

星载激光雷达数据海面风速反演模型研究

张馨毅¹, 吴东^{1,2*}, 杨振威¹, 贺岩³¹中国海洋大学信息科学与工程学部海洋技术学院, 山东 青岛 266100;²青岛海洋科学与技术试点国家实验室区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266237;³中国科学院上海光学精密机械研究所中国科学院空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800

摘要 使用 2017 年 10 月、2018 年 1 月、2018 年 4 月和 2018 年 7 月 Version 4.10 星载激光雷达 CALIOP Level 1B 和 Version 4.20 Level 2 的日夜数据反演全球海面风速, 选用准同步观测的 Version 8.2 AMSR-2 的海面风速值进行对比。在前人利用 CALIOP 无云数据进行海面风速反演的基础上, 进一步将透明云层的数据用于风速反演, 在明显增加数据量的同时, 保持了相当的反演精度。探究不同的海面斜率分布模型的差异对 CALIOP 海面风速反演的影响, 给出了夜间和日间有透明云层条件下的近似 Gram-Charlier 模型。结果显示, 高斯模型整体的误差相对较小, 但近似 Gram-Charlier 模型修正了偏度和峰度的影响, 在较低风速(小于 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)和较高风速(大于 $13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)情况下表现更好。采用有透明云层条件下的近似 Gram-Charlier 模型: 利用 2017 年 10 月、2018 年 1 月、2018 年 4 月和 2018 年 7 月的夜间数据反演的标准偏差分别为 $1.22, 1.33, 1.20, 1.39 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 相关系数分别为 $0.92, 0.91, 0.92, 0.90$; 利用日间数据反演的标准偏差分别为 $1.41, 1.45, 1.86, 1.69 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 相关系数分别为 $0.90, 0.89, 0.86, 0.87$ 。

关键词 遥感; 星载激光雷达; 海面后向散射; 海面风速; 海面斜率分布

中图分类号 P733.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1828007

Models of Sea Surface Wind Speed Retrieval by Spaceborne Lidar Data

Zhang Xinyi¹, Wu Dong^{1,2*}, Yang Zhenwei¹, He Yan³

¹Department of Marine Technology, Faculty of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China;

²Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, Shandong, China;

³Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Daytime and nighttime spaceborne lidar data from CALIOP Version 4.10 Level 1B and Version 4.20 Level 2 products are used to retrieve sea surface wind speed globally in October 2017, January 2018, April 2018, and July 2018. The quasi-synchronous sea surface wind speed observed by the Version 8.2 AMSR-2 product is selected for comparison. Based on the previous studies of sea surface wind speed which focused on the cloud-free data of CALIOP, the data of transparent cloud layers are further used for the retrieval of sea surface wind speed, and the retrieval accuracy maintains the same level when the data is added significantly. The effects of differences between different sea surface slope distribution models on the retrieval of sea surface wind speed by CALIOP are explored. Furthermore, the Gram-Charlier approximation model with transparent cloud layers at daytime and nighttime is given. Results show that the Gaussian model has relatively small error, while the Gram-Charlier approximation model corrects the effect of kurtosis and skewness, and has better performance when wind speed is low ($<3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) or high ($>13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). According to results of the Gram-Charlier approximation model with transparent cloud layers, the standard deviations of nighttime data in October 2017, January 2018, April 2018, and July 2018 are $1.22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $1.33 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $1.20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, and $1.39 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively, and the correlation coefficients are 0.92 , 0.91 , 0.92 , and 0.90 , respectively. The standard deviations of the daytime data are $1.41 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $1.45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $1.86 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, and $1.69 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively, and the correlation coefficients are 0.90 , 0.89 ,

收稿日期: 2022-01-27; 修回日期: 2022-03-21; 录用日期: 2022-04-21

基金项目: 中国科学院空间激光信息传输与探测技术重点实验室开放基金

通信作者: *dongwu@ouc.edu.cn

0.86, and 0.87, respectively.

Key words remote sensing; spaceborne lidar; sea surface backscatter; sea surface wind speed; sea surface slope distribution

1 引言

云-气溶胶激光雷达和红外探测者观测卫星 CALIPSO 搭载的正交偏振云-气溶胶激光雷达 CALIOP 是一种高精度的主动式光学卫星传感器,具有高分辨率的特点^[1]。利用 CALIOP 星载激光雷达数据可以实现星载激光高分辨率海面风速反演,为全球高分辨率的海面风速数据提供新的数据源。

Barrick 和 Bahar^[2-3]推导出了雷达后向散射截面与入射角和粗糙表面均方斜率的理论关系。Bufton 等^[4]进行了早期的机载激光雷达海面后向散射的测量实验。Menzie 等^[5]基于 LITE 航天飞机飞行实验,说明了机载激光雷达可以通过测量海面后向散射来反演海面风速。Cox 和 Munk^[6]发现当假设海面斜率是各向同性的高斯分布时,海面均方斜率随着海面风速的增大呈线性增长,考虑到海面的上/下风向的偏度和峰度,给出了更接近真实情况的海面斜率的二维 Gram-Charlier 分布的多项式公式。人们基于海面斜率分布的高斯模型和 Gram-Charlier 模型在 CALIOP 激光雷达海面风速反演的应用上开展了深入的研究。

Hu 等^[7]使用 CALIOP 的带有少量气溶胶负载的夜间无云数据和 AMSR-E 数据进行海面风速反演,基于高斯模型,给出了 CALIOP 的海面后向散射系数与海面均方斜率的关系式。同时,结合 Cox 和 Munk^[6]、Wu^[8]的海面均方斜率与海面风速的关系式,给出了优化后的三段式关系公式。吴东等^[9]在文献^[7]的研究基础上,进一步将 CALIOP 的大气气溶胶光学厚度数据应用于大气双程透过率的计算,使得具有较显著的气溶胶负载的数据反演成为可能,大大提高了数据可利用性,并将该方法应用到星载激光雷达数据估算海气交换速率中^[10]。同时,对激光雷达的单脉冲测量数据进行了 5 km 滚动平均处理,减少了测量数据中噪声的影响。丁红波等^[11]研究了激光雷达信号的去噪方法,指出增加脉冲累积数可以有效减弱回波信号波动,提高信噪比。孙雨辰等^[12]指出了 CALIOP 的日间数据也可用于海面风速反演,但由于日间数据受到太阳背景光等的影响,信噪比较差,故风速反演的精度有待提高。He 等^[13]选取了 23°S~40°S 的 CALIOP 的夜间无云数据和 AMSR-E 的数据拟合了基于 Gram-Charlier 模型的四次多项式,由于该多项式不具有单调性,故实际应用中出现了一个激光雷达海面后向散射系数对应两个海面风速的多值问题。Cox 和 Munk^[6]给出的 Gram-Charlier 多项式也存在同样的多值问题。杨振威^[14]利用 2011 年 1 月、2011 年 4 月、2011 年 7 月和 2010 年 10 月 4 个月的夜间无云数据分别拟合了基于 Gram-Charlier 模型的二次多项式,有效地避免了 Cox 和 Munk^[6]、He 等^[13]的四次多项式的多值问题,且能更准

确地进行海面风速的反演。

总的来说,前人对 CALIOP 数据进行海面风速反演的应用仅限于无云数据,并选用了基于海面斜率分布的高斯模型和 Gram-Charlier 模型展开研究。本文在此基础上研究了 CALIOP 的透明云层数据用于风速反演的能力,以增加数据可利用性。同时,对两种海面斜率分布模型的应用进行了比较,可为未来的星载激光雷达数据海面风速反演的应用提供参考。

2 探测原理与模型

星载激光雷达 CALIOP 发射 532 nm 和 1064 nm 波长的激光,激光以小角度近似垂直入射到海面。激光经过双程的大气衰减,星载激光雷达接收到海面的后向散射信号,并对信号进行后处理生成三个通道的激光雷达后向散射信号。产品中给出了 532 nm 垂直通道和平行通道总的后向散射信号、532 nm 垂直通道的后向散射信号,以及 1064 nm 通道的后向散射信号。文中选取 532 nm 垂直通道和平行通道总的后向散射信号进行研究。

2.1 海面风速与激光后向散射

CALIOP 的海面后向散射系数 γ ^[9]的表达式为

$$\gamma = \beta'(0)/T^2(0), \quad (1)$$

式中: $\beta'(0)$ 由 CALIOP 的后向散射信号 β' 的海面所在分辨单元的前一个分辨单元到后三个分辨单元积分得到; $T^2(0)$ 为海面处的大气双程透过率。

对于大气双程透过率 T^2 的计算^[9],考虑了大气中的分子、臭氧、云和气溶胶的影响,其表达式为

$$\begin{cases} T^2(z) = \exp\left[-2 \int_z^{z_{\text{sat}}} \tau(z') dz'\right] \\ \tau(z) = \tau_m(z) + \tau_{\text{o}_3}(z) + \tau_c(z) + \tau_a(z), \\ T^2(z) = T_m^2(z) T_{\text{o}_3}^2(z) T_c^2(z) T_a^2(z) \end{cases} \quad (2)$$

式中: z 为海拔高度; z_{sat} 为卫星的海拔高度; τ 为消光系数,可从 CALIOP 产品中获得;分子、臭氧、云和气溶胶的贡献分别用下标 m、o₃、c 和 a 区分。

2.2 海面斜率分布模型

基于海面斜率各向同性的高斯分布模型^[2,4-5,15-16]假设,CALIOP 星载激光雷达的海面后向散射系数与海面均方斜率的关系^[7,13,17]可表示为

$$\gamma = \frac{\rho}{4\pi\sigma^2 \cos^4\theta} \exp\left(-\frac{\tan^2\theta}{\sigma^2}\right), \quad (3)$$

式中: σ 为海面斜率的标准偏差; σ^2 为海面均方斜率; ρ 为菲涅耳反射系数,对于小角度入射角,在 532 nm 波段处, $\rho \approx 0.0209$,在 1064 nm 波段处, $\rho \approx 0.0193$; θ 为激光入射角。CALIOP 的天底角 θ_1 为 3°,当海面波的斜率为 $\tan\theta = \tan\theta_1$ 时,即激光入射角等于天底角时,

CALIOP 才能接收到海面后向散射的镜面反射信号。

在开阔海域中,海面斜率分布并不是严格的高斯分布,高斯分布适用于海面风速不是太大或太小的情况。当风速很小时,海面斜率处于发展状态,偏度和峰度显得非常重要。当风速很大时,高斯分布显然不再适用。Cox 和 Munk^[6]考虑了峰度和偏度,提出了更贴近实际情况的 Gram-Charlier(以下简称 GC)分布多项式关系式。He 等^[13]使用了 CALIOP 和 AMSR-E 的数据,利用 Cox 和 Munk 给出的风速关系式计算海面粗糙度,选取 23°S~40°S 的数据拟合了基于 GC 模型的 $\Delta_{\text{He}}(1/\sigma)$ 与 $1/\sigma$ 的四次多项式,即

$$\Delta_{\text{He}}\left(\frac{1}{\sigma}\right) = -0.0002\left(\frac{1}{\sigma}\right)^4 + 0.0076\left(\frac{1}{\sigma}\right)^3 - 0.1008\left(\frac{1}{\sigma}\right)^2 + 0.4780\left(\frac{1}{\sigma}\right) - 0.8232, \quad (4)$$

式中: $\Delta_{\text{He}}(1/\sigma)$ 是以 $1/\sigma$ 为变量的对高斯模型的修正项。当不考虑白帽和水下多次散射时,修正偏度和峰度后 CALIOP 的海面后向散射系数^[13]为

$$\gamma = \frac{\rho}{4\pi\sigma^2 \cos^4\theta} \exp\left(-\frac{\tan^2\theta}{\sigma^2}\right) \left[1 + \Delta_{\text{He}}\left(\frac{1}{\sigma}\right)\right]. \quad (5)$$

杨振威^[14]利用 2010 年 10 月、2011 年 1 月、2011 年 4 月和 2011 年 7 月的夜间 CALIOP 数据和 AMSR-E 风速数据,选取 23°S~40°S 区域,大气后向散射积分值最小的前 4% 的无云大气,基于 GC 模型进行二次多项式拟合,拟合的多项式在 60°N~60°S 范围内的风速反演中具有良好的适应性,避免了 He 等^[13]的四次多项式造成的多值现象,得到无云条件下的夜间 2010 年 10 月、2011 年 1 月、2011 年 4 月和 2011 年 7 月的 $\Delta_{\text{Yang}}(1/\sigma)$ 与 $1/\sigma$ 的二次多项式为

$$\Delta_{\text{Yang}}\left(\frac{1}{\sigma}\right) = \begin{cases} 0.0045\left(\frac{1}{\sigma}\right)^2 - 0.1536\left(\frac{1}{\sigma}\right) + 0.6451, & \text{time is October 2010} \\ 0.0049\left(\frac{1}{\sigma}\right)^2 - 0.1620\left(\frac{1}{\sigma}\right) + 0.6938, & \text{time is January 2011} \\ 0.0048\left(\frac{1}{\sigma}\right)^2 - 0.1579\left(\frac{1}{\sigma}\right) + 0.6746, & \text{time is April 2011} \\ 0.0029\left(\frac{1}{\sigma}\right)^2 - 0.1268\left(\frac{1}{\sigma}\right) + 0.5568, & \text{time is July 2011} \end{cases}. \quad (6)$$

2.3 海面风速与均方斜率的关系

Cox 和 Munk^[6]、Hu 等^[7]给出的海面均方斜率与海面风速的经验关系式分别为

$$\sigma_{\text{Cox and Munk}}^2 \approx 0.003 + 0.00512U_{12.5}, \quad (7)$$

$$\sigma_{\text{Hu}}^2 = \begin{cases} 0.0146\sqrt{U_{10}}, & U_{10} < 7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \\ 0.003 + 0.00512U_{10}, & 7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \leq U_{10} < 13.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}, \\ 0.138\lg U_{10} - 0.084, & U_{10} \geq 13.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \end{cases}, \quad (8)$$

式中: $U_{12.5}$ 为海面上 12.5 m 处的风速,为方便比较,将其转换成海面上 10 m 处的风速值^[18],由于基于 GC 模型的多项式的拟合过程使用了式(7),为减少可能的误差,故仍将其应用到后续的近似 GC 模型的海面风速反演中; U_{10} 为海面上 10 m 处的风速,因式(8)为 Hu 等^[7]对式(7)的优化,故将其应用于高斯模型的海面风速反演中。

3 分析与讨论

使用 2017 年 10 月、2018 年 1 月、2018 年 4 月和 2018 年 7 月新版 Version 4.10 星载激光雷达 CALIOP Level 1B 和 Version 4.20 Level 2 的日夜数据反演全球海面风速,同时选用准同步观测的 Version 8.2 AMSR-2 海面风速值进行对比。数据经过质量控制,选择了全球区域内具有一定气溶胶负载的大气,并加入了透明云层的数据。

参考吴东^[9]的判定方法,采用大气后向散射积分

(IAB, M_{IAB}) 和(对流层)大气气溶胶双向透过率 T_a^2 共同判断大气清洁度,将筛选条件限定为 $M_{\text{IAB}} < 0.017 \text{ sr}^{-1}$, $T_a^2 > 0.8$ 。由于 CALIOP 的 V4 版本数据新增了平流层气溶胶的分类,故文中没有对平流层的气溶胶进行限制。根据 CALIOP Level 2 云产品中的不透明度标志对云进行分类,其值为 1 表示不透明层,值为 0 表示透明层。不透明度标志为 1 并不表示单个层实际上是不透明的,而是表示后向散射信号完全衰减,即单个层为与背景信号电平无法区分的层。文中使用的透明云层数据即为根据不透明度标志值为 0 进行判定的数据,云的消光系数可从 CALIOP 的云产品中获得,以便进行大气双程透过率的计算。

2017 年 10 月、2018 年 1 月、2018 年 4 月和 2018 年 7 月的夜间数据量分别为 1706648、1623547、1671525 和 1600302,其中透明云层的数据量占比分别约为 17.5%、18.9%、24.5% 和 17.5%。4 段时间相应的日间数据量分别为 1893716、1789778、2034478 和

1939976, 其中透明云层的数据量占比分别约为 13.5%、12.7%、14.6% 和 11.5%。数据处理的工作全部采用 MATLAB 软件编程实现。

3.1 基于 GC 模型的二次多项式拟合

使用 2017 年 10 月、2018 年 1 月、2018 年 4 月 和

2018 年 7 月的夜间数据进行基于 GC 模型的二次多项式拟合, 得到有透明云层条件下 4 段时间内夜间的 $\Delta_{\text{night}}(1/\sigma)$ 与 $1/\sigma$ 的二次多项式为

$$\Delta_{\text{night}}\left(\frac{1}{\sigma}\right) = \begin{cases} 0.0037\left(\frac{1}{\sigma}\right)^2 - 0.1332\left(\frac{1}{\sigma}\right) + 0.5770, \text{ time is October 2017} \\ 0.0044\left(\frac{1}{\sigma}\right)^2 - 0.1484\left(\frac{1}{\sigma}\right) + 0.6575, \text{ time is January 2018} \\ 0.0042\left(\frac{1}{\sigma}\right)^2 - 0.1442\left(\frac{1}{\sigma}\right) + 0.6277, \text{ time is April 2018} \\ 0.0039\left(\frac{1}{\sigma}\right)^2 - 0.1367\left(\frac{1}{\sigma}\right) + 0.5800, \text{ time is July 2018} \end{cases}, \quad (9)$$

有透明云层条件下 4 段时间内日间的 $\Delta_{\text{day}}(1/\sigma)$ 与 $1/\sigma$ 的二次多项式为

$$\Delta_{\text{day}}\left(\frac{1}{\sigma}\right) = \begin{cases} 0.0038\left(\frac{1}{\sigma}\right)^2 - 0.1371\left(\frac{1}{\sigma}\right) + 0.6202, \text{ time is October 2017} \\ 0.0037\left(\frac{1}{\sigma}\right)^2 - 0.1319\left(\frac{1}{\sigma}\right) + 0.6357, \text{ time is January 2018} \\ 0.0049\left(\frac{1}{\sigma}\right)^2 - 0.1564\left(\frac{1}{\sigma}\right) + 0.7411, \text{ time is April 2018} \\ 0.0045\left(\frac{1}{\sigma}\right)^2 - 0.1524\left(\frac{1}{\sigma}\right) + 0.7068, \text{ time is July 2018} \end{cases}. \quad (10)$$

3.2 实验结果及误差分析

针对高斯模型和近似 GC 模型用于海面风速反演的结果分别进行误差分析, 其中近似 GC 模型将对无云条件下的式(6)和有透明云层条件下的式(9)与式(10)的结果分别进行分析。高斯模型(Gauss)、无云条件下的近似 GC 模型(GC1)和有透明云层条件下的近似 GC 模型(GC2)在 2017 年 10 月、2018 年 1 月、2018

年 4 月和 2018 年 7 月夜间与日间风速反演的平均偏差、标准偏差和相关系数分别如表 1 和表 2 所示。

图 1 分别为 2017 年 10 月、2018 年 1 月、2018 年 4 月和 2018 年 7 月夜间数据的 CALIOP 风速反演值(横轴)与 AMSR-2 风速值(纵轴)的对比图, 图中色标表示 $\lg N$, N 是出现的次数, 色标的最大值为 4.5。

表 1 高斯模型、无云条件下的近似 GC 模型和有透明云层条件下的近似 GC 模型的夜间海面风速反演的误差

Table 1 Differences of nighttime sea surface wind speed retrieved by Gaussian model, GC approximation model in cloud-free condition and GC approximation model with transparent cloud layers

Time	Bias / (m·s ⁻¹)			Standard deviation / (m·s ⁻¹)			Correlation coefficient		
	Gauss	GC1	GC2	Gauss	GC1	GC2	Gauss	GC1	GC2
October 2017	0.03	0.10	0.30	1.09	1.29	1.22	0.93	0.92	0.92
January 2018	-0.21	0.01	0.25	1.17	1.38	1.33	0.91	0.90	0.91
April 2018	-0.07	0.12	0.23	1.09	1.25	1.20	0.93	0.92	0.92
July 2018	0.05	0.07	0.25	1.24	1.68	1.39	0.91	0.87	0.90

通过误差分析可以看出: 在相同的数据预处理和筛选条件下, CALIOP 的夜间数据的反演结果要优于日间数据; 模型 GC2 是夜间和日间两种情况给出的, 而模型 GC1 是基于夜间情况给出的, 从表 2 中误差可以看出 GC1 不适用于日间的情况, 即 GC2 比 GC1 的应用效果更好, 说明文中给出的有透明云层条件下的

近似 GC 模型(GC2)优于前人的模型。同时, 在增加透明云层的数据前后, 反演精度保持在同一水平, 数据可利用率显著提高, 其中在不同月份, 夜间数据可利用率增加的范围为 17.5%~24.5%, 日间数据可利用率增加的范围为 11.5%~14.6%。

最后, 对高斯模型和有透明云层条件下的近似

表 2 高斯模型、无云条件下的近似 GC 模型和有透明云层条件下的近似 GC 模型的日间海面风速反演的误差

Table 2 Differences of daytime sea surface wind speed retrieved by Gaussian model, GC approximation model in cloud-free condition and GC approximation model with transparent cloud layers

Time	Bias / (m·s ⁻¹)			Standard deviation / (m·s ⁻¹)			Correlation coefficient		
	Gauss	GC1	GC2	Gauss	GC1	GC2	Gauss	GC1	GC2
October 2017	-0.19	-0.16	0.33	1.23	1.45	1.41	0.91	0.89	0.90
January 2018	-0.60	-0.46	0.28	1.28	1.53	1.45	0.89	0.88	0.89
April 2018	-0.60	-0.45	0.40	1.57	1.83	1.86	0.86	0.85	0.86
July 2018	-0.41	-0.49	0.35	1.45	1.85	1.69	0.88	0.82	0.87

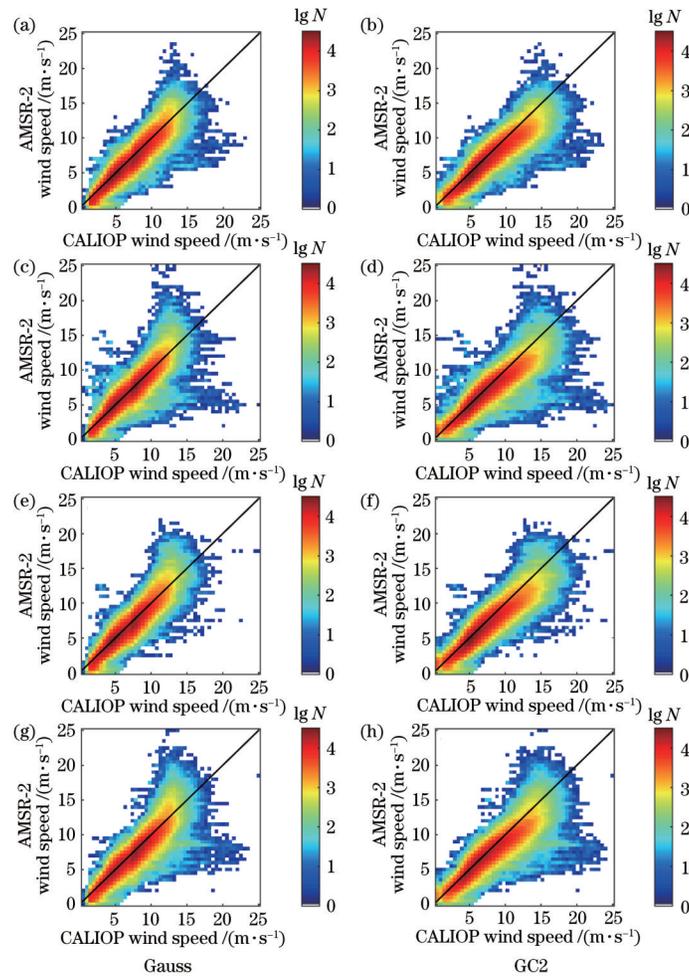


图 1 不同时间下 CALIOP 风速反演值与 AMSR-2 风速值的对比图。(a)(b) 2017 年 10 月; (c)(d) 2018 年 1 月; (e)(f) 2018 年 4 月; (g)(h) 2018 年 7 月

Fig. 1 Comparison of CALIOP wind speed inversion values and AMSR-2 wind speed values at different times. (a)(b) October 2017; (c)(d) January 2018; (e)(f) April 2018; (g)(h) July 2018

GC 模型的表现进行讨论。表 1 和表 2 中的数据显示高斯模型的整体误差更小。图 1 中的实线表示反演值的理想值曲线,反演值越接近实线表示误差越小。从图 1 中可以看出,高斯模型和近似 GC 模型在 3~13 m·s⁻¹ 的风速区间内数据点分布较为集中,且越接近实线,数据点密度越大,但在较低风速(小于 3 m·s⁻¹)和较高风速(大于 13 m·s⁻¹)的区间内数据点分布较为分散,存在较大的误差。

针对较低风速和较高风速的区间进行分区定量计算的结果如图 2 所示。图 2 为 2017 年 10 月夜间数据的

结果,2018 年 1 月、4 月和 7 月的结果差别不大。图 2 中的点线和虚线分别表示高斯模型和有透明云层条件下的近似 GC 模型的误差,实线表示反演值的理想值曲线,误差棒的中心表示在每个 1 m·s⁻¹ 的风速区间中的 CALIOP 风速反演值的均值,上下界为对应的标准差。图 2(a)、(b) 显示出理想值曲线始终在近似 GC 模型的反演值的 1 倍标准差内,但在 0~1 m·s⁻¹ 风速范围内高斯模型的 1 倍标准差范围超出了理想值曲线,且根据统计,当风速大于 16 m·s⁻¹ 时,高斯模型的反演值数据点十分稀少,而近似 GC 模型能给出较多的反演值。

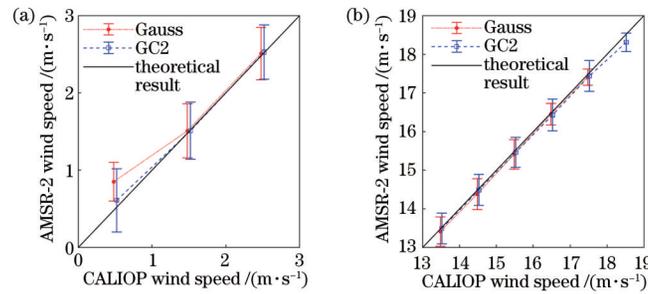


图 2 不同风速区间的 CALIOP 风速反演值与 AMSR-2 风速值的误差图。(a) 风速小于 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) 风速大于 $13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
 Fig. 2 Errors between CALIOP wind speed inversion values and AMSR-2 wind speed values in different wind speed intervals.
 (a) Wind speed less than $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) wind speed greater than $13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

综合来看,近似 GC 模型在较低风速和较高风速情况下表现得更好,说明近似 GC 模型修正了高斯模型在偏度和峰度上的不足。

3.3 白帽和 underwater 散射的影响

Hu 等^[7]使用退偏比 δ 来修正白帽和 underwater 散射的影响,采用 δ 为 15% 的经验值进行修正。吴东等^[9]发现对于 2007 年的 1 月和 7 月采用 δ 为 15% 的经验值,4 月和 10 月采用 δ 为 25% 的经验值可以获得更好的修正效果。周鑫等^[19]在计算激光的海面反射率时,针对海面白帽漫反射的影响,应用了 Monahan 等^[20-21]统计的白帽覆盖比例。王明军等^[22]研究了 532 nm 激光在气-海界面和海水中的透过率,发现气泡对激光衰减的贡献随着风速的增大而增大,随着激光传输距离的增大而减小。前人的研究已指出退偏比对季节的变化较为敏感^[9],而统计得到的经验公式的适用性尚未可知,因此对白帽和 underwater 多次散射的贡献暂不处理,相信消除其影响后会取得更佳的反演效果。

4 结 论

使用新版 Version 4.10 星载激光雷达 CALIOP Level 1B 和 Version 4.20 Level 2 的日夜数据反演全球海面风速,选用 Version 8.2 AMSR-2 海面风速值进行对比。在前人对 CALIOP 的无云数据进行海面风速反演的基础上,加入了透明云层的数据进行研究,使用云和气溶胶的光学厚度共同进行大气双程透过率的校正,大大提高了数据可利用率,其中在不同月份中,夜间数据可利用率增加范围为 17.5%~24.5%,日间数据可利用率增加范围为 11.5%~14.6%。

根据海面斜率分布模型的不同,选用高斯模型和 GC 模型进行研究,并给出了更优的有透明云层条件下的近似 GC 模型,并在 CALIOP 的全球夜间和日间数据的海面风速反演中进行了应用。结果显示,高斯模型整体的误差较小,但在较低风速(小于 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)和较高风速(大于 $13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)的区间内存在不足,近似 GC 模型则可以修正偏度和峰度的影响,在较低和较高的风速区间内表现得更好。对于日间数据来说,太阳背景光的影响仍需要深入研究,以提高反演精度。此外,本研究工作未考虑白帽和 underwater 多次散射的贡献。

致谢 感谢美国国家航空航天局兰利研究中心的科学数据中心(ASDC)提供的 CALIOP 激光雷达观测数据。感谢遥感系统(Remote Sensing Systems)提供的 AMSR-2 数据,数据从 www.remss.com 网站获得。

参 考 文 献

- [1] Winker D M, Vaughan M A, Omar A, et al. Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(11): 2310-2323.
- [2] Barrick D. Rough surface scattering based on the specular point theory[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1968, 16(4): 449-454.
- [3] Barrick D, Bahar E. Rough surface scattering using specular point theory[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1981, 29(5): 798-800.
- [4] Bufton J L, Hoge F E, Swift R N. Airborne measurements of laser backscatter from the ocean surface [J]. *Applied Optics*, 1983, 22(17): 2603-2618.
- [5] Menzies R T, Tratt D M, Hunt W H. Lidar in-space technology experiment measurements of sea surface directional reflectance and the link to surface wind speed [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(24): 5550-5559.
- [6] Cox C, Munk W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1954, 44(11): 838-850.
- [7] Hu Y, Stamnes K, Vaughan M, et al. Sea surface wind speed estimation from space-based lidar measurements [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8(13): 3593-3601.
- [8] Wu J. Mean square slopes of the wind-disturbed water surface, their magnitude, directionality, and composition [J]. *Radio Science*, 1990, 25(1): 37-48.
- [9] 吴东, 张小雪, 阎逢旗, 等. 基于星载激光雷达数据的海面风速探测[J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0828002.
Wu D, Zhang X X, Yan F Q, et al. Sea surface wind speed detection by using the data of CALIPSO lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0828002.
- [10] 吴东, 王建华, 阎逢旗. 激光雷达数据应用于海气界面气体传输速率的估算[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0928001.

- Wu D, Wang J H, Yan F Q. Estimation of air-sea gas transfer velocity using the CALIPSO lidar measurements [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0928001.
- [11] 丁红波, 王珍珠, 刘东. 激光雷达信号去噪方法的对比研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(24): 2401001.
Ding H B, Wang Z Z, Liu D. Comparison of de-noising methods of LiDAR signal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(24): 2401001.
- [12] 孙雨辰, 吴东. 星载激光雷达探测海面风速昼夜差异研究[J]. *量子电子学报*, 2013, 30(1): 29-35.
Sun Y C, Wu D. Comparison of day and night sea surface wind speed detection using CALIPSO lidar measurements[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2013, 30(1): 29-35.
- [13] He M, Hu Y X, Huang J P, et al. Aerosol optical depth under "clear" sky conditions derived from sea surface reflection of lidar signals[J]. *Optics Express*, 2016, 24(26): A1618-A1634.
- [14] 杨振威. 基于 CALIOP 数据的海面反射模型及海面风速反演研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2020: 42-50.
Yang Z W. Research of sea surface reflection model and sea surface wind speed inversion based on CALIOP data [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2020: 42-50.
- [15] Kodis R. A note on the theory of scattering from an irregular surface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1966, 14(1): 77-82.
- [16] van Ginneken B, Stavridi M, Koenderink J J. Diffuse and specular reflectance from rough surfaces[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(1): 130-139.
- [17] Tang Q, Hu Y X, Li W, et al. Optimizing cirrus optical depth retrievals over the ocean from collocated CALIPSO and AMSR-E observations[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(26): 7472-7481.
- [18] Jin W. Wind-Stress coefficients over sea surface near neutral conditions: a revisit[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1980, 10(5): 727-740.
- [19] 周鑫, 杨坚, 李松. 星载单光子激光雷达海面回波信号模型[J]. *光学学报*, 2021, 41(19): 1928002.
Zhou X, Yang J, Li S. Model of sea surface echos from spaceborne single photon lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(19): 1928002.
- [20] Monahan E C. Oceanic whitecaps[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1971, 1(2): 139-144.
- [21] Anguelova M D, Bettenhausen M H. Whitecap fraction from satellite measurements: algorithm description[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(3): 1827-1857.
- [22] 王明军, 王宇航, 陈丹, 等. 二维动态海面-气泡层中蓝绿激光的透射特性[J]. *光学学报*, 2022, 42(2): 0214001.
Wang M J, Wang Y H, Chen D, et al. Transmission characteristics of blue-green laser through two-dimensional dynamic sea surface-bubble layer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(2): 0214001.