

doi:10.3788/gzxb20154407.0701003

# 光纤 Mach-Zehnder 干涉仪测风激光雷达技术与数值仿真

谭林秋, 华灯鑫, 汪丽, 何廷尧, 常博

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

**摘 要:** 基于光纤 Mach-Zehnder 干涉仪双边缘检测技术, 提出并设计了一套全光纤非相干测风激光雷达系统, 对多普勒频移的提取和风速反演算法进行了理论分析, 针对大气分子散射信号的特点, 对光纤 Mach-Zehnder 鉴频系统进行了优化设计. 应用美国标准大气模型, 对系统的灵敏度、信噪比以及测量误差进行了数值仿真. 仿真结果表明, 对 532 nm 波长的地基分子散射测风激光雷达, 当垂直距离分辨率为 300 m, 进行 1 000 次激光脉冲累计平均后, 得到径向探测距离达到 20 km, 径向风速在  $\pm 100$  m/s 的范围内时, 径向风速误差小于 1.4 m/s, 说明此系统可以进行远距离大尺度风速的测量, 为新型小型化测风激光雷达的开发及研制提供了一种可行的技术方案.

**关键词:** 激光雷达; 多普勒测风; 数值仿真; 光纤 Mach-Zehnder 干涉仪; 双边缘检测技术; 风速反演; 鉴频系统

中图分类号: P412.16; TN958.98

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)07-0701003-7

## Numerical Simulation for Wind Lidar Based on Optical Fiber Mach-Zehnder Interferometer

TAN Lin-qiu, HUA Deng-xin, WANG Li, HE Ting-yao, CHANG Bo

(School of Mechanical and Instrument Engineering, Xian University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** An all-fiber incoherent wind lidar system was proposed and designed based on double-edge technique of optical fiber Mach-Zehnder interferometer. The algorithms for Doppler shift extraction and for wind velocity retrieval were theoretically analyzed. The optical fiber Mach-Zehnder interferometer used as a spectral analyzer in the proposed system, was discussed to optimize for wind velocity measurement based on the signals backscattered by the molecules. Performances including wind measurement sensitivity, signal-to-noise ratio and measurement error of lidar system were numerically simulated based on the U. S. standard atmospheric model. For a ground-based molecular wind lidar at a wavelength of 532 nm, an error in the line-of-sight velocity component of the wind was found to be smaller than 1.4 m/s up to an altitude of 20 km, with the line-of-sight wind velocity within the range of  $\pm 100$  m/s, a 300-shot average and a vertical resolution of 1 000 m. Obtained results show that the designed system can be applied for long-distance and large-scale wind velocity measurement. The system will be able to provide a technical solution for the development of the compact Doppler lidar.

**Key words:** Lidar; Doppler wind measurement; Numerical simulation; Optical fiber Mach-Zehnder interferometer; Double-edge technique; Wind velocity retrieval; Frequency discriminator system

**OCIS Codes:** 010.3640; 280.3340; 010.1310; 260.3160

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61205189, 61275185)资助

第一作者: 谭林秋(1984-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为测风激光雷达技术. Email: linqiutan@sina.com

导 师: 华灯鑫(1964-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为激光雷达大气遥感探测技术. Email: xauthdx@163.com

通讯作者: 汪丽(1979-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为激光雷达大气风场探测技术. Email: wlfuyun@163.com

收稿日期: 2014-12-18; 录用日期: 2015-03-10

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

## 0 引言

激光雷达作为大气风廓线测量的一种有效工具,具有很高的时空分辨率,受到世界各国的广泛关注与资金投入.美国 NASA 及欧空局 ESA 等国家相继研发了地基、机载及星载测风激光雷达<sup>[1-2]</sup>,我国中科院安徽光机所及中国海洋大学等单位也开展了卓有成效的研究,先后研制出不同波长的多普勒测风激光雷达系统,并用于日常业务及科研观测研究<sup>[3-4]</sup>.激光雷达用于大气风场探测的原理是基于大气分子及悬浮颗粒物的多普勒频移,直接测量多普勒频移的方法主要包括边缘检测技术<sup>[5]</sup>和条纹成像技术<sup>[6]</sup>,所使用的鉴频器大多是基于 Fabry-Perot 干涉仪 (Fabry-Perot Interferometer, FPI) 的.然而 FPI 的透过率比较低,且产生的环状干涉条纹和已有的阵列式探测器不匹配,这就给条纹探测带来了困难<sup>[7-8]</sup>.相对于 FPI, Mach-Zehnder 干涉仪 (Mach-Zehnder Interferometer, MZI) 具有透过率高、探测谱的范围宽、能进行视场展宽、所成直条纹可以与探测器相互匹配等优点,用于多普勒测风激光雷达可以获得较高的探测信噪比及大的测风动态范围<sup>[9-11]</sup>.然而传统的机械结构式 MZI 具有体积大、光路调整复杂、结构不紧凑、特别是系统稳定性差、易受环境干扰等缺点,制约了它的应用及发展,特别是在机载和星载系统中的应用<sup>[12]</sup>.

近年来,随着光纤传感技术的飞速发展,一些传统

的光学仪器可以用光纤及光无源器件来代替,其优点是体积小、重量轻、结构紧凑、稳定性高,已被广泛应用于光纤传感、光纤滤波、光调制等方面<sup>[13]</sup>.特别是光纤 MZI,具有优良的波长选择性和光谱分辨率、较高的分光效率和抗干扰能力等特点<sup>[14]</sup>,如将其应用到多普勒测风激光雷达的鉴频系统中,将可获得新型小型化、高效稳定的光纤鉴频技术.

本文基于光纤 MZI 的干涉原理,设计了一套以光纤 MZI 为鉴频器的全光纤测风激光雷达系统.针对大气分子散射信号的特点,对光纤 MZI 鉴频系统进行了优化设计,并基于 1976 年美国标准大气模型,对系统的光学性能进行了仿真计算,验证了系统方案的可行性.该系统具有结构紧凑、重量轻、稳定性高、能进行大尺度风速测量等特点,可为新型小型化多普勒激光雷达的发展以及建立星载平台上全球风场探测激光雷达提供新的技术支持及解决方法.

## 1 基于光纤 MZI 的非相干测风激光雷达系统

### 1.1 非相干测风激光雷达系统结构

非相干测风激光雷达系统构成如图 1 所示,主要包含四部分:单频种子注入 Nd:YAG 脉冲激光发射子系统、望远镜光学接收子系统、鉴频子系统以及数据处理子系统.

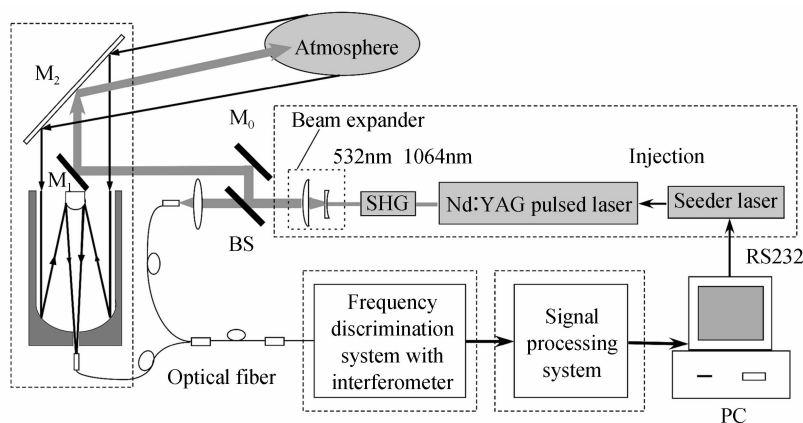


图 1 非相干测风激光雷达系统

Fig. 1 Schematic diagram of an incoherent wind lidar

激光发射系统采用频率稳定的种子注入 Nd:YAG 激光器,出射波长为 532 nm 的激光,光束经过准直扩束后被分光镜 BS 分为两部分,小部分光耦合至传导光纤进入频移检测系统,作为参考光;大部分光经全反镜  $M_0$ 、 $M_1$  和  $M_2$  指向大气探测区域,大气后向散射信号由卡塞格林望远镜接收并耦合至传导光纤中,进入鉴频子系统,鉴频器输出信号经光电转换、数据采集,最终送计算机进行反演处理.

### 1.2 双通道光纤 MZI 鉴频器性能分析

双通道光纤 MZI 的结构如图 2 所示,由两个 3 dB 光纤耦合器  $C_1$ 、 $C_2$  和两条光纤干涉臂  $L_1$ 、 $L_2$  组成<sup>[15]</sup>.光信号由光纤 MZI 的输入端  $I_1$  或者  $I_2$  输入,经第一个耦合器  $C_1$  分束,进入光纤干涉臂  $L_1$  和  $L_2$  中,然后进入第二个耦合器  $C_2$ ,最后从输出端  $O_1$  和  $O_2$  输出.假设信号从输入端  $I_1$  进入,输出端  $O_1$  输出的光信号有两个传播途径,一路是经  $C_1$  的直通臂、 $L_1$  和  $C_2$  的直

通臂,另一路是通过  $C_1$  的交叉臂、 $L_2$  和  $C_2$  的交叉臂,两路信号在输出端  $O_1$  相互干涉,由光电探测器  $D_1$  接收.输出端  $O_2$  的输出信号与此类似,由光电探测器  $D_2$  接收.

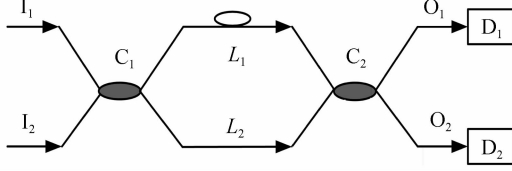


图2 光纤 MZI 鉴频系统结构图

Fig.2 Configurations of frequency discrimination systems with optical fiber MZI

在不考虑损耗时,根据耦合模理论,双通道光纤 MZI 输出端光场与输入端光场的关系可以表示为<sup>[15]</sup>

$$\begin{pmatrix} E_{-O_1} \\ E_{-O_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{1-\alpha_2} & j\sqrt{\alpha_2} \\ j\sqrt{\alpha_2} & \sqrt{1-\alpha_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{j\delta} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sqrt{1-\alpha_1} & j\sqrt{\alpha_1} \\ j\sqrt{\alpha_1} & \sqrt{1-\alpha_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{-I_1} \\ E_{-I_2} \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中,  $E_{-I_1}$ 、 $E_{-I_2}$  分别是输入端  $I_1$  和  $I_2$  的输入光场,  $E_{-O_1}$ 、 $E_{-O_2}$  分别是输出端  $O_1$  和  $O_2$  的输出光场,  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  分别是光纤耦合器  $C_1$  和  $C_2$  的耦合系数.  $\delta = 2\pi\sigma n\Delta L$ ,  $\sigma$  为入射光波的波数,  $n$  为光纤的有效折射率,  $\Delta L = L_1 - L_2$  为 MZI 两干涉臂的臂长差. 若信号只从输入端  $I_1$  输入,即输入光场  $E_{-I_2} = 0$ ,且光纤耦合系数  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$ ,则由式(1)可以得到

$$\begin{cases} E_{-O_1} = \frac{1}{2}E_{-I_1}(1 - e^{j\delta}) \\ E_{-O_2} = \frac{j}{2}E_{-I_1}(1 + e^{j\delta}) \end{cases} \quad (2)$$

设输入端  $I_1$  的输入功率为  $P_{-I_1}$ ,则输出端  $O_1$  和  $O_2$  的输出光功率  $P_{-O_1}$  和  $P_{-O_2}$  分别为

$$\begin{cases} P_{-O_1} = E_{-O_1}E_{-O_1}^* = P_{-I_1} \cdot \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \\ P_{-O_2} = E_{-O_2}E_{-O_2}^* = P_{-I_1} \cdot \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \end{cases} \quad (3)$$

因此,光纤 MZI 输出端  $O_1$  和  $O_2$  的透过率函数分别为

$$\begin{cases} T_1(\sigma) = \frac{P_{-O_1}}{P_{-I_1}} = \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) = \sin^2(\pi\sigma n\Delta L) \\ T_2(\sigma) = \frac{P_{-O_2}}{P_{-I_1}} = \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) = \cos^2(\pi\sigma n\Delta L) \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可知,光纤 MZI 两个通道的透过率函数是互补的 SineSqr 函数,其自由光谱范围为

$$\Delta\sigma_{\text{FSR}} = \frac{1}{n \cdot \Delta L} \quad (5)$$

## 2 基于双通道光纤 MZI 边缘检测技术的风速反演理论

当激光束以一定方位角和天顶角指向大气被探测

区域时,大气中的气溶胶粒子和大气分子分别发生 Mie 散射和 Rayleigh 散射,它们的中心波数都与发射激光中心波数  $\sigma_0$  相同.但由于风的作用或大气粒子的运动,它们会产生相对于发射激光频率  $\sigma_0$  的多普勒频移  $\Delta\sigma_{\text{DOP}}$ .

该多普勒频移与大气径向风速的关系为<sup>[16]</sup>

$$V = \frac{\Delta\sigma_{\text{DOP}} \cdot c}{2\sigma_0} \quad (6)$$

式中,  $V$  为大气径向风速,  $\Delta\sigma_{\text{DOP}}$  为大气回波信号的多普勒频移,  $\sigma_0$  为发射激光的波数,  $c$  为光速.通过回波信号的频率检测可以得到大气径向风速引起的多普勒频移,进而获得径向风速的大小,如果进行平面或立体扫描,则可以反演大气风场的水平风速和风向信息.

假设回波信号是大气分子散射信号,在不考虑布里渊散射引起的展宽和发射激光线宽的情况下,归一化的散射信号谱可表示为<sup>[16]</sup>

$$I_m(\sigma) = \frac{1}{\gamma_m \sqrt{\pi}} \exp\left[-\frac{(\sigma - \sigma_0)^2}{(\gamma_m)^2}\right] \quad (7)$$

式中  $\sigma$  为光的波数,  $\gamma_m$  为大气分子散射谱峰值  $1/e$  处的半宽,表示为<sup>[16]</sup>

$$\gamma_m = \frac{2\sigma_0}{c} \left(\frac{2kt}{m}\right)^{1/2} \quad (8)$$

式中  $k$  为玻尔兹曼常量,  $t$  为散射介质的温度,  $m$  是大气分子的平均质量.

那么图2中探测器  $D_1$  和  $D_2$  探测到的信号则为大气分子后向散射信号与光纤 MZI 透过率函数(式(4))的卷积,分别表示为

$$\begin{cases} S_{m_1}(\sigma) = I_m(\sigma) \otimes T_1(\sigma) = \frac{1}{2} [1 - \exp(-\pi^2 \gamma_m^2 n^2 \Delta L^2) \cos(2\pi\sigma n\Delta L)] \\ S_{m_2}(\sigma) = I_m(\sigma) \otimes T_2(\sigma) = \frac{1}{2} [1 + \exp(-\pi^2 \gamma_m^2 n^2 \Delta L^2) \cos(2\pi\sigma n\Delta L)] \end{cases} \quad (9)$$

定义鉴频信号的响应函数  $Q_m$  为

$$Q_m(\sigma) = \frac{S_{m_1}(\sigma) - S_{m_2}(\sigma)}{S_{m_1}(\sigma) + S_{m_2}(\sigma)} = -\exp(-\pi^2 \gamma_m^2 n^2 \Delta L^2) \cdot \cos(2\pi\sigma n\Delta L) \quad (10)$$

考虑到风速引起的多普勒频移,大气后向散射光波数  $\sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma_{\text{DOP}}$ ,则响应函数为

$$Q_m(V) = -\exp[-\pi^2 \gamma_m^2 n^2 \Delta L^2] \cdot \cos\left[2\pi n\Delta L\sigma_0 \left(1 + \frac{2V}{c}\right)\right] \quad (11)$$

根据双边缘测风原理,发射激光的最佳工作点应该锁在 MZI 两通道透过率曲线的交点处,也即曲线的半高半宽处(A点处),此时  $T_1 = T_2$ ,如图3所示.图3表示了光纤 MZI 两通道透过率  $T_1$ 、 $T_2$  以及无多普勒频移时大气分子散射谱  $I_m$  的曲线.很明显,没有多普勒频移时,  $T_1 = T_2$ ,因此两通道探测器探测到的信号

$S_{m_1}$  和  $S_{m_2}$  是相同的. 但是由于风的作用, 大气回波信号的中心波数发生多普勒频移, 将会偏离  $\sigma_0$ , 那么光纤 MZI 两通道值将发生变化, 通过检测这种变化可以得到多普勒频移, 从而实现鉴频的目的.

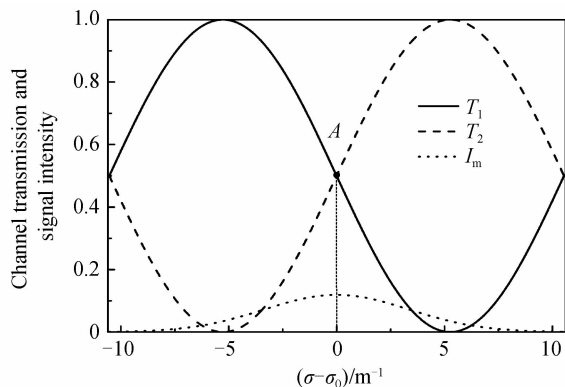


图 3 光纤 MZI 两通道透过率曲线及大气分子散射谱  
Fig. 3 Transmission of the optical fiber MZI channels and the molecular backscattered signal spectral distribution as a function of  $\sigma - \sigma_0$

将式 (7) 和 (9) 中的  $\gamma_m$  替换为  $\gamma_a$  即可得到双通道光纤 MZI 对气溶胶散射信号的透过率  $S_{a_1}$  和  $S_{a_2}$ , 其中  $\gamma_a$  为气溶胶散射谱峰值  $1/e$  处的半宽, 可近似认为其与激光线宽  $\gamma_e$  相等<sup>[16]</sup>.

### 3 基于分子散射的光纤 MZI 鉴频系统优化与性能仿真

#### 3.1 光纤 MZI 鉴频系统优化

对于光纤 MZI 来说, 首先需要优化的参量是两干涉臂的臂长差  $\Delta L$ , 由文献[17]可知, 对于分子散射测风激光雷达来说, 最优臂长差可以表示为

$$\Delta L_{OPT} = (\sqrt{2} \pi n \gamma_m)^{-1} = \frac{c}{4\pi n \sigma_0} \left(\frac{kt}{m}\right)^{-1/2} \quad (12)$$

如图 3 所示, 发射激光的最佳工作点应该锁在 MZI 两通道透过率曲线的交点 A 处, 此时  $T_1 = T_2$ , 由式 (4) 可得发射激光中心波数  $\sigma_0$  与最优臂长差  $\Delta L_{OPT}$  之间需满足<sup>[17]</sup>

$$\sigma_0 = \frac{1}{4n\Delta L_{OPT}}(2p + 1) \quad p=0, 1, 2, 3 \dots \quad (13)$$

当发射激光中心波长为 532 nm, 光纤有效折射率  $n=1.46$ , 大气后向散射信号为温度  $t=250$  K 的大气分子散射谱时, 由式 (12) 和 (13) 可得最优臂长差  $\Delta L_{OPT}=3.25$  cm. 在此臂长差下, 由式 (5) 可得光纤 MZI 透过率函数的自由光谱范围  $\Delta\sigma_{FSR}=21.07$   $m^{-1}$ . 基于光纤 MZI 的分子散射测风激光雷达系统参量见表 1.

表 1 分子散射测风激光雷达系统参量  
Table 1 Parameters for molecular wind lidar

Parameters	Values
Wavelength $\lambda_0/nm$	532
Pulse energy $E_0/mJ$	550
Laser 1/e width $\gamma_e/cm^{-1}$	0.002
Received area $A/m^2$	0.166
Zenith $\epsilon / (^\circ)$	45
Field angle of telescope $\theta/mrad$	0.4
Vertical resolution/m	300
Detector efficiency $\eta$	0.26
Detector dark count (CPS)	400
Radiance of background skylight in daytime $R_b/(W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1})$	1.75
Coupling efficiency of the single-mode fiber $\xi$	0.005
Frequency discriminator	Optical fiber MZI
Free spectral range $\Delta\sigma_{FSR}/m^{-1}$	21.07
Optimal arm length difference $\Delta L_{OPT}/cm$	3.25
Line-of-sight dynamic range/ $(m \cdot s^{-1})$	(-420, 420)

#### 3.2 分子散射测风激光雷达系统性能分析与仿真

##### 3.2.1 光纤 MZI 透过率响应函数

对于分子散射系统来说, 根据式 (9) 可知, 光纤 MZI 的透过率响应函数是大气分子散射信号与光纤 MZI 透过率函数的卷积. 假设大气后向散射信号为温度是 250 K 的大气分子散射信号, 那么光纤 MZI 的透过率响应函数曲线如图 4 所示. 可以看出, 最高透过率响应和最低透过率响应分别为 0.8 和 0.2, 说明光纤 MZI 对谱宽较宽、峰值较小的大气分子散射谱具有比较高的透过率响应, 且透过率变化范围较大, 这样更有利于鉴频信号  $Q_m$  的检测和风速的反演.

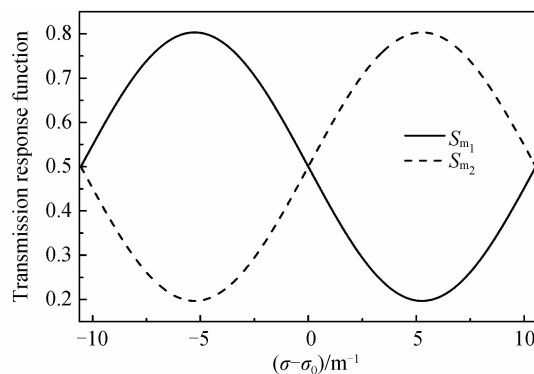


图 4 光纤 MZI 对大气分子散射信号的透过率响应函数曲线  
Fig. 4 Interferometer transmission for a molecular backscattered signal at a temperature of 250 K

### 3.2.2 系统信噪比

如图 1 所示的非相干测风激光雷达系统,假设出射激光的中心波数为  $\sigma_0$ ,单脉冲能量为  $E_0$ ,不考虑其它光学器件的光学损耗和透过率,经过图 2 所示的双通道光纤 MZI 鉴频系统之后,光电探测器  $D_j (j=1,2)$  探测到的大气后向散射光子数为<sup>[18]</sup>

$$N_{m,j}(R) = \frac{E_0}{hc\sigma_0} \frac{A}{R^2} S_{m,j} \eta_j \xi \beta_m \times \Delta R \times \exp[-2 \int_0^R \tau(r) dr] \quad (14)$$

式中,  $h$  为普朗克常量,  $A$  为激光雷达接收的有效面积,  $R$  为径向探测的空间距离,  $\Delta R$  为距离分辨率,  $S_{m,j}$  为  $j$  通道光纤 MZI 对大气分子散射信号的透过率,  $\eta_j$  为探测器  $j$  的量子效率,  $\beta_m$  为大气分子的后向散射系数,  $\tau$  为大气消光系数,  $\xi$  为望远镜接收的后向散射光场与单模光纤的耦合效率,此参量制约了全光纤 MZI 多普勒激光雷达的探测高度和测量准确度,提高此耦合效率也是一直以来研究的重点<sup>[19-21]</sup>.

设  $\beta_a$  为气溶胶的后向散射系数,  $S_{a,j}$  为  $j$  通道光纤 MZI 对气溶胶散射信号的透过率,那么分别用  $S_{a,j}$  和  $\beta_a$  取代  $S_{m,j}$  和  $\beta_m$  可以得到气溶胶后向散射光子数  $N_{a,j}$ .

采用 1976 年美国标准大气模型<sup>[22]</sup>,对中心波长为 532 nm 的激光进行建模,可以得到大气气溶胶 Mie 散射和大气分子 Rayleigh 散射引起的大气后向散射系数  $\beta_a, \beta_m$  和消光系数  $\tau$ ,进而可以得到探测器能探测到的大气分子后向散射光子数和气溶胶后向散射光子数,如图 5 所示.图中所示为没有多普勒频移时,光纤 MZI 中探测器  $D_1$  探测到的大气后向散射光子数,因此时两通道透过率  $T_1 = T_2$ ,所以探测器  $D_2$  探测到的光子数与  $D_1$  相同.可以看出,在低空 ( $R < 200$  m) 时,气溶胶散射信号略强于大气分子散射信号,探测距离继续增大,大气分子后向散射信号将渐渐强于气溶胶后向散射信号,当径向探测距离在 15 km 以上时,探测器已经几乎探测不到气溶胶后向散射信号了.

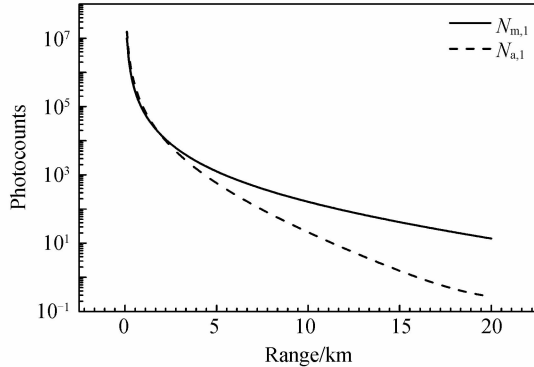


图 5 光纤 MZI 中探测器  $D_1$  探测到的大气后向散射光子数  
Fig. 5 Simulations of the detected photon counts for the signal backscattered from the atmosphere for detector  $D_1$  of the optical fiber MZI

系统信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 是评价

系统性能的重要指标,对于一个大气分子散射系统来说,气溶胶信号的加入会增加系统的信噪比,因为气溶胶散射光谱宽度远远小于分子散射谱宽<sup>[23]</sup>.单次测量下,探测器  $D_j (j=1,2)$  获得的光子探测信噪比为<sup>[23]</sup>

$$\text{SNR}_j = \frac{N_{m,j} + N_{a,j}}{(N_{m,j} + N_{a,j} + N_{B,j} + N_{d,j})^{1/2}} \quad (15)$$

式中  $N_{B,j}$  为光纤 MZI 通道  $j$  的太阳背景光子数,  $N_{d,j}$  为探测器  $D_j$  的暗电流.

白天测量时,系统接收到的太阳背景光强度可表示为<sup>[24]</sup>

$$P_b = R_b \cdot \Delta\lambda \cdot \frac{\pi}{4} \theta^2 \cdot A \quad (16)$$

式中  $R_b$  为白天的太阳背景辐亮度,对于白天晴朗天气,在本系统采用的激光工作波长 532 nm 附近,  $R_b$  约为  $1.75 \text{ W/m}^2 \cdot \text{Sr} \cdot \text{nm}$ ,  $\Delta\lambda$  为干涉仪的带宽,  $\theta$  为接收望远镜的视场角.相对应的  $j$  通道太阳背景光子数为

$$N_{B,j} = \eta_j \cdot S_{m,j} \cdot \xi \cdot \frac{\lambda}{hc} \cdot P_b \cdot \Delta t \quad (17)$$

式中  $\lambda$  为激光波长,  $\Delta t = 2 \cdot \Delta R / c$  为探测时间,其中  $\Delta R$  为距离分辨率.

用光子数形式表示的探测器暗电流为<sup>[24]</sup>

$$N_{d,j} = \text{CPS}_j \cdot \Delta t \quad (18)$$

式中  $\text{CPS}_j$  为光电探测器  $D_j$  的暗计数.

对于双通道光纤 MZI 来说,总的系统信噪比可以表示为

$$\text{SNR} = \left[ \sum_{j=1}^2 \frac{1}{(\text{SNR}_j)^2} \right]^{-1/2} \quad (19)$$

对目标进行  $M$  次测量取平均后,其信噪比为

$$\overline{\text{SNR}} = \sqrt{M} \text{SNR} \quad (20)$$

经过 1 000 次探测脉冲累计平均后,基于光纤 MZI 的分子散射多普勒激光雷达系统总信噪比如图 6 所示,白天测量,太阳背景辐亮度  $R_b = 1.75 \text{ W/m}^2 \cdot \text{Sr} \cdot \text{nm}$ ,信噪比为 100 时,径向探测距离可达到 24.5 km.

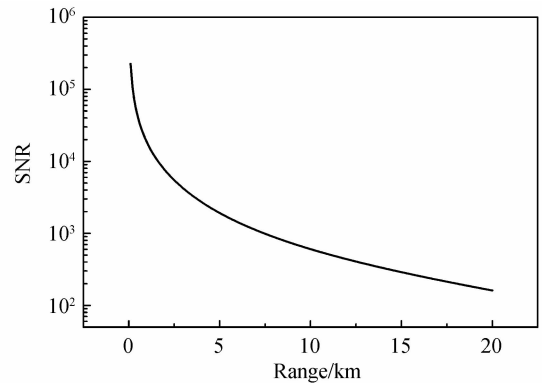


图 6 基于光纤 MZI 的分子散射测风激光雷达系统信噪比  
Fig. 6 SNR for molecular wind lidar based on optical fiber MZI

### 3.2.3 系统灵敏度

测风激光雷达系统灵敏度定义为单位风速下探测器测量信号的变化值<sup>[18]</sup>,基于双通道光纤 MZI 的分子散射系统灵敏度表达式为

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \frac{1}{V} \frac{\Delta S_{m_1}}{S_{m_1}} = \frac{2\sigma_0}{c} \frac{dS_{m_1}(\sigma)}{d\sigma} \\ \theta_2 &= \frac{1}{V} \frac{\Delta S_{m_2}}{S_{m_2}} = \frac{2\sigma_0}{c} \frac{dS_{m_2}(\sigma)}{d\sigma}\end{aligned}\quad (21)$$

双通道测量的灵敏度是两通道灵敏度之差,表示为

$$\Theta = \theta_2 - \theta_1 \quad (22)$$

在一个测风动态范围内分子散射系统灵敏度如图 7 所示.

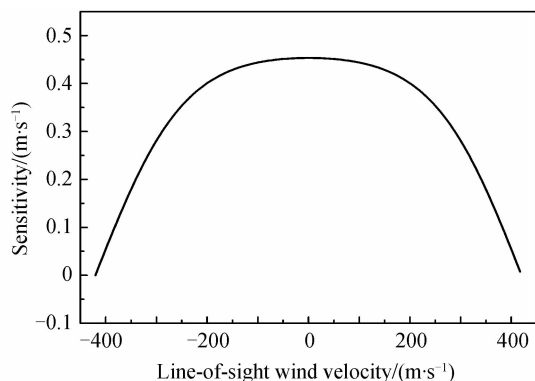


图 7 光纤 MZI 对大气分子散射信号的灵敏度

Fig. 7 Sensitivity to molecular backscattered signal for optical fiber MZI

当无多普勒频移时,大气回波信号的中心波数将会锁在光纤 MZI 两通道透过率曲线的交点处,也即曲线的半高半宽处,如图 3 所示.此时,曲线的斜率最大,且两通道透过率曲线互补,因此系统灵敏度达到最大值,为 0.45% (m/s).随着风速增大,回波信号的中心波数将发生偏离,曲线斜率减小,所以灵敏度随之下降,如图 7 所示,当径向风速大小分别达到 100 m/s 和 200 m/s 时,系统灵敏度分别为 0.44% (m/s) 和 0.40% (m/s),相对于最大值分别下降了 2% 和 11%.

### 3.2.4 系统误差

多普勒测风激光雷达径向风速误差与系统灵敏度和信噪比成反比,可表示为<sup>[18]</sup>

$$\epsilon = \frac{1}{\text{SNR} \cdot \Theta} \quad (23)$$

其随探测高度变化的曲线如图 8 所示,由于灵敏度非恒定值的影响,不同风速下,误差随着探测高度增加而增大的速度不同,风速越大,增大速度越快,曲线越陡.风速分别为 1 m/s 和 100 m/s 时的曲线几乎重合,说明风速大小不超过 100 m/s 时,由灵敏度非恒定性引起的误差增大并不明显.对基于分子散射的光纤 MZI 测风激光雷达系统,当径向探测距离达到 20 km,径向

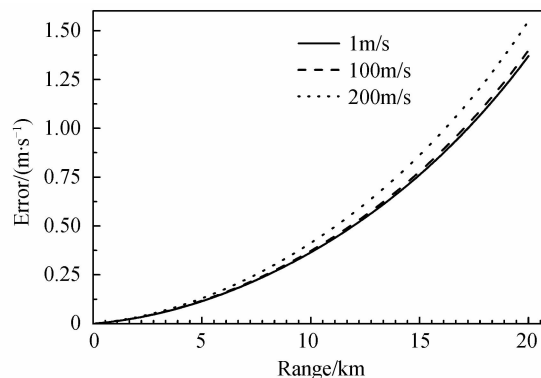


图 8 系统径向风速测量误差与径向探测距离的关系  
Fig. 8 Errors in the line-of-sight velocity component of the wind as a function of range

风速大小不超过 100 m/s 时,径向风速误差小于 1.4 m/s.

## 4 结论

本文设计了基于双通道光纤 MZI 边缘检测技术的非相干测风激光雷达系统,重点对基于大气后向散射信号的光纤 MZI 鉴频系统进行了优化设计.应用 1976 年美国标准大气模型,对波长为 532 nm 的分子散射地基激光雷达系统的光学性能(信噪比、灵敏度和风速误差)进行了数值仿真.当垂直距离分辨率为 300 m,进行 1 000 次脉冲累计平均后,在 -100~100 m/s 的径向风速测量范围内,径向探测距离达到 20 km 时,得到径向风速误差小于 1.4 m/s.以上基于光纤 MZI 多普勒激光雷达系统的研究与性能仿真将为新型小型化、远距离大尺度大气风场探测激光雷达的开发和研制提供可行的技术和方法.

### 参考文献

- [1] GENTRY B M, CHEN H L. Tropospheric wind measurements obtained with the Goddard Lidar Observatory for Winds (GLOW): validation and performance[C]. SPIE, 2002, **4484**: 74-81.
- [2] YOE J G, RAMA VARMA RAJA M K, HARDESTY R M, et al. Groundwinds 2000 field campaign: demonstration of new Doppler lidar technology and wind lidar data intercomparison [C]. SPIE, 2003, **4893**: 327-336.
- [3] SUN Dong-song, ZHONG Zhi-qing, ZHOU Jun, et al. Accuracy analysis of the Fabry-Perot etalon based Doppler wind lidar[J]. *Optical Review*, 2005, **12**(5): 409-414.
- [4] LIU Zhi-shen, WU Dong, LIU Jin-tao, et al. Low-altitude atmospheric wind measurement from the combined Mie and Rayleigh backscattering by Doppler lidar with an iodine filter [J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(33): 7079-7086.
- [5] MCKAY J A. Modeling of direct detection Doppler wind lidar. I. The edge technique[J]. *Applied Optics*, 1998, **37**(27): 6480-6486.
- [6] MCKAY J A. Modeling of direct detection Doppler wind lidar. II. The fringe imaging technique[J]. *Applied Optics*, 1998, **37**(27): 6487-6493.

- [7] IRGANG T D, HAYS P B, SKINNER W R. Two-channel direct-detection Doppler lidar employing a charge-coupled device as a detector[J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(6): 1145-1155.
- [8] HAYS P B. Circle to line interferometer optical system[J]. *Applied Optics*, 1990, **29**(10): 1482-1489.
- [9] BRUNEAU D. Fringe-imaging Mach-Zehnder interferometer as a spectral analyzer for molecular Doppler wind lidar[J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(3): 503-510.
- [10] BRUNEAU D, GARNIER A, HERTZOG A, et al. Wind-velocity lidar measurements by use of a Mach-Zehnder interferometer, comparison with a Fabry-Perot interferometer [J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(1): 173-181.
- [11] TAN Lin-qiu, HUA Deng-xin, WANG Li, et al. Performance comparison of Fabry-Perot and Mach-Zehnder interferometers for molecular Doppler lidar based on fringe-imaging technique[J]. *Optik*, 2014, **125**(20): 6291-6295.
- [12] WANG Li, TAN Lin-qiu, XING Mei-li, et al. System research and simulation of new type dual-channel Mach-Zehnder frequency discriminator for Doppler lidar wind measurement [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(1): 0101002-1-0101002-5.  
汪丽, 谭林秋, 邢美丽, 等. 新型双通道 Mach-Zehnder 干涉仪多普勒测风激光雷达鉴频系统研究及仿真[J]. 光子学报, 2014, **43**(1): 0101002-1-0101002-5.
- [13] ZHANG Sen. Theoretic and applied analysis of optical fiber Mach-Zehnder interferometer system [J]. *Electro-optic Technology Application*, 2007, **22**(6): 15-19.  
张森. 光纤马赫曾德尔干涉仪系统的理论与应用分析[J]. 光电技术应用, 2007, **22**(6): 15-19.
- [14] LI Jie, TONG Zheng-rong, MENG Hong-yun, et al. Theoretical study on optical comb-filter of cascaded M-Z interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 41-44.  
李杰, 童峥嵘, 蒙红云, 等. 级联马赫曾德尔干涉仪光学梳状滤波的理论研究[J]. 光学学报, 2003, **23**(1): 41-44.
- [15] 胡先志. 光器件及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 344-350.
- [16] BRUNEAU D, PELON J. Simultaneous measurements of particle backscattering and extinction coefficients and wind velocity by lidar with a Mach-Zehnder interferometer: principle of operation and performance assessment [J]. *Applied Optics*, 2003, **42**(6): 1101-1114.
- [17] BRUNEAU D. Mach-Zehnder interferometer as a spectral analyzer for molecular Doppler wind lidar [J]. *Applied Optics*, 2001, **40**(3): 391-399.
- [18] KORB C L, GENTRY B M, WENG C Y. Edge technique: theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind[J]. *Applied Optics*, 1992, **31**(21): 4202-4213.
- [19] LI Shi-chun, HUA Deng-xin, SONG Yue-hui, et al. Research on micro-lens coupling system of all-fiber Raman lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0601001-1-0601001-6.  
李仕春, 华灯鑫, 宋跃辉, 等. 全光纤拉曼激光雷达的微透镜耦合系统研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(6): 0601001-1-0601001-6.
- [20] LI Shi-chun, HUA Deng-xin, SONG Yue-hui, et al. Fiber coupling system of space optical field based on aspheric lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(9): 1053-1058.  
李仕春, 华灯鑫, 宋跃辉, 等. 基于非球面透镜的空间光场光纤耦合系统研究[J]. 光子学报, 2012, **41**(9): 1053-1058.
- [21] LI Shi-chun, HUA Deng-xin, WANG Li, et al. Analysis of an efficient single-mode fiber coupler for all-fiber rotational Raman lidar[J]. *Optik*, 2013, **124**(13): 1450-1454.
- [22] U.S. Standard Atmosphere, Washington, D. C.: U. S. Government Printing Office, 1976.
- [23] MCGILL M J, SPINHIRNE J D. Comparison of two direct-detection Doppler lidar techniques[J]. *Optical Engineering*, 1998, **37**(10): 2675-2686.
- [24] 唐杰. 大气温湿度探测拉曼激光雷达的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2012.