

$$I_n(x) = S_0 + \frac{1}{2} S_0 E_0(x) \left\{ \exp [i(2\pi\kappa_0 x + \Phi_0 + \delta\varphi_0)] + \exp [-i(2\pi\kappa_0 x + \Phi_0 + \delta\varphi_0)] \right\} + A \cdot \exp \left[\frac{-(x-x_0)^2}{2c^2} \right] \quad (4)$$

式中, A 为冲击噪声中心点的强度, x_0 为冲击噪声中心点在干涉图上的像元位置, c 与冲击噪声峰宽相关. 将带有冲激噪声的干涉图进行傅里叶变换得到频谱, 可表示为

$$f_n(\omega) = \mathcal{F} \left\{ S_0 + \frac{1}{2} S_0 E_0(x) \left\{ \exp [i(2\pi\kappa_0 x + \Phi_0 + \delta\varphi_0)] + \exp [-i(2\pi\kappa_0 x + \Phi_0 + \delta\varphi_0)] \right\} + A \cdot \exp \left[\frac{-(x-x_0)^2}{2c^2} \right] \right\} \quad (5)$$

式中, $f_n(\omega)$ 为干涉图的频谱. 加窗 $t(\omega)$ 去除对称谱中的负频率成分可得

$$t(\omega) f_n(\omega) = t(\omega) \mathcal{F} (S_0) + t(\omega) \mathcal{F} \left\{ \frac{1}{2} S_0 E_0(x) \left\{ \exp [i(2\pi\kappa_0 x + \Phi_0 + \delta\varphi_0)] + \exp [-i(2\pi\kappa_0 x + \Phi_0 + \delta\varphi_0)] \right\} \right\} + t(\omega) \mathcal{F} \left\{ A \cdot \exp \left[\frac{-(x-x_0)^2}{2c^2} \right] \right\} \quad (6)$$

再将式(6)进行傅里叶逆变换得到复干涉图 $I'_n(x)$, 其表达式为

$$I'_n(x) = \mathcal{F}^{-1} [t(\omega) f_n(\omega)] = T(x) \otimes \left\{ \frac{1}{2} S_0 E_0(x) \exp [i(2\pi\kappa_0 x + \Phi_0 + \delta\varphi_0)] \right\} + T(x) \otimes \left\{ A \cdot \exp \left[\frac{-(x-x_0)^2}{2c^2} \right] \right\} \\ = I'(x) + T(x) \otimes \left\{ A \cdot \exp \left[\frac{-(x-x_0)^2}{2c^2} \right] \right\} \quad (7)$$

式中, $T(x)$ 为窗函数 $t(\omega)$ 的傅里叶逆变换, 在实践中, 通常会使用矩形窗函数, 即将干涉图频谱中特征峰保留, 其余元素均赋值为 0. 令矩形窗宽度为 $(2n+1)$, 通过复干涉图实虚部比可以得到带有冲击噪声干涉图的干涉相位 φ_n , 其表达式为

$$\varphi_n = \arctan \left\{ \frac{\Im [I'(x)] + \Im \left\{ \exp \left(-i \frac{2\pi\sigma_0}{N} x \right) \frac{\sin \left(\frac{2\pi n}{N} x \right)}{\pi x} \right\} \otimes \left\{ A \cdot \exp \left[\frac{-(x-x_0)^2}{2c^2} \right] \right\}}{\Re [I'(x)] + \Re \left\{ \exp \left(-i \frac{2\pi\sigma_0}{N} x \right) \frac{\sin \left(\frac{2\pi n}{N} x \right)}{\pi x} \right\} \otimes \left\{ A \cdot \exp \left[\frac{-(x-x_0)^2}{2c^2} \right] \right\}} \right\} \quad (8)$$

式中, N 为干涉图采样数.

由式(7)和(8)可知, 冲击噪声对反演相位的最终影响是由窗函数与冲击噪声函数的卷积确定的. 冲击噪声的强度、位置、宽度以及所用窗函数的形式均会对最终反演相位产生影响.

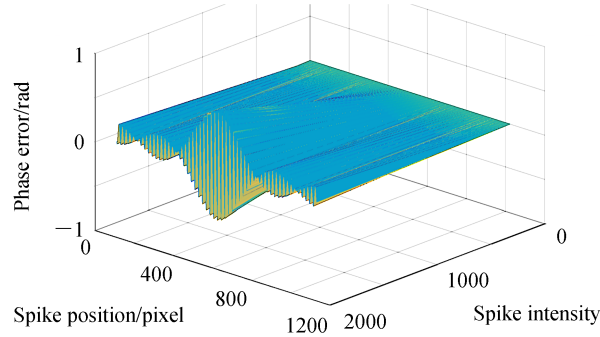
为分析冲击噪声强度、位置和峰宽对相位反演的影响, 选取表 1 所示的多普勒差分干涉仪参数, 基于上述理论推导, 仿真加入冲击噪声前后的反演相位误差

$$\Delta\varphi = \varphi_n - \varphi \quad (9)$$

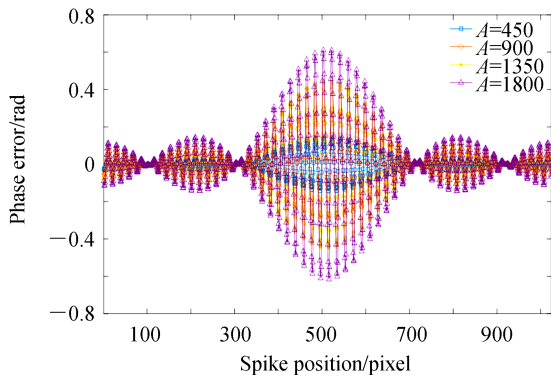
仿真得出干涉图中心点(第 512 像素点)的相位误差与冲击噪声中心点位置及强度 DN(Digital Number) 值关系如图 3, 干涉图中心点(第 512 像素点)的相位误差与冲击噪声的峰宽及中心点强度关系如图 4.

表 1 多普勒差分干涉仪主要参数
Table 1 Principle parameters of DASH

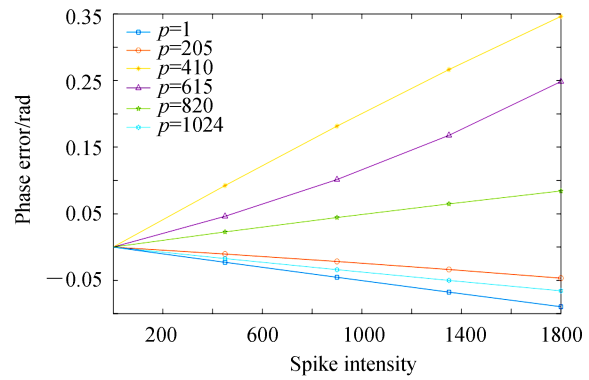
Parameter	Value
OPD_0	50 mm
Spectral resolution	0.78 cm^{-1}
Working wavelength	630.5 nm
Interferogram average digital number	369.92
Interferogram average SNR	17.39
Interferogram sample count	1 024



(a) Relationship between phase error and spike center position and intensity



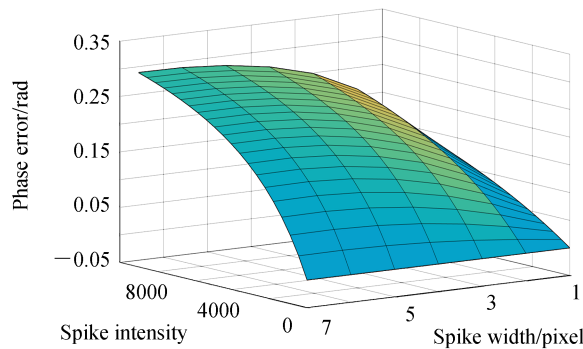
(b) Relationship between the phase error and spike center point position



(c) Relationship between phase error and the DN of the center point spike

图 3 相位误差与冲击噪声位置及强度的关系

Fig.3 Relationship between phase error and spike center position and intensity



(a) Relationship between phase error and spike center DN and peak width

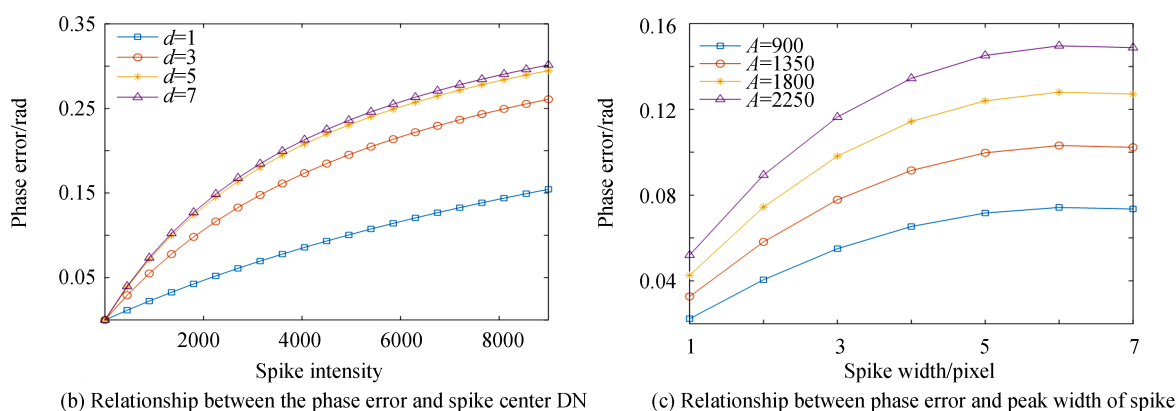


图4 相位误差与冲击噪声强度及峰宽的关系

Fig.4 Relationship between phase error and spike center intensity and peak width

从图3和图4可以看出,当冲击噪声峰宽与强度一定时,反演相位误差随冲击噪声与中心点的距离呈周期性变化,变化周期与干涉图周期一致,且相位误差的峰值随冲击噪声与干涉图采样中心点的距离增大而减小;当冲击噪声峰宽与位置一定时,反演相位误差与冲击噪声的强度呈正相关,冲击噪声强度越高,其引发的相位误差越大,但当冲击噪声中心点DN值超过一定值时,相位误差随中心点DN值的变化趋于平缓;当冲击噪声强度与位置一定时,反演相位误差与冲击噪声的峰宽呈正相关,在一定范围内,冲击噪声所占像素越多,其引发的相位误差越大,但当峰宽超过5个像素时,相位误差几乎不再随其增大而变化。

2 实验分析

为了进一步探究实践中冲击噪声对反演相位的影响,在实验室利用参数如表1所示的多普勒差分干涉仪开展实验研究,实验中采用Ne灯作为光源,单次曝光时间10 s,连续采集数小时Ne灯干涉图,共采集2 000帧图像,根据单帧图像的平均DN值筛选出存在冲击噪声的干涉图7帧。

针对存在冲击噪声的干涉图可从两方面衡量冲击噪声对反演相位的影响,第一方面分析冲击噪声所在行的干涉曲线与相邻前后两帧干涉图相同行平均干涉曲线相位之差;第二方面分析冲击噪声所在行的干涉曲线与同一帧干涉图相邻上下两行平均干涉曲线相位之差。由于实际干涉数据存在条纹倾斜、条纹畸变等因素,相邻行干涉曲线之间会存在较大的相位误差,影响对冲击噪声带来的相位误差的判断。因此,选择冲击噪声所在行的干涉曲线与相邻前后两帧干涉图相同行平均相位之差计算冲击噪声引起的相位误差。数据分析流程如下:首先,对原始干涉数据带有冲击噪声行进行傅里叶变换,用宽度为5的矩形窗函数进行单频谱提取,将提取的单频率进行傅里叶逆变换及干涉相位的反演,计算干涉图采样中心点的相位与相邻帧同行干涉曲线中心点的相位之差。然后,根据本文推导的理论公式计算邻帧同行干涉曲线加入相应噪声造成的相位误差。7组数据冲击噪声所在行与邻帧同行采样中心点的相位误差如表2。

表2 实验与理论计算反演相位误差

Table 2 Experimental and theoretical calculation of inversion phase error

	Data1	Data2	Data3	Data4	Data5	Data6	Data7
Experimental phase error /rad	0.154 6	0.027 1	0.020 2	0.013 9	0.006 8	-0.004 2	-0.002 1
Theoretical phase error /rad	0.154 3	0.026 9	0.021 3	0.013 8	0.006 1	-0.004 2	-0.002 2

表2中共有7组数据,其中Data1~Data4平均信噪比为17.39的干涉图;Data5~Data7为平均信噪比为55.70的干涉图。7组数据的冲击噪声点位置随机,峰宽在1~4像素不等,强度在干涉图平均值的0.5~3.4倍间变化。由表2可以看出,实验中产生的冲击噪声造成的反演相位误差与理论公式计算结果基本一致,误差不超过0.001 1 rad,表明了本文所推导的理论模型的正确性。同时可以看出,当冲击噪声的强度达到干涉图平均强度的3.4倍时,相位反演误差可达到0.156 rad,这表明即使不计干涉数据没有其他误差的影响,只出现一个像素的冲击噪声对反演相位的影响已极其严重。因此,对于差分干涉仪而言,必须在数据处理流程之

前对干涉数据的冲击噪声进行校正.

3 冲击噪声检测校正及实验分析

3.1 冲击噪声定位与校正算法

传统的去除冲击噪声的方法如均值滤波和中值滤波法等将滤波作用于图像中的所有像素点,因此干涉图中没有受到冲击噪声干扰的采样点就会偏离其本真值,导致有效干涉信息受到影响.因此,将传统的滤波方法改进,在滤波之前定位冲击噪声坐标,使滤波精准作用于冲击噪声采样点处,有效提高数据处理的精确性和稳定性.

多普勒差分干涉仪的干涉数据为斐索型干涉条纹,入射辐射均匀时其每一行相同位置处的强度值理论上是相等的.冲击噪声的强度通常为干涉图幅值的几倍甚至几十倍,可以结合干涉图与冲击噪声的特点,采用最近邻比较法^[20]与中值滤波结合对冲击噪声点坐标进行定位及校正.该方法流程如图5,具体步骤如下:

1) 原始干涉图任意一点的DN值为 $DN_{(i,j)}$,其中 i 表示该点所在行数, j 表示该点所在列数.在每一列对相邻行的DN值作差得到残差 D ,即

$$D_{(i,j)} = DN_{(i+1,j)} - DN_{(i,j)} \quad (10)$$

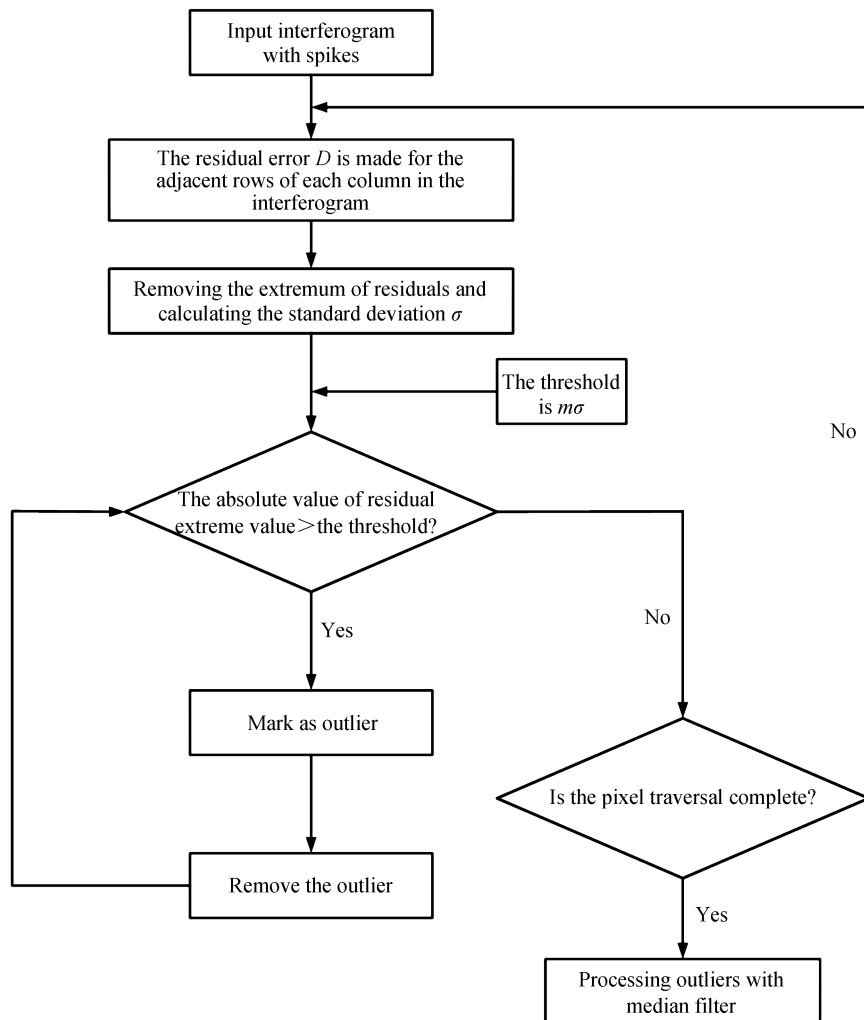


图5 最近邻比较中值滤波算法流程

Fig.5 Flow chart of nearest neighbor comparison median filtering algorithm

2) 从数据第一列开始,在每一列上,对残差的值去除最大值和最小值后求标准差 σ ,令阈值为该标准差的 m 倍, m 的值可随干涉数据的不同而变化.若该列的残差最大值或最小值的绝对值大于该阈值,就把该最大值或最小值记为异常值,异常值所在的点记为冲击噪声点.再对该列去除异常值之后的数据重复上述步

骤,直到新的最大值和最小值都小于相应的阈值,继续对下一列数据重复以上步骤,直至最后一列。

3)将原图像前4行与后4行进行镜像延拓,在检测出的冲击噪声点处使用 9×1 窗口进行中值滤波去除冲击噪声。

3.2 干涉数据冲击噪声修正实验

利用3.1节提出的算法对实验室多普勒差分干涉仪获取的干涉数据开展冲击噪声点检测与修正实验,并与不同方法进行比较,以验证上述算法对干涉数据的实用性.图6为实验获取的原始干涉图(截取)及其第607行干涉数据.从二维干涉图可以看出,干涉数据存在明显的冲击噪声点.分别应用中值滤波法、均值滤波法、全变分法、全局阈值判断结合加窗法以及本文所述最近邻比较结合中值滤波法对干涉数据的冲击噪声进行修正.干涉数据修正后的结果如图7所示.从图7中可以明显看出,均值滤波法和全变分法对于干涉图冲击噪声的修复作用有限,且会影响原本的干涉信息.中值滤波法对冲击噪声有较好的修复效果,但由于中值滤波器是作用在整幅干涉图像上,不可避免地对原本的干涉信息产生了影响.全局阈值结合加窗法和本

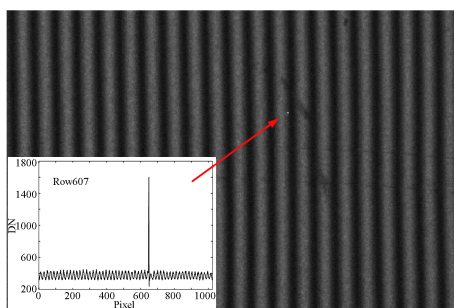


图6 干涉图中的冲击噪声
Fig.6 Spikes on interferogram

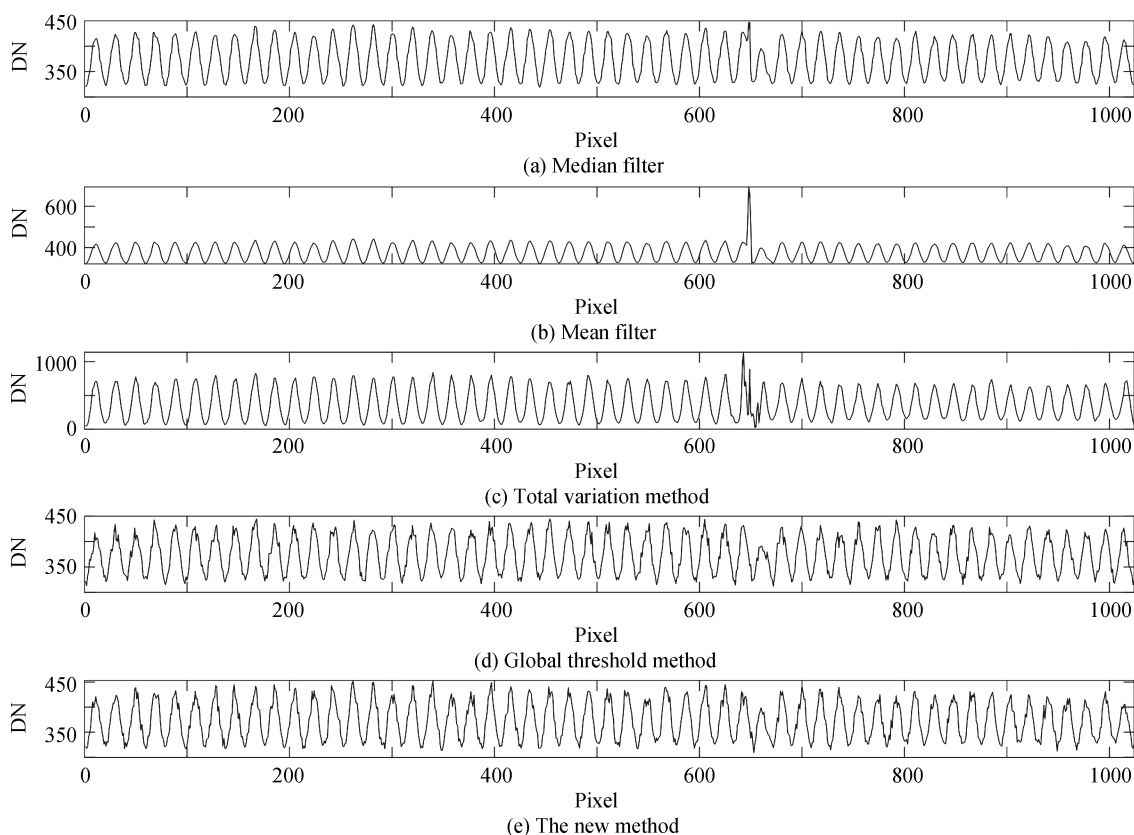


图7 5种算法对冲击噪声的修正效果
Fig.7 The correction effects of five algorithms on spike are analyzed

文方法均可实现冲击噪声的坐标定位,且滤波只作用于冲击噪声点处,对非冲击噪声点的干涉信息保留完整,对冲击噪声修正效果较好.但由于全局阈值法采用的是窗口内除冲击噪声之外点的强度均值作为冲击噪声点强度值的替代,当一个窗口内不止一个冲击噪声点时,会使冲击噪声所在行的相邻行引入冲击噪声影响.综上,本文所提出的算法与其他几种算法相对比,可以在不对原始干涉数据产生影响的前提下,获得更好的冲击噪声修正效果.

为了验证本文算法对冲击噪声带来的干涉数据反演相位误差的修正效果及算法的实用性,针对含有冲击噪声的两种不同信噪比的实测干涉图,计算用不同方法修正后的反演相位值,与带有冲击噪声的原始干涉数据的绝对相位及无冲击噪声数据的标准相位对比.

干涉数据共有7组,每组数据均存在冲击噪声点.其中Data1~Data4是用Ne灯作为光源采集的干涉数据,Data5~Data7是用Ar灯作为光源采集的干涉数据,两类数据的条纹周期与信噪比均不相同.对7组数据,分别使用均值滤波法、中值滤波法、全局阈值结合加窗法以及本文提出的最近邻比较结合中值滤波法进行处理,对原始数据去除直流分量后,用第1.2节所述方法计算处理冲击噪声所在行中心点的反演相位,并用冲击噪声所在帧的前后两帧同行数据的反演相位的平均值代替无噪声情况下的反演相位标准值,计算结果如表3.结果表明,本文所提出的算法对相位误差的修正效果明显优于其他三种算法,且该算法在用于不同周期及信噪比的干涉数据时,对反演相位误差的修正都达到90%以上,对不同的干涉数据具有普适性.

表3 冲击噪声处理算法的反演相位结果对比
Table 3 Comparison of inversion phase results of spike processing algorithms

	Data1	Data2	Data3	Data4	Data5	Data6	Data7
Standard inversion phase /rad	0.306 8	0.780 6	0.194 5	0.025 5	1.493 3	0.724 4	0.789 2
Original inversion phase /rad	0.152 1	0.807 7	0.214 7	0.011 6	1.500 2	0.728 5	0.791 4
Inversion phase of mean filtering method /rad	0.243 6	0.801 2	0.200 7	0.018 9	1.494 5	0.727 2	0.791 1
Inversion phase of median filtering method /rad	0.268 5	0.800 7	0.197 8	0.020 3	1.499 6	0.725 1	0.790 3
Inversion phase of global threshold method /rad	0.311 6	0.779 8	0.192 2	0.028 1	1.501 3	0.722 3	0.788 3
Inversion phase of the new method /rad	0.306 4	0.780 9	0.194 9	0.026 0	1.493 5	0.724 2	0.789 0

4 结论

本文针对多普勒差分干涉数据特点,结合相位反演模型,理论推导了相位误差与冲击噪声强度、位置及峰宽之间的定量关系,并对实验室干涉仪测得的带有冲击噪声的干涉数据与理论模型进行对比验证,实验结果与理论计算结果的一致性验证了理论模型的正确性,同时证明了冲击噪声对反演相位的极大影响.此外,还提出了对冲击噪声的检测与修正方法,通过对实验测量干涉数据冲击噪声修正前后对比可以看出,该方法与其他方法相比,对冲击噪声能够进行精确地检测与校正,且不会对原始干涉数据产生影响,对冲击噪声带来的相位误差能够很好地修正,有助于提高后续干涉数据处理的精确性和稳定性.该方法不但适用于多普勒差分干涉数据,也同样适用于其他类型的空间干涉仪干涉数据冲击噪声的检测与修正.

参考文献

- [1] CHEN Hong-bin. An overview of the space-based observations for upper atmospheric research [J]. *Advances in Earth Science*, 2009, **24**(3): 229-241.
陈洪滨. 中高层大气研究的空间探测[J]. *地球科学进展*, 2009, **24**(3): 229-241.
- [2] FENG Yu-tao, LI Juan, ZHAO Zheng-liang, et al. Development of interferometric spectroscopy for atmosphere wind observations based on satellite [J]. *Aerospace Shanghai*, 2017, **34**(3): 14-26.
冯玉涛,李娟,赵增亮,等. 大气风场探测星载干涉光谱技术进展综述[J]. *上海航天*, 2017, **34**(3): 14-26
- [3] SHEN Jing, XIONG Wei, SHI Hai-liang, et al. Data processing method of asymmetric spatial heterodyne interferogram for wind measurement [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, **36**(9): 3014-3019.
沈静,熊伟,施海亮,等. 用于风场探测的非对称空间外差干涉数据处理方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, **36**(9): 3014-3019.
- [4] ENGLERT C R, HARLANDER J M, BABCOCK D D, et al. Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy (DASH): an innovative concept for measuring winds in planetary atmospheres[C]. SPIE, 2006, **6303**: 63030T.
- [5] ENGLERT C R, HARLANDER J M. Flatfielding in spatial heterodyne spectroscopy[J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(19):

- 4583-4590.
- [6] 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.
- [7] SUN Chen, FENG Yu-tao, FU Di, *et al.* A propagation of interferogram signal-to-noise (SNR) and phase uncertainty in doppler asymmetric spatial heterodyne spectrometer[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, **69**(1): 014202.
孙晨,冯玉涛,傅頔,等.多普勒差分干涉仪干涉图信噪比对相位不确定度研究[J].物理学报,2020,**69**(1): 014202.
- [8] BOWIE B T, CHASE D B, LEWIS I R, *et al.* Anomalies and artifacts in raman spectroscopy [M]. *Handbook of Vibrational Spectroscopy*, John Wiley & Sons, Ltd, 2006: 2355-2378.
- [9] 李志伟.空间外差光谱仪光谱重构关键技术研究[D].北京:中国科学院大学,2015: 1-125.
- [10] YAO Tian, BURCH K S. Automatic spike removal algorithm for raman spectra[J]. *Applied Spectroscopy*, 2016, **70**(11): 1861-1871.
- [11] ENGLERT C R, STEVENS M H, SISKIND D E, *et al.* Spatial heterodyne imager for mesospheric radicals on STPSat-1[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 2010, **115**(D20): 1-20.
- [12] ZHAO Jun. Image curvature correction and cosmic removal for high-throughput dispersive raman spectroscopy [J]. *Applied Spectroscopy*, 2003, **57**(11): 1368-1375.
- [13] REKHA G, SANDEEP V, FREEK A, *et al.* Review of multidimensional data processing approaches for raman and infrared spectroscopy[J]. *EPJ Techniques and Instrumentation*, 2015, **2**(8):1-38.
- [14] KATSUMOTO Y, OZAKI Y. Practical algorithm for reducing convex spike noises on a spectrum [J]. *Applied Spectroscopy*, 2003, **57**(3):317-322.
- [15] JONATHAN L, STEPHEN K O. An approach to the spectral smoothing of raman data applied to the specific case of thin-film carbon[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2018, **29**:10026-10036.
- [16] LASCH P. Spectral pre-processing for biomedical vibrational spectroscopy and microspectroscopic imaging [J]. *Chemometrics & Spectroscopy and Microspectroscopic Imaging*, 2012, **117**:100-114.
- [17] ENGLERT C R, HARLANDER J M, BROWN C M, *et al.* Michelson interferometer for global high-resolution thermospheric imaging (MIGHTI): instrument design and calibration [J]. *Space Science Reviews*, 2017, **212**(1): 553-584.
- [18] YE Qing-hao, SHI Hai-liang, XIONG Wei. Blind-data error correction of spatial heterodyne spectrometer [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, **42**(12): 25-29.
叶擎昊,施海亮,熊伟.空间外差光谱仪数据盲元误差修正[J].光电工程,2015,**42**(12):25-29.
- [19] CHEN Jie-jing, FENG Yu-tao, HU Bing-liang, *et al.* Window function optimization in atmospheric wind velocity retrieval with doppler difference interference spectrometer [J]. *Acta Optic Sinica*, 2017, **37**(2): 0207002.
陈洁婧,冯玉涛,胡炳樑,等.多普勒差分干涉光谱仪大气风速反演过程中窗函数优化[J].光学学报,2017,**37**(2): 0207002.
- [20] YAN Jing-wen, LI Ying, CHEN Jing, *et al.* Spike detection and removal of raman spectra by method combined nearest neighbor comparison with median filter[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2017, **12**(3): 128-135.
闫静文,李颖,陈靓,等.基于最近邻比较和中值滤波的拉曼光谱 spike 自动检测及剔除方法研究[J].大气与环境光学学报,2017,**12**(3):128-135