

多普勒差分干涉光谱仪大气风速反演过程中窗函数优化

陈洁婧^{1,2}, 冯玉涛^{1*}, 胡炳樑¹, 李娟¹, 孙剑¹, 郝雄波¹, 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, 陕西 西安 710119;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 多普勒差分干涉光谱仪是傅里叶变换型光谱仪, 在大气风速反演过程中, 偶延拓的反演光谱无法直接解出目标谱线的相位, 而且在实际测量中反演光谱中含有的杂散光谱线、噪声等, 使得复干涉图相位发生变化, 最终导致反演风速值的偏差。所以, 在对实际噪声环境下测得数据的处理过程中, 获取反演光谱相位信息时需要目标谱线进行提取。针对不同信噪比的干涉图, 利用蒙特卡罗方法对不同线宽的不同窗函数的优化反演结果进行分析。结果表明: 对于信噪比高于 26.5 dB 的干涉图, 线宽为 4~5 倍光谱分辨率的高斯窗函数是最优的窗函数优化方式; 对于信噪比低于 26.5 dB 的干涉图, 线宽为 7~12 倍光谱分辨率的矩形窗函数的反演风速值更精确, 是最优的窗函数优化方式, 可以复原相位信息, 反演出大气风速的近似值。

关键词 信号处理; 光谱数据反演; 蒙特卡罗方法; 大气风场探测; 多普勒差分干涉仪

中图分类号 O433.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0207002

Window Function Optimization in Atmospheric Wind Velocity Retrieval with Doppler Difference Interference Spectrometer

Chen Jiejing^{1,2}, Feng Yutao¹, Hu Bingliang¹, Li Juan¹,
Sun Jian¹, Hao Xiongbo¹, Bai Qinglan¹

¹Key Laboratory of Spectral Imaging Technology of the Chinese Academy of Sciences, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Doppler difference interference spectrometer is a kind of Fourier transform spectrometer. In the process of atmospheric wind velocity retrieval, even-prolongated recovered spectrum cannot work out the phase information of the target spectral line directly. Meanwhile, there are stray spectral lines and noises in the recovered spectrum, which make the phase of the interferogram changed and the retrieved wind velocity deviated. Therefore, isolation of the target spectral line is necessary in the process of getting the phase information of the recovered spectrum in actual noisy environment. For interferograms with different signal noise ratios the retrieved wind velocities (SNR) optimized by different window functions with different line widths are analyzed by Monte-Carlo method. The results indicate that the Gaussian window function with line width equaling 4 to 5 times of the spectral resolution provides the best performance if the SNR of the measured interferogram is higher than 26.5 dB, and rectangular window function with line width equaling 7 to 12 times-of the spectral resolution provides the best performance if the SNR of the measured interferogram is lower than 26.5 dB. The phase information and the approximative atmospheric wind velocity can be retrieved.

Key words signal processing; spectral data retrieval; Monte-Carlo method; atmospheric wind field measurement; Doppler difference interference spectrometer

OCIS codes 070.4790; 300.6190; 200.4560

收稿日期: 2016-07-22; 收到修改稿日期: 2016-10-06

基金项目: 国家自然科学基金(41005019)

作者简介: 陈洁婧(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事干涉光谱仪精细光谱探测方面的研究。E-mail: chenjiejing@opt.cn

导师简介: 胡炳樑(1973—), 男, 博士, 研究员, 主要从事信号处理及光谱成像技术等方面的研究。E-mail: hbl@opt.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: fytciom@opt.ac.cn

1 引 言

多普勒差分干涉光谱技术是在空间外差光谱技术的基础上发展起来的一种新型大气风场探测技术。多普勒差分干涉光谱仪的系统结构由迈克耳孙干涉仪改进而成,是傅里叶变换型光谱仪^[1-4]。目前,多普勒差分干涉光谱仪大气风速反演的主体算法已经完成^[5-9],但为了保证高精度的数据相位反演,在反演过程中的一些详细问题仍有待讨论。在仪器完成后,首先采用 Marr 等^[8]提出的方法进行平场处理,来校正探测器非均匀性产生的误差。然后在采集到原始干涉图后,主要经过预处理、切趾、傅里叶逆变换得到反演光谱、获取目标谱线的相位信息等步骤,最终获得大气风速值^[5-9]。其中,获取目标谱线的相位信息需先得到目标谱线的复干涉图,再求得其相位信息。由反演光谱的复干涉图函数计算目标谱线的相位信息采用 Englert 等^[2]提出的方法。但是,在获取目标谱线的复干涉图函数时,若目标谱线有多条,需对每条谱线的相位信息进行单独计算^[2],同时,实际测量过程中,在光谱仪光谱范围内的杂散光也会进入光谱仪,得到的干涉图会受到不同程度的噪声影响,导致反演光谱中含有杂散光谱线、噪声等,并且目标谱线被展宽,使得复干涉图相位发生变化,最终导致反演风速值的偏差。因此,在对实际噪声环境下测得数据的处理过程中,获取反演光谱相位信息时需要目标谱线进行提取。

本文研究了获取反演光谱相位信息的过程中窗函数优化提取的过程,针对不同信噪比(SNR)的干涉图傅里叶逆变换得到的反演光谱,分析了不同种窗函数和同一种窗函数的不同线宽对其进行单一谱线提取的效果。以 30 m/s 的风速为例,使用蒙特卡罗方法,模拟高斯白噪声影响下不同信噪比的干涉图进行 1000 次随机运算,分别用不同线宽的矩形窗函数、三角窗函数和高斯窗函数对反演光谱进行优化提取,对反演风速结果进行分析,提出了最优的窗函数优化方式。

2 理论模型

多普勒差分干涉光谱仪实现对大气风速探测的主要原理是通过探测气辉谱线的多普勒频移来反演大气风场信息^[1]。多普勒差分干涉光谱仪系统图 1 所示。

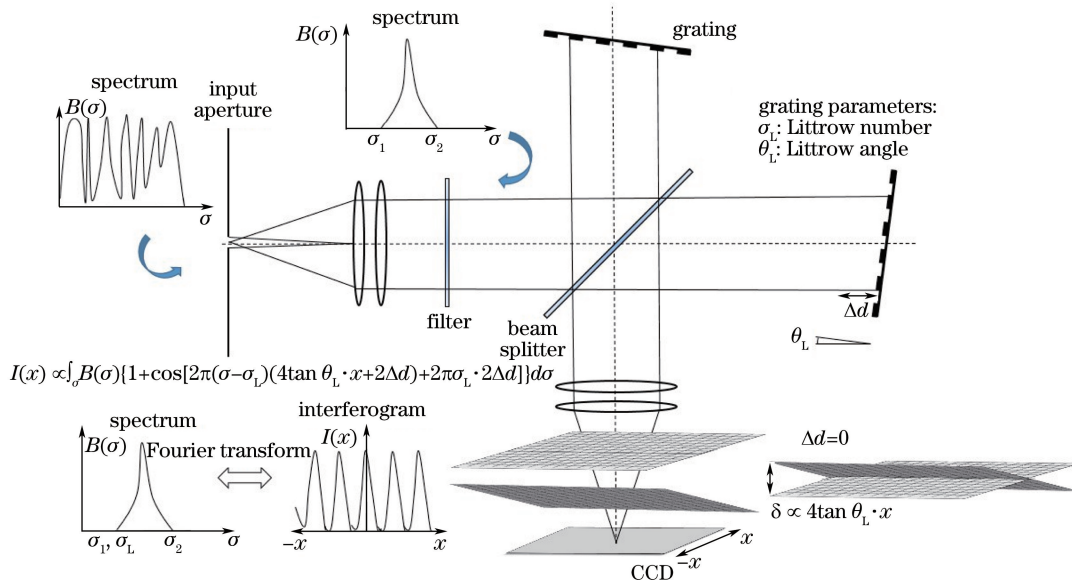


图 1 多普勒差分干涉光谱仪系统

Fig. 1 Schematic of the Doppler difference interference spectrometer system

假设入射光束为一个平面波阵面,在分束器处分振幅,分束后的两束光分别在两干涉臂末端的闪耀光栅处发生衍射。经闪耀光栅反射后,两波阵面返回分束器合束,这时,两个波阵面都有了 $\gamma \approx 2 \tan \theta_L [(\sigma - \sigma_L) / \sigma]$ 角度的倾斜与 $2\Delta d$ 的光程差,形成等厚差分干涉条纹。探测器所记录的干涉条纹表达式为

$$I(x) = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} B(\sigma) \cdot \{1 + \cos [2\pi(\sigma - \sigma_L) (4\tan \theta_L \cdot x + 2\Delta d) + 2\pi\sigma_L \cdot 2\Delta d] \} d\sigma, \quad (1)$$

式中 x 是图 1 所示探测器阵列的位置($x=0$ 是探测器阵列中心), θ_L 是闪耀光栅的 Littrow 角, $B(\sigma)$ 是入射光的光谱强度, σ 为波数。

利用多普勒差分干涉光谱技术进行大气风速反演的数据处理流程如图 2 所示^[10-13]。

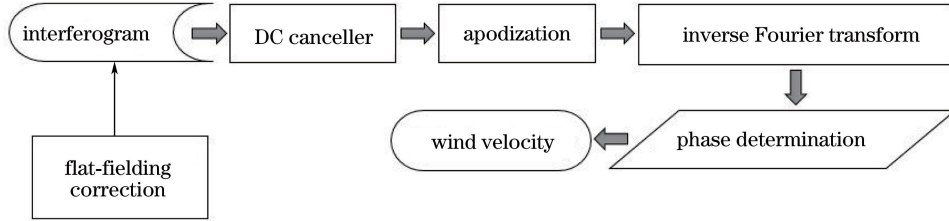


图 2 数据处理算法流程图

Fig. 2 Flow chart of data processing algorithm

采集到原始干涉图后,首先要去除低频基线,低频基线的干扰会导致傅里叶变换光谱中出现低频假信号,常用的去除低频基线的方法有高通滤波法、差分法、最小二乘拟合法、基于小波变换的去趋势项法等^[10]。然后进行切趾,切趾的作用是抑制旁瓣、缓和干涉图边缘的不连续性,常用的切趾函数有三角函数、汉明函数、布莱克曼函数等^[12]。通过傅里叶逆变换得到反演光谱,然后通过求解反演光谱的复干涉图函数来获取目标谱线的相位信息,最终得出大气风速值。

对于多条单色光谱线,设其波数分别为 $\sigma_j (j=1, 2, \dots)$, 其反演光谱为

$$B_j(\sigma) = \sum_j [\delta'(\sigma - \sigma_j) + \delta'(\sigma + \sigma_j)] * \{L \cdot \text{sinc}[2(\sigma_j - \sigma)L]\}, \quad (2)$$

式中 $\delta'(\sigma - \sigma_j)$ 为狄拉克函数, L 为系统有限采集的最大光程差, 其反演光谱为不同波数的单条单色光谱线与仪器线型函数卷积的叠加。由于多普勒差分干涉光谱仪是傅里叶变换型光谱仪, 干涉图函数与光谱强度函数呈傅里叶变换关系, 对反演光谱作傅里叶变换得到其干涉图函数, 可表示为

$$I_j(x) = \int_{-\infty}^{\infty} B_j(\sigma) \cdot \exp [i2\pi(\sigma - \sigma_L) (4\tan \theta_L \cdot x + 2\Delta d)] d\sigma = \sum_j \text{rect}\left(\frac{2\tan \theta_L \cdot x + \Delta d}{L}\right) \cos [2\pi(\sigma_j - \sigma_L) (4\tan \theta_L \cdot x + 2\Delta d)]. \quad (3)$$

在求取光谱相位信息的过程中, (3) 式所表示的干涉图函数中包含了所有谱线共同作用下的相位特征, 即使对于同一条谱线也包含了 $\delta'(\sigma - \sigma_j)$ 和 $\delta'(\sigma + \sigma_j)$ 共同作用下的相位特征, 无法解出目标谱线的相位。而且在实际测量时, 光谱仪光谱范围内的杂散光也会进入光谱仪, 得到的干涉图会受到噪声的影响, 导致反演光谱中含有杂散光谱线、噪声等, 使得求和得出的复干涉图相位发生变化, 最终导致反演风速值的偏差。所以, 需要对目标波数邻域的反演光谱进行窗函数的提取和优化, 才能得到目标谱线的相位信息。

设波数为 σ_1 的单色光是目标谱线, 并假设窗函数不对谱线产生影响, 对其进行窗函数提取后可表示为

$$B_1(\sigma) = \delta'(\sigma - \sigma_1) * \{L \cdot \text{sinc}[2(\sigma_1 - \sigma)L]\}, \quad (4)$$

对窗函数提取后的反演光谱作傅里叶变换得到的干涉图函数为

$$I_1(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta'(\sigma - \sigma_1) * \{L \cdot \text{sinc}[2(\sigma_1 - \sigma)L]\} \cdot \exp [i2\pi(\sigma - \sigma_L) (4\tan \theta_L \cdot x + 2\Delta d)] d\sigma = \text{rect}\left(\frac{2\tan \theta_L \cdot x + \Delta d}{L}\right) \exp [i2\pi(\sigma_1 - \sigma_L) (4\tan \theta_L \cdot x + 2\Delta d)] = \text{rect}\left(\frac{2\tan \theta_L \cdot x + \Delta d}{L}\right) [\cos(2\pi\kappa_1 x + \Phi_1) + i\sin(2\pi\kappa_1 x + \Phi_1)], \quad (5)$$

式中 $\kappa_1 = 4(\sigma_1 - \sigma_L) \tan \theta_L$ 是目标谱线的干涉条纹空间频率, $\Phi_1 = 4\pi(\sigma_1 - \sigma_L) \Delta d$ 是非对称光程差 $2\Delta d$ 的相移项。在探测大气风速时, 设气辉谱线的多普勒频移引起干涉图函数产生相位移动 $\delta\varphi_1$, 则由目标谱线的

复干涉图算出干涉图函数的虚部和实部之比,再求其反正切即可计算出随光程差变化的总相位函数^[2],

$$2\pi\kappa_1 x + \Phi_1 + \delta\varphi_1 = \arctan \frac{\text{Im}[I_1(x)]}{\text{Re}[I_1(x)]} \quad (6)$$

(6)式由无多普勒频移项 $2\pi\kappa_1 x + \Phi_1$ 以及多普勒频移项 $\delta\varphi_1$ 组成。在测量目标谱线的过程中同时观测一个已知的、无多普勒频移的参考谱线,确定无多普勒频移的干涉条纹相位。即使外界条件发生变化,每次采集仍能进行无多普勒频移项的校准。减去无多普勒频移项后,得到目标谱线的多普勒频移引起的相移。再将多普勒频移项 $\delta\varphi_1$ 、无频移目标谱线的中心波数 σ 和系统非对称量 Δd 代入相位移动表达式^[2]

$$\delta\varphi_1 = 4\pi\Delta d\sigma\left(\frac{\nu}{c}\right), \quad (7)$$

就可得出视线方向的光源和光谱仪之间的相对速度 ν 。光谱仪光谱范围内的所有谱线均可通过这种方法计算,每条谱线需要独立的速度计算过程。

因此,对获取反演光谱相位信息时提取目标谱线的窗函数优化过程进行研究。以 30 m/s 的风速为例,使用蒙特卡罗方法,模拟 1000 幅随机生成的高斯白噪声影响下不同信噪比的干涉图,分别用不同半峰全宽的矩形窗函数、三角窗函数和高斯窗函数对其反演光谱进行优化,对风速反演结果进行分析。

3 数值模拟及分析

对整个数据处理过程进行模拟,目标谱线为 630 nm 的多普勒差分干涉光谱仪的系统参数设置如表 1 所示^[6]。

表 1 目标谱线为 630 nm 的多普勒差分干涉光谱仪的系统参数表

Table 1 System parameters of Doppler difference interference spectrometer for target spectral line at 630 nm

Optical parameter	Value
Target source temperature	1000 K
Line width of target spectral line	0,0381 cm ⁻¹
Path difference sampled	2.5856-5.7634 cm
Optimum path difference	4.1745 cm at 1000 K ($\lambda=630$ nm)
Spectral resolution	0,3147 cm ⁻¹
CCD camera	2048 pixel×2048 pixel, 13 μ m pixel pitch
Littrow wavelength	630,5170 nm
Littrow angle	16,48°
Grating	Aperture: 28 mm×28 mm active area, groove density: 900 mm ⁻¹

模拟 30 m/s 的风速得到频移前后的干涉图、反演光谱以及相位图如图 3 所示,其中 OPD 表示光程差。

依照 Harlander 等^[6]提出的系统参数设置、使用 Andor 的 iKon-M_934 系列探测器在地基观测的实验结果,得出这类仪器通常对 630 nm 气辉曝光 300 s 的情况下,干涉图信噪比大约为 28 dB,因此,模拟信噪比分别为 31 dB,28 dB,25 dB,22 dB 的干涉图进行研究。

对于矩形窗函数,线宽取 6~21 倍光谱分辨率,对上述信噪比的干涉图进行优化,得到反演风速值的方差如图 4(a)所示。信噪比低于 30 dB 时,线宽取 7~12 倍光谱分辨率时,反演风速的方差较小。窗函数中心设在多普勒频移前的波数位置处,当线宽减小为 6 倍光谱分辨率以下时,窗函数对多普勒频移后的反演光谱谱线的提取不完整,会使谱线峰值位置发生变化,导致反演光谱谱线失真,反演风速的方差急剧增大,反演风速值完全偏离 30 m/s,如图 4(b)所示。以信噪比为 28 dB 的干涉图为例,由线宽分别为 6 倍光谱分辨率、16 倍光谱分辨率和 9 倍光谱分辨率的矩形窗函数优化后,得到的反演风速值如图 4(b)~(d)所示。

对于三角窗函数,线宽取 15~30 倍光谱分辨率,对上述信噪比的干涉图进行优化,得到反演风速的方差如图 5(a)所示。由图可知,在不使反演光谱谱线失真的情况下,反演风速的方差没有显著变化。以信噪比为 28 dB 的干涉图为例,由线宽为 18 倍光谱分辨率的三角窗函数优化后,得到的反演风速值如图 5(b)所示。

对于高斯窗函数,线宽取 3~18 倍光谱分辨率,对信噪比分别为 31 dB,28 dB,25 dB,22 dB 的干涉图进行优化,得到反演风速的方差如图 6(a)所示。由图可知,随着高斯窗函数线宽的逐步减小,反演风速的方差随之减小。当线宽减小至 3 倍光谱分辨率以下时,反演光谱谱线失真,反演风速的方差急剧增大,相位信息无法复原。以信噪比

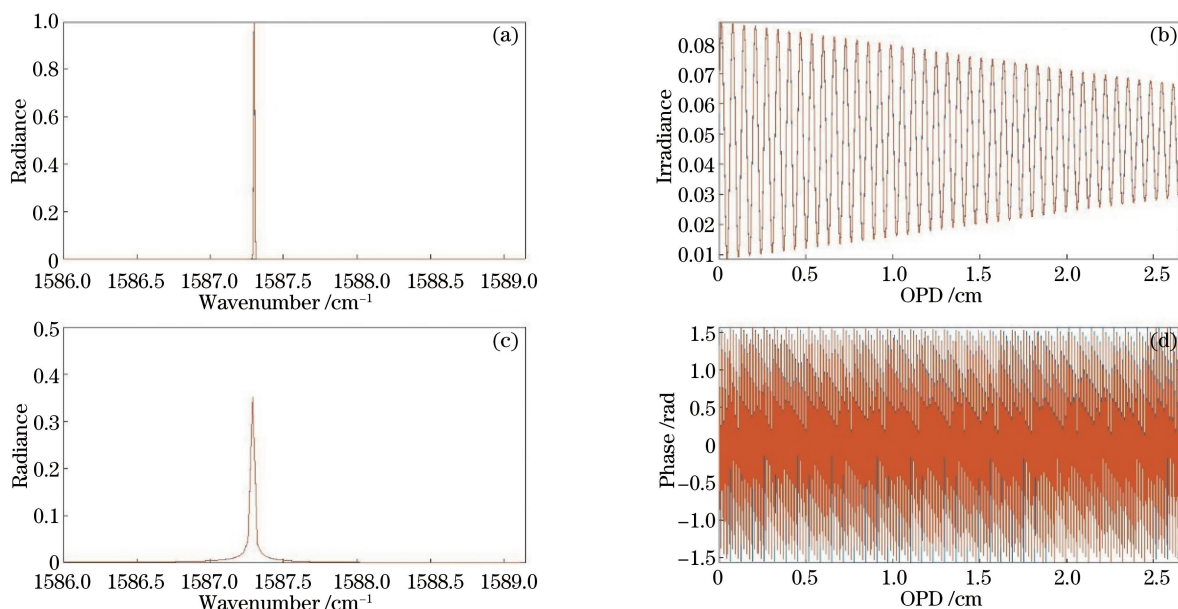


图 3 (a)输入光谱图;(b)干涉图;(c)反演光谱图;(d)相位图

Fig. 3 (a) Input spectral radiance; (b) measured interferogram; (c) recovered spectral radiance; (d) phase of the interferogram

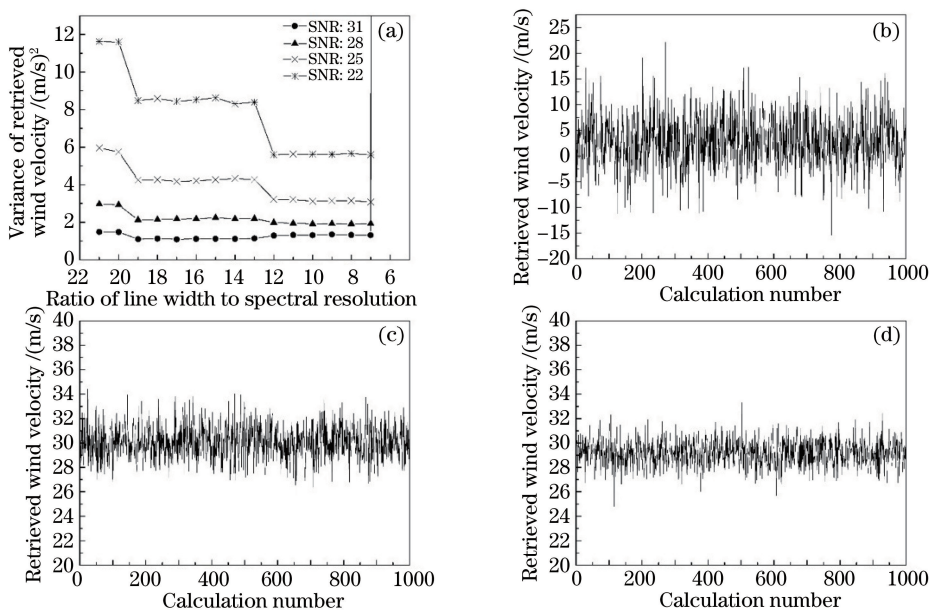


图 4 (a)线宽从 21 倍递减到 6 倍光谱分辨率的矩形窗函数对不同信噪比干涉图优化后的反演风速方差; 信噪比为 28 dB 的干涉图,由线宽为(b)6 倍;(c)16 倍;(d)9 倍光谱分辨率的矩形窗函数优化后的反演风速

Fig. 4 (a) Retrieved wind velocity variance of the interferogram with different SNR optimized by rectangular window functions with line width from 21 to 6 times of the spectral resolution; retrieved wind velocity of the interferogram with SNR equaling 28 dB optimized by rectangular window functions with line width equaling (b) 6 times; (c) 16 times; (d) 9 times of the spectral resolution of 28 dB 的干涉图为例,由线宽为 5 倍光谱分辨率的高斯窗函数优化后,得到的反演风速值如图 6(b)所示。

观察上述三种窗函数的优化结果可知,在不使反演光谱谱线失真的情况下,窗函数线宽越窄,噪声越小,反演风速值越精确。对于相同信噪比的干涉图,矩形窗线宽从 21 倍递减到 6 倍光谱分辨率,线宽取 6 倍光谱分辨率时反演光谱谱线失真;三角窗线宽从 30 倍递减到 15 倍光谱分辨率,线宽取 15 倍光谱分辨率时反演光谱谱线失真;高斯窗线宽从 18 倍递减到 3 倍光谱分辨率,线宽取 3 倍光谱分辨率时反演光谱谱线失真,对比分析失真前不同线宽三种窗函数的优化结果。对比信噪比为 28 dB 的干涉图经过三种窗函数优化后得到的反演风速的方差,线宽为 4~5 倍光谱分辨率的高斯窗函数的反演风速值最精确;对比信噪比为 25 dB

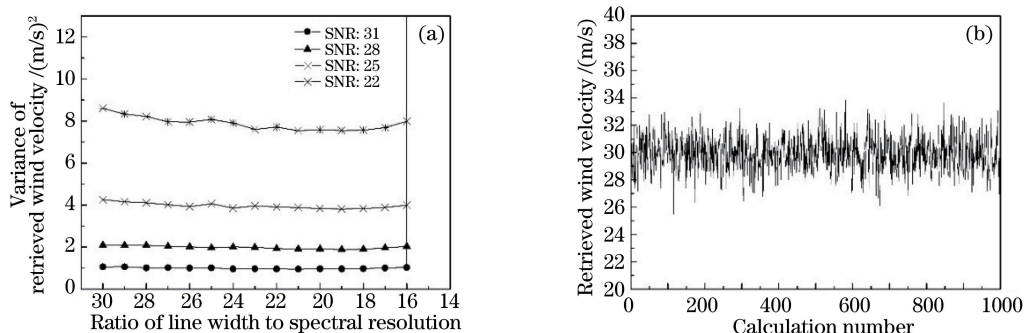


图 5 (a)线宽从 30 倍递减到 15 倍光谱分辨率的三角窗函数对不同信噪比干涉图优化后的反演风速方差；
(b)信噪比为 28 dB 的干涉图,由线宽为 18 倍光谱分辨率的三角窗函数优化后的反演风速

Fig. 5 (a) Retrieved wind velocity variance of the interferogram with different SNR optimized by triangular window function with line width from 30 to 15 times of the spectral resolution; (b) retrieved wind velocity of the interferogram with SNR equaling 28 dB optimized by triangular window function with line width equaling 18 times of the spectral resolution

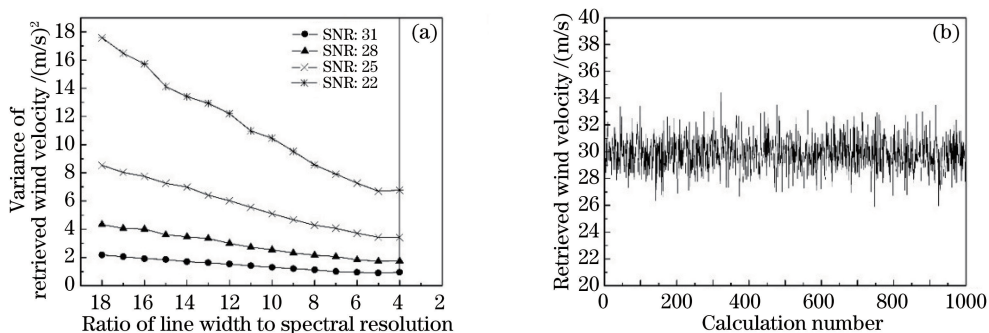


图 6 (a)线宽从 18 倍递减到 3 倍光谱分辨率的高斯窗函数对不同信噪比干涉图优化后的反演风速方差；
(b)信噪比为 28 dB 的干涉图,由线宽为 5 倍光谱分辨率的高斯窗函数优化后的反演风速

Fig. 6 (a) Retrieved wind velocity variance of the interferogram with different SNR optimized by Gaussian window function with line with from 18 to 3 times of the spectral resolution; (b) retrieved wind velocity of the interferogram with SNR equaling 28 dB optimized by Gaussian window function with line width equaling 5 times of the spectral resolution

的干涉图经过三种窗函数优化后得到的反演风速的方差,线宽为 7~12 倍光谱分辨率的矩形窗函数的反演风速值最精确。因此,在 25 dB~28 dB 之间存在一个临界值使得高斯窗和矩形窗的最佳优化反演结果的精确度相同。最终求得当干涉图信噪比为 26.5 dB 时,线宽为 4~5 倍光谱分辨率的高斯窗和 7~12 倍光谱分辨率的矩形窗的优化反演结果的精确度基本相同。观察三种窗函数的线宽对其优化提取作用的影响,总体来说三角窗的优化提取结果最稳定,矩形窗反演结果的精确度随线宽的减小呈阶梯状提升,而高斯窗只有在 线宽较小的情况下才能得到比较精确的反演结果。

4 结 论

基于多普勒差分干涉光谱仪的大气风速反演算法,针对高斯白噪声影响下的不同信噪比的干涉图,使用蒙特卡罗方法对不同线宽的不同窗函数的优化反演结果进行分析,得到最优的窗函数优化方式。结果得出:对于信噪比高于 26.5 dB 的干涉图,对比三种窗函数的优化结果,线宽为 4~5 倍光谱分辨率的高斯窗函数反演精度更高,是最优的窗函数优化方式,其中,对于信噪比为 28 dB 的干涉图,线宽为 5 倍光谱分辨率的高斯窗的反演风速的方差为 1.7293 (m/s)^2 ,可以复原相位信息;对于信噪比低于 26.5 dB 的干涉图,线宽为 7~12 倍光谱分辨率的矩形窗函数的反演风速值更精确,是最优的窗函数优化方式,其中,对于信噪比为 25 dB 的干涉图,线宽为 7 倍光谱分辨率的矩形窗的反演风速的方差为 3.0827 (m/s)^2 ,可以复原相位信息,反演出大气风速的近似值。得到最优的窗函数优化方式对今后反演算法的完善和细化有借鉴作用。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Feng Yutao, Bai Qinglan, Wang Yongmei, *et al.* Theory and method for designing field-widened prism of spatial heterodyne spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1030001.
冯玉涛, 白清兰, 王咏梅, 等. 空间外差光谱仪视场展宽棱镜设计理论与方法[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1030001.
- [4] Fei Xiaoyun, Feng Yutao, Bai Qinglan, *et al.* Optical system design of a co-path Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer with two fields of view[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0422003.
费小云, 冯玉涛, 白清兰, 等. 双视场准共路多普勒外差干涉仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0422003.
- [5] Englert C R, Harlander J M, Emmert J T, *et al.* Initial ground-based thermospheric wind measurements using Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy (DASH)[J]. Optics Express, 2010, 18(26): 27416-27430.
- [6] Harlander J M, Englert C R, Babcock D D, *et al.* Design and laboratory tests of a Doppler asymmetric spatial heterodyne (DASH) interferometer for upper atmospheric wind and temperature observations [J]. Optics Express, 2010, 18(25): 26430-26440.
- [7] Englert C R, Harlander J M, Brown C M, *et al.* Coincident thermospheric wind measurements using ground-based Doppler asymmetric spatial heterodyne (DASH) and Fabry-Perot interferometer (FPI) instruments [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2012, 86: 92-98.
- [8] Marr K D, Englert C R, Harlander J M. Flat-fields in DASH interferometry[J]. Optics Express, 2012, 20(9): 9535-9544.
- [9] Marr K D, Englert C R, Harlander J M, *et al.* Thermal sensitivity of DASH interferometers: the role of thermal effects during the calibration of an Echelle DASH interferometer[J]. Applied Optics, 2013, 52(33): 8082-8088.
- [10] Ye Song, Xiong Wei, Wang Xinqiang, *et al.* Correction of spatial heterodyne interferogram based on frequency domain analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0530001.
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): 0530001.
- [11] Jing Juanjuan, Xiangli Bin, Lü Qunbo, *et al.* Advance in interferogram data processing technique[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(4): 865-870.
景娟娟, 相里斌, 吕群波, 等. 干涉光谱数据处理技术研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(4): 865-870.
- [12] Huang Min, Xiangli Bin, Lü Qunbo, *et al.* Research on spatially modulated Fourier transform imaging spectrometer data processing method[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 30(3): 855-858.
黄旻, 相里斌, 吕群波, 等. 空间调制型干涉光谱成像仪数据处理方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(3): 855-858.
- [13] Perkins C P. Spatial heterodyne spectroscopy: modeling and interferogram processing[D]. Massachusetts: Merrimack College, 2011.