

范开国, 黄韦良, 贺明霞等. 星载 SAR 遥感图像反演海洋大气边界层高度. 地球物理学报, 2012, 55(4): 1137-1143, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.04.009.

Fan K G, Huang W G, He M X, et al. Marine atmospheric boundary layer depth retrieval by SAR in China Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(4): 1137-1143, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.04.009.

星载 SAR 遥感图像反演海洋大气边界层高度

范开国^{1,2}, 黄韦良^{1*}, 贺明霞³, 傅 斌², 施英妮⁴

1 中国人民解放军 91039 部队, 北京 102401

2 国家海洋局第二海洋研究所 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 杭州 310012

3 中国海洋大学 海洋遥感研究所, 青岛 266100

4 中国人民解放军 61741 部队, 北京 100094

摘 要 本研究将边界层相似理论与对流理论应用到具有海洋大气边界层 (Marine Atmospheric Boundary Layer, MABL) 对流特征的星载合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 遥感图像, 探讨了星载 SAR 遥感图像描述海气应力作用下水平扰动尺度变化的潜在可能性. 针对具有三维对流涡旋 Cell 和二维水平滚轴涡旋 Roll 特征的星载 SAR 遥感图像, 反演了中国海海域 MABL 高度, 并与同步实验获取的 MABL 高度结果进行对比. 结果表明, 利用具有对流特征的星载 SAR 遥感图像反演 MABL 高度是可行的, 展示了以高分辨率、大面积观测为特点的星载 SAR 遥感图像探测 MABL 的广阔前景.

关键词 SAR, 海洋大气边界层, 相似理论, 对流理论

doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.04.009

中图分类号 P421

收稿日期 2011-08-12, 2012-02-21 收修定稿

Marine atmospheric boundary layer depth retrieval by SAR in China Sea

FAN Kai-Guo^{1,2}, HUANG Wei-Gen¹, HE Ming-Xia³, FU Bin², SHI Ying-Ni⁴

1 91039 Army, PLA, Beijing 102401, China

2 State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics Second Institute of Oceanography,

State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China

3 Ocean Remote Sensing Institute, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

4 61741 Army, PLA, Beijing 100094, China

Abstract The marine atmospheric boundary layer is the part of the atmospheric that has direct contact and, hence, is directly influenced by the ocean. Thus, at the marine atmospheric boundary layer is where the ocean and atmospheric exchange primarily via convective turbulent transport. Associated with these convective atmospheric phenomena is a varying sea surface wind field which modulated the short-scale sea surface roughness, and thus the kilometer-scale convective atmospheric phenomena, such as the three dimensional atmospheric convective cells and two dimensional convective rolls over the ocean, affect the sea surface roughness and thus become detectable by Synthetic Aperture Radar (SAR). In this study, the boundary layer similarity theories and the convective theories are applied to the SAR images with the convective

基金项目 国家自然科学基金青年科学基金项目(41106155), 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(2010BSA13015)和海洋公益性行业科研专项经费项目(201105001)联合资助.

作者简介 范开国, 男, 1981 年生, 主要从事 SAR 海洋遥感研究. E-mail: van.fkg@tom.com

*** 通讯作者** 黄韦良, 男, 1955 年生, 研究员, 博士研究生导师, 主要从事海洋遥感技术与应用研究. E-mail: wg Huang@mail.hz.zj.cn

characteristic of the marine atmospheric boundary layer, and the probability of getting the turbulent-scale horizontal variability in air-sea stress by SAR image is discussed. The depths of the marine atmospheric boundary layer could be retrieved by SAR image with three dimensional convective cells and two dimensional convective rolls, and both were compared to the depth retrieved by Lidar and potential temperature result from weather station. The results show that the method of marine atmospheric boundary layer depth retrieved by SAR image is feasible, and SAR image combining with Lidar and weather information will have bright future in the area of detecting the marine atmospheric boundary layer.

Keywords SAR, MABL, Similarity theory, Convective theory

1 引言

SAR 遥感图像的海面后向散射强度的变化很大程度上依赖于海面波谱中与 SAR 工作波长相近的部分. 海洋和大气现象对海面波谱的影响,在一定条件下可以成像于海面 SAR 遥感图像. 通常观测的大气现象包括:边界层对流、对流风暴以及由海岸地形或海气温差等引起的各种大量的中尺度环流.

千米尺度的海洋大气边界层对流是一种常见的的大气现象,是在海洋表面虚位温高于底层大气虚位温的位置,由扰动动能的浮力效应形成. 由于空气的垂直运动,对流涡旋中高动量的下降气体向下传输到近海面,导致近海面层的垂直风切变增加,以阵风的形式叠加在平均风场上,从而使下降气流区域的海面粗糙度增大,在 SAR 遥感图像中形成了高后向散射强度区. 反之,对流涡旋的上升区域对应于 SAR 遥感图像中的低后向散射强度区. 高分辨率的星载 SAR 遥感图像足可以描述这种由浮力效应导致的水平变化的扰动尺度.

大气边界层对流的结果主要有两种形式,三维对流涡旋 Cell 和二维水平滚轴涡旋 Roll. 理论和观测结果都表明,三维对流涡旋 Cell 通常出现在低风速条件下,二维水平滚轴涡旋 Roll 在强风条件下更加普遍. Deardorff^[1] 针对观测结果给出了理论解释,认为风速和海气温差对对流现象出现的形式起决定作用,在给定风速条件下,海气温差越大,就越可能形成三维对流涡旋 Cell.

两种边界层对流现象都是基于高分辨率 SAR 气象学的重要研究目标. Sikora 等^[2-4] 论述了三维对流涡旋 Cell 在 SAR 遥感图像上的斑点状后向散射特征, Mourad^[5] 对二维水平滚轴涡旋 Roll 的线性特征 SAR 遥感图像给出了解释. Young 等^[6-7] 利用具有三维对流涡旋 Cell 特征的 SAR 遥感图像反演

得到了 MABL 高度及其浮力通量等其他扰动统计参数, Alpers 等^[8-9] 利用具有二维水平滚轴涡旋 Roll 特征的 SAR 图像反演了 MABL 高度. 由于气溶胶粒子主要来源于地球表面,故 MABL 中富集气溶胶. Lidar 可以探测到 MABL 气溶胶后向散射信号和梯度变化,得到高分辨率的 MABL 剖面结构特征,利用二次微分法处理探测的气溶胶后向散射信号,可以获取 MABL 高度.

本文利用具有三维对流涡旋 Cell 和处于热不稳定状态的二维水平滚轴涡旋 Roll 对流特征现象的星载 SAR 遥感图像,分别获取了三维对流涡旋 Cell 的特征长度和二维水平滚轴涡旋 Roll 的平均水平波长,根据边界层相似理论与对流理论得到了 MABL 高度,首次对二者反演的 MABL 高度进行对比,同时利用探空资料数据、Lidar 实验获取的 MABL 高度进行验证分析. 其结果显示二者符合较好,为后继以 SAR、探空资料数据与 Lidar 为基础的集成技术探测 MABL 特征提供了参考.

2 SAR 遥感图像反演 MABL 高度方法

利用三维对流涡旋 Cell 的空间尺度和密度特征得到垂直于风向方向的平均一维水平能量谱,通过谱分析法^[10] 确定小尺度峰值波长,即三维对流涡旋 Cell 的特征长度 λ_{cell} ,根据边界层相似理论提供的 λ_{cell} 与边界层高度 Z_i 1.5 倍定量关系得到 MABL 高度^[11].

二维水平滚轴涡旋 Roll 通常用来求解风向,也利用二维水平滚轴涡旋 Roll 的空间尺度特性,得到垂直于风向方向的二维水平滚轴涡旋 Roll 平均水平波长 λ_{roll} ,在热不稳定 MABL 情况下,根据线性 Rayleigh-Benars 对流理论,利用 2.8 倍定量关系^[11],得到 MABL 高度. 图 1 为 SAR 遥感图像反演 MABL 高度的流程.

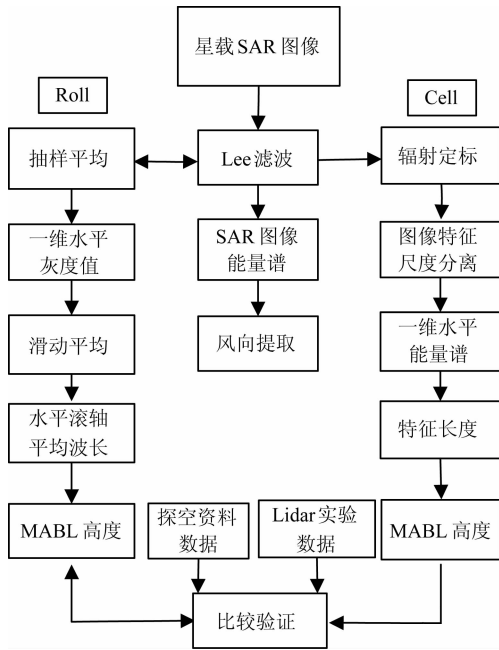


图1 星载 SAR 遥感图像反演 MABL 高度流程

Fig. 1 Flowchart of the MABL depth retrieval from SAR image

基于星载 SAR 遥感图像反演 MABL 高度流程,首先对 SAR 遥感图像进行 Lee 滤波以消除其固有的斑点噪声.由于海面平均风场的存在,SAR 遥感图像上呈现出具有线性排列的斑点状后向散射特征(三维对流涡旋 Cell)或线性的风条纹纹理特征(二维水平滚轴涡旋 Roll),因此可根据 SAR 遥感图像低波数能量谱获取海面风向,但此方法获取的海面风向具有 180° 模糊,该海面风向的不确定性,可通过 SAR 遥感图像本身信息或其他风场提供的信息加以消除^[12].

利用具有三维对流涡旋 Cell 特征的 SAR 遥感图像反演 MABL 高度时,需要对 SAR 遥感图像进行辐射定标,得到雷达海面后向散射强度,以消除 SAR 侧视所引起的能量值分布不均匀的现象.同时将遥感图像分辨率降为 50 m,消除高频信号对小尺度峰值波长信息的影响.

此外,SAR 遥感图像中不仅包含了大气对流引起的大气现象,也包含了许多大尺度、中尺度等海洋现象,可采用尺度分离的方式将三维对流涡旋 Cell 现象之外的特征滤除.三维对流涡旋 Cell 使得海面风场模式发生变化,导致海面粗糙度发生相应变化,从而 SAR 遥感图像很大程度上体现海面风场模式的变化特征,因此可利用谱相似性原理分析风速谱得到图像特征尺度分离的依据^[10].在体现大气现象的伽马中尺度和小尺度之间的谱隙对应的尺度大

约是 $5Z_i$ ^[13].设 600 m 为实验海域 MABL 的平均高度,则 600 m 与 3000 m 为尺度分离时的特征尺度,从而确保将大尺度和中尺度对一维水平能量谱的影响去除而不影响小尺度峰值波长信息.

最后采用双线性插值的方法将尺度分离后的 SAR 遥感图像旋转到沿海面风向方向的自然坐标系,并在 $(k \times \log(S(k)), \log(k))$ 双对数坐标系下,得到垂直于风向方向的平均一维水平能量谱,确定三维对流涡旋 Cell 的特征长度,根据边界层相似理论得到 MABL 高度.

对垂直于风向方向具有二维水平滚轴涡旋 Roll 特征的 SAR 遥感图像要进行抽样平均,降低遥感图像分辨率,消除高频信息的影响,更好的体现条纹特征.最后滑动平均滤波后的平均一维水平灰度值确定平均水平波长.在热不稳定 MABL 情况下,根据线性 Rayleigh-Benars 对流理论得到 MABL 高度.

3 实例研究与验证分析

3.1 实例一

图 2a 是青岛近海分辨率为 25 m 的 ENVISAT ASAR 遥感图像,成像时间为 2005-01-14 21:41 (BJT).从图中截取具有三维对流涡旋 Cell 特征的遥感子图像作为实例研究的数据(图 2b 所示),可见截取的 SAR 遥感子图像具有线性排列斑点状的海面后向散射特征.

分析截取的 SAR 遥感子图像低波数能量谱,并基于分析图 2a 中落山风所导致的近岸海域 SAR 遥感图像呈亮色的信息确定风向为西北风(图 3 所示).图 4 是进行特征尺度分离后的 SAR 遥感子图像,可以看出,相比图 2b 更好地体现斑点状海面后向散射特征.

将特征尺度分离后的星载 SAR 遥感子图像(图 4)进行快速傅里叶变换,得到垂直于风向方向的平均一维水平能量谱,判断三维对流涡旋 Cell 的特征长度为 1560 m(图 5a).根据边界层相似理论提供的 λ_{Cell} 与边界层高度 Z_i 1.5 倍定量关系,得到 MABL 高度为 1040 m.

SAR 遥感图像计算得到的 MABL 高度结果与同步 Lidar 获取的 MABL 高度(图 5b)及探空资料数据位温剖面(图 5c)进行验证分析.表 1 列出了进行同步实验的相关地理位置和 MABL 探测高度.

通过表 1 可以看出,星载 SAR 遥感图像反演的 MABL 高度比 Lidar 获取的 MABL 高度偏低,而气

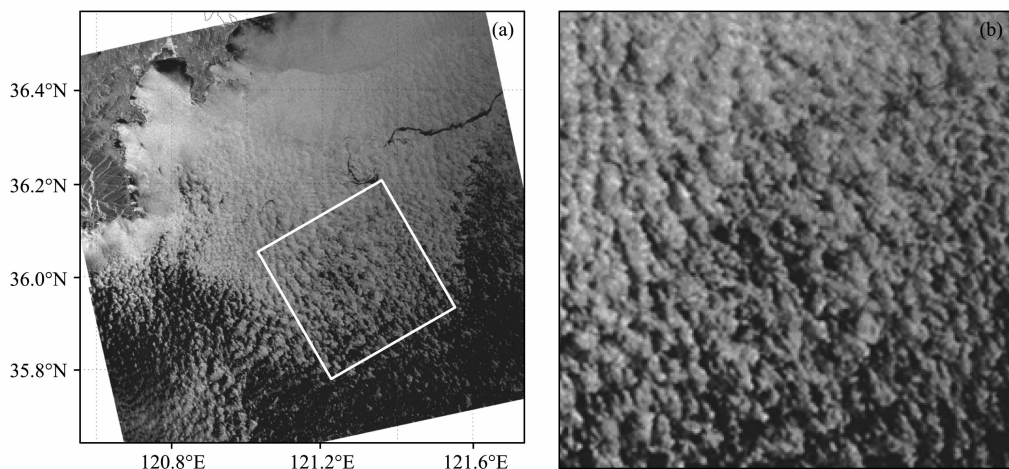


图 2 (a) ENVISAT ASAR 遥感图像; (b) 具有三维对流涡旋的星载 SAR 遥感子图像

Fig. 2 (a) ENVISAT ASAR image and (b) sub SAR image with three dimensional convectonal cells

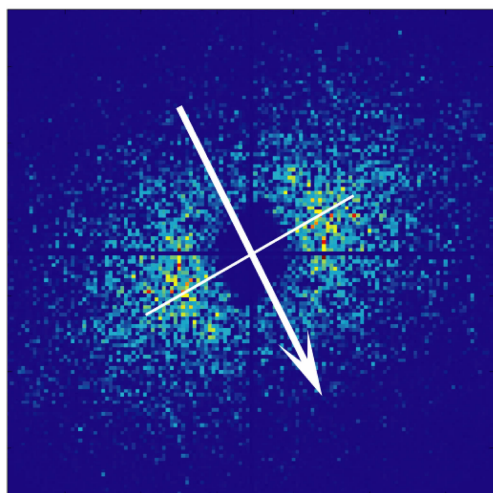


图 3 星载 SAR 遥感子图像低波数能量图与海面风向

Fig. 3 Energy spectrum of sub SAR image and the wind direction

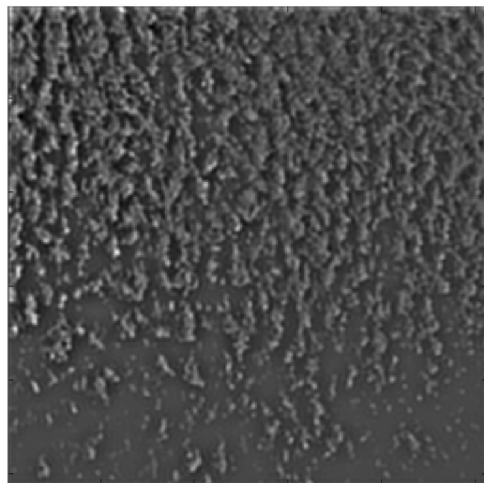


图 4 特征尺度分离后的星载 SAR 遥感子图像

Fig. 4 Diagnostic scale-separated sub SAR image

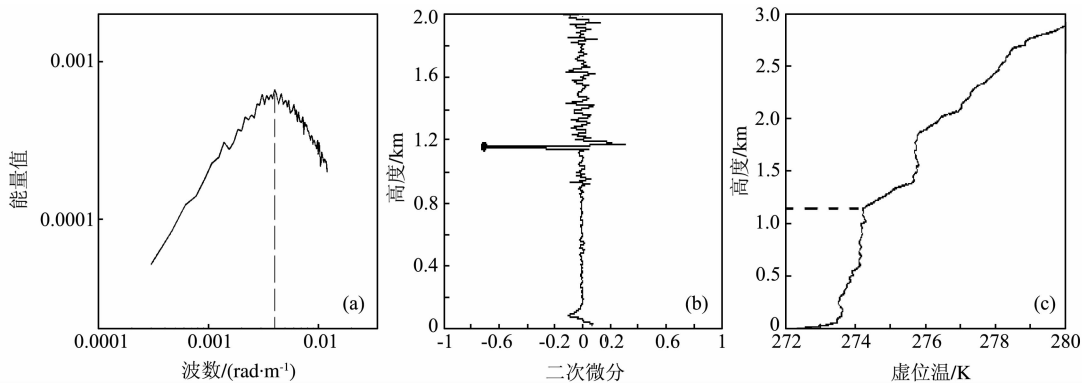


图 5 (a) 垂直于风向的一维水平能量谱; (b) 青岛海滨 Lidar 获取的 MABL 高度; (c) 青岛气象台探空资料数据位温剖面

Fig. 5 (a) Cross wind direction one dimensional energy spectrum; (b) MABL depth of Qingdao Seashore retrieved by Lidar and (c) Potential temperature result from Qingdao weather station

象探空资料估计的 MABL 高度较高。λ_{cell} 与 Lidar 获取的 MABL 高度比值为 1.35, 接近 1.5, 与气象探空资料相比, SAR 遥感图像反演的 MABL 高度

误差达到 14%, 而 Lidar 获取的结果误差为 5%.

3.2 实例二

图 6 a 是 2006 年春季 SOLAS 黄海实验同步

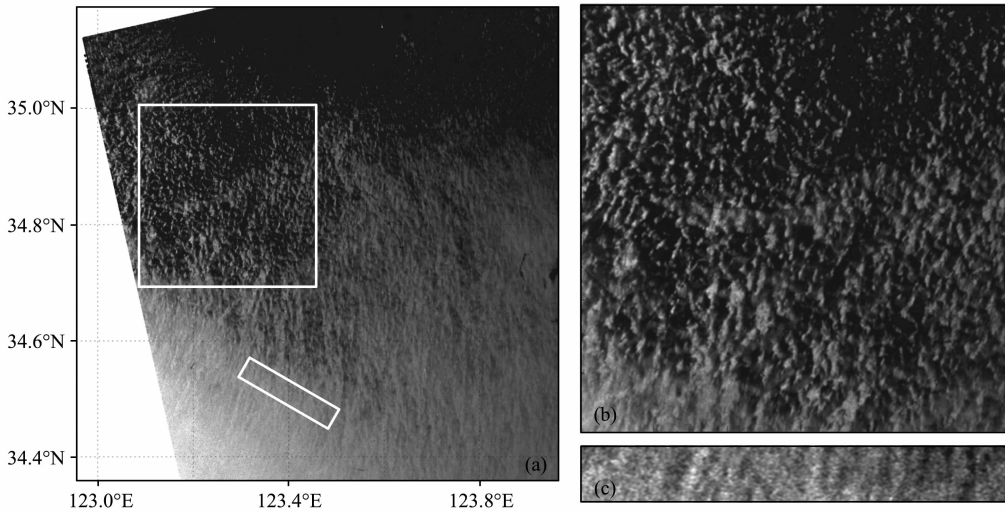


图 6 (a) ENVISAT ASAR 星载 SAR 遥感图像;(b) 具有三维对流涡旋 Cell 特征的星载 SAR 遥感子图像;(c) 具有二维水平滚轴涡旋 Roll 的星载 SAR 遥感子图像

Fig. 6 (a) ENVISAT ASAR SAR image, (b) Sub SAR image with three dimensional convective cells and (c) Sub SAR image with two dimensional convective rolls

表 1 SAR、Lidar 和气象探空资料获取的 MABL 高度的比较

Table 1 The comparison between SAR, Lidar and weather data

方法	SAR	Lidar	探空资料
地理位置	121.24°E 36.06°N	120.33°E 36.06°N	120.33°E 36.07°N
观测时间 (BJT)	2005-01-14 21:41	2005-01-14 21:36	2005-01-14 19:25
MABL 高度	1040 m	1156 m	1214 m
数据处理	图 5a	图 5b	图 5c

ENVISAT ASAR 遥感图像,图像分辨率为 25 m,成像时间是 2006-04-27 21:31 (BJT). 从该遥感图像左下方到左上方可以观测到二维水平滚轴涡旋 Roll 到三维对流涡旋 Cell 两种对流现象的转变,单纯从遥感图像的灰度值可以初步判断遥感图像左下方海域的风速值高于左上方海域的风速值. 关于两种对流方式之间转变的定量关系,将会在以后的研究中展开.

通过分析该研究海域 SAR 遥感子图像低波数能量图,判断风向为西南风向. 从该遥感图像中分别截取具有三维对流涡旋 Cell 特征的遥感子图像(图 6b)和垂直于风向方向上具有二维水平滚轴涡旋 Roll 特征的遥感子图像(图 6c)作为实例研究数据. 基于三维对流涡旋 Cell 特征的 SAR 遥感子图像,反演得到该海域 MABL 高度为 722 m.

二维水平滚轴涡旋 Roll 在 SAR 遥感图像上体现为黑白相间的条纹,条纹间的间距一般在 1~8 km 之间. 基于星载 SAR 遥感图像反演 MABL 高

度流程,将具有 Roll 特征的 SAR 子图像平滑后的平均一维灰度值,利用其空间特性得到平均水平波长为 1896 m (图 7 所示).

根据 SOLAS 黄海实验现场实验数据表明(表 2 所示),该时刻海洋表面虚位温高于底层大气的虚位

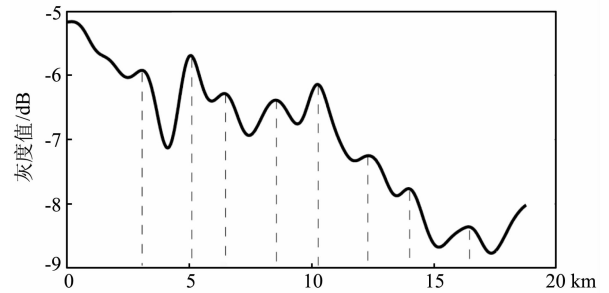


图 7 滤波后的平均一维灰度值

Fig. 7 Filtered mean one dimensional intensity

表 2 现场实验数据给出的海洋表面温与底层大气温度

Table 2 The potential temperature from the In-situ experiment data

地理位置	观测时间 (BJT)	海表底层		海气温差 (°C)
		海表温度(°C)	大气温度 (°C)	
32.908°N, 122.507°E	2006-04-27 04:34	11.176	10.6	+0.576
33.43°N, 122.274°E	2006-04-27 08:30	11.060	11.0	+0.060
34.449°N, 121.133°E	2006-04-27 17:06	11.327	11.1	+0.227
35.084°N, 121.412°E	2006-04-28 01:16	9.573	7.5	+2.073

温,即海气温差 $T_{\text{sea-air}} > 0$,则 MABL 处于热不稳定状态.根据二维水平滚轴涡旋 Roll 水平波长与 MABL 高度在热不稳定条件下的线性 Rayleigh-Benars 对流理论,得到该海域 MABL 为 677 m.

由于 Lidar 探测位置与 SAR 遥感图像中心位置距离大约 270 km,所以 Lidar 获取的 MABL 高度不能作为定量验证的标准.根据香港天文台 2006-04-27 08:00 提供的天气状况信息,Lidar 数据可以作为 SAR 遥感图像反演的 MABL 高度参考值^[14].表 3 给出进行同步实验的相关地理位置和 MABL 探测高度.

表 3 SAR 和 Lidar 所探测的 MABL 高度比较

Table 3 The comparison between SAR and Lidar

方法	Cell SAR	Roll SAR	Lidar
地理位置	123.255°E 34.842°N	123.346°E 34.474°N	120.757°E 34.997°N
观测时间 (BJT)	2006-04-27 21:31	2006-04-27 21:31	2006-04-27 20:30-22:00
MABL 高度	722 m	677 m	630 m

从表 3 可以看出,利用具有三维对流涡旋 Cell 特征的 SAR 遥感子图像反演的 MABL 高度与利用具有二维水平滚轴涡旋 Roll 特征的 SAR 遥感子图像反演 MABL 高度结果均高于 Lidar 获取高度.将 Lidar 获取的 MABL 高度设为 SAR 成像位置 MABL 的高度,得到 λ_{Roll} 与 Lidar 获取 MABL 高度比值为 3.01,介于实验观测比值 2~6 之间^[9],与 Stull^[11]提到的比值 3 最为接近. λ_{Cell} 与 Lidar 获取的 MABL 高度比值为 1.7,在实验经验比值范围 1~5 之间^[2],接近 1.5.

4 分析与结论

本文通过具有三维对流涡旋 Cell 和二维水平滚轴涡旋 Roll 特征的星载 SAR 遥感图像反演了 MABL 高度,首次对二者反演的 MABL 结果进行比较,结果吻合较好.同时首次提出利用 Lidar 获取的 MABL 高度验证星载 SAR 遥感图像反演的 MABL 高度,为 SAR、Lidar 与探空资料数据集成技术探测 MABL 特征进行了首次尝试.

通过本文表 1 与表 3 可以看出,SAR 遥感图像反演的 MABL 高度与 Lidar 获取的 MABL 高度结果虽然基本一致,但有一定的出入.这可能由以下因素造成:(1) $\lambda_{\text{Cell/Roll}}$ 与 MABL 高度的定量比值要求在实测的风向条件下,而本文的海面风向是通过

SAR 遥感子图像处理得到,与实际风向会有一定的出入,影响 MABL 高度反演结果.(2)对 SAR 遥感图像进行快速傅里叶变换得到垂直于海面风向方向的平均一维水平能量谱时,由于风向与实际风向的出入而引入沿风向方向的剪切力对最小峰值信息造成的失真,及能量谱离散化过程中由于分辨率限制导致最小峰值的偏差.(3)尺度分离过程中特征尺度的选择,及其根据先验知识选择的图像旋转到自然坐标系下存在斑点状后向散射特征的不均匀性问题,都会引入一维水平能量谱多尺度的峰值信息.而通过平均得到的一维水平能量谱和一维灰度值,也会降低低波数能量谱的可信度和空间分布信息.最后,Lidar 测量气溶胶后向散射信号及其通过探空资料数据得到 MABL 高度过程中,存在的系统误差与二者测量时刻的时间延迟及空间间距也会对验证分析结果产生一定的影响.

本研究通过实例研究与验证分析展示了以高分辨率、大面积观测为特点的星载 SAR 遥感图像探测 MABL 的广阔前景,同时表明可利用探空资料、Lidar 的高精度剖面测量 MABL 结果,实时、同步地校正星载 SAR 遥感图像大面积观测 MABL 的定量反演结果,为后继以 SAR、探空资料与 Lidar 为基础的集成技术探测 MABL 特征提供了参考.

参考文献(References)

- [1] Deardorff J W. Discussion of "Thermals over the sea and gull flight behavior" by Woodcock A H. *Boundary-Layer Meteor.*, 1976, 10: 41-46.
- [2] Sikora T D, Young G S, Shirer H N, et al. Estimating convective atmospheric boundary layer depth from microwave radar imagery of the sea surface. *J. Appl. Meteor.*, 1997, 36: 833-845.
- [3] Vesecky J F, Luding F L, Daida J M, et al. Seagulls and SAR: atmospheric convection effects in SAR images over the Ocean. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1996, 2: 891-892.
- [4] Romeiser R, Ufermann S, Androssov A, et al. On the remote sensing of oceanic and atmospheric convection in the Greenland Sea by synthetic aperture radar. *J. Geophys. Res.*, 2004, 109: C03004.
- [5] Mourad P D. Inferring multiscale structure in atmospheric turbulence using satellite-based synthetic aperture radar imagery. *J. Geophys. Res.*, 1996, 101(C8): 8433-8449.
- [6] Young G S, Sikora T D, Winstead N S. Inferring marine atmospheric boundary layer properties from spectral characteristics of satellite-borne SAR imagery. *Monthly Weather Review*, 2000, 128(5): 506-520.

- [7] Young G S. Mixed layer spectra from aircraft measurements. *J. Atmos. Sci.*, 1987, 44(9): 1251-1256.
- [8] Alpers W, Brümmer B. Atmospheric boundary layer rolls observed by the synthetic aperture radar aboard the ERS-1 satellite. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99(C6): 12613-12621.
- [9] Alpers W, Muller G, Brummer B. Study of atmospheric boundary layer rolls near Spitsbergen by using ERS SAR images of the sea surface and a numerical model. *IEEE Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 3: 1162-1164.
- [10] Kaimal J C, Wyngaard J C, Haugen D A, et al. Turbulence structure in the convective boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, 1976, 33(11): 2152-2169.
- [11] Stull R B. An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [12] Fan K G, Huang W G, He M X, et al. Wind direction analysis over the ocean using SAR imagery. *Journal of Information and Computational Science*, 2008, 5(1): 223-231.
- [13] Lenschow D H, Stephens P L. The role of thermals in the convective boundary layer. *Boundary-Layer Meteorol.*, 1980, 19(4): 509-523.
- [14] <http://www.weather.gov.hk/wxinfo/currwx/wxchtc.htm>.

(本文编辑 汪海英)