

YE Han, ZHANG Zijin, DONG Xiaolong, ZHU Di, ZHANG Jingyu. Simulation Study on the Detection Signal of Atmospheric Wind Field within Clouds Using Spaceborne W-band Doppler Radar (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, **45**(2): 340–352. CSTR:32142.14.cjss. 2024-0189. DOI:10.11728/cjss2025.02.2024-0189

星载 W 波段多普勒雷达云内大气风场 探测信号仿真研究*

叶 晗^{1,2} 张子瑾¹ 董晓龙^{1,2}
朱 迪^{1,2} 张敬钰¹

1(中国科学院国家空间科学中心 微波遥感技术重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 全球三维大气风场探测对提升数值天气预报精度、增强气象灾害预警能力及保障航空航天安全具有关键作用. 本文建立了一套星载 W 波段多普勒雷达云内大气风场探测信号仿真系统, 通过输入实际场景的大气廓线数据, 仿真雷达回波信号, 进而利用回波信号估计径向风速, 并分析了信噪比和脉冲累积数对径向风速估计精度的影响. 结果表明, 对于星载 W 波段多普勒雷达, 当极化脉冲间隔不大于 $20\ \mu\text{s}$ 时, 极化分集脉冲对技术可实现 $0\sim 40\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速探测范围, 有效获取云内高速产品; 径向风速估计精度随脉冲累积数的增加和信噪比的增大而提升; 在本文雷达系统指标条件下, 当信噪比为 $0\ \text{dB}$, 脉冲累积数为 64 时, 径向风速估计精度为 $1.34\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 能够满足数值天气预报 $2\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的测风精度要求.

关键词 云内大气风场, W 波段多普勒雷达, 回波信号仿真, 极化分集脉冲对技术, 径向多普勒速度

中图分类号 P412.25

Simulation Study on the Detection Signal of Atmospheric Wind Field within Clouds Using Spaceborne W-band Doppler Radar

YE Han^{1,2} ZHANG Zijin¹ DONG Xiaolong^{1,2}
ZHU Di^{1,2} ZHANG Jingyu¹

1(Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, National Space Science Center,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

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

* 国家重点研发计划项目 (2023YFB3907701), 中国气象局青年创新团队项目 (CMA20240N10) 和中国科协青年人才托举工程项目 (2023QNRC001) 共同资助

2024-12-18 收到原稿, 2025-01-23 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Abstract The detection of the global three-dimensional atmospheric wind field plays a crucial role in improving the accuracy of numerical weather prediction, enhancing the ability of meteorological disaster early warning, and ensuring the safety of aerospace activities. At present, the main methods for detecting the atmospheric wind field include ground-based wind profile radars, spaceborne Doppler lidars, and millimeter-wave cloud radars, *etc.* Ground-based wind profile radars are difficult to deploy in oceanic and remote terrestrial areas, making it impossible to achieve global networked observations. Spaceborne Doppler Lidars can accurately detect the atmospheric wind field in clear-sky regions, but they are unable to obtain data on the wind field within clouds. Compared with lasers, millimeter waves have better penetration capabilities and possess unique advantages in the detection of the wind field within clouds. However, existing spaceborne millimeter-wave cloud radars cannot provide information on the horizontal wind field. Spaceborne millimeter-wave cloud radars with a conical scanning system can achieve the detection of the three-dimensional atmospheric wind field within clouds. In this paper, a signal simulation system for the atmospheric wind field detection within clouds by a spaceborne W-band Doppler radar was established, which provided a theoretical basis and technical reference for in-cloud wind field detection. The required elements of the signal simulation system include atmospheric profile data, reflectivity factor, attenuation coefficient, radar system parameters, spaceborne observation geometry, echo signal amplitude, echo signal frequency, echo signal phase, echo signals, and radial velocity. The system processes actual cloud profile data and simulates radar echo signals to estimate the radial wind speed. The effects of Signal-to-Noise Ratio (SNR) and pulse-pair cumulative number on the estimation accuracy of radial wind speed were systematically analyzed. The results show that for a spaceborne W-band Doppler radar, when the polarization pulse interval is not greater than $20\ \mu\text{s}$, the polarization diversity pulse-pair technique can achieve a wind speed detection range of 0 to $40\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, effectively obtaining high wind speed products within clouds. The estimation accuracy of radial wind velocity is positively correlated with the increase in SNR and the number of pulse-pair accumulations. Under the index conditions of the radar system described in this paper, when the SNR is $0\ \text{dB}$ and the number of pulse-pair accumulations is 64 , the estimation accuracy of the radial wind speed is $1.34\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, which can meet the wind measurement accuracy requirement of $2\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ for numerical weather prediction.

Key words Atmospheric wind field within clouds, W-band Doppler radar, Echo signal simulation, Polarization diversity pulse-pair technique, Radial Doppler velocity

0 引言

大气风场是一个重要的气象要素,其精确资料的获取有助于建立完备的大气动力过程模型、提升数值天气预报 (Numerical Weather Prediction, NWP) 能力、提高气象灾害预警预报的准确性和有效性、保障航空和航天器的航行或发射安全^[1,2]。大气风场是世界气象组织 (World Meteorological Organization, WMO) 全球综合观测系统 2040 年远景发展规划 (WIGOS2040) 和我国下一代气象卫星发展规划明确的优先方向,也是我国空间科学中长期发展规划提出的 2027 年之前空间地球科学的优先方向^[3]。

探测大气风场需要达到一定的精度和分辨率要求, NWP 典型水平风矢量的理想目标需满足速度精

度为 $2\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 水平分辨率为 $15\ \text{km}$, 垂直分辨率为 $0.5\ \text{km}$, 时间分辨率为 $1\ \text{h}$ 的要求; 突破目标需满足速度精度为 $3\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 水平分辨率为 $100\ \text{km}$, 垂直分辨率为 $1\ \text{km}$, 时间分辨率为 $6\ \text{h}$ 的要求^[4]。目前, 大气风场探测手段主要包括星载红外“云导风”技术、地基风廓线雷达、星载激光测风雷达等。星载红外“云导风”技术由于穿透能力的限制, 无法获取云内大气风场的垂直分布信息^[5]; 地基风廓线雷达受到地形等自然条件的限制, 难以部署在海洋和偏远的陆地地区, 无法实现全球组网观测^[6]; 星载激光测风雷达, 例如风神卫星上搭载的阿拉丁, 能够实现晴空区域大气风场的准确探测^[7], 但是, 激光无法穿透云层, 导致风神卫星无法获取云覆盖区域的云内风场数据, 而全球平均云层的覆盖率超过 66% ^[8], 沿海区域云覆盖率可

以达到 80%~90%^[9], 导致大量关键风场数据缺失.

毫米波相较于激光具有更好的穿透能力, 因此毫米波雷达在云内风场探测方面具有独特的优势. 毫米波测云雷达通常采用的波段主要有 Ka 波段 (35 GHz) 和 W 波段 (94 GHz), 其中 W 波段灵敏度更高, 可以探测较小的云滴和水汽, 更适合对云层进行三维立体观测^[10], 是星载首选的云感应频率. 2024 年 5 月发射的 EarthCARE 卫星搭载的云廓线雷达, 工作于 W 波段, 通过天底点指向的波束观测, 首次实现了云粒子垂直速度信息获取, 但该雷达无法提供水平风场信息^[11,12]. 水平风的测量需要对同一观测单元实现不同方位角的观测, 目前已有的星载测云雷达均不具备测量水平风场的能力. 云内大气三维风场探测, 尤其是水平风场探测, 是目前国内外风场遥感领域的研究热点.

近年, 欧洲航天局 (ESA) 研究提议, 使用 W 波段具有圆锥扫描能力的雷达弥补在云粒子水平方向运动观测能力的不足. 目前已向 ESA 地球探索者 11 号提出, 被称为 WIVERN (WInd VELOCITY Radar Nephoscope), 其目标是测量 800 km 刈幅宽度范围的云内三维风场^[4,13]. 2021 年, Battaglia 等^[14]建立了 WIVERN 的端到端模拟器, 用于研究 WIVERN 的性能, 并分析了风切变、卫星平台运动对多普勒速度估计的影响, 但该研究并未构建完整的回波信号仿真模型, 且测量精度分析是基于理论推导的物理公式而不是回波信号仿真. 2022 年, Liu 等^[15]研究了影响星载云内风场测量雷达多普勒测量精度的内在机理, 并基于极化分集脉冲对 (Polarization Diversity Pulse-Pair, PDPP) 算法速度估计精度的数学表达, 开展了关键系统参数对径向速度估计精度影响的分析和参数优化. 但其研究是基于测速精度的数学表达, 并未开展基于信号处理的仿真分析. 本文开展的星载 W 波段多普勒雷达云内大气风场探测信号仿真, 实现了对真实云场景的雷达回波模拟, 仿真分析了信噪比和脉冲累积数对径向风速测量精度的影响, 并通过回波信号仿真证实该多普勒雷达具有较强的测风能力, 能够满足 NWP 的测风精度要求.

1 云内大气风场探测雷达回波信号仿真系统

星载多普勒雷达通过发射电磁波, 与大气中水凝

物粒子相互作用产生后向散射回波, 回波信号相位的改变与多普勒频率有关, 通过估计平均多普勒频率能够得到云雨粒子在波束视轴上速度 (径向速度) 的估计, 根据径向速度结合观测几何可实现云内三维风场的反演. 本部分将结合星载观测几何和雷达系统参数, 建立回波信号幅度和相位估计模型, 并实现回波信号径向速度参数估计.

1.1 回波信号仿真要素分析

雷达回波信号模型主要包括信号幅度和相位两部分^[16], 信号模型公式为

$$S = \sum S_i = \sum A_i \exp [j2\pi (f + f_{di}) t_i]. \quad (1)$$

其中, i 表示将垂直方向的高度划分成 i 层, S_i 表示第 i 层的回波信号, 总回波 S 是每一层回波 S_i 的叠加. 此外, A_i 表示第 i 层的回波幅度, 由星载气象雷达方程决定^[17,18]:

$$A_i = \sqrt{P_{ri}} = \sqrt{\frac{P_t G^2 \pi^3 \beta_{ra} \beta_{az} c \tau |K_w|^2 Z_i}{1024 (\ln 2) L \lambda^2} \frac{1}{R_i^2} 10^{-0.2 \int_0^r K_i dr}}. \quad (2)$$

其中, P_{ri} 表示第 i 层的雷达回波功率, P_t 表示雷达接收功率, G 表示天线增益, β_{ra} 和 β_{az} 分别为俯仰向和方位向的波束宽度, 脉冲宽度为 τ , K_w 由复折射指数 m 计算得到, Z_i 为第 i 层的反射率因子, L 是系统损耗, λ 是电磁波波长, R_i 为第 i 层目标物与雷达之间的距离, K_i 为第 i 层的衰减系数.

此外, f_{di} 为第 i 层的多普勒频率^[17], 其具体形式如下:

$$f_{di} = \frac{2v_i}{\lambda}. \quad (3)$$

其中, v_i 是第 i 层的径向速度, 包括卫星平台速度、水平风速和垂直风速.

t_i 表示第 i 层的回波时延^[17], 可以表示为

$$t_i = t - \frac{2R_i}{c}. \quad (4)$$

综上, 回波信号仿真系统及所需要素具体包括大气廓线数据、反射率因子、衰减系数、雷达系统参数、星载观测几何、回波信号幅度、回波信号频率、回波信号相位、回波信号以及径向速度, 如图 1 所示. 以下将分别具体描述回波信号幅度和相位估计模型的建立过程. 结合回波信号幅度和相位估计模型, 根据式 (1) 可以得到多普勒雷达回波信号, 由回波信号相位可进一步得到径向速度参数, 具体过程见 1.4 节.

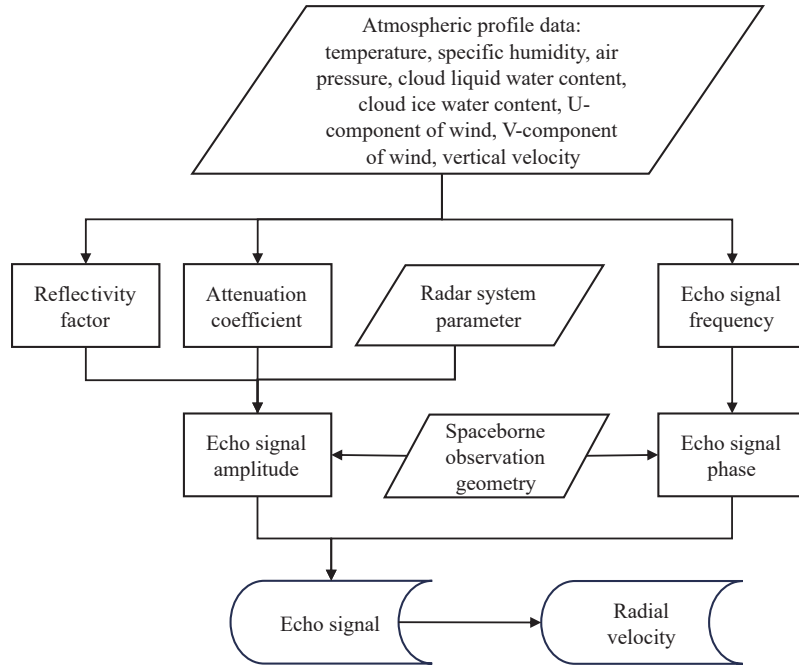


图 1 回波信号仿真系统及所需要素

Fig. 1 Echo signal simulation system and necessary elements

1.2 回波信号幅度

1.2.1 反射率因子

反射率因子 Z 是影响回波信号幅度的重要参数之一, 其主要与波长和云雨粒子的直径等参数有关^[18], 可以表示为

$$Z = \frac{\lambda^4}{\pi^5 |K_w|^2} \int_0^\infty N(D) \sigma(D) dD. \quad (5)$$

其中, λ 为波长, D 为粒子直径, $|K_w|^2$ 由复折射指数 m 计算得到, $N(D)$ 为粒子谱, $\sigma(D)$ 为后向散射截面, 下面将分别进行讨论.

$|K_w|^2$ 与复折射指数 m 有如下关系:

$$|K_w|^2 = \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2. \quad (6)$$

其中, 云水粒子的复折射指数根据德拜方程求解^[19]; 云冰粒子的复折射指数根据 Warren 和 Brandt^[20] 以及 Mätzler^[21] 的研究进行计算.

对于 $N(D)$, 即云水和云冰的粒子谱 (Particle Size Distribution, PSD), 使用 Gamma 分布表示^[22], 有

$$N(D) dD = N_w \frac{6}{3.67^4} \frac{(3.67 + \mu)^{\mu+4}}{\Gamma(\mu+4)} \left(\frac{D}{D_0} \right)^\mu \exp \left[- (3.67 + \mu) \frac{D}{D_0} \right] dD, \quad (7)$$

$$D_0 = 3.67 \left(\frac{W}{\pi N_w \rho} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (8)$$

$$N_w = \frac{W}{\pi \rho} \left(\frac{3.67}{D_0} \right)^4. \quad (9)$$

其中, N_w 为归一化数浓度参数 (单位 $\text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$), μ 为谱形因子, D_0 为中值体积直径 (单位 mm), W 为含水量 (单位 $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), ρ 为密度 (单位 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$). 云水粒子和云冰粒子的中值体积直径分别设置为 $10 \sim 50 \mu\text{m}$ 和 $0.1 \sim 1 \text{ mm}$ ^[23-25].

在本文仿真中, 云水粒子设置为球形粒子. 由于云水粒子的直径比 W 波段波长小 30 倍以上, 因此云水粒子的后向散射截面 $\sigma(D)$ 根据瑞利散射理论进行计算, 可以表示为^[18,26]

$$\sigma(D) = \frac{\pi^5 D^6}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2. \quad (10)$$

云冰粒子设置为非球形粒子, 对于云冰粒子的后向散射截面, 采用 T 矩阵算法进行计算^[27].

由式 (6)~(10) 得到反射率因子计算的各项参数, 再根据式 (5) 得到反射率因子. 根据式 (5)~(10) 得到云水粒子在 W 波段的反射率因子随云液水含量的变化情况, 如图 2 所示. 仿真中, 设置云水粒子中值体积直径 D_0 为 $10 \sim 50 \mu\text{m}$, 谱形因子 μ 为 $0 \sim 4$ ^[24,25].

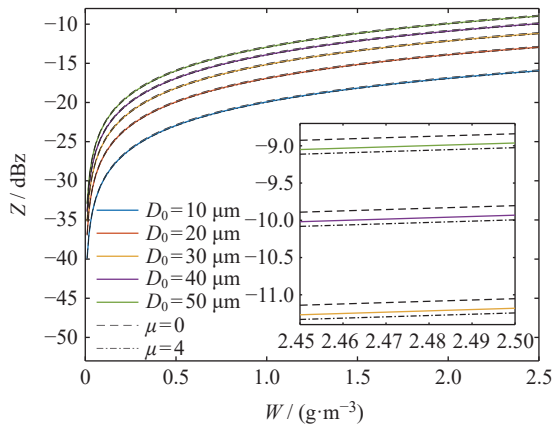


图2 云水反射率因子随云液水含量的变化

Fig. 2 Variation of cloud water reflectivity factor with cloud liquid water content

图2中的小图为云水反射率因子 Z 在云液水含量为 $2.45 \sim 2.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的放大图, 其中黑色虚线为谱形因子 $\mu = 0$ 时的反射率因子变化情况, 黑色点虚线为 $\mu = 4$ 时的反射率因子变化情况, 不同颜色的实线表示 $\mu = 2$ 时不同中值体积直径情况下的反射率因子. 由图2可以看出, 云水反射率因子 Z 在 W 波段的大小为 $-40 \sim -8 \text{ dBZ}$, 且随着云液水含量的增加呈对数增长. 此外, 中值体积直径 D_0 对反射率因子 Z 的影响较大, 且 D_0 越大, Z 越大, 当 D_0 从 10 μm 增长到 50 μm 时, Z 的变化可达 8 dBZ . 而谱形因子对云水反射率因子的影响较小, 当 μ 从 0 到 4 变化时, Z 的变化不足 0.5 dBZ .

云冰粒子反射率因子随云冰水含量的变化如图3所示. 仿真中, 中值体积直径 D_0 设置为 $0.1 \sim 1 \text{ mm}$, 谱形因子 μ 设置为 $0 \sim 2$ ^[23]. 图3中的小图为云冰反射率因子在云冰水含量为 $0.4 \sim 0.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的放大图, 其中黑色虚线为谱形因子 $\mu = 0$ 时的反射率因子变化情况, 黑色点虚线为 $\mu = 2$ 时的反射率因子变化情况, 不同颜色的实线表示 $\mu = 1$ 时不同中值体积直径情况下的反射率因子. 可以看出, 云冰反射率因子在 W 波段的变化范围为 $-20 \sim 20 \text{ dBZ}$, 云冰水含量越大, 反射率因子越大, 呈现对数增长. 此外, 云冰反射率因子随中值体积直径 D_0 的增加而增大, 随谱形因子 μ 的增大而减小, 并且中值体积直径 D_0 对云冰反射率因子的影响远大于谱形因子 μ .

1.2.2 衰减系数

大气吸收和云雨粒子衰减会影响雷达回波信号的幅度. 对于 W 波段多普勒雷达, 信号在大气中的衰

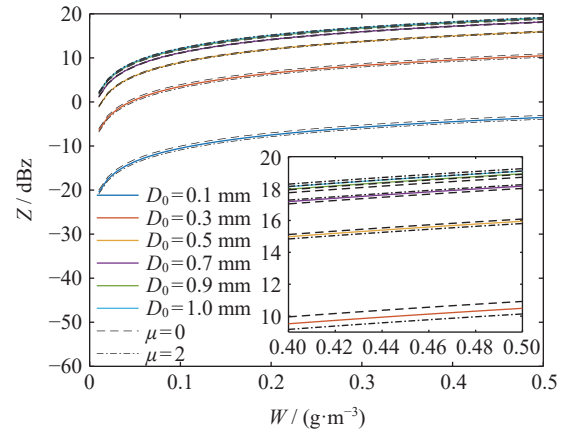


图3 云冰反射率因子随云冰水含量的变化

Fig. 3 Variation of cloud ice reflectivity factor with cloud ice water content

减主要取决于水汽和氧气的吸收. 对于氧气吸收衰减, 利用 $\text{O}_2\text{-MPM93}$ 模型进行计算^[28]; 对于水汽吸收衰减 K_a , 可以表示为^[26,29]

$$K_a(f) = 2f^2 \rho \left(\frac{300}{T_K} \right)^{1.5} \alpha_1 \left[\frac{300}{T_K} e^{-\frac{644}{T}} \frac{1}{(f^2 - 494.4019)^2 + 4f^2 \alpha_1^2} + 1.2 \times 10^{-6} \right], \quad (11)$$

其中,

$$\alpha_1 = 2.85 \left(\frac{P}{1013} \right) \left(\frac{300}{T_K} \right)^{0.626} \left[1 + 0.018 \frac{\rho T_K}{P} \right]. \quad (12)$$

式中, f 为 W 波段的频率 94 GHz , ρ 为水汽密度 (单位 $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), T_K 为气温 (单位 K), α_1 单位为 GHz , P 为气压 (单位 hPa), K_a 为水汽吸收衰减 (单位 $\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$).

对于云水粒子^[18], 衰减系数可以表示为

$$K_{tc} = \left[0.4343 \frac{6\pi}{\lambda} \text{Im} \left(-\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) \right] W. \quad (13)$$

令

$$K_1 = \left[0.4343 \frac{6\pi}{\lambda} \text{Im} \left(-\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) \right], \quad (14)$$

则有

$$K_{tc} = K_1 W. \quad (15)$$

其中, K_{tc} 表示云液滴的衰减系数, K_1 表示云中单位含水量的衰减系数, 量纲单位为 $(\text{dB} \cdot \text{km}^{-1})/(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$. 由式(15)计算衰减系数, 结果表明, 对于云水含量为 $2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的云水粒子, 衰减系数为 $8.34 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$.

对于云冰粒子, 利用 T 矩阵算法^[27] 计算非球形粒子的衰减系数 K_{ic} , 如图 4 所示.

图 4 中的黑色实线为谱形因子 $\mu = 0$ 时的衰减系数变化情况, 黑色虚线为 $\mu = 2$ 时的衰减系数变化情况, 不同颜色的实线表示 $\mu = 1$ 时不同中值体积直径情况下的衰减系数. 中值体积直径 D_0 对云冰粒子的衰减系数影响较大, 在谱形因子 μ 取 2 的情况下, 衰减系数最大不超过 $2.1 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$; 谱形因子 μ 对云冰粒子的衰减系数影响相对较小, 在中值体积直径 D_0 小于 0.5 mm 的情况下, 云冰的衰减系数小于 $0.45 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$.

1.2.3 星载观测几何和雷达系统参数

仿真的星载多普勒雷达采用笔形波束圆锥扫描的观测体制. 圆锥扫描是指俯仰角固定, 方位角进行 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的旋转扫描. 仿真中卫星的俯仰角 α 为 41.6° , 方位角为 φ , 同时卫星以 $7.6 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度向前运动, 雷达波束足迹为螺旋轨迹, 扫描几何如图 5 所示. 因此, 雷达垂向分辨率 Δh 可以表示为

$$\Delta h = \frac{c\tau}{2} \cos \alpha. \quad (16)$$

其中, c 为光速, τ 为脉冲宽度.

仿真中使用的雷达系统参数列于表 1, 该参数是基于刘顺飞开展的雷达系统关键参数优化研究^[15] 得到的结果.

卫星高度为 500 km , 俯仰角为 41.6° 时, 基于星载观测几何和表 1 的雷达系统参数以及式 (16), 可以得到雷达垂向分辨率 Δh 为 0.37 km .

基于表 1 的雷达系统参数, 进一步分析回波信噪

比 SNR(定义数学符号 R_{SNR}) 与反射率因子的关系. 信噪比公式为

$$R_{\text{SNR}} = \frac{P_r}{P_n}. \quad (17)$$

其中, P_r 为雷达回波功率, 根据式 (2) 计算, P_n 为雷达接收机的噪声功率, 可以表示为

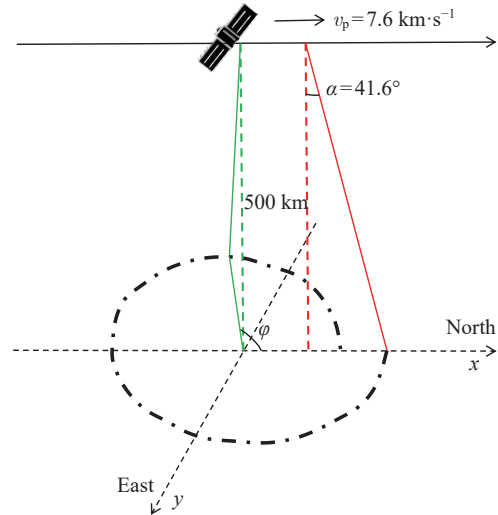


图 5 圆锥扫描观测几何示意

Fig. 5 Geometric diagram of conical scanning observation

表 1 星载 W 波段多普勒雷达系统参数
Table 1 System parameters of spaceborne W-band Doppler radar

参数及指标	数值
工作频率/ GHz	94
扫描方式	圆锥扫描
单程 -3 dB 波束宽度/(°)	0.08
天线尺寸/ m	3
天线增益/ dB	66.3
极化方式	H/V
发射峰值功率/ W	1800
脉冲宽度/ μs	3.3
脉冲重复频率/ kHz	4
信号形式	正交极化脉冲
极化脉冲时间间隔/ μs	20
系统损耗/ dB	2.5
接收机噪声系数/ dB	5
接收机带宽/ MHz	0.36

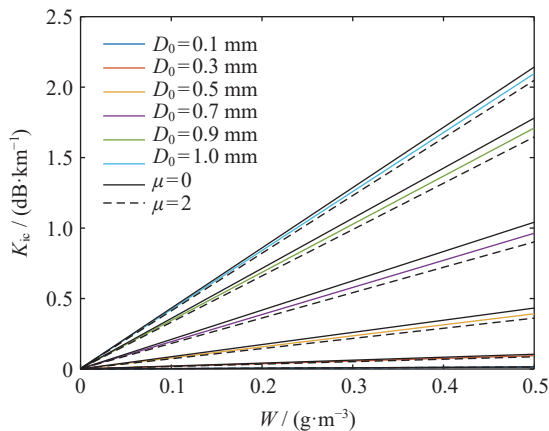


图 4 云冰衰减系数随云冰水含量的变化

Fig. 4 Variation of cloud ice attenuation coefficient with cloud ice water content

$$P_n = n_f k_B T_K B. \quad (18)$$

其中, n_f 为接收机的噪声系数, k_B 为波尔兹曼常数, T_K 为环境温度, B 为接收机带宽.

当卫星平台高度为 500 km, 仿真得到信噪比 SNR 与反射率因子 Z 的关系如图 6 所示. 从图 6 可以看出, 若要求回波信噪比大于 0 dB, 多普勒雷达的单脉冲探测灵敏度为 -19.5 dBZ; 当脉冲积累数为 256 时, 可以探测到 -31.5 dBZ 的云.

另外, 星载 W 波段多普勒雷达探测会受到地杂波的影响, 其中高度线杂波由于接收时间的不同能够清晰分辨, 而旁瓣杂波的影响能够通过天线设计进行抑制, 因此主瓣杂波对大气探测的影响最大, 如图 7 所示, 当雷达某个发射脉冲接近地表时, 地表处的 C 点为地杂波首次被探测到的位置, 此时 C 点处的地杂波开始与 F 点处的气象目标信号出现在同一个距离门内而产生混叠^[30]. 根据星载观测几何 (图 7) 计算得出, 主瓣杂波区最大高度 H_{gmd} 为 0.49 km, 主瓣杂波区最小高度为 0, 即地表^[31]. 由于垂向分辨率为 0.37 km, 则主瓣的地杂波会影响靠近地面两个距离门的大气探测数据, 因此仿真中探测最小离地距离为 0.74 km.

1.3 回波信号的多普勒频率和相位

回波信号相位仿真需要径向速度数据提供多普勒频率信息, 径向速度需要结合观测几何 (图 5) 和大气风场数据进行求解. 径向速度包括卫星平台的运动速度、水平风速和垂直风速. 假设卫星处于升轨向 (由南向北运动), 观测方向沿顺轨向.

仿真中卫星平台速度 v_p 为 $7.6 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, 其径向分量可以表示为

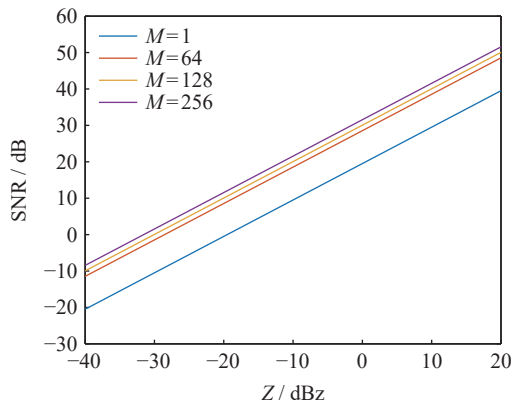


图 6 信噪比与反射率因子的关系

Fig. 6 Relation between SNR and reflectivity factor

$$v_{\text{pr}} = v_p \cos \varphi \sin \alpha. \quad (19)$$

其中, φ 表示卫星方位角, α 表示卫星俯仰角.

此外, v_U 表示风速在东西方向上的分量, 指向东方的风速为正; v_V 表示风速在南北方向上的分量, 指向北方的风速为正; 垂直速度 v_W 向上为正. 则径向风速 v_{wr} 可以表示为^[15,32,33]

$$v_{\text{wr}} = v_V \cos \varphi \sin \alpha - v_U \sin \varphi \sin \alpha + v_W \cos \alpha. \quad (20)$$

总的径向速度 v 由卫星平台速度和风速的径向分量累加得到, 可以表示为

$$v = v_{\text{pr}} + v_{\text{wr}}. \quad (21)$$

由式 (21) 可以计算出每一层的径向速度, 将该径向速度输入式 (3) 可以得到多普勒频率, 并作为回波信号模型相位的输入.

1.4 基于回波信号的径向速度参数估计

对于 W 波段多普勒雷达回波信号的径向速度参数估计, 为了满足足够的探测范围 (最大无模糊距离), 对于 0~20 km 高度范围分布的云, 接收窗长度至少为 $133.3 \mu\text{s}$, 如果采用传统的脉冲对 (Pulse Pair Processing, PPP) 算法估计径向速度, 则对应的最大无模糊速度为 $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[15].

利用 ERA5 再分析数据中 2019—2023 年 U 风和 V 风的月数据, 并对春 (3—5 月)、夏 (6—8 月)、秋 (9—11 月)、冬 (12, 1, 2 月) 四个季节按月进行平均, 统计了近五年来 0~20 km 高度上的大气风场水平风速范围, 如图 8 所示.

图 8 是 2019—2023 年春夏秋冬四个季节大气层

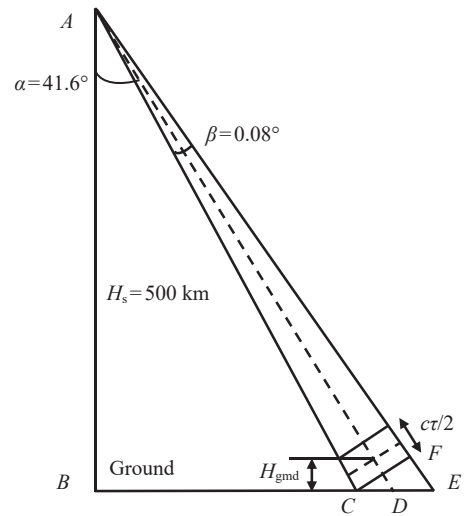


图 7 星载观测几何

Fig. 7 Spaceborne observation geometry

0~20 km 高度上月平均水平风风速的统计情况. 可以看出, 0~20 km 的大气中, 水平风速一般分布在 0~40 m·s⁻¹ 的范围内; 在极端天气情况下, 风速可达到 80 m·s⁻¹ 左右, 而这样的风速极值一般在十几千米的高空出现.

根据上述分析, 采用传统的脉冲对算法无法满足 0~40 m·s⁻¹ 水平风速的探测需求. 为了提高最大不模糊速度的范围, 采用 PDPP 算法估计径向风速, 该算法利用正交极化信号之间的隔离来防止回波重叠. PDPP 算法主要通过 H 和 V 脉冲信号的相关性来估计径向速度, 记 H-V 脉冲对和 V-H 脉冲对的相关函数分别为 R_{HV} 和 R_{VH} , 脉冲间隔分别为 T_{HV} 和 T_{VH} , 其中 $T_{HV} = T_{VH}$, 则平均速度的估计可以表示为^[15]

$$\hat{v}_{\text{mean}} = \frac{\lambda}{4\pi T_{HV}} \arctan \left(\frac{\text{Im} \left\{ \sqrt{R_{HV}(T_{HV}) R_{VH}(T_{VH})} \right\}}{\text{Re} \left\{ \sqrt{R_{HV}(T_{HV}) R_{VH}(T_{VH})} \right\}} \right). \quad (22)$$

当 $T_{HV} = 20 \mu\text{s}$ 时, 最大不模糊速度为 40 m·s⁻¹, 能够适应真实大气风场一般情况下的风速探测范围.

2 回波信号仿真实验

2.1 数据和实验设计

使用欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 第五代再分析数据 (ERA5) 进行回波信号仿真. 数据的空间范围为 5°N–25°N, 110°W–130°W, 时间为 2018 年 7 月 11 日 21:00 UTC. 仿真中使用的 ERA5 廓线数据参数包括大气温度、绝对湿度、气压、云液水含量、云冰水含量、U 风速、V 风速和垂直速度, 高度为 50~1000 hPa. 数据水平分辨率为 0.25°×0.25°, 仿真区域范围内共有 81×81 即 6561 组数据. 对原始的 ERA5 数据进行垂直方向上的线性插值处理, 插值后径向分辨率为 500 m, 垂直方向层数为 58 层, 即每条风廓线共有 58 个数据点.

根据前文图 1 所示, 在回波信号仿真系统中输入 ERA5 的大气廓线数据集, 得到真实云场景的回波信号和径向风速估计结果. 其中, 大气温度、绝对湿度、气压、云液水含量、云冰水含量的廓线数据用于计算

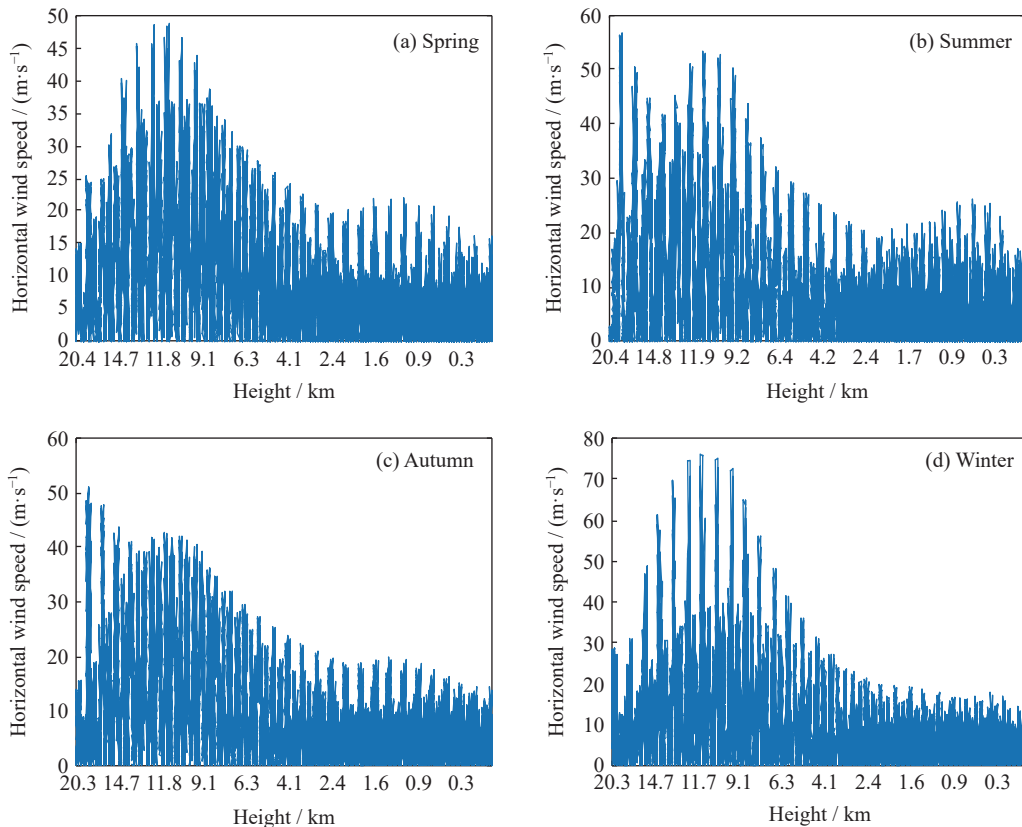


图 8 2019–2023 年全球 0~20 km 高度上月平均水平风速

Fig. 8 Global average monthly horizontal wind at 0~20 km height during 2019–2023

真实云场景的反射率因子、衰减系数,并结合星载观测几何和雷达系统参数,进行回波信号的幅度估计;根据 ERA5 的 U 风速、V 风速、垂直风速的廓线数据、星载平台运动速度,结合星载观测几何进行回波信号的相位估计;将回波信号幅度和相位估计结合得到完整的多普勒雷达回波信号,并利用 PDPP 算法根据回波信号的相位信息估计径向风速。

2.2 真实云场景回波仿真结果

将 2.1 节所选区域的大气廓线数据输入回波信号仿真系统中,得到真实云场景的仿真结果,如图 9~11 所示.该仿真中脉冲累积数 M 设置为 256。

图 9 给出了有云区域内的反射率因子仿真结果.其中,图 9(a) 为所有区域内云场景反射率因子,图 9(b) 为整体云场景中选取的小范围云场景 (图 9a 中黑色矩形框) 的反射率因子.可以看出,该云场景中云高度基本分布于 2~16 km。

将有云区域内的真实径向风速和估计径向风速作对比,如图 10 所示。

图 10(a) 给出了由 ERA5 风场数据计算得到的有云区域内的真实径向风速,图 10(c) 给出了有云区域内由回波信号仿真系统估计得到的径向风速,图 10(b)(d) 分别为图 10(a)(c) 的区域放大图 (见图 10a, c 中黑色矩形框).其中,径向风速范围在 $-15 \sim 15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,正负号表示径向风速的方向 (以观测点沿波束中心向地面的直线方向为正方向),高度范围在 0~20 km.可以看出,估计的径向风速与真实径向风速有很好的 consistency.为了进一步评估估计径向风速的精度,将真实径向风速与估计的径向风速作差,

得到径向风速估计误差,如图 11(a)(b) 所示;再分别计算每点的信噪比,如图 11(c)(d) 所示.其中,图 11(b)(d) 分别为图 11(a)(c) 的整体云场景的区域放大图 (见图 11a, c 中黑色矩形框).可以看出,径向风速估计误差大部分在 $-1 \sim 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 内,极少数点大于 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,这主要是由于该区域的信噪比较低,如图 11 所示.为了分析信噪比对径向风速估计精度的影响,进一步开展了不同信噪比情形下径向风速估计精度的对比研究。

3 信噪比和脉冲累积数对径向风速估计精度影响的分析

影响 PDPP 算法多普勒速度估计精度的因素包括信噪比、脉冲累积数、雷达系统参数 H-V 脉冲对间隔和脉冲重复周期、H-V 脉冲之间的极化串扰效应和气象目标的谱展宽^[15].这里将分析信噪比和脉冲累积数对星载多普勒雷达径向风速估计精度的影响.关于极化串扰效应和速度谱展宽对径向风速估计精度的影响,将在后续研究中进一步分析。

脉冲累积数分别为 1, 64, 128, 256 时,径向风速误差随信噪比的变化如图 12 所示。

图 12 给出所选区域不同信噪比条件下径向风速估计误差的分布情况.可以看出,脉冲累积数为 1 时,信噪比最小值为 -13 dB;脉冲累积数为 64 时,信噪比均不小于 -4 dB;脉冲累积数为 128 时,信噪比均不小于 -3 dB;脉冲累积数为 256 时,信噪比均不小于 0 dB.可以看出,随着脉冲累积数的增加,同一云场

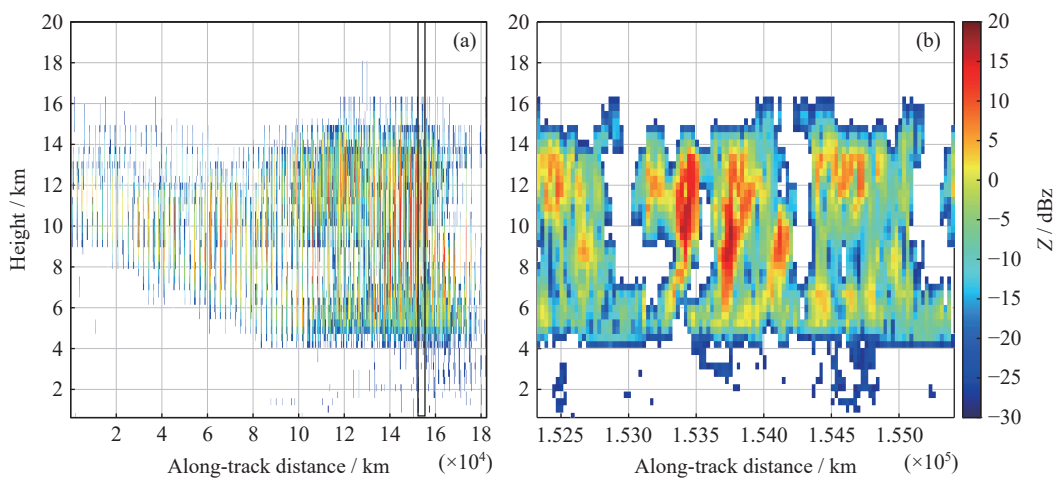


图 9 云反射率因子. (a) 整体云场景, (b) 局部放大图

Fig. 9 Cloud reflectivity factor. (a) Full cloud scene, (b) enlarged view of the highlighted region

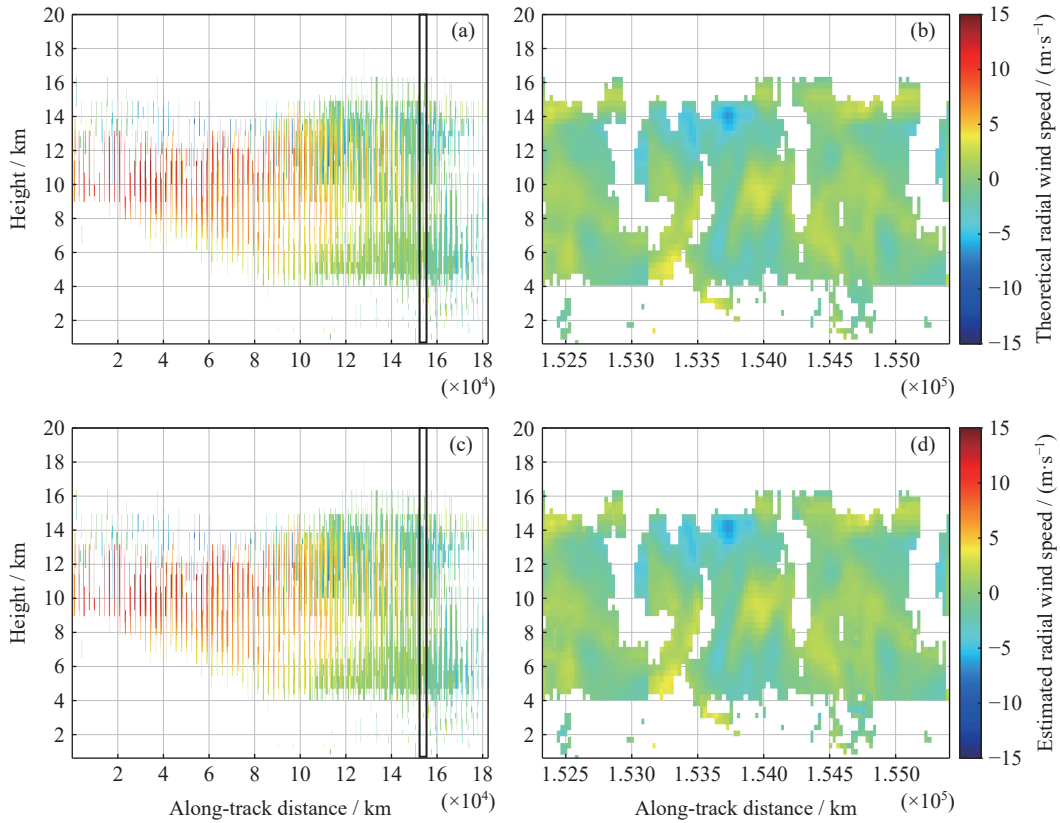


图 10 (a) 整体云场景的理论径向风速, (b) 理论径向风速的局部放大, (c) 整体云场景的估计径向风速, (d) 估计径向风速的局部放大

Fig. 10 (a) Theoretical radial wind speed for full cloud scene, (b) enlarged view of the theoretical radial wind speed for the highlighted region, (c) estimated radial wind speed for full cloud scene, (d) enlarged view of the estimated radial wind speed for the highlighted region

景的 SNR 增大, 径向风速估计误差减小. 此外, 当 SNR 为定值时, 可以看出, 随着脉冲累积数的增大, 径向风速估计误差减小; 当脉冲累积数为定值时, 随着 SNR 的增大, 径向风速估计误差减小, 这表明径向风速估计误差随着脉冲累积数和信噪比的增大而减小. 当脉冲累积数为 256, SNR 不小于 4 dB 时, 所有数据的径向风速估计误差均小于 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

进一步计算得到不同脉冲累积数和不同信噪比条件下, 径向风速估计误差的均值、均方根误差 (Root Mean Squared Error, RMSE) 和 95% 置信区间, 结果如图 13 所示.

从图 13 中可以看出, 同一脉冲累积数条件下, RMSE 随着信噪比的增大而减小; 当 SNR 相同时, RMSE 随着脉冲累积数的增加而减小; 当 SNR 为 0 dB, 脉冲累积数为 1 时, RMSE 为 $2.48 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 当 SNR 为 0 dB, 脉冲累积数为 64 时, RMSE 为 $1.34 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 能够达到 NWP 要求的 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 测速精度. 此

外, 当脉冲累积数大于 64 后, 随着脉冲累积数的增加, 速度估计精度的提高不明显. 然而当脉冲累积数增加时, 测量数据的水平分辨率会变差, 因此对于 M 的取值需要折中考虑.

4 结论与展望

本文建立了星载 W 波段多普勒雷达云内大气风场探测信号仿真系统, 利用该系统开展了真实云场景回波的仿真, 并分析了信噪比和脉冲累积数对径向风速测量精度的影响. 结果表明: 对于星载 W 波段多普勒雷达, 利用 PDPP 算法估计径向风速能够同时得到高的无模糊速度和大的无模糊距离, 当极化脉冲间隔不大于 $20 \mu\text{s}$ 时, 该算法能够实现 $0 \sim 40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速探测范围, 获取云内的高风速产品; W 波段云水反射率因子一般在 $-40 \sim -8 \text{ dBz}$, 云冰反射率因子一般在 $-20 \sim 20 \text{ dBz}$; 在本文雷达系统指标条件下, 当 SNR

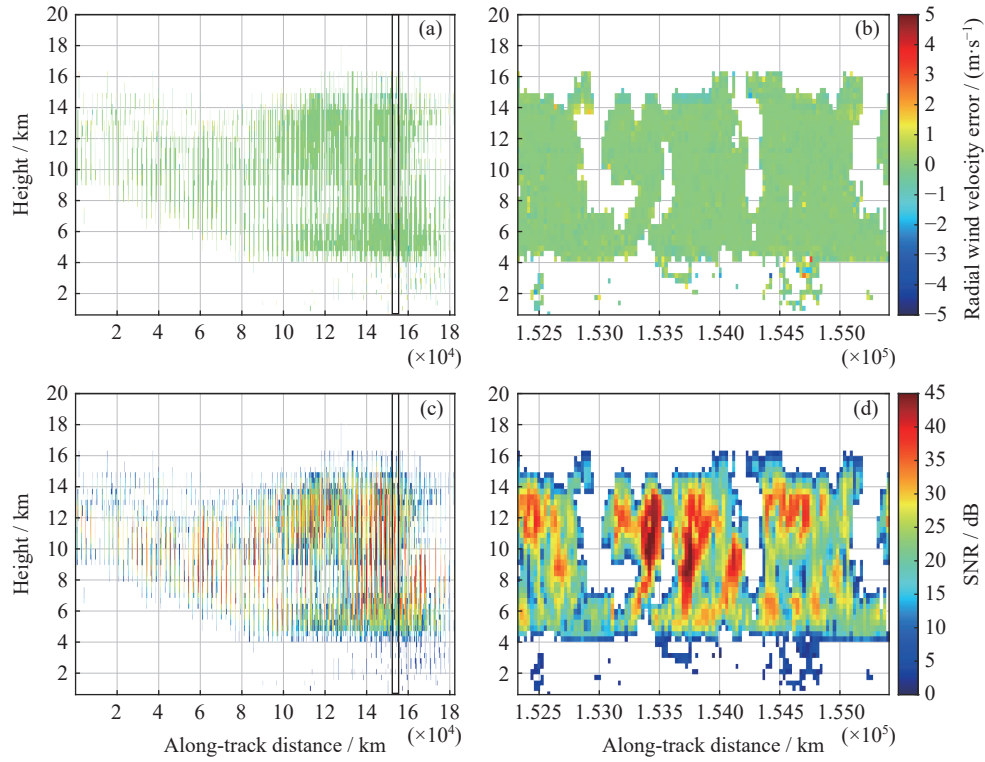


图 11 (a) 整体云场景的径向风速误差, (b) 径向风速误差的局部放大, (c) 整体云场景的信噪比, (d) 信噪比的局部放大

Fig. 11 (a) Radial wind speed error for full cloud scene, (b) enlarged view of the radial wind speed error for the highlighted region, (c) Signal-to-Noise ratio for full cloud scene, (d) enlarged view of the Signal-to-Noise ratio for highlighted region

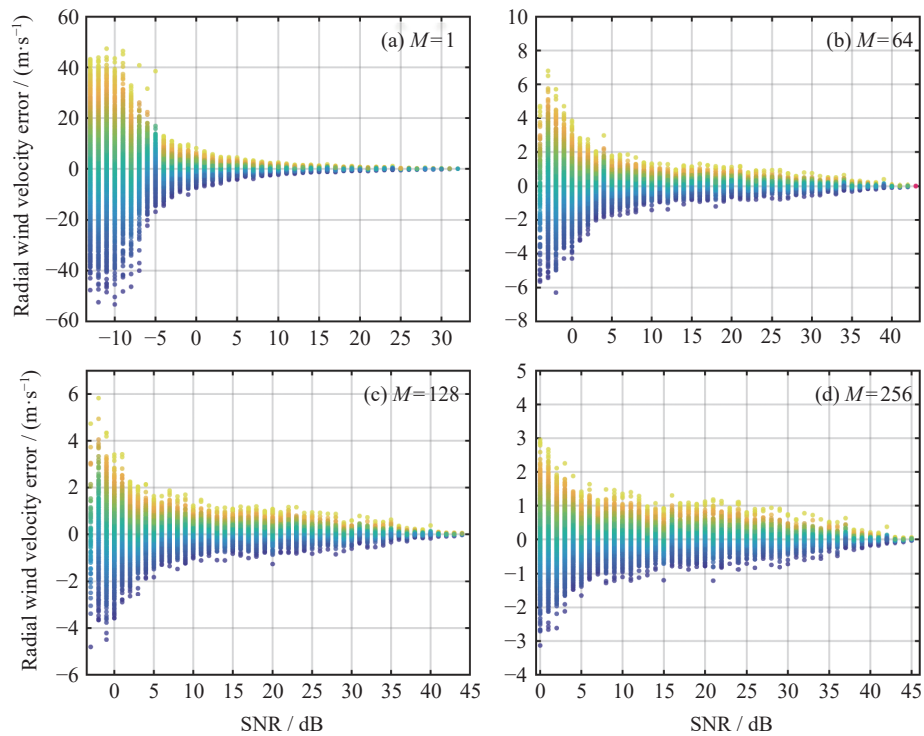
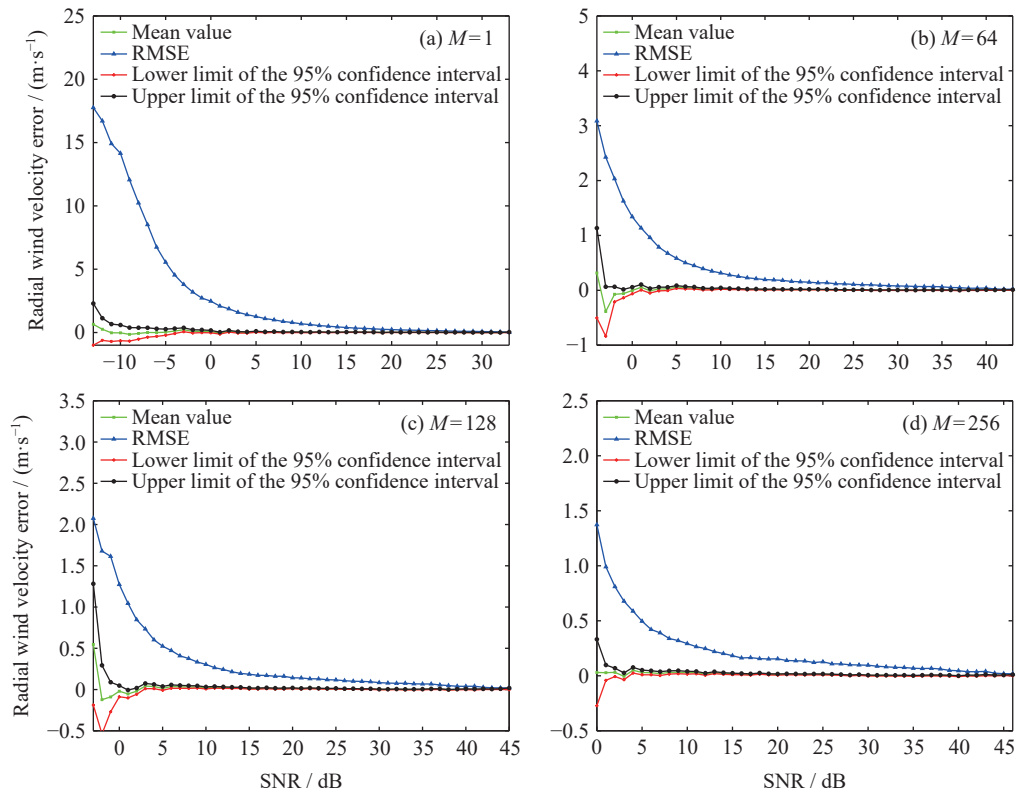


图 12 径向风速估计误差随信噪比 SNR 和脉冲累积数 M 的变化

Fig. 12 Variation of radial wind speed estimation error with Signal-to-Noise ratio and pulse accumulation M

图 13 径向风速估计误差的统计分析结果随信噪比 SNR 和脉冲累积数 M 的变化Fig. 13 Statistical analysis results of radial wind speed estimation error with respect to variations in Signal-to-Noise ratio and pulse accumulation M

为 0 dB, 脉冲累积数为 64 时, 径向风速估计的均方根误差为 $1.34 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 满足数值天气预报要求的 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 测速精度; 信噪比和脉冲累积数会影响径向风速估计精度, 信噪比或脉冲累积数越大, 径向风速估计精度越高; 脉冲累积数大于 64 后, 随脉冲累积数的增加, 速度估计精度的提高不明显, 但同时测量数据的水平分辨率会变差, 需要折中考虑脉冲累积数的取值。

本文研究对星载 W 波段多普勒雷达探测指标论证具有重要意义, 后续将深入分析速度谱和退极化比对回波信号相位的影响, 完善回波信号仿真系统, 并进一步分析非均匀波束充塞对速度估计精度的影响。

参考文献

- [1] TRIDON F, BATTAGLIA A, RIZIK A, *et al.* Filling the gap of wind observations inside tropical cyclones[J]. *Earth and Space Science*, 2023, **10**(11): e2023EA003099
- [2] CHEN J F, XIE C B, JI J, *et al.* Performance evaluation and error tracing of rotary rayleigh Doppler wind LiDAR[J]. *Photonics*, 2024, **11**(5): 398
- [3] 张文建. 世界气象组织全球综合观测系统 (WIGOS) 空间部分 2040 年远景发展规划的解读 [J]. 气象科技进展, 2016, **6**(1): 135-145
- [4] ILLINGWORTH A J, BATTAGLIA A, BRADFORD J, *et al.* WIVERN: a new satellite concept to provide global in-cloud winds, precipitation, and cloud properties[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2018, **99**(8): 1669-1687
- [5] FENG Yutao, FU Di, ZHAO Zengliang, *et al.* An overview of spaceborne atmospheric wind field measurement with passive optical remote sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, **43**(6): 0601011 (冯玉涛, 傅頔, 赵增亮, 等. 星载被动光学遥感大气风场探测技术进展综述 [J]. *光学学报*, 2023, **43**(6): 0601011)
- [6] ZHAO Xinyu, MIN Jinzhong, ZHU Lijian, *et al.* Application of wind profiler radar data: quality assessment[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2023, **46**(3): 453-465 (赵新宇, 闵锦忠, 朱利剑, 等. 风廓线雷达资料的应用: 质量评估 [J]. *大气科学学报*, 2023, **46**(3): 453-465)
- [7] STOFFELEN A, BENEDETTI A, BORDE R, *et al.* Wind profile satellite observation requirements and capabilities[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2020, **101**(11): E2005-E2021
- [8] LIU Zili, YANG Jiajun, WANG Wenjing, *et al.* Cloud detection methods for remote sensing images: a survey[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2023, **43**(1): 1-17 (刘子力, 杨家俊, 王文静, 等. 遥感图像云检测方法综述 [J]. *中国空间科学技术*, 2023, **43**(1): 1-17)

- [9] LACHLAN-COPE T. Antarctic clouds[J]. *Polar Research*, 2010, **29**(2): 150-158
- [10] GAO Lei. Design and Implementation of W-Band Cloud Radar System[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018 (高磊. W 波段测云雷达系统设计与实现 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2018)
- [11] EISINGER M, MARNAS F, WALLACE K, *et al.* The EarthCARE mission: science data processing chain overview[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2024, **17**(2): 839-862
- [12] DONOVAN D P, VAN ZADELHOFF G J, WANG P. The EarthCARE lidar cloud and aerosol profile processor (A-PRO): the A-AER, A-EBD, A-TC, and A-ICE products[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2024, **17**(17): 5301-5340
- [13] SCARSI F E, BATTAGLIA A, TRIDON F, *et al.* Mispointing characterization and Doppler velocity correction for the conically scanning WIVERN Doppler radar[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2024, **17**(2): 499-514
- [14] BATTAGLIA A, MARTIRE P, CAUBET E, *et al.* Observation error analysis for the WInd VELOCITY Radar Nephoscope W-band Doppler conically scanning spaceborne radar via end-to-end simulations[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2022, **15**(9): 3011-3030.
- [15] LIU Shunfei, ZHU Di, DONG Xiaolong. Study and simulation on measurement of atmospheric wind field in cloud by spaceborne Doppler radar[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2023, **38**(4): 903-912 (刘顺飞, 朱迪, 董晓龙. 星载多普勒雷达云中大气风场测量仿真研究 [J]. 遥感技术与应用, 2023, **38**(4): 903-912)
- [16] ZHANG J Y, DONG X L, ZHU D. Analysis of Doppler spectrum of a spaceborne Doppler scatterometer using an echoed signal simulation model[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2023, **44**(16): 4883-4910
- [17] FUKAO S, HAMAZU K. Radar measurements and scatterer parameters[M]//FUKAO S, HAMAZU K. Radar for Meteorological and Atmospheric Observations. Tokyo: Springer, 2014
- [18] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 雷达气象学 [M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 2001
- [19] RAY P S. Broadband complex refractive indices of ice and water[J]. *Applied Optics*, 1972, **11**(8): 1836-1844
- [20] WARREN S G, BRANDT R E. Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave: a revised compilation[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, **113**(D14): D14220
- [21] MÄTZLER C. Thermal Microwave Radiation: Applications for Remote Sensing[M]. London: The Institution of Engineering and Technology, 2006
- [22] BRINGI V N, CHANDRASEKAR V. Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001
- [23] HEYMSFIELD A J, SCHMITT C, BANSEMER A. Ice cloud particle size distributions and pressure-dependent terminal velocities from in situ observations at temperatures from 0° to -86°C[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2013, **70**(12): 4123-4154
- [24] MILES N L, VERLINDE J, CLOTHIAUX E E. Cloud droplet size distributions in low-level stratiform clouds[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2000, **57**(2): 295-311
- [25] YIN J F, WANG D H, ZHAI G Q. Long-term in situ measurements of the cloud-precipitation microphysical properties over East Asia[J]. *Atmospheric Research*, 2011, **102**(1/2): 206-217
- [26] 林正健. 星载毫米波雷达正演仿真研究及敏感性分析 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2023
- [27] LEINONEN J. High-level interface to *T*-matrix scattering calculations: architecture, capabilities and limitations[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(2): 1655-1660
- [28] LIEBE H J. An updated model for millimeter wave propagation in moist air[J]. *Radio Science*, 1985, **20**(5): 1069-1089
- [29] 张培昌, 王振会. 大气微波遥感基础 [M]. 北京: 气象出版社, 1995
- [30] REN Zhengjiang, WU Di, GAO Mingyang, *et al.* Three-dimensional space-time adaptive processing algorithm of ground clutter suppression for airborne weather radar[J]. *Modern Radar*, 2021, **43**(2): 11-19 (任郑江, 吴迪, 高铭阳, 等. 基于三维 STAP 算法的机载气象雷达地杂波抑制 [J]. 现代雷达, 2021, **43**(2): 11-19)
- [31] MING Wenhua. Clutter computation and analysis of spaceborne precipitation radar[J]. *Radar Science and Technology*, 2009, **7**(3): 189-193, 204 (明文华. 星载降水测量雷达杂波计算与分析 [J]. 雷达科学与技术, 2009, **7**(3): 189-193, 204)
- [32] WANG Y X, WEI M, WANG Z H, *et al.* Novel scanning strategy for future spaceborne Doppler weather radar with application to tropical cyclones[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, **10**(6): 2685-2693
- [33] BATTAGLIA A, DHILLON R, ILLINGWORTH A. Doppler W-band polarization diversity space-borne radar simulator for wind studies[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, **11**(11): 5965-5979

作者简介



叶 哈 (第一作者) 女, 1999 年出生于安徽省黄山市, 现为中国科学院大学国家空间科学中心硕士研究生。主要从事微波遥感探测技术等方面的研究。
E-mail: yehan22@mailsucas.ac.cn



董晓龙 (通信作者) 男, 1969 年出生于陕西省渭南市, 现为中国科学院大学国家空间科学中心研究员, 博士生导师。主要从事新型微波遥感探测与成像及微波遥感信息获取的方法与技术研究。
E-mail: dongxiaolong@mirslab.cn