

激光海面反射率的机载实验分析

李志刚¹ Oliver Reitebuch² 刘智深¹

(¹中国海洋大学海洋遥感研究所, 山东 青岛 266003; ²德国空间中心, 德国 慕尼黑)

摘要 星载多普勒测风激光雷达系统(ALADIN)机载演示器(A2D)分别在 2007 年 11 月、2008 年 12 月、2009 年 9 月进行了 3 次飞行任务。利用获取的海表面反射信号进行海表面反射率特性的研究。在海表面反射率模型中综合考虑白帽、海面光谱反射和海水体的散射贡献,对 355 nm 海表面反射测量结果和模型进行了对比,测量结果体现了受海面风驱动的海表面反射率的变化特征,以及来自海水体的不可忽视的贡献,并利用较高入射天底角的测量数据对海水体散射贡献进行了估计。

关键词 海洋光学;激光雷达;海表面反射率;海面风;机载实验

中图分类号 TP722.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100505

Analysis of Sea Surface Reflectance from Airborne Lidar Experimental Measurement

Li Zhigang¹ Oliver Reitebuch² Liu Zhishen¹

¹*Ocean Remote Sensing Institute, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266003, China*
²*Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt (DLR), Institut für Physik der Atmosphäre (IPA),
Oberpfaffenhofen, Germany*

Abstract Three airborne campaigns with ALADIN (an atmospheric laser doppler instrument) airborne demonstrator (A2D) were performed in November 2007, December 2008, and September 2009, respectively. Sea surface return measured during the campaigns is analyzed for the sea surface reflectance. With consideration of the contribution of whitecaps, specular reflection and the subsurface volume backscattering to the sea surface reflectance models, the measured sea surface reflectance was compared to the models for the wavelength of 355 nm. The observations show that the expected effect of the wind stress on the sea surface reflectance and allow new insights into the significant contribution of subsurface reflectance, and contribution from the subsurface is estimated by using lidar signal for large incidence angles.

Key words oceanic optics; lidar; sea surface reflectance; sea surface wind; airborne campaign

OCIS codes 280.3640; 010.4450; 010.1350

1 引 言

激光的海表面反射研究主要受限于 3 个方面:由海面风驱动的海表面毛细-重力波的波面斜率分布;受海面风影响的海面白帽覆盖率;受激光波长和水质影响的水下激光散射。海表面波的斜率分布和海面风的关系对于海表面反射的模型分析十分重要,迄今, Cox 等^[1~4]都提出了不同的关系模型。随着激光雷达技术的发展,激光可以用在海表面反射的现场测量上,这是开展海表面反射模型及验证研究的一个非常好的手段, Menzies 等^[5]通过空间激

光雷达(LITE)的海表面测量数据,分析了不同入射角度的海表面反射强度和海表面风速的关系,并提出了海表面反射模型; Tratt 等^[6]通过机载 1064 nm 激光雷达测量,分析证实了由海面风场驱动的波形分布特征所调制的海面反射率的方向特性。

机载和星载激光雷达对于海表面反射率的研究有助于验证及改进反射率模型,比如气溶胶云团和红外探测卫星观测系统(CALIPSO),它可以根据海表面风速和海表波面斜率分布的关系,利用海表面回波强度的大小估计海表面的风速大小^[4],而对于

收稿日期: 2010-08-21; 收到修改稿日期: 2010-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(40905005)和高校科研专项基金(201013034)资助课题。

作者简介: 李志刚(1980—), 博士, 讲师, 主要从事大气激光雷达探测方面的研究。E-mail: lizg.ouc@gmail.com

欧空局的大气动力任务(ADM),这方面的研究将有助于在不同入射天底角和海表面风速下的能量校准和海表面零风速校准。星载多普勒测风速激光雷达(ALADIN)机载演示器(A2D)系统采用 355 nm 激光波长,飞行实验过程中采集到了不同入射天底角的海表面回波数据,这十分有助于紫外(UV)波段海表面反射分析研究。本文利用激光雷达的海表面回波数据进行了激光海表面反射率的对比分析。

2 激光雷达系统

ALADIN 将是国际上第一个具有全球风场观测能力的星载多普勒测风激光雷达系统。ALADIN 探测系统采用 355 nm 激光,并根据大气米氏散射和瑞利散射光谱的不同采用两种不同探测方式进行分别探测,以达到各自探测性能最优化,实现 0~30 km 的探测范围。米氏散射探测通道采用基于菲佐干涉仪的条纹检测技术,将实现在较高气溶胶含量范围内的大气风速测量,而瑞利探测通道采用基于法布里-珀罗(Fabry-Perot)干涉仪的双边缘检测技术,实现低气溶胶含量范围内的大气风速测量。由于 ALADIN 使用了两项先进的测风技术,其精确设计以及信号数据处理技术需要在发射前使用机载演示器 A2D 进行机载飞行实验论证研究。A2D 系统是按照 ALADIN 星载测风激光雷达系统的相同探测原理和技术,实现机载系统的设计、性能测试和风速测量,以此作为星载系统发射前的充分技术论证^[7~9]。A2D 的系统参数指标如表 1 所示。A2D 系统激光束通过望远镜下方反射镜和飞机的下方窗口发射到大气中,并具有 20° 的天底倾斜角,发射方向基本垂直于飞机的头部指向,目的是为了减弱由飞机运动速度引起的激光视线速度分量。

表 1 A2D 系统参数指标

Table 1 Instrument parameters of A2D system

Parameters	Value
Wavelength /nm	355
Repetition /kHz	50
Pulse energy /mJ	55~65
Linewidth /MHz	45 (FWHM)
Telescope /mm	200
Receiver	Fizeau interferometer --- Mie channel Fabry-Perot interferometer --- Rayleigh channel
Detection	ACCD
Airplane	DLR Falcon 20
Flight height /km	8~12
LOS pointing /(^{\circ})	20 (off nadir)

3 激光海表面反射率

海表面的反射率共由 3 个部分组成:海表面的白帽反射率^[10],海表面的光谱反射率^[11],来自水下的激光散射贡献^[12~14]。来自这 3 部分的海表面反射率模型可以写为^[15,16]

$$R(\theta) = \frac{WR_{wc,eff} \cos \theta}{\pi} + \frac{(1-W)\rho}{2\pi\sigma^2 \cos^4 \theta} \times \exp\left(-\frac{\tan^2 \theta}{\sigma^2}\right) + (1-R_{wc}) \frac{R_0 \cos \theta}{\pi},$$

式中 R 为海表面反射率,与入射角 θ 有关;第一项为白帽的反射率,白帽是深海中因风吹拂海浪波顶,使波顶水粒跳出溢出白色的水泡,两个参量决定了海面的白帽反射率:覆盖率 W ,有效反射率 $R_{wc,eff}$,白帽覆盖率 W 是一个由海表风速(SSW)决定的函数。第二项为发生在没有被白帽覆盖的海面区域的光谱反射率, ρ 是激光的非涅耳反射率, σ^2 是海表的波面斜率分布,它是 SSW 的函数。Cox 等分别表示了不同的海表面斜率分布模型,Cox 模型为线性函数^[1]; Wu 模型为两段对数函数^[2,3]; Hu 模型为三段函数^[4],如图 1 所示为模拟结果。第三项为来自水分子和水中悬移物散射光的等效反射率, $(1-R_{wc})$ 是基于海面白帽对来自水下和水上的光具有相同反射作用的假设。 R_0 定义为等效反射率,下标 0 的含义就是利用海面 0 深度的朗伯反射代表所有水下的激光散射贡献。

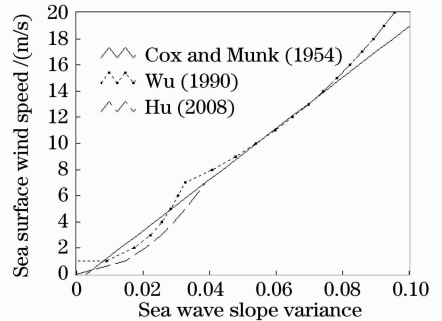


图 1 海表波面斜率分布模型比较

Fig. 1 Relations models between SSW and sea surface waves slope variance

图 2 为模拟计算在不同的 SSW 和入射天底角情况下海表面反射率模型曲线。共考虑了两种情况:包含水下散射贡献和不包含水下散射贡献。当天底角小于 10° 时,两种情况的差别很小。当天底角大于 15° 时,两者的相对差别变得较大。当天底角大于 30° 时,低 SSW 条件下两者差别可达两个数量级,水下散射成为主要的散射贡献体。从模拟结果中可以看出对 UV 波段的海表面反射考虑海水体

散射贡献的必要性。

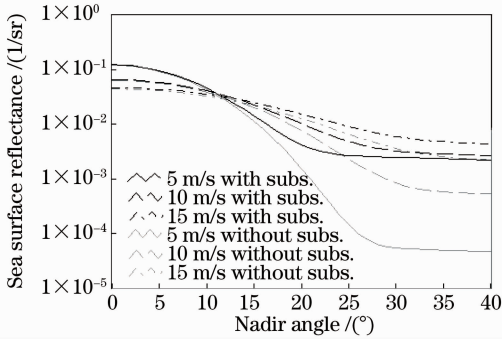


图2 模拟计算的 355 nm 激光海面反射率模型曲线
Fig. 2 Simulation of total sea surface reflectance for different SSW with and without considering subsurface contribution

4 机载测量与模型的对比分析

A2D的激光出射天底角为 20°,通过改变飞机的翻滚角度,可以获取不同出射天底角的信号测量,因此,通过这种模式可以获取不同入射天底角的海表面测量信号,这为实验测量不同入射天底角的海表面反射率提供了方法。激光的海表面回波信号可以看作是朗伯反射和海表面光谱反射的组合,利用米氏散射通道获取的激光雷达信号,提取海表面反射信号。利用飞机的飞行高度和激光天底角完成海表面信号的距离平方校正;假设海表面上层的大气均匀性特征,利用海表面回波信号和海表面上大气信号的比值实现强度校正,以此计算相对的海表面反射率。

2007年11月,2008年12月,2009年9月3次实验任务共有5个航次获取了在不同入射天底角下的海表面测量信号,飞行区域如表2所示。

表2 海表面测量

Table 2 Measurements of sea surface

Areas	Location	Time (UTC)	Date	Flight height /km
Balearic sea	42.25° N/ 5.10° E	~15:30	2007-11-17	9.03
Baltic sea	54.35° N/ 12.25° E	~14:15	2007-11-19	7.96
Adriatic sea	42.50° N/ 15.40° E	~15:00	2007-11-28	8.92
North sea	54.50° N/ 3.50° E	~14:30	2008-12-17	7.40
North atlantic sea	64.40° N/ 38.00° W	~16:00	2009-9-26	7.75

2007年11月1日飞行实验只获取了3°和21°天底角的测量数据,同时采集到了飞机转向时约0.4 s采集分辨率的数据。图3为计算的海表面相对散射强度与模型曲线对比结果,模型曲线采用了与测量数据比较吻合的4个SSW,测量结果和13 m/s的模型曲线比较吻合,因此估计的SSW大约为13 m/s;对于0.4 s测量分辨率的结果,由于信号具有较低的SNR,因此结果具有较大的起伏,但是也基本具有相同趋势。为了验证对比结果,参考了QuikSCAT的SSW反演值,当日晚上在测量区域的海表面风速大小约为10 m/s,同时具有约3 h的测量时间差别。

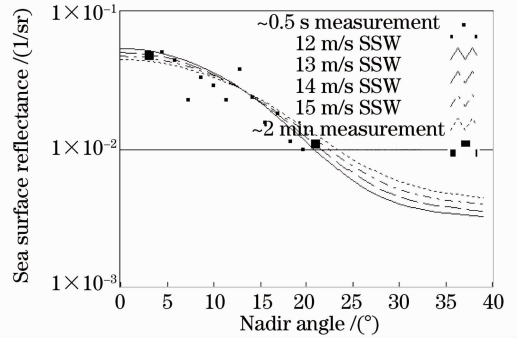


图3 2007年11月17日飞行实验 Balearic sea 海表面反射率的对比结果
Fig. 3 Sea surface reflectance at 355 nm from observations on 17th November 2007 over the Balearic sea (black dots)

图4和5为2007年11月19日和28日飞经Baltic sea和Adriatic sea的海表面反射率的对比结果。从两天数据对比结果估计当日的SSW分别为5~6 m/s和6~7 m/s,参考QuikSCAT海表风场,两天的SSW均约为5 m/s,同时具有2 h的测量时间差。从两天的对比结果中可以看出,37.5°天底角的测量数据比模型偏低,这主要是由于不能正确估计模型中的来自水下散射贡献 R_0 的大小或者大气校正带来的偏差。

2009年9月的飞行实验获取了较大SSW条件下的海表面测量信号,图6所示为飞行实验在North Atlantic的飞行轨迹,共获取了5个天底角的测量信号,可以清楚看到飞机姿态调整带来的圆型飞行轨迹。图7给出了测量与模型曲线的对比结果,参考QuikSCAT海表风场,当时的SSW的为20 m/s,同时具有约6 h的测量时间差。在较高的风速条件下,两者显示出了较好的一致性。

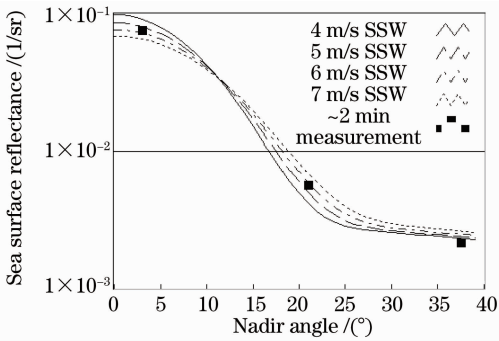


图 4 2007 年 11 月 19 日飞行实验 Baltic sea 海表面反射率的对比结果

Fig. 4 Sea surface reflectance at 355 nm from observations on 19th November 2007 over the Baltic sea (black dots)

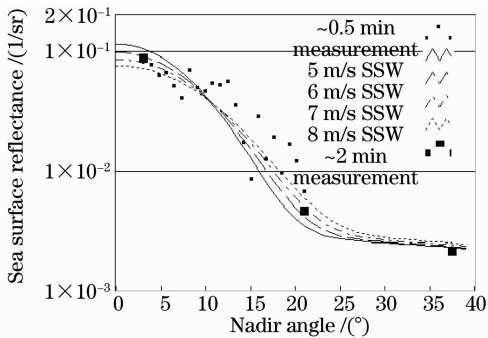


图 5 2007 年 11 月 28 日飞行实验 Adriatic sea 海表面反射率的对比结果

Fig. 5 Sea surface reflectance at 355 nm from observations on 28th November 2007 over the Adriatic sea (black dots)

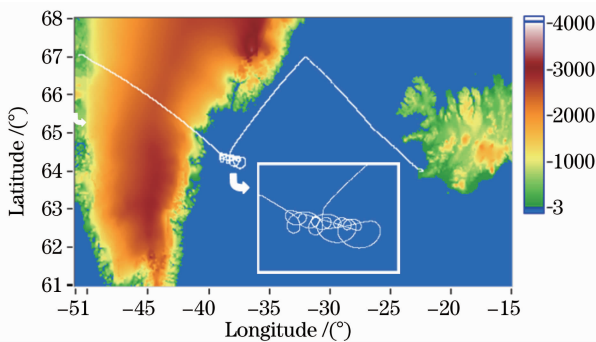


图 6 2009 年 9 月 26 日在 North Atlantic 飞行实验的飞行轨迹

Fig. 6 Flight track over the North Atlantic on 26th September 2009

5 结 论

通过对海表面反射率模型的分析,综合考虑海表面白帽的反射贡献、海表面光谱反射率和水下散射贡献,表明了 UV 波段海表面反射率考虑水下散

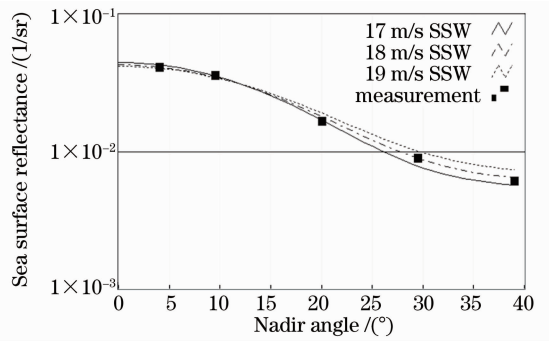


图 7 2009 年 9 月 26 日飞行实验 North Atlantic sea 海表面反射率的对比结果

Fig. 7 Sea surface reflectance at 355 nm from observations on 26th September 2009 over the North Atlantic sea (black dots)

射贡献的必要性,并通过 A2D 的飞行实验测量结果给予了验证。这些也是对 Menzies 等^[5]所得出的 532 nm 激光水下散射贡献结果的有效补充。通过比较模型曲线和实测结果估计的 SSW 值与 QuickSACT 的反演大小具有较好的一致性,验证了受海表面风驱动的海表面反射率特征。

由于激光的水下散射与海水的水质有关,所以不能正确的估计等效海表面反射率 R_0 的大小。37.5° 天底角的测量结果在低风速条件下,可以认为全部来自水下的激光散射,通过模型曲线和实测结果比较,估算 355 nm 激光 R_0 的大小为 $0.83\% \text{sr}^{-1}$,接近以往文献报道的 R_0 的大小 $0.88\% \text{sr}^{-1}$,其大小理论上可以反映水质情况。由于 SSW 对于水下激光的散射具有非常小的影响,因此对于固定的入射天底角, R_0 可以看作一个常数。

海表面反射率的研究是未来星载测风激光雷达 ALADIN 系统研究的一部分,其结果不仅是为了星载雷达系统的能量校准,也是为了分析由于海表面运动对零风速校准而产生的影响,这些都是 ADM-Aelous 发射前的必要前期研究。

参 考 文 献

- 1 C. Cox, W. Munk. Measurement of the roughness of the sea surface from photography of the Sun's glitter[J]. *J. Opt Soc. Am.*, 1954, **44**(11): 838~850
- 2 J. Wu. Sea-surface slope and equilibrium wind-wave spectra[J]. *Phys. Fluids*, 1972, **15**(5): 741~747
- 3 J. Wu. Mean square slopes of the wind-disturbed water surface, their magnitude, directionality, and composition[J]. *Radio Sci.*, 1990, **25**(1): 37~48
- 4 Y. Hu, K. Stamnes, M. Vaughan *et al.*. Sea surface wind speed estimation from space-based lidar Measurements [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2008, **8**(13): 3593~3601
- 5 Robert T. Menzies, David M. Tratt, Willian N. Nunt. Lidar in-space technology experiment measurements of sea surface

- directional reflectance and the link to surface wind speed[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(24): 5550~5559
- 6 Tratt D. *et al.*. Airborne doppler lidar investigation of the wind-modulated sea-surface angular retroreflectance signature [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(33): 6941~6950
- 7 Reitebuch O., E. Chinal, A. Dabas *et al.*. Ground and airborne Doppler lidar campaigns for atmospheric dynamics mission ADM [C]. Proc. 6th. Int. Symp. Tropospheric Profiling, Leipzig, 2003. 432~434
- 8 Oliver Reitebuch, Evis Chinal, Yannig Durand *et al.*. Development of an airborne demonstrator for ADM-Aeolus and campaign activities [C]. 22nd Int. Laser Radar Conference, Matera, Italy, 2004. 1007~1010
- 9 Reitebuch O., M. Endemann, D. Engelbert *et al.*. Pre-launch validation of ADM-Aeolus with an airborne direct-detection wind lidar [C]. 24th Int. Laser Radar Conference, Boulder, CO, USA, 2008. 41~44
- 10 P. Koepke. Effective reflectance of oceanic whitecaps[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(11): 1816~1824
- 11 D. E. Barrick. Rough surface scattering based on the specular point theory [J]. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 1968, **AP-16**(4): 449~454
- 12 A. Morel, L. Prieur. Analysis of variations in ocean color[J]. *Limnol. Oceanogr.*, 1977, **22**(4): 709~722
- 13 A. Morel. In-water and remote measurements of ocean color[J]. *Boundary-Layer Meteorol.*, 1980, **18**(2): 177~201
- 14 H. R. Gordon, A. Y. Morel. Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery: A review [J]. *Springer-Verlag*, 1983, **4**: 1~114
- 15 Zhigang Li, Christian Lemmerz, Ulrike Paffrath *et al.*. Airborne Doppler lidar investigation of sea surface reflectance at a 355 nm ultraviolet wavelength [J]. *AMS-Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2010, **27**(4): 693~704
- 16 Damien Josset, Pengwang Zhai, Yongxiang Hu *et al.*. Lidar equation for ocean surface and subsurface [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(20): 20862~20875