

## 基于菲佐干涉仪的星载测风激光雷达仿真模拟

康佳慧<sup>1,2</sup>, 郗海阳<sup>1,2\*</sup>, 廖淑君<sup>3</sup>, 寇蕾蕾<sup>1,2</sup>, 丁丕满<sup>4</sup>, 王震<sup>1,2</sup>, 卜令兵<sup>1,2</sup><sup>1</sup>南京信息工程大学中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 江苏 南京 210044;<sup>2</sup>南京信息工程大学大气物理学院, 江苏 南京 210044;<sup>3</sup>青海省气象台, 青海 西宁 810012;<sup>4</sup>上海卫星工程研究所, 上海 200240

**摘要** 星载测风激光雷达具有高精度、高垂直分辨率、全球覆盖等特点,是获取全球风场的有效手段。聚焦于米散射通道测风模式,对冰云与气溶胶同时存在的较复杂场景实施星载激光雷达测风的仿真模拟。基于菲佐干涉仪的测风原理构建了一套包含6个子模块的正演模型,以大气激光多普勒雷达(ALADIN)仪器参数作为输入值,模拟了典型场景下的探测信号,并结合反演分析了测风精度水平。结果发现,云层和气溶胶的回波能够增强探测器获取信号的信噪比,从而提升反演精度,将风速误差控制在 $\pm 1.2$  m/s范围内;但当云层冰水含量较大时,由于衰减作用使得云层下方信噪比削弱,从而增大反演风速误差,部分区域甚至无法实施有效探测。另外,在采用重心法反演风速时,可通过增加累积电荷耦合器件(ACCD)探测器通道数来减小风速振荡误差。上述研究可为设计和改进星载测风技术提供参考。

**关键词** 遥感; 星载激光雷达; 主动遥感; 菲佐干涉仪; 仿真模拟; 非相干测风

**中图分类号** P412.27 **文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL221186

## 1 引言

风速是描述大气状态的基本参量之一,全球风场的探测是天气预报与气候研究的基础<sup>[1]</sup>。目前获取风场数据主要靠地基仪器和站点组网来实现,但受到人口分布和地理条件的制约,尤其对南半球、海洋以及赤道地区三维风场观测资料的缺乏,很大程度上阻碍了与动力过程相关的研究,同时也影响了天气预报水平的发展<sup>[2]</sup>。相比之下,星载测风激光雷达具有高精度、高垂直分辨率、全球覆盖等特点<sup>[3]</sup>,是获取全球风场的有效手段。近年来已有多个国家和地区投入到对星载测风激光雷达的研究中<sup>[4-6]</sup>。1998年欧洲航天局决定启动大气动力学任务(ADM)<sup>[7]</sup>,并于2018年成功发射了一颗名为“风神”(ADM-Aeolus)的测风卫星。风神卫星运行在高度320 km、倾角97°的太阳同步轨道上,其有效载荷大气激光多普勒雷达(ALADIN)工作在355 nm波段,采用瑞利散射和米散射双通道结合的直接探测模式<sup>[8]</sup>。风神卫星首次实现了使用卫星平台搭载主动遥感设备对全球大气风场进行三维观测<sup>[9]</sup>,具有里程碑式的意义。

目前,国内在激光测风技术领域的发展已有了多年积累<sup>[10-17]</sup>,但对星载测风激光雷达技术的研究仍处

于起步阶段,需要大量的理论和实验支持。在星载测风激光雷达的研制过程中,对于其性能的仿真模拟是十分必要的。张日伟等<sup>[18-19]</sup>基于菲佐干涉仪和连续双通道法布里-珀罗(F-P)标准具设计了测量整层大气风速廓线的星载激光多普勒测风雷达系统。Zhang等<sup>[20]</sup>构架了星载激光测风雷达正演模型,并利用该模型评估了太阳背景辐射对星载激光雷达测风精度的影响。刘延文等<sup>[21]</sup>通过仿真模拟验证了分子散射对星载多普勒测风激光雷达米散射通道风速反演的影响,并提出了一种减小分子散射干扰的方法。

已有的研究针对星载激光测风雷达不同探测模式实施了仿真模拟,并探讨了影响测风精度的多种因素,但多针对理想的标准场景,并未涉及对于复杂真实场景的分析。本文将聚焦米散射通道测风模式,基于菲佐干涉仪原理构建一套包含6个子模块的正演模型,对云与气溶胶同时存在的复杂场景进行仿真模拟,分析其探测能力,提升仿真结果的真实性与实用性,为设计和改进星载激光测风雷达技术提供参考。

## 2 正演模型

### 2.1 探测模式和正演模型构架

大气分子和气溶胶粒子会在风场的作用下产生运

收稿日期: 2022-08-29; 修回日期: 2022-10-19; 录用日期: 2022-11-14; 网络首发日期: 2022-11-30

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC2802502)、国家自然科学基金(41975027)

通信作者: \*gaohy@nuist.edu.cn

动。使用激光雷达探测时,回波信号会存在多普勒频移,使用恰当的方式对回波信号进行鉴频和反演,可以得到风速。以星载测风激光雷达 ALADIN 为例,一般采用瑞利散射和米散射双通道结合的探测模式,主要由激光器、光学接收、鉴频检测和探测器 4 个子系统组成。其中,激光器一般采用对小粒子和大气分子更加敏感的 355 nm 波长、50 Hz 左右脉冲频率的二极管泵浦 Nd:YAG 固态激光器。用于接收的光学系统一般采用直径为 1~2 m 的卡塞格林反射式望远镜。由于大气分子和气溶胶粒子运动速度、浓度分布不同,所产生的后向散射信号谱分布和强度差异较大,通常需采用不同的鉴频手段对两种回波信号进行处理。瑞利散射通道以大气分子为探测对象,基于双边缘技术,以连续双通道的 F-P 标准具<sup>[2-3]</sup>为鉴频器反演中高层大气风速,连续双通道 F-P 标准具的两个通道具有不同峰值的透过率,且不再将信号分离,较传统离散双通道 F-P 标准具效率更高。米散射通道以云和气溶胶粒子为探测对象,基于条纹技术以菲佐干涉仪为鉴频器反演低对流层大气风速。

探测器采用累积电荷耦合器件(ACCD)探测器,获取鉴频器出射的亮斑强度或条纹位置来反演风速。

本课题组在前期的研究中已经构建了一套用于探测云与气溶胶的激光雷达正演模型<sup>[22]</sup>,将测风及反演模块与其进行耦合,得到本文所使用的正演模型。本模型基于 Python 语言(3.8 版本),包含大气场景、大气辐射传输计算、卫星轨道平台参数、仪器参数、反演分析及对比验证、参数敏感性分析 6 个子模块,其逻辑结构如图 1 所示。从大气场景中获取风速、气溶胶质量密度、水凝物混合比、分子数密度等参数,通过大气辐射传输计算得到不同高度上的总体衰减后向散射系数,其中大气吸收来自用 LBLTRM 逐线积分模式构建的典型纬度数据库。代入卫星轨道平台和部分仪器参数,得到鉴频器前的接收光子信号。再将菲佐干涉仪、ACCD 探测器等模型耦合后,得到探测器上的输出信号。从探测信号反演风速,将结果与大气场景中的径向风速进行对比分析。也可针对某些参数进行敏感性分析,研究其对模拟结果的影响。

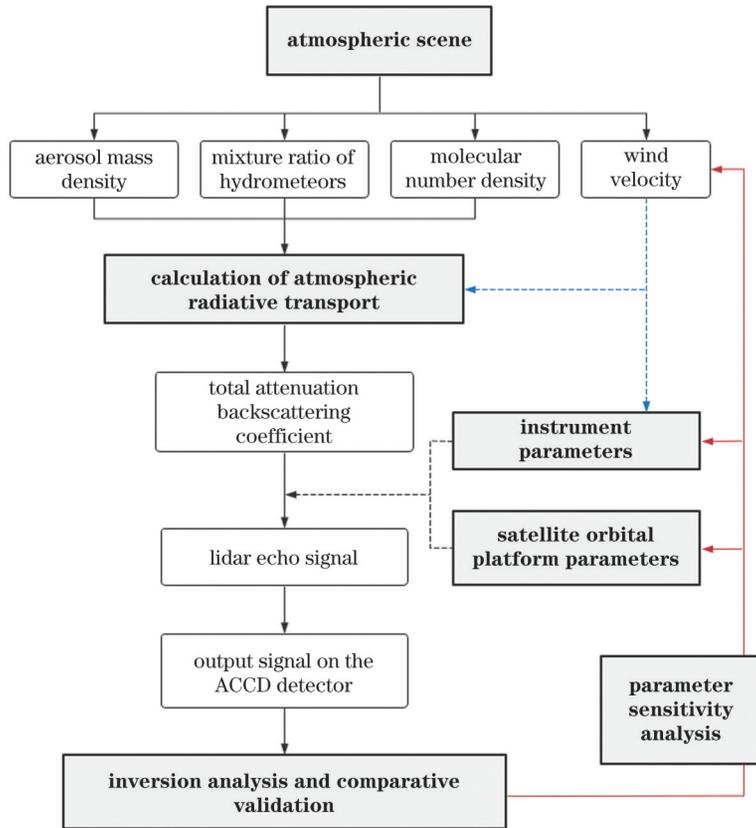


图 1 本文正演模型的子模块及逻辑结构

Fig. 1 Sub-module structure and logic framework of forward model

## 2.2 回波信号强度

经过大气散射和吸收的消光作用后,激光雷达所接收到的回波信号中不仅包括米散射和瑞利散射回波信号,还包括大气背景辐射信号。在不同探测高度  $z$  上,经过激光雷达望远镜接收后,在到达鉴频器之前,这三类回波信号强度以光子数形式分别表示为<sup>[23]</sup>

$$\begin{cases} S_{\text{Mie}} = \frac{E\lambda}{hc} \frac{\pi D^2}{4} \beta'_a(\lambda, z) \frac{1}{R^2(z)} \frac{\Delta z}{\cos \phi} T_{\text{rec}} T_{\text{tra}} \\ S_{\text{Ray}} = \frac{E\lambda}{hc} \frac{\pi D^2}{4} \beta'_m(\lambda, z) \frac{1}{R^2(z)} \frac{\Delta z}{\cos \phi} T_{\text{rec}} T_{\text{tra}}, \quad (1) \\ S_{\text{BKG}} = \frac{2\lambda}{hc^2} \left( \frac{\pi \Delta \theta D}{100} \right)^2 L_{\text{BKG}}(\lambda) \frac{\Delta z}{\cos \phi} T_{\text{rec}} \end{cases}$$

式中:  $S_{\text{Mie}}$ 、 $S_{\text{Ray}}$ 、 $S_{\text{BKG}}$  分别为米散射、瑞利散射、大气背景辐射回波信号强度, 三者的单位均为光子数;  $E$  为发射激光的单脉冲能量;  $h$  为普朗克常量;  $D$  为望远镜直径;  $R(z)$  为卫星到探测大气之间的距离;  $\lambda$  为激光波长;  $\Delta z$  为垂直大气距离分辨率;  $\phi$  为激光侧摆角度;  $T_{\text{tra}}$  为发射系统效率;  $T_{\text{rec}}$  为接收系统效率;  $\Delta\theta$  为接收视场角;  $L_{\text{BKG}}(\lambda)$  为白天地球辐射率, 激光波长为 355 nm 时, 辐射率取  $260 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ ;  $\beta'_a$  和  $\beta'_m$  分别为气溶胶和大气分子的衰减后向散射系数,

$$\begin{cases} \beta'_a(\lambda, z) = T^2(\lambda, z)\beta_a(\lambda, z) \\ \beta'_m(\lambda, z) = T^2(\lambda, z)\beta_m(\lambda, z) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\beta_a$  和  $\beta_m$  分别为气溶胶和大气分子的后向散射系数;  $T(\lambda, z)$  为卫星到探测大气之间的单层大气透过率。

值得一提的是, 355 nm 处于紫外波段,  $\text{O}_3$  对其吸收较强, 在辐射传输计算中需要着重考虑。

### 2.3 菲佐干涉仪的鉴频原理

米散射通道采用菲佐干涉仪<sup>[24-26]</sup>作为鉴频系统, 其透过率  $T(\lambda)$  为米散射回波光谱和菲佐干涉仪透过率的卷积:

$$\begin{cases} f(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{2\sigma^2}\right] \\ h(\lambda) = T_p / \left[1 + \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{1/2 \lambda_{\text{FWHM}}^{\text{Fiz}}}\right)^2\right] \\ T(\lambda) = f(\lambda) \otimes h(\lambda) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $f(\lambda)$  为不考虑气溶胶粒子多普勒展宽情况下的米散射回波光谱, 其中  $\lambda$  为波长;  $\lambda_0$  为散射回波光谱的中心波长;  $\sigma = \lambda_{\text{FWHM}} / \sqrt{8\ln 2}$  为散射回波光谱的等效谱宽,  $\lambda_{\text{FWHM}}$  为出射激光的谱线半高全宽 (FWHM);  $h(\lambda)$  为菲佐干涉仪透过率;  $T_p$  为菲佐干涉仪峰值透过率;  $\lambda_{\text{FWHM}}^{\text{Fiz}}$  为干涉仪的半高全宽;  $\otimes$  为卷积符号。

米散射回波光谱和菲佐干涉仪透过率曲线如图 2(a) 和图 2(b) 所示。当存在径向风速时, 由于多普勒效应, 米散射回波信号的中心波长相较于发射激光的中心波长会发生改变。菲佐干涉仪由两块光学平板组成, 两块平板之间以一定的微小楔角分开, 形成一个楔形空间, 回波信号在经过平板间的楔形空间后会沿

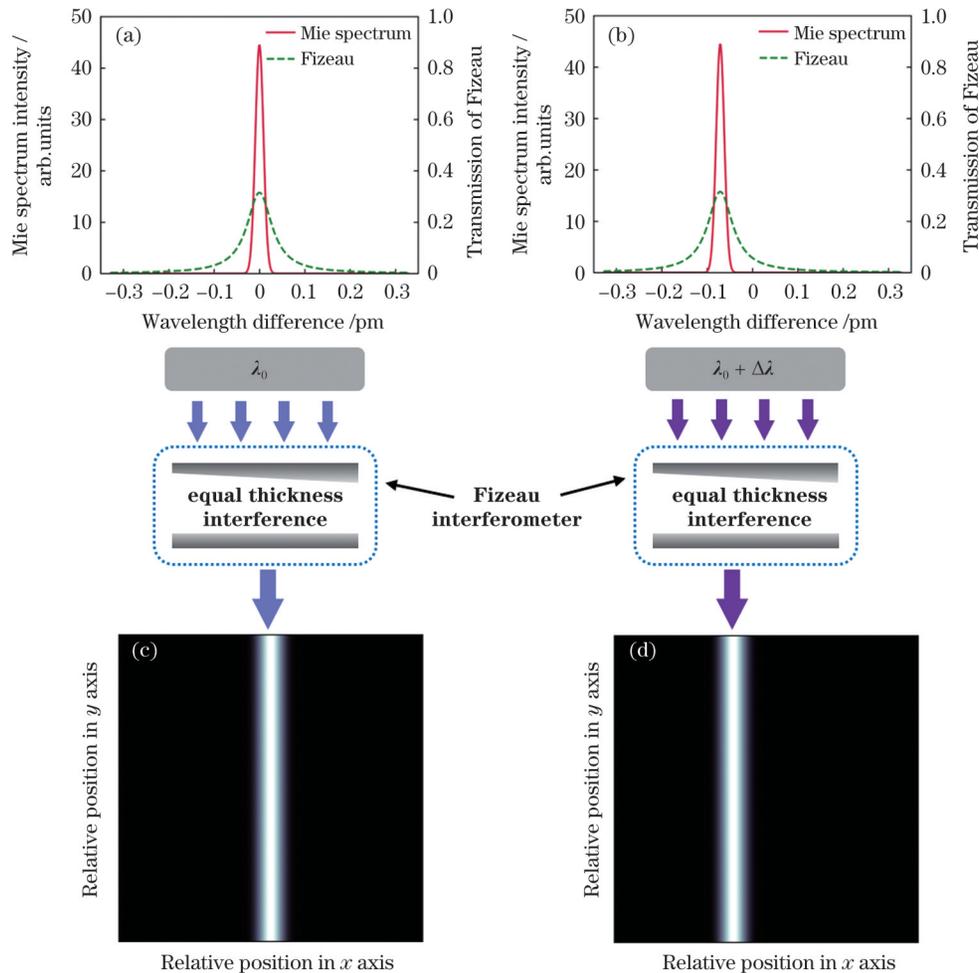


图 2 米散射通道菲佐干涉仪探测风速原理示意图。(a), (b) 不同中心波长时的米散射回波光谱和菲佐干涉仪透过率曲线;

(c), (d) 探测器上对应的输出图像

Fig. 2 Schematic diagram of wind speed detection by Fizeau interferometer of Mie channel. (a), (b) Mie scattering echo spectra and transmission curves of Fizeau interferometer for different central wavelengths; (c), (d) corresponding output images from detector

楔角方向形成干涉条纹,不同波长的信号通过菲佐干涉仪后会在不同位置产生干涉条纹,因此风速变化导致的回波信号中心波长的改变同时会使得干涉条纹的位置发生移动。通过菲佐干涉仪的回波信号被 ACCD

探测器接收,转化为探测器不同像素上的电子信号,在面阵图像中形成亮条纹,如图 2(c)和图 2(d)所示,从而利用其位置的变化来反演计算风速。表 1 所示为星载测风激光雷达仿真参数设置。

表 1 星载测风激光雷达仿真参数设置  
Table 1 Input parameters for forward model of spaceborne wind lidar

Unit	Parameter	Reference value
Satellite	Mean altitude $H$ / km	320
	Mean orbital speed $V$ / (km·s <sup>-1</sup> )	7.7
	Slant angle $\phi$ / (°)	35
Laser transmitter	Wavelength $\lambda$ / nm	355
	Energy per pulse $E$ / mJ	80
	Linewidth $\lambda_{\text{FWHM}}$ / pm	0.021
	Repetition rate $\lambda_{\text{PRF}}$ / Hz	50.5
Telescope	Primary mirror diameter $D$ / m	1.5
	Transmitting system efficiency $T_{\text{tra}}$	0.42
	Receiving system efficiency $T_{\text{rec}}$	0.66
	Receiving field of view (FOV) $\Delta\theta$ / $\mu\text{rad}$	18.1
Mie spectrometer	Fizeau peak transmission $T_{\text{p}}$	0.315
	Fizeau FWHM $\lambda_{\text{FWHM}}^{\text{Fiz}}$ / pm	0.067
	Rayleigh equivalent bandwidth $\Delta\lambda_{\text{Ray}}$ / pm	0.15
	Background equivalent bandwidth $\Delta\lambda_{\text{BKG}}$ / pm	83.75
ACCD detection unit	Equivalent bandwidth $\Delta\lambda_{\text{ACCD}}$ / pm	0.041
	Quantum efficiency $\eta$	0.85
	Pupil truncation $\xi$	$2/\pi$
Physical constant	Number of pixel column $N$	16
	Speed of light $c$ / (m·s <sup>-1</sup> )	$2.9979 \times 10^8$
	Boltzmann constant $K_{\text{B}}$ / (J·K <sup>-1</sup> )	$1.38 \times 10^{-23}$
	Atmospheric molecular mass $M_{\text{air}}$ / (kg·mol <sup>-1</sup> )	$2.9 \times 10^{-2}$
	Planck constant $h$ / (J·s)	$6.62 \times 10^{-34}$
	Avogadro constant $N_{\text{Ave}}$ / mol <sup>-1</sup>	$6.022 \times 10^{23}$

#### 2.4 ACCD 探测模式

ACCD 探测器<sup>[27]</sup>包括图像区、传输行、内存区、读出记录器和输出放大器。图像区由 16×16 个像素组成;内存区由 25 行 32 列组成,其中两列并为一组,包括一列存储列和一列传输列,共 16 组,对应图像区横向的 16 个像素。图像区和内存区如图 3(a)所示。激光雷达向大气发射一个脉冲,接收望远镜接收到来自某一探测高度的回波信号,信号通过菲佐干涉仪鉴频后到达 ACCD 探测器的图像区,紧接着图像区的信号内容汇总入传输行,在下一探测高度的回波信号被接收望远镜接收之前,传输行的内容向下推移一行进入内存区的传输列,并清除传输行。当下一个探测高度的信号到达探测器后,之前高度的信号数据被一一存储在内存区的传输列中。当一个激光脉冲探测到的所有高度的信号都被内存区的传输列接收后,传输列中的信号内容转移一列进入存储列,同时传输列被清空,为

下一次激光脉冲的采集做准备。经过一段的累积周期,存储列中的内容被传输至读出寄存器中,再转移至输出放大器以生成信号。读出所有行后,清除存储列以准备下一个累积周期。

由于检测系统 ACCD 探测器输出的是离散信号,而通过菲佐干涉仪的散射回波信号为连续信号,因此需要先对连续信号进行离散处理,才能通过计算离散信号的重心位置求解风速<sup>[18]</sup>。为方便描述,本文将 ACCD 探测器图像区纵向一列 16 个像素称为通道,则 ACCD 探测器某一通道  $i$  上的响应函数定义为

$$T_{\text{ACCD}}(i) = \int_{\lambda_i}^{\lambda_i + \Delta\lambda_{\text{ACCD}}} T(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

式中: $\lambda_i$  为 ACCD 探测器通道  $i$  对应的起始波长; $\Delta\lambda_{\text{ACCD}}$  为 ACCD 探测器的等效带宽; $T(\lambda)$  为式(3)中鉴频系统的透过率。

结合式(3)和式(4)并进行离散后,可得

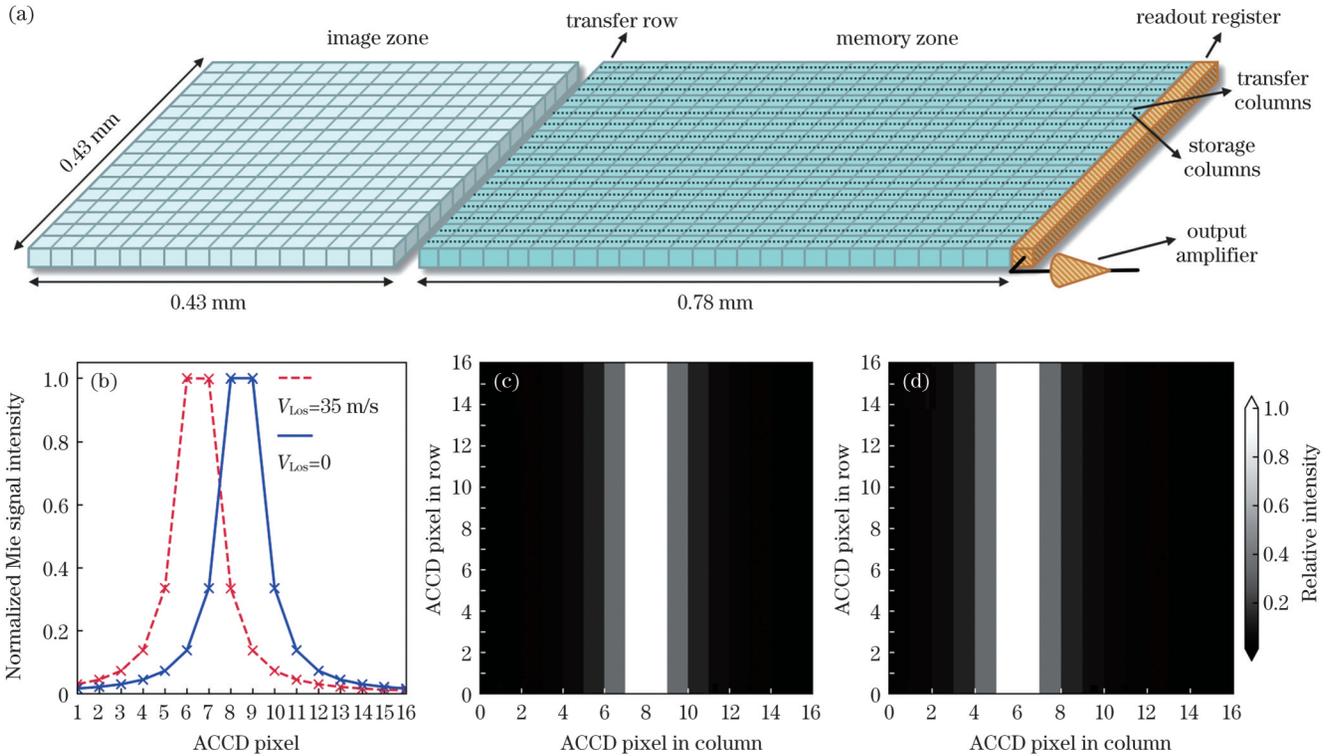


图 3 ACCD 探测器工作原理及接收信号示意图。(a)ACCD 探测器工作原理示意图;(b)ACCD 探测器上归一化之后的透过率曲线;(c),(d)无径向风速和径向风速为 35 m/s 时 ACCD 探测器上接收到的信号相对强度

Fig. 3 Schematic diagram of ACCD detection principle and signal on ACCD. (a) Schematic diagram of ACCD detection principle; (b) normalized transmissivity curve on ACCD; (c), (d) relative strength of signal received on ACCD at radial wind speed of 0 (c) and 35 m/s (d)

$$\begin{cases} T_{\text{ACCD}}(i) = \Delta\lambda\Delta x \sum_{k=1}^{N_k} f(x_k) \sum_{j=1}^{N_j} h(x_k, \lambda_j) \\ x_k = -\frac{1}{2}\lambda_{\text{USR}} + (k-1)\frac{\lambda_{\text{USR}}}{N_k} \\ \lambda_j = \lambda_i + (j-1)\frac{\Delta\lambda_{\text{ACCD}}}{N_j} \end{cases}, \quad (5)$$

式中:  $N_k$  为在非佐干涉仪有效光谱范围内将回波信号光谱离散的份数, 取  $N_k=1000$ ;  $\lambda_{\text{USR}}$  为非佐干涉仪有效光谱范围对应波长;  $N_j$  为将 ACCD 探测器每一通道的响应带宽划分的区间数, 取  $N_j=10$ 。

图 3(b) 中实线和虚线分别为风速为 0 和 35 m/s 时, 离散后的 ACCD 探测器各通道上的回波信号归一化透过率曲线, 图中横坐标代表 ACCD 探测器上的通道。图 3(c) 和图 3(d) 为 ACCD 探测器上接收到的电子数相对强度分布, 横坐标相邻两个刻度之间的一格代表 ACCD 探测器上的一个通道。由图 3(b)~图 3(d) 可见, 当径向风速发生改变时, ACCD 探测器通道上的透过率也会发生相应变化, 使得各通道上接收到的电子数发生改变, 可以通过计算各通道所接收到的电子数来拟合条纹重心的位置, 从而获得径向风速。散射回波信号由接收望远镜接收后, 经干涉滤光片部分信号进入米散射通道鉴频系统, 通过菲佐干涉仪后被 ACCD 探测器接收并转化为电子。ACCD 探测器通

道  $i$  上光电转换后得到的总电子数为

$$N(i) = N_{\text{Mie}}(i) + N_{\text{Ray}} + N_{\text{BKG}} + N_{\text{noise}}(i), \quad (6)$$

式中:  $N_{\text{Mie}}$ 、 $N_{\text{Ray}}$ 、 $N_{\text{BKG}}$  分别为 ACCD 探测器通道  $i$  上光电转换后得到的米散射、瑞利散射和大气背景辐射的电子数;  $N_{\text{noise}}(i)$  为 ACCD 探测器通道  $i$  上接收到各类噪声转化的电子数。

在模拟时, 假设大气背景辐射在 ACCD 探测器各通道上均匀分布, 则有

$$\begin{cases} N_{\text{Mie}}(i) = S_{\text{Mie}} \cdot \eta N_s \xi \frac{1}{N} \frac{1}{\Delta\lambda_{\text{ACCD}}} T_{\text{ACCD}}(i) \\ N_{\text{Ray}} = S_{\text{Ray}} \cdot 2 \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \eta N_s \xi \frac{1}{N} \cdot \frac{\Delta\lambda_{\text{Ray}} + \Delta\lambda_{\text{ACCD}}}{\lambda_{\text{FWHM}}^{\text{Ray}}}, \quad (7) \\ N_{\text{BKG}} = S_{\text{BKG}} \cdot \eta N_s \xi \frac{1}{N} \Delta\lambda_{\text{BKG}} \end{cases}$$

式中:  $\eta$  为 ACCD 探测器量子效率;  $N_s$  为累积激光脉冲数;  $\xi$  为小孔截断比;  $N$  为 ACCD 探测器通道数;  $\Delta\lambda_{\text{Ray}}$  为非佐干涉仪响应瑞利散射的等效带宽;  $\Delta\lambda_{\text{BKG}}$  为非佐干涉仪响应大气背景辐射的等效带宽;  $\lambda_{\text{FWHM}}^{\text{Ray}}$  为瑞利散射回波信号光谱的半高全宽,

$$\lambda_{\text{FWHM}}^{\text{Ray}} = \frac{2\lambda}{c} \sqrt{\frac{(8\ln 2) K_B T}{M_{\text{air}}/N_{\text{Avo}}}}, \quad (8)$$

式中:  $c$  为光速;  $K_B$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为大气温度;  $M_{\text{air}}$  为大气分子质量;  $N_{\text{Avo}}$  为阿伏伽德罗常数。各常量的

具体参数值见表 1。

另外,式(6)中  $N_{\text{noise}}(i)$  的来源即探测器噪声一般包括光子散粒噪声  $\sigma_s$ 、暗噪声  $\sigma_D$  以及随机噪声  $\sigma_R$ 。光子散粒噪声与到达探测器像素上的光子数有关,探测器通道  $i$  上的光子散粒噪声为  $\sigma_s(i)$ ;暗噪声与信号电平无关,与探测器本身的性能有关,取  $1.9(\text{s}\cdot\text{pixel})^{-1}$ ;随机噪声是指在 ACCD 探测器工作时来自外界的各种噪声干扰,米散射通道总随机噪声取  $3.9(\text{s}\cdot\text{pixel})^{-1}$ 。 $N_{\text{noise}}(i)$  和  $\sigma_s(i)$  分别表示为

$$\begin{cases} N_{\text{noise}}(i) = \sqrt{\sigma_s(i)^2 + \sigma_D^2 + \sigma_R^2} \\ \sigma_s(i) = \sqrt{N_{\text{Mic}}(i) + N_{\text{Ray}} + N_{\text{BKG}}} \end{cases} \quad (9)$$

探测器接收到的噪声具有随机性。为了在正演模型中体现出噪声随机性对结果的影响,在模拟时将每个通道上每次接收到的散粒噪声、暗噪声以及随机噪声分别乘以一个呈正态分布的随机数后,再耦合入正演模型中。

### 3 反演算法

目前条纹技术风速反演算法主要有重心法<sup>[28]</sup>、高斯法<sup>[29]</sup>和最大似然函数法<sup>[30-31]</sup>。本节将对这三种方法进行简要介绍,并对比分析各种方法存在的系统误差,选取最优方法进行风速反演计算。

#### 3.1 风速反演算法

##### 3.1.1 重心法

利用重心法计算条纹重心的位置并反演径向风速:

$$\begin{cases} L_c = \frac{\sum_{i=i_{\max}-m}^{i_{\max}+m} i \cdot N(i)}{\sum_{i=i_{\max}-m}^{i_{\max}+m} N(i)} \\ V_{\text{Los}} = (L_c - 8.5) \cdot V_{\text{USR}} / 16 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $L_c$ 为条纹重心的位置; $i_{\max}$ 为 ACCD 探测器上接收到最多电子数的通道序号;计算时所覆盖的通道数为  $2m+1$  ( $m$ 一般取值 2 或 3); $N(i)$ 为 ACCD 探测器通道  $i$  上接收的电子数; $V_{\text{Los}}$ 为径向风速; $V_{\text{USR}}$ 为菲佐干涉仪有效光谱对应的风速。

##### 3.1.2 高斯法

高斯法假设 ACCD 探测器上的回波信号符合高斯函数:

$$G(\lambda) = \frac{\sqrt{8\ln 2}}{\sqrt{2\pi} \lambda_{\text{FWHM}}^{\text{Gauss}}} \exp\left[-\frac{4\ln 2 \cdot \lambda^2}{(\lambda_{\text{FWHM}}^{\text{Gauss}})^2}\right], \quad (11)$$

式中: $\lambda_{\text{FWHM}}^{\text{Gauss}}$ 为高斯函数的半高全宽。

定义相关性函数:

$$C(\lambda_n) = \sum_{i=k-m}^{k+m} N(i)G(\lambda_n), \quad (12)$$

式中:计算时所覆盖的通道数为  $2m+1$ ;  $N(i)$ 为 ACCD 探测器通道  $i$  上接收的电子数。

采用迭代法计算相关性函数的最大值,其最大值

对应的波长  $\lambda_n$ 即为径向风速多普勒效应引起的波长偏移,进而通过多普勒频移公式  $V_{\text{Los}} = -2\lambda_n \cdot c/\lambda$  计算风速值。

##### 3.1.3 最大似然函数法

最大似然函数法假设 ACCD 探测器上的回波信号符合洛伦兹函数:

$$L(\lambda) = \frac{1}{\pi} \frac{2}{\lambda_{\text{FWHM}}^{\text{Loren}}} \left[ 4 \frac{\lambda^2}{(\lambda_{\text{FWHM}}^{\text{Loren}})^2} + 1 \right]^{-1}, \quad (13)$$

式中: $\lambda_{\text{FWHM}}^{\text{Loren}}$ 为洛伦兹函数的半高全宽。

第  $i$  个通道接收到的电子数  $N_i$  为

$$N_i = \int_a^b N_{\text{tot}} L(\lambda) d\lambda, \quad (14)$$

式中: $N_{\text{tot}}$ 为 ACCD 探测器接收到的总光子数; $a$ 、 $b$ 分别为通道  $i$  对应波长范围的上边界和下边界。

假设通道  $i$  接收的光子数服从泊松分布,其均值为实际探测到的电子数  $N_{\text{Fiz}}$ ,则电子数为理论计算值  $N_i$  的概率为

$$P(N_i) = \frac{N_i^{N_{\text{Fiz}}}}{N_{\text{Fiz}}!} e^{-N_i}. \quad (15)$$

利用最大似然函数  $\Lambda$  来描述光强分布服从  $L(\lambda)$  的概率,并转化为对数形式  $\Lambda_{\text{ln}}(\lambda)$ :

$$\Lambda_{\text{ln}}(\lambda) = \ln \left[ \prod_i P(N_i) \right] = \sum_{i=1}^{16} (N_{\text{Fiz}} \ln N_i - \ln N_{\text{Fiz}}! - N_i). \quad (16)$$

式(16)无法直接求解,需要采用与高斯法相同的迭代方式求得近似解。 $\Lambda_{\text{ln}}(\lambda)$ 取最大值时的多普勒频移即为相应风速对应的多普勒频移。

#### 3.2 反演算法误差

图 4 给出了三种风速反演算法的系统误差。采用重心法和高斯法反演风速时,由于 ACCD 探测器会对信号进行离散,当探测器上的电子数呈不对称分布时,计算出的条纹重心位置与实际条纹中心位置会存在偏差,从而导致风速计算误差,且随着风速的变化,误差表现为增大减小的振荡式变化。高斯法虽然对重心法进行了改进,误差有所减小,但振荡式的误差变化依然存在。反演风速时所覆盖的探测器的通道数也会对误差造成影响, $m=3$  时的振荡误差小于  $m=2$  时的情况,如图 4(a)和图 4(c)所示。对于高斯法,高斯函数的半高全宽  $\lambda_{\text{FWHM}}^{\text{Gauss}}$  的取值同样会影响风速计算误差。图 4(d)为当  $m=3$  时,  $\lambda_{\text{FWHM}}^{\text{Gauss}}$  分别取 0.10、0.15、0.20、0.30 pm 时的系统误差情况,可以看出当  $\lambda_{\text{FWHM}}^{\text{Gauss}} = 0.15$  pm 时,所构造的高斯函数最接近真实的 ACCD 探测器上接收到的回波光谱,计算误差最小。图 4(b)为  $\lambda_{\text{FWHM}}^{\text{Loren}}$  分别取 0.08、0.10、0.15、0.20 pm 时最大似然函数法的系统误差情况,可见随着风速的变化,误差呈现先减小后增大的趋势,当  $\lambda_{\text{FWHM}}^{\text{Loren}} = 0.08$  pm 时,整体风速误差最小。

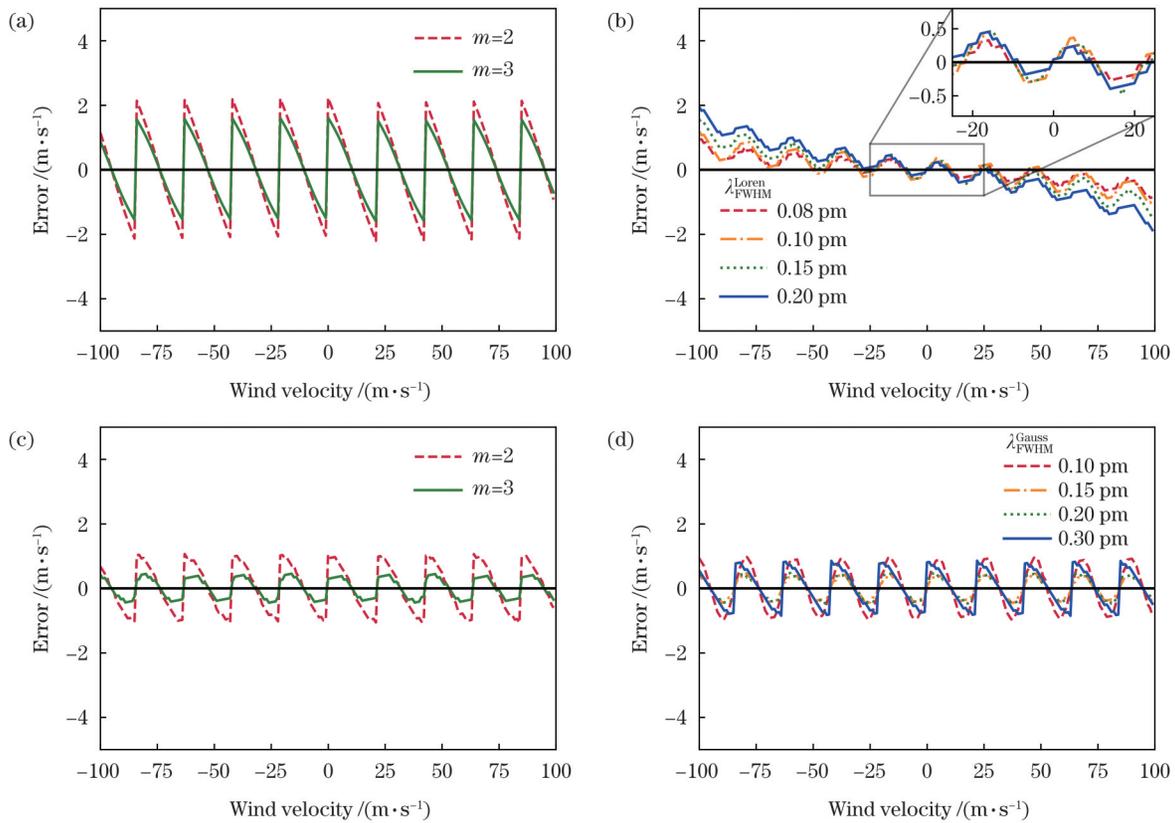


图 4 三种反演径向风速方法的系统误差。(a)重心法;(b)最大似然函数法;(c),(d)高斯法

Fig. 4 Systematic errors of three methods for retrieving radial wind speed. (a) Centroid method; (b) maximum likelihood function; (c), (d) Gaussian correlation algorithm

通过对比以上三种反演方法可知:重心法最为简单直观,但振荡误差明显,计算风速与实际风速相差较大;高斯法同样存在由于信号离散造成的振荡误差,同时还有引入方法本身带来的算法误差;在 $-25\sim 25$  m/s 的风速范围内,最大似然函数法的计算精度高于前两种,且计算风速几乎没有振荡误差。因此在后续研究中,为了尽量减小所选择的反演方法带来的系统误差,选择最大似然函数法( $\lambda_{FWHM}^{Loren}=0.08$  pm)进行风速反演和计算。

## 4 典型场景的仿真模拟分析

### 4.1 典型场景选取与模拟

在我们的正演模型中设置了 15 个典型场景,包括陆地和海洋的晴空、积云、深对流云、卷云、层状云、气溶胶、气溶胶与卷云,以及台风场景。每个场景均采用美国国家环境预报中心(NCEP)数据作为输入场,使用 4.1.2 版本的 WRF 和 WRF-Chem 来模拟指定区域的各项参数。对于星载激光雷达而言,光学厚度超过 7 一般就很难穿透,因此,较薄的冰云和气溶胶层是激光雷达最擅长探测的场景。本文选取 2018 年 11 月 12 日 18:00 的 d03 数据,如图 5(a) 所示,模拟区域覆盖了  $108.5^{\circ}\text{E}\sim 111^{\circ}\text{E}$  和  $34.75^{\circ}\text{N}\sim 36.75^{\circ}\text{N}$ ,为我国陕西省所处区域,南部为秦岭,北部为内蒙古高原地区,采用三重嵌套,分辨率分别为 27、9、1 km,垂直分为 36 层,顶

层取为 50 hPa,微物理过程为 Morrison 方案,积分步长为 60 s, WRF-Chem 使用的排放源为 ANTHRO。

在图 5(a) 场景中展示了气溶胶质量浓度(包括  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$ )及云冰混合比的空间分布情况。在经度  $110.62^{\circ}\text{E}$  处倾斜  $35^{\circ}$  选取截面,图 5(b) 和图 5(c) 分别为在该截面上的气溶胶质量浓度和云冰混合比。将其与温度、湿度、大气压场一并输入至正演模型中,可根据探测参数自动插值加密背景场,并计算出总体的衰减后向散射系数,如图 5(d) 所示。另外一个重要的输入量为径向风速,如图 5(e) 所示。可以看出,气溶胶粒子主要分布在近地层  $0\sim 2.5$  km 处,在海拔  $5\sim 12$  km 处有冰云分布;在  $34.72^{\circ}\text{N}\sim 35.08^{\circ}\text{N}$  之间云层非常稀薄,但其下方气溶胶层向上延伸较高;  $35.08^{\circ}\text{N}\sim 35.88^{\circ}\text{N}$  处有较薄的云层,同时气溶胶层浓度也较高;而在  $36.02^{\circ}\text{N}\sim 36.69^{\circ}\text{N}$  之间云层较厚,冰混合比最大值可达到  $6.75\times 10^{-5}$  kg/kg,其下方的气溶胶层浓度较小。相应地,当云层出现时,气溶胶的衰减后向散射系数随之增大,且云层越厚衰减后向散射系数越大,在  $8\sim 12$  km,  $36.05^{\circ}\text{N}\sim 36.69^{\circ}\text{N}$  处出现强反射区,衰减后向散射系数最大值约为  $0.19\text{ km}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$ 。探测全球风场的极轨卫星的  $\beta'$  侧摆方式一般只用于探测纬向风。由图 5(e) 可见风速先随高度增高而变大,在海拔高度 11 km 处出现最大风速后,又随高度增高而减小,且在近地面处风速呈现负值,即从近地到高空风向发生

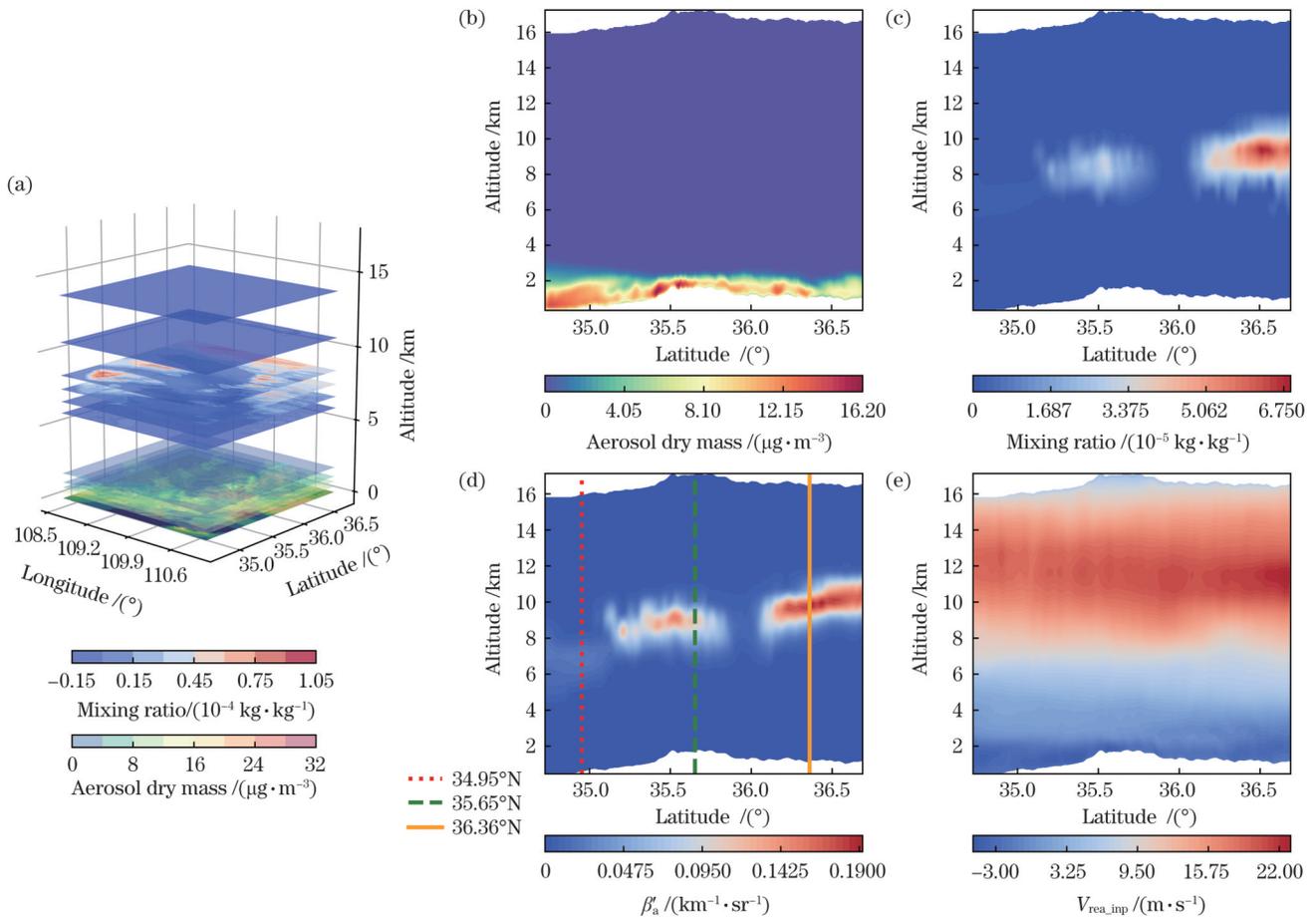


图 5 典型场景。(a)气溶胶总质量浓度及云冰混合比空间分布;(b)气溶胶总质量浓度;(c)云冰混合比;(d)衰减后向散射系数;(e)径向风速

Fig. 5 Typical scene. (a) Spatial distribution of total aerosol mass concentration and cloud ice mixing ratio; (b) total mass concentration of aerosol; (c) cloud ice mixing ratio; (d) attenuation backscattering coefficient; (e) radial wind speed

了转变。

#### 4.2 仿真模拟结果分析

将 4.1 节中的典型云与气溶胶同时出现的场景输入至正演模型,同时输入仪器、卫星平台等参数(部分值列于表 1),即可模拟仿真得到最终探测风场量以及一些过程量。本文首先分析不同位置处典型廓线的模拟结果。如图 5(d)所示三条标记线所示,选择分别位于 34.95 $^{\circ}$ N、35.65 $^{\circ}$ N、36.36 $^{\circ}$ N 纬度处的典型廓线,这三条廓线分别通过了非常稀薄的云层、较薄的云层和较厚的云层,具有代表性。另外,水平空间分辨率为 1 km,垂直空间分辨率为 250 m。

图 6(a1)、图 6(b1)、图 6(c1)为进行了多组信号累积但未转移到传输区的 ACCD 探测器内存区信号值,横坐标为 16 个通道,纵坐标为探测层数,可以看出中部区域较亮,这与三条廓线在中部区域存在云层回波信息有关。为了更直观地考察信噪比(SNR),我们将每一个高度上的信号进行归一化处理,得到图 6(a2)、图 6(b2)、图 6(c2)。可以看出,探测器通道上接收的信号强度不是平均分布的,而是在居中位置形成了一条亮带,并且在不同高度上这条亮带会随着风速的变

化发生位置偏移。除中部以外的区域,即信号相对较小的区域,探测器通道上出现了不规则的信号强度变化,这是由于噪声导致的,整体信号强度减弱的同时信噪比明显降低,会影响风速反演精度。

在 34.95 $^{\circ}$ N 处的第一条廓线图 6(a)穿过了较薄云层,信噪比峰值达到了 15.3,如图 6(a4)和图 6(a5)所示,仿真模拟得到的风速廓线与输入值基本一致,2~12 km 的风速误差最大为  $\pm 1.78\text{ m/s}$ ,2 km 以下的区域内由于信噪比下降,误差极值超过 10 m/s。35.65 $^{\circ}$ N 处第二条廓线图 6(b)穿过了中等厚度冰云,图 6(b1)中 ACCD 探测器信号值在 7~11 km 处较亮,在图 6(b2)中这部分的亮度分布结构也最为清晰,图 6(b3)中的衰减后向散射系数增大,同时也导致了回波信号信噪比的峰值处达到了 37.2。但也可以发现,在云层之下也即 7 km 以下的区域,由于激光经过云层后的衰减,加之气溶胶回波信号也较弱,导致信噪比很低,再结合图 6(b4)和图 6(b5),7~11 km 处的误差均小于  $\pm 0.73\text{ m/s}$ ,但云下的区域反演出的风速误差随高度下降而增大,5 km 高度处的误差最大值已超过  $\pm 4.5\text{ m/s}$ ,而接近地面处已超过

±10 m/s。相比之下,36.36°N 处第三条廓线图 6(c) 穿过的是冰云中冰水含量最大的区域,较亮区域出现在 8~12 km 区域,信噪比峰值也达到了 39.6,与图 6(b)相似,由于云层对激光的衰减很强,导致云层下方的气溶胶回波信号几乎无法探测到,如图 6(c4)

和图 6(c5)所示,虽然 8~12 km 区域处的最大误差在 ±0.55 m/s 范围内,但从 8 km 以下的区域开始,风速误差随高度下降而迅速增大,甚至在 5 km 处的误差极值就已达到了 ±10 m/s,而近地面的气溶胶层则无法实施有效探测。

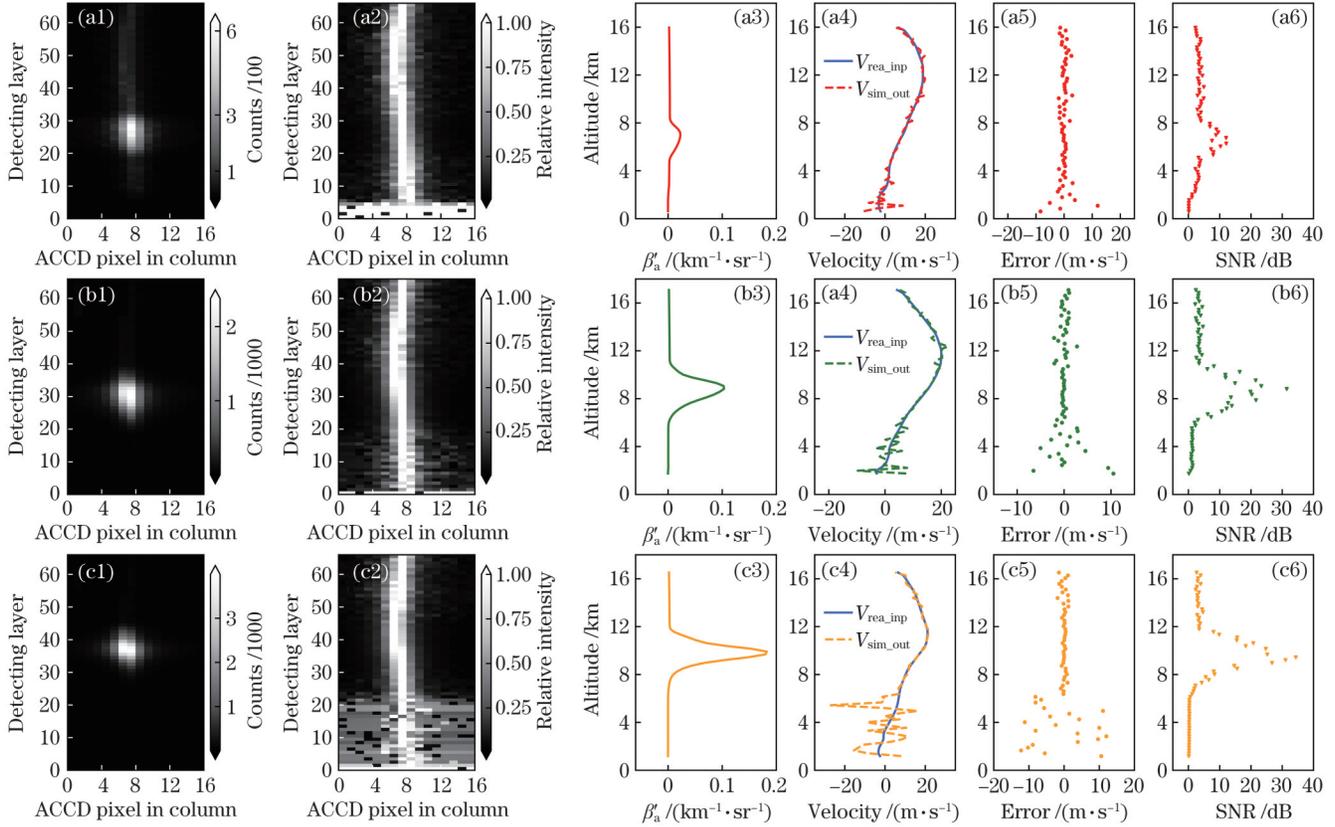


图 6 图 5(d)中标记的三条典型廓线的模拟结果。(a) 34.95°N; (b) 35.65°N; (c) 36.36°N。(a1), (b1), (c1) ACCD 探测器信号值的模拟结果; (a2), (b2), (c2) ACCD 探测器信号值归一化后的结果; (a3), (b3), (c3) 衰减后向散射系数; (a4), (b4), (c4) 输入场景风速与输出模拟风速; (a5), (b5), (c5) 风速误差; (a6), (b6), (c6) 信噪比

Fig. 6 Simulation results of three typical profiles marked in Fig. 5(d). (a) 34.95°N; (b) 35.65°N; (c) 36.36°N. (a1), (b1), (c1) Simulation results of ACCD detector signal; (a2), (b2), (c2) normalized results of ACCD detector signal; (a3), (b3), (c3) attenuation backscattering coefficients; (a4), (b4), (c4) input scene wind speed and output simulated wind speed; (a5), (b5), (c5) wind speed error; (a6), (b6), (c6) signal-to-noise ratio

在分析完典型廓线后,我们对二维剖面上的所有廓线进行了仿真模拟,结果如图 7 所示。图 7(a)~图 7(c) 水平分辨率为 1 km,图 7(d)~图 7(f)的水平分辨率为 5 km,两组图的垂直分辨率均为 250 m,其差异在于采用了不同数量的积累脉冲叠加。图 7(b)为二维截面上的信噪比随海拔高度变化的情况,结合图 5 中的典型场景,当有云层出现时信噪比增加;同时在较厚的云层下方,由于信号无法穿透云层使得云层下方信噪比几乎为 0,结合图 7(a)和图 7(c),风速误差集中出现在海拔 7.5 km 以下,36.15°N~36.69°N 区域之间以及 35.5°N 区域周围,即云层对信号的衰减作用导致了较大的风速误差。纵向对比图 7 中水平分辨率为 1 km 的模拟结果和水平分辨率为 5 km 的模拟结果,可见两组图中风速误差、信噪比随海拔高度的变化趋势基本相同。值得注意的是,图 7(e)中信噪比极值要高于

图 7(b),图 7(f)中的风速绝对误差远低于图 7(c),这是因为当水平分辨率为 5 km 时,探测器输出的信号值是多个脉冲累积的结果,通过积累脉冲来提高回波信号强度并降低探测器噪声,可以达到提高信噪比、降低风速误差的目的。

图 8 为图 7 中 35.65°N 处风速和风速误差的廓线对比结果,水平分辨率分别为 1 km 和 5 km。从图 8 可以看出,在 7~11 km 高度范围内,由于云层回波,衰减后向散射系数较大,两者风速误差都处于较小的范围内,1 km 水平分辨率下的风速最大误差小于 ±1.2 m/s,5 km 水平分辨率下的风速最大误差小于 ±0.5 m/s,相对误差都在 ±5% 以内;云层上方 11~17 km 处存在少量的冰晶粒子,仍可通过获取信号来反演风速,水平分辨率为 1 km 时的风速误差明显大于分辨率为 5 km 时;云层下方由于信号的衰减,导致水平分辨率为

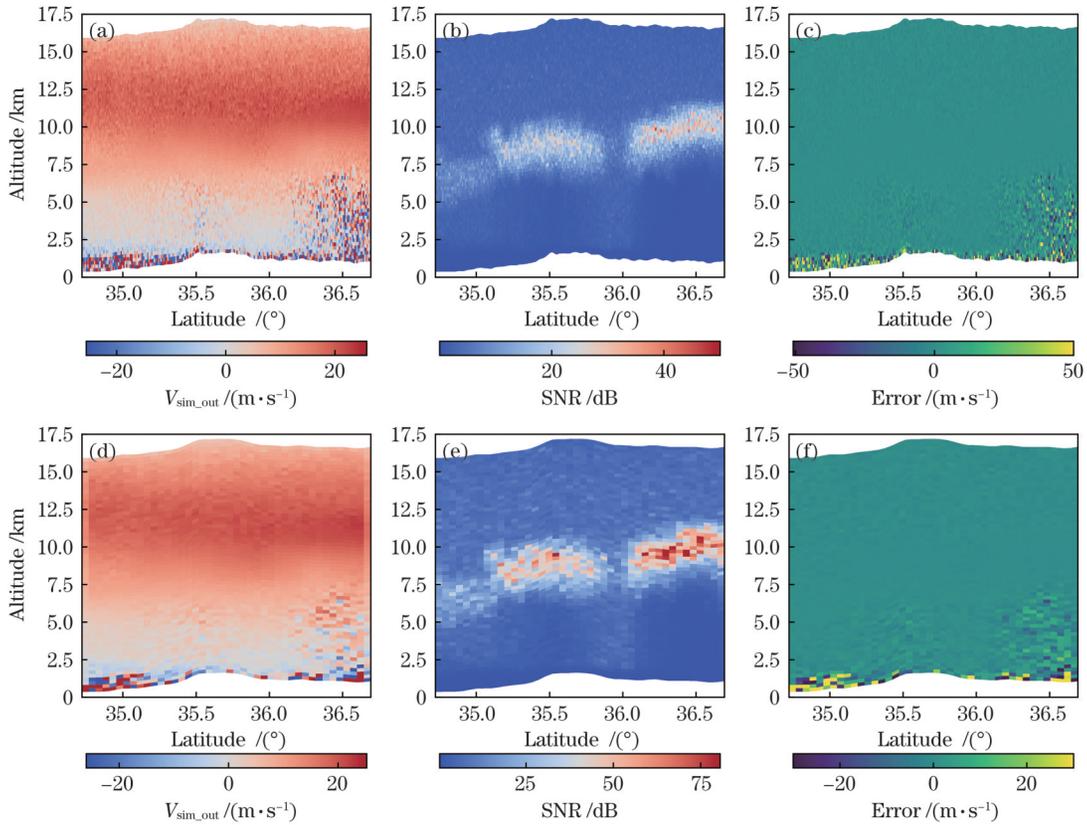


图 7 二维风速模拟结果。(a)~(c)水平分辨率为 1 km 的输出模拟风速、信噪比和风速误差；(d)~(f)水平分辨率为 5 km 的输出模拟风速、信噪比和风速误差

Fig. 7 Two-dimensional diagram of wind speed simulation results. (a)–(c) Output simulated wind speed, signal-to-noise ratio, and wind speed error with horizontal resolution of 1 km; (d)–(f) output simulated wind speed, signal-to-noise ratio, and wind speed error with horizontal resolution of 5 km

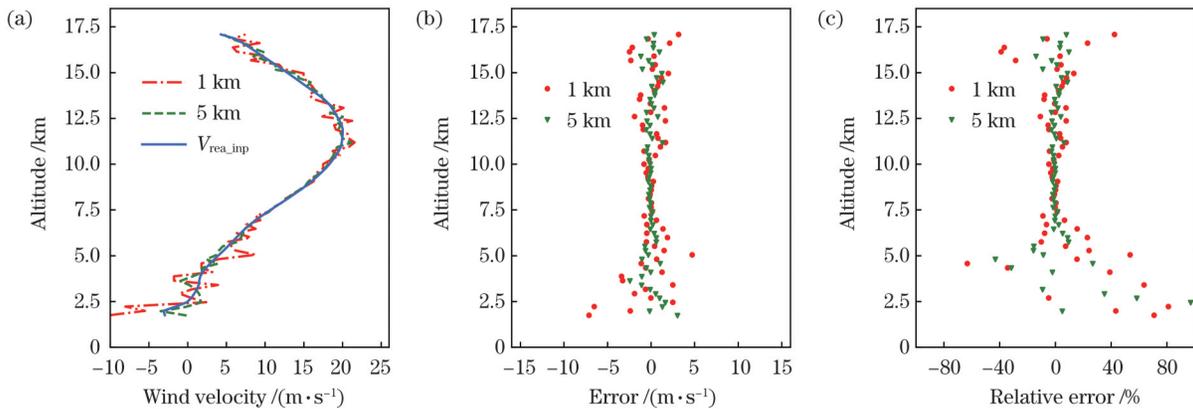


图 8 水平分辨率为 1 km 和 5 km 时的风速廓线对比。(a) 风速；(b) 风速误差；(c) 相对误差

Fig. 8 Comparison of wind speed profiles with horizontal resolution of 1 km and 5 km. (a) Wind speed; (b) wind speed error; (c) relative error

1 km 时的风速误差远超 5 km 时,且整体风速误差显著增大,相对误差甚至超过 80%。可见降低水平分辨率虽然牺牲了空间精度,但有利于减小风速误差,提高探测结果的质量。

## 5 参数敏感性分析

### 5.1 卫星轨道高度与激光脉冲能量的影响

提高探测信噪比的关键在于增大接收回波信号的

强度,而提高强度的方法有多种,我们选取了轨道高度和激光脉冲能量作为典型参数,来考察其对风速探测误差的影响。采用上文中提到的二维截面中 35.65°N 处的典型廓线,通过改变轨道高度和激光脉冲能量值对探测信号的信噪比进行模拟,结果如图 9 所示。从图 9(a)和图 9(b)可以看出,卫星轨道高度越高,信噪比越小,风速误差越大,在信号较弱的区域(海拔高度 11 km 以上及 6 km 以下)风速误差下降更加明显。

图 9(c)和图 9(d)则表明激光脉冲能量越强,信噪比越大,风速误差越小。实际上,增加望远镜口径、提高探

测器水平、优化整体光学系统都可以在一定程度上提高信噪比,在设计中需要根据实际情况进行优化。

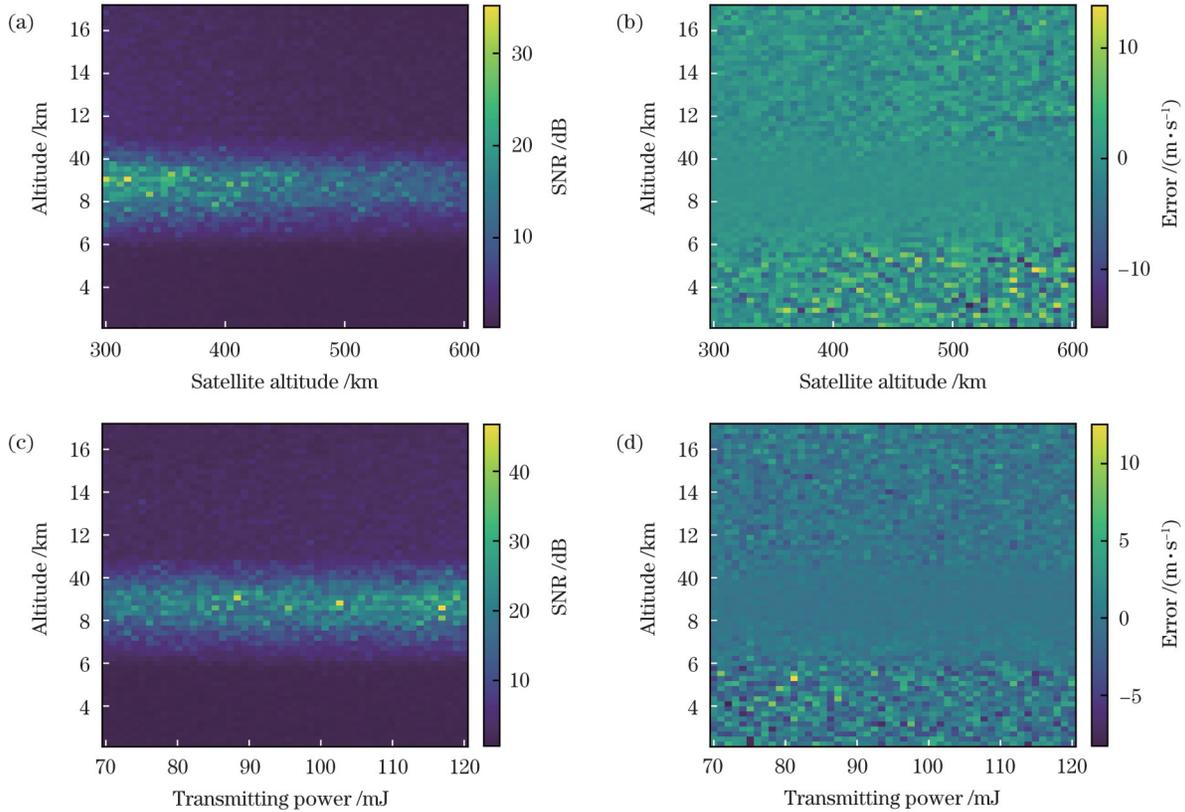


图 9 卫星轨道高度和发射激光脉冲能量对反演风速的信噪比和误差影响。(a),(b)卫星轨道高度对信噪比和风速误差的影响; (c),(d)发射激光脉冲能量对信噪比和风速误差的影响  
Fig. 9 Influence of satellite orbit altitude and laser pulse energy on signal-to-noise ratio and wind speed error. (a), (b) Influence of satellite orbit altitude on signal-to-noise ratio and wind speed error; (c), (d) influence of laser pulse energy on signal-to-noise ratio and wind speed error

### 5.2 ACCD探测器参数的影响

上文反演风速所采用的最大似然函数法,在处理大量数据时,需要较长的计算时间,而重心法直观简便,运算速度快,在处理大量探测数据时具有优势。由于ACCD探测器通道对回波信号的离散化,使得计算风速与真实风速之间存在较大的振荡误差;可以通过

增加ACCD探测器通道数量及反演时所覆盖的通道数,降低信号离散对反演风速的影响,从而减小重心法带来的系统误差,弥补其在计算误差方面的不足。如图10(a)所示,当ACCD探测器通道数为16、计算时所覆盖的通道数为5时,计算风速与真实风速之间存在多处明显的振荡误差,图10(b)给出风速误差的值,振荡

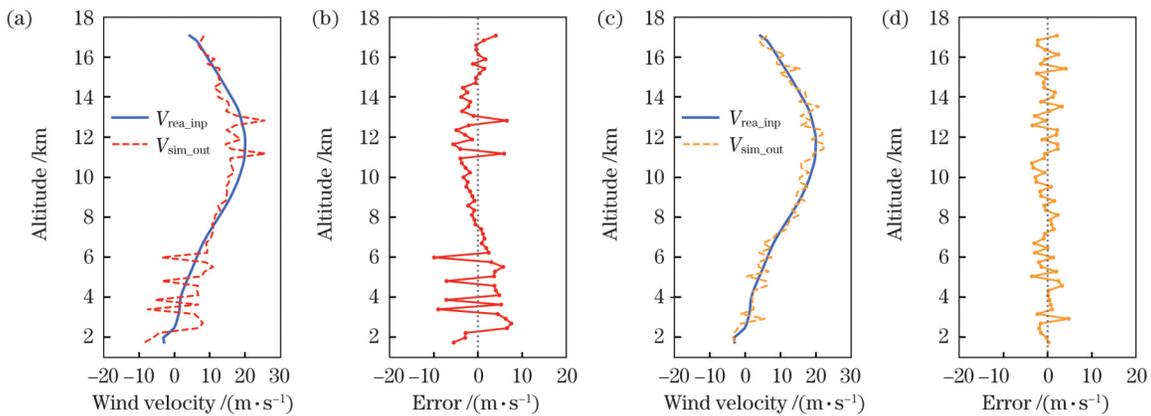


图 10 ACCD探测器通道数对重心法反演风速精度的影响。(a),(b)ACCD探测器通道数为16;(c),(d)ACCD探测器通道数为64  
Fig. 10 Influence of ACCD detector's channel number on accuracy of wind speed inversion by centroid method. (a), (b) Number of ACCD detector channels is 16; (c), (d) number of ACCD detector channels is 64

误差在  $\pm 10$  m/s 之间。图 10(c) 和图 10(d) 展示了将 ACCD 探测器通道数增加到 64 个, 反演风速时覆盖的通道数增加到 13 个之后的结果, 反演出的风速误差和振荡误差都明显减小, 均在  $\pm 5$  m/s 之内。但在实际的探测中, 所选用的通道数越多, 计算时间越长, 需要权衡后做出选择。

### 5.3 结果讨论

与已有的研究相比, 本文在复杂场景模拟、测风精度评估和参数敏感性分析层面上做出了更进一步的研究。张日伟等<sup>[18]</sup>构建了基于菲佐干涉仪的鉴频仿真系统, 结合摇摆模式分析(RMA)的气溶胶资料以及 RS92 探空资料, 分析了云和气溶胶对一维风速廓线反演的影响, 结果表明云和气溶胶的存在会导致反演风速最大偏差和标准差增大。卢博等<sup>[16]</sup>采用 CALIOP 星载激光雷达测量的气溶胶后向散射系数的全球三维平均分布数据, 对相干测风激光雷达性能进行了仿真模拟, 评估了二维剖面上气溶胶的分布对风速误差的影响。本文构建的正演模型的最大特点在于复杂场景的模拟能力, 通过使用 WRF 对真实场景进行模拟, 将背景大气参数(如温/压/风/湿、云、气溶胶、大气成分等)作为模型的初始输入, 同时探讨了不同反演算法的特点和局限性。与过去较为简化的一维仿真模型相比, 本文将三维场景作输入, 可获取任意二维剖面的模拟结果, 在真实性和实用性方面有很大提升。

## 6 结 论

本文基于菲佐干涉仪的星载测风激光雷达探测模式, 详细描述了构建其正演模型的方法和关键技术, 同时分析了三种反演算法的特点, 可为设计和改进星载激光测风雷达技术提供量化参考。以 ALADIN 仪器参数为输入值, 模拟了同时存在冰云与气溶胶的典型场景下的探测信号, 通过反演与输入风速进行对比分析了影响测风精度水平的主要因素, 并进行了参数敏感性分析。结果表明: 大气中云层和气溶胶的存在使得衰减后向散射系数增大, 从而提高信噪比和测风精度, 使用最大似然函数法对风速进行反演, 风速误差可在  $\pm 1.2$  m/s 范围内; 当云层的冰水含量较高、厚度较大时, 由于云层对激光的强衰减作用使得激光无法穿透云层, 从而无法对云层以下的高度实施有效探测; 在相同垂直分辨率下, 5 km 水平分辨率时的测风误差明显低于 1 km 水平分辨率时的误差, 表明降低水平分辨率、增加累积脉冲数量, 可以减小风速误差, 提高探测精度; 在典型参数的敏感性分析中, 降低卫星轨道高度、增大激光发射功率均可增强信噪比并减小风速误差, 增加 ACCD 探测器通道数可以减小重心法反演风速带来的系统振荡误差。

### 参 考 文 献

- [1] Baker W E, Emmitt G D, Robertson F, et al. Lidar-measured winds from space: a key component for weather and climate prediction[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1995, 76(6): 869-888.
- [2] Paffrath U, Lemmerz C, Reitebuch O, et al. The airborne demonstrator for the direct-detection Doppler wind lidar ALADIN on ADM-Aeolus. Part II: simulations and Rayleigh receiver radiometric performance[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(12): 2516-2530.
- [3] Reitebuch O, Lemmerz C, Nagel E, et al. The airborne demonstrator for the direct-detection Doppler wind lidar ALADIN on ADM-Aeolus. Part I: instrument design and comparison to satellite instrument[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(12): 2501-2515.
- [4] Ishii S, Baron P, Aoki M, et al. Feasibility study for future spaceborne coherent Doppler wind lidar, part 1: instrumental overview for global wind profile observation[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II*, 2017, 95(5): 301-317.
- [5] Baron P, Ishii S, Okamoto K, et al. Feasibility study for future spaceborne coherent Doppler wind lidar, part 2: measurement simulation algorithms and retrieval error characterization[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II*, 2017, 95(5): 319-342.
- [6] 孙学金, 张传亮, 方乐, 等. 星载激光测风技术体制及其评估方法综述[J]. *遥感学报*, 2022, 26(6): 1260-1273.  
Sun X J, Zhang C L, Fang L, et al. A review of the technical system of spaceborne Doppler wind lidar and its assessment method [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(6): 1260-1273.
- [7] Stoffelen A, Pailleux J, Källén E, et al. The atmospheric dynamics mission for global wind field measurement[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2005, 86(1): 73-88.
- [8] Schillinger M, Morançais D, Fabre F, et al. ALADIN: the lidar instrument for the AEOLUS mission[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4881: 40-51.
- [9] 宋晶晶. 首个星载全球大气风场激光雷达成功发射[J]. *国际太空*, 2018(9): 40-43.  
Song J J. The first spaceborne global atmospheric wind lidar was successfully launched[J]. *Space International*, 2018(9): 40-43.
- [10] Zhai X C, Wu S H, Liu B Y, et al. Shipborne wind measurement and motion-induced error correction of a coherent Doppler lidar over the Yellow Sea in 2014[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11(3): 1313-1331.
- [11] 金效梅, 朱文越, 刘庆, 等. 相干测风激光雷达的数值建模和仿真分析[J]. *光学学报*, 2021, 41(6): 0601003.  
Jin X M, Zhu W Y, Liu Q, et al. Numerical modeling and simulation analysis of coherent wind lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(6): 0601003.
- [12] Liu B M, Guo J P, Gong W, et al. Characteristics and performance of wind profiles as observed by the radar wind profiler network of China[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, 13(8): 4589-4600.
- [13] Guo J P, Liu B M, Gong W, et al. Technical note: first comparison of wind observations from ESA's satellite mission Aeolus and ground-based radar wind profiler network of China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, 21(4): 2945-2958.
- [14] 狄慧鸽, 华灯鑫. 云探测中的激光雷达技术研究进展[J]. *光学学报*, 2022, 42(6): 0600002.  
Di H G, Hua D X. Research progress of lidar in cloud detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(6): 0600002.
- [15] 陈炳龙, 杨忠东, 闵敏, 等. 星载多普勒测风激光雷达应用需求与研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(19): 190003.  
Chen B L, Yang Z D, Min M, et al. Application requirements and research progress of spaceborne Doppler wind lidar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(19): 190003.
- [16] 卢博, 吴东, 张天澈. CALIOP 数据在星载相干多普勒测风激光雷达性能仿真中的应用[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2017, 47(1): 119-125.  
Lu B, Wu D, Zhang T C. Performance simulation of spaceborne

[1] Baker W E, Emmitt G D, Robertson F, et al. Lidar-measured

- coherent Doppler wind lidar based on CALIOP data[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, 47(1): 119-125.
- [17] 庄鹏, 沈法华, 王邦新, 等. 基于法布里-珀罗干涉仪的瑞利-米散射测风激光雷达研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(12): 1210001.  
Zhuang P, Shen F H, Wang B X, et al. Rayleigh-Mie wind lidar based on Fabry-Perot interferometer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(12): 1210001.
- [18] 张日伟, 孙学金, 严卫, 等. 星载激光多普勒测风雷达鉴频系统仿真(I): 基于 Fizeau 干涉仪的 Mie 通道大气风速反演研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(14): 140702.  
Zhang R W, Sun X J, Yan W, et al. Simulation of frequency discrimination for spaceborne Doppler wind lidar (I): study on the retrieval of atmospheric wind speed for Mie channel based on Fizeau interferometer[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(14): 140702.
- [19] 张日伟, 孙学金, 严卫, 等. 星载激光多普勒测风雷达鉴频系统仿真(II): 基于 Fabry-Perot 标准具的 Rayleigh 通道大气风速反演研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(14): 140703.  
Zhang R W, Sun X J, Yan W, et al. Simulation of frequency discrimination for spaceborne Doppler wind lidar (II): study on the retrieval of atmospheric wind speed for Rayleigh channel based on Fabry-Perot interferometer[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(14): 140703.
- [20] Zhang C L, Sun X J, Zhang R W, et al. Impact of solar background radiation on the accuracy of wind observations of spaceborne Doppler wind lidars based on their orbits and optical parameters[J]. *Optics Express*, 2019, 27(12): A936-A952.
- [21] 刘延文, 孙学金, 张传亮, 等. 分子散射对星载测风激光雷达 Mie 通道的影响[J]. *激光与红外*, 2019, 49(2): 156-164.  
Liu Y W, Sun X J, Zhang C L, et al. Influence of molecular scattering on Mie channel of spaceborne wind lidar[J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(2): 156-164.
- [22] 廖淑君, 郜海阳, 寇蕾蕾, 等. 星载激光雷达探测云与气溶胶的仿真模拟[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(10): 1028001.  
Liao S J, Gao H Y, Kou L L, et al. Simulation of cloud and aerosol detection based on spaceborne lidar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(10): 1028001.
- [23] Marseille G J, Stoffelen A. Simulation of wind profiles from a space-borne Doppler wind lidar[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2003, 129(594): 3079-3098.
- [24] 刘继桥, 陈卫标, 胡企铨. 基于斐索干涉仪的直接探测多普勒测风激光雷达[J]. *大气科学*, 2004, 28(5): 762-770.  
Liu J Q, Chen W B, Hu Q Q. A wind direct-detection Doppler lidar based on a multi-beam Fizeau interferometer[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2004, 28(5): 762-770.
- [25] 沈法华, 孙东松, 陈敏, 等. 利用 Fizeau 干涉仪进行激光风速测量的原理分析[J]. *量子电子学报*, 2006, 23(3): 330-334.  
Shen F H, Sun D S, Chen M, et al. Analysis of principle of wind velocity measurement with Fizeau interferometer[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2006, 23(3): 330-334.
- [26] 卜令兵, 陈卫标, 周军, 等. 条纹技术测风激光雷达研究[J]. *光子学报*, 2009, 38(1): 175-178.  
Bu L B, Chen W B, Zhou J, et al. Studies of fringe-technique wind lidar[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(1): 175-178.
- [27] Reitebuch O, Huber D, Nikolaus I. ADM-Aeolus ATBD Level 1B Products[R]. 2018: 22.
- [28] 杨春沪, 沈法华, 孙东松. 基于 Fizeau 干涉仪多普勒激光雷达测风的实验研究[J]. *激光与红外*, 2009, 39(7): 724-727.  
Yang C H, Shen F H, Sun D S. Experimental study of Doppler lidar with Fizeau fringe technique[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(7): 724-727.
- [29] 刘延文. 基于 Mie 散射的星载激光雷达测风技术仿真研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018: 47-50.  
Liu Y W. Simulation of spaceborne wind lidar technology based on Mie scattering[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018: 47-50.
- [30] Frehlich R G, Yadlowsky M J. Performance of mean-frequency estimators for Doppler radar and lidar[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1994, 11(5): 1217-1230.
- [31] Smalikho I. Techniques of wind vector estimation from data measured with a scanning coherent Doppler lidar[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, 20(2): 276-291.

## Simulation of Spaceborne Wind Lidar Based on Fizeau Interferometer

Kang Jiahui<sup>1,2</sup>, Gao Haiyang<sup>1,2\*</sup>, Liao Shujun<sup>3</sup>, Kou Leilei<sup>1,2</sup>, Ding Piman<sup>4</sup>, Wang Zhen<sup>1,2</sup>,  
Bu Lingbing<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China;

<sup>2</sup>School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China;

<sup>3</sup>Qinghai Meteorological Observatory, Xining 810012, Qinghai, China;

<sup>4</sup>Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China

### Abstract

**Objective** Global wind field measurement is the basis of weather forecasting and climate research since wind speed is one of the basic parameters to describe the atmospheric state. Spaceborne lidar is an effective means to obtain the global wind field due to the characteristics of high accuracy, high vertical resolution, global coverage, etc. At present, spaceborne wind lidar technology is in development in China, and it needs a lot of theoretical and experimental support. In many research directions of this technology, the simulation technology of detection mode and observation results is very important. Previous research has simulated different detection modes of spaceborne lidar, but those simulations mostly came from standard ideal scenes, and have not involved the analysis of complex real scenes. In this work, we carry out a practical simulation by employing a real scene from the WRF model in which both clouds and aerosol exist at the same time. The results from the analysis on detection ability can improve the practicability of the simulation method, and provide support for the design and improvement of spaceborne wind lidar.

**Methods** We build a forward model including six sub-modules (Fig. 1): atmospheric scene, calculation of atmospheric radiation

transfer, satellite orbital platform parameters, instrument parameters, inversion analysis and comparison verification, and parameter sensitivity analysis. The parameters such as wind speed, aerosol mass density, mixture ratio of hydrometeor, and molecular number density are obtained from the atmospheric scene. The optical properties of particles in clouds and aerosol depend on the Optical Properties of Aerosols and Clouds (OPAC) database. The atmospheric absorption calculation comes from the line-by-line integration model of LBLTRM. Then the overall attenuation backscattering coefficients at different altitudes can be calculated through atmospheric radiation transfer. Substituting the parameters of the satellite orbit platform and lidar instruments into the forward model, the photon signal received before the discriminator can be obtained. By coupling the Fizeau interferometer, accumulation charge coupled device (ACCD) detector, and other models, the output signal on the detector is simulated. To verify the simulation results, the retrieved wind speed from the simulation signal is compared with the original wind speed provided by the scene. In addition, parameter sensitivity analysis is also used to discuss the impact on the simulation detection results.

**Results and Discussions** The forward model in this paper can simulate complex real scenes, and the authenticity and practicability of the simulation have been greatly improved (Fig. 1). The results of wind speed profiles with regard to altitude show that clouds and aerosol can increase the signal-to-noise ratio (SNR) of the detection and improve the inversion accuracy. However, when the cloud layer is thick, due to the attenuation effect of the cloud layer on the signal, the SNR below the cloud layer will decrease, thus increasing the error of wind speed error (Fig. 6). The two-dimensional (2D) profiles of wind speed are then simulated with the horizontal resolutions of 1 km and 5 km, respectively. The results show that the wind speed error can be reduced by the decreasing horizontal resolution due to the increasing echo signal intensity through accumulating pulses. When the centroid method is used to retrieve the wind speed, the wind speed oscillation error can be reduced by increasing the number of channels of the ACCD detector (Fig. 10).

**Conclusions** Based on the spaceborne wind lidar detection mode of the Fizeau interferometer and using the Atmospheric Laser Doppler Instrument (ALADIN) instrument parameters as input, we simulate the detection signals in the presence of clouds and aerosol. By comparing the inversion results with the input original value, we discuss the main factors affecting the wind speed error and analyze the parameter sensitivity. The results show that the clouds and aerosol in the atmosphere can increase the attenuation backscattering coefficient, improve the SNR and reduce the wind speed error. When the maximum likelihood function method is used to retrieve the wind speed, the wind speed error ranges within  $\pm 1.2$  m/s. However, when the cloud layer tends to be thicker, the lidar cannot penetrate the cloud layer due to the strong attenuation effect of the cloud layer on the pulse energy, so the information below the cloud layer cannot be detected effectively. For the same vertical resolution, the wind speed error with the horizontal resolution of 5 km is significantly better than that with the horizontal resolution of 1 km, which means that reducing the horizontal resolution and increasing the number of cumulative pulses can improve the wind speed detection accuracy. Through the sensitivity analysis of typical parameters, the lower satellite orbit altitude or the greater laser emission power can enhance the SNR and reduce the wind speed error. Furthermore, the increasing number of the ACCD detector channels can reduce the system oscillation error caused by the principle of the centroid method.

**Key words** remote sensing; spaceborne lidar; active remote sensing; Fizeau interferometer; simulation; incoherent wind measurement