

引用格式: Guo Jie, He Yijun, Zhang Biao, *et al.*. Based on Wave Parameters Inversion Model Experiment by Scatterometer Data Improved Dlgornth[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(5): 907-911. [过杰, 何宜军, 张彪, 等. 基于散射计波浪参数反演模型的改进算法实验[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(5): 907-911.] doi: 10. 11873/j. issn. 1004-0323. 2016. 5. 0907

# 基于散射计波浪参数反演模型的改进算法实验

过 杰<sup>1</sup>, 何宜军<sup>2</sup>, 张 彪<sup>2</sup>, Vladimir Yurjevich Karaev<sup>3</sup>,  
M. A. Panfilova<sup>3</sup>, Yuriy Titchenko<sup>3</sup>

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所山东省海岸带环境过程重点实验室, 山东 烟台 264003;

2. 南京信息工程大学海洋科学学院, 江苏 南京 210044;

3. Department of Hydrophysics, Institute of Applied Physics, Russian Academy of Science  
Nizhny Novgorod, Russia, 46603950)

摘要: 一种新的利用散射计(ERS1/2)数据反演有效波高和平均周期的模式被提出。通过俄罗斯学者利用浮标数据建立完全成长风浪条件下有效波高与风速之间的关系, 与匹配浮标观测的有效波高数据对比, 区分完全成长风浪、成长风浪和涌浪 3 种海况下的匹配数据; 利用 BP 神经网络建立模式反演 3 种海况下的有效波高, 均方根误差分别为 0.53、0.57 和 0.86 m, 反演平均周期均方根误差分别为 0.69、1.04 和 1.36 s。这种反演方法在完全成长风浪海况下最好, 依次是成长风浪和涌浪海况。该研究为散射计数据反演波浪参数提供了依据, 使大面积反演波浪参数成为可能。

关键词: 有效波高; 平均周期; BP 神经网络; 散射计(ERS1/2)数据; 浮标数据

中图分类号: TP 79 文献标志码: A 文章编号: 1004-0323(2016)05-0907-05

## 1 引 言

海浪通常用有效波高( $H_{1/3}$ )、波周期和波长等波浪参数来描述。波浪参数的获得传统上主要借助于测波计和浮标等观测手段来实现。这种测量方法只能局限于局部实施, 无法应用于广阔的海域且保证数据的详细和连续性。随着遥感技术的发展, 大范围连续测量波浪参数已经成为可能。目前, 卫星搭载的合成孔径雷达(SAR)是可以通过遥感观测波浪谱用于波浪参数研究的传感器。但是由于方位波数截止和能源缺乏, 不能观测高频率的波浪谱, 因而在研究波浪参数应用方面存在局限性。而高度计通过雷达脉冲的海面回波波形的前沿斜率, 可以获取

海面有效波高的信息, 全球海面有效波高反演精度已经达到 0.5 m。这一突破为研究全球海域其他波浪参数提供了可能, 许多学者为此做了大量的研究工作。

Hwang 等<sup>[1]</sup>利用墨西哥湾的浮标数据风速、波周期和有效波高建立了关系; 利用高度计观测的风速和有效波高来估算波周期, 这些波浪参数可以在 7 km 分辨率轨迹上测得。但是, 由于二维空间分辨率太低, 其应用受到了限制。微波散射计是测量海面风场的特殊传感器, 它的分辨率分别为 50、25 和 12.5 km 不等, 反演全球海面风速精度已经达到 2 m/s 以内。由于其覆盖面积大, 重复周期短, 数据得到了广泛应用。风场之所以能被散射计观测, 是

收稿日期: 2015-09-28; 修订日期: 2016-08-27

基金项目: 中国科学院与乌俄白国际合作项目“理论数字模拟海况对散射计海面风场反演精度的影响”(Y429011031), 国家自然科学基金委员会与俄罗斯基础研究基金会合作交流项目“利用 SAR 数据分析关于雷达后向散射及风场反演的影响因子”(4141101049), 国家自然科学基金委面上项目“多波段极化合成孔径雷达岸高风场反演研究”(41176160)。

作者简介: 过 杰(1965—), 女, 河南开封人, 副研究员, 主要从事海洋微波遥感及应用研究。E-mail: jguo@yic.ac.cn。

因为风场影响海面毛细重力波,而海面毛细重力波的变化能通过散射计的后向散射系数测量。事实上散射计的后向散射系数呈现的海面雷达回波强度是受海风驱动的影响。众所周知,海浪包括风浪和涌浪;因此,散射计后向散射系数不但与风场有关,而且与海浪有关。Tran 等<sup>[2]</sup>利用热带降雨测量卫星 TRMM(Tropical Rainfall Mapping Mission),和两个卫星传感器名字为:Jason-1 和 ENVISAT 的大量海洋遥感数据建立了后向散射系数与风速、有效波高和入射角之间的关系;这篇文章利用这些全球海洋数据对过去的理论和研究领域的假设做一评估。Stephen 等<sup>[3]</sup>应用于海面的谱模型,它是二尺度散射理论模型的应用,能够很好地预测观察在宽范围入射角范围  $0^{\circ}\sim 70^{\circ}$  内依赖于后向散射系数的频率、极化、入射角和风矢量。谱模型结合涌的作用检验雷达后向散射系数,在低频(L-波段)标准入射角影响是显著的;但是在高频(Ku-波段)大入射角(约  $50^{\circ}$ )时,影响几乎可以消除。随着神经网络技术发展,Quilfen 等<sup>[4]</sup>利用大量匹配数据研究了散射计(ESR、C-波段)后向散射系数与集成的海况参数波周期和有效波高(浮标测量)关系,发现后向散射系数受波浪参数影响。在此基础上,Guo 等<sup>[5-6]</sup>分别利用散射计 ESR1/2 和 QuikSCAT 与浮标匹配数据研究了散射计后向散射系数与风速、风向、入射角、有效波高、波陡之间的关系,先后利用神经网络和遗传算法成功地利用散射计数据反演了波陡。利用经验关系区分了风浪和涌浪,风浪时反演有效波高比较成功,涌浪时反演有效波高均方根误差是 0.72 m。本文将在此基础上,利用浮标风速与有效波高之间的关系区分完全成长风浪、成长风浪和涌浪,并进一步反演波浪参数。

2 研究数据与方法

数据来自于 ESR1/2(1991 年 8 月~2000 年 12 月)与美国浮标中心(NDBC)提供的 12 个浮标(如图 1)<sup>[6]</sup>数据匹配的结果。匹配数据见表 1。匹配方

式:经纬度误差  $0.15^{\circ}$ ,时间误差 0.5 h,共获得匹配数据 15 096 对,剔除风速不大于 3 m/s 的数据 14 817 对。将采用反馈神经网络模式反演波浪参数:有效波高及周期。输入元,输出元、隐含元及传递函数见表 2。通过对 14 817 对数据神经网络训练发现,隐含元选 38,传递函数用 Logsig 和 purelin,模式训练误差最小。反演有效波高训练,输入元是:散射计测量的入射角、后向散射系数、波向(散射计方位角减去浮标风向差的余弦值)和浮标测的风速;输出元是浮标有效波高( $H_b$ )。反演有效波高( $H_{1/3}$ )验证,输入元是散射计测量的入射角、后向散射系数、波向(散射计方位角减去散射计风向差的余弦值)和散射计测的风速;输出元是散射计反演的有效波高。波浪的平均周期( $T$ )反演方法基本与有效波高反演方法一致,唯一不同的是输入元中增加了浮标测量的有效波高(或散射计数据反演的有效波高)。

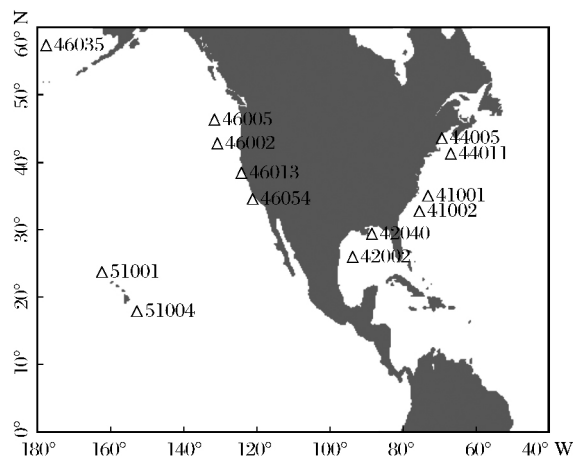


图 1 匹配浮标的位置

Fig. 1 Match the location of the buoys

表 1 参数匹配

Table 1 Matched data

散射计				
后向散射系数	方位角	入射角	风速	风向
浮标				
风速	风向	有效波高	平均周期	

表 2 反馈神经网络模式因子

Table 2 The factors of BP neural network model

反演有效波高							
输入元	入射角	后向散射系数	波向	风速	输出元	有效波高	
反演周期							
输入元	入射角	后向散射系数	波向	风速	反演的有效波高	输出元	周期
隐含元		38	传递函数		Logsig, purelin		

3 结果与分析

本文采用完全成长风浪状态下, Karaeva 等<sup>[7-8]</sup>风与有效波高之间的关系(式(1)), 从散射计与浮标匹配数据中区分成长中的风浪(2 721 对)、完全成长中的风浪(2 334 对)和涌浪(9 762 对)3种海况的数据分别建立模式并验证模式(表 3)。

$$H_s = -0.0125 + 0.000926 \cdot U_{10} + 0.02337 \cdot U_{10}^2 + 0.0000006 \cdot U_{10}^3 + 0.028 \cdot \exp(-U_{10}) \quad (1)$$

式(1)适用于风速大于 3 m/s 的数据( $U_{10}$ 距海面 10 m 高处的风速,  $H_s$  表示有效波高)。

海况区分条件:

- $|H_b - H_s| < 0.2 \text{ m}$  完全成长风浪
- $(H_b - H_s) \leq -0.2 \text{ m}$  成长风浪
- $(H_b - H_s) \geq 0.2 \text{ m}$  涌浪

其中:  $H_b$  为浮标观测的有效波高,  $H_s$  为散射计数据反演的有效波高。

表 3 建模及验证数据

Table 3 Building modeling and validation data

海况	建模数据/对	验证模式数据/对
发展中的成长风浪	1 721	1 000
完全成长风浪	1 334	1 000
涌浪	5 000	4 762

3.1 发展中的成长风浪海况下

在发展中的风浪海况下, 共有 2 721 对数据参加建模(1 721 对)与验证(1 000 对)。图 2 显示验证模式, 有 1 000 对数据参加验证。反演  $H_{1/3}$  与浮标  $H_b$  对比相关系数( $R$ )0.88, 均方根误差(RMSE)0.57 m, 绝对误差(Bias)0.44 m, 相对误差(RE)0.27 m。图 3 显示将图 2 反演的有效波高加入, 全部利用散射计数据反演平均周期, 验证模式有 1 000 对数据参加验证。反演平均周期( $T_r$ )与浮标观测平均周期( $T_b$ )对比相关系数( $R$ )0.52, 均方根误差(RMSE)1.04 s, 绝对误差(Bias)0.63 s, 相对误差(RE)0.13 s。

3.2 完全成长风浪海况下

在完全成长风浪海况下, 共有 2 334 对数据参加建模(1 334 对)与验证(1 000 对)。图 4 显示验证模式, 有 1 000 对数据参加验证。反演  $H_{1/3}$  与浮标  $H_b$  对比相关系数( $R$ )0.89, 均方根误差(RMSE)0.53 m, 绝对误差(Bias)0.33 m, 相对误差(RE)0.24 m。图 5 显示将图 4 反演的有效波高加入周期反演, 验证模式有 1 000 对数据参加验证。反演周期( $T_r$ )与浮标观测周期( $T_b$ )对比相关系数( $R$ )0.68, 均方根误差(RMSE)0.69 s, 绝对误差(Bias)

0.53 s, 相对误差(RE)0.11 s。

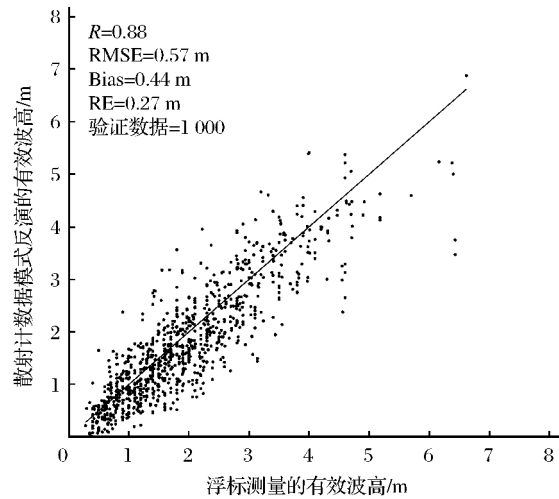


图 2 成长风浪海况下反演的波浪参数  $H_{1/3}$

Fig. 2  $H_{1/3}$  retrieved in developing wind-wave

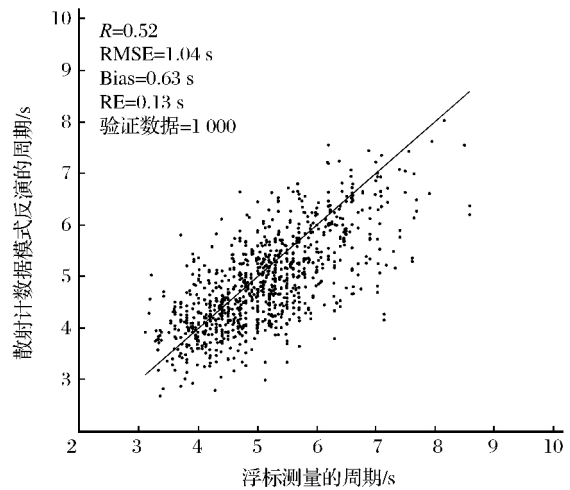


图 3 成长风浪海况下反演的波浪参数  $T$

Fig. 3  $T$  retrieved in developing wind-wave

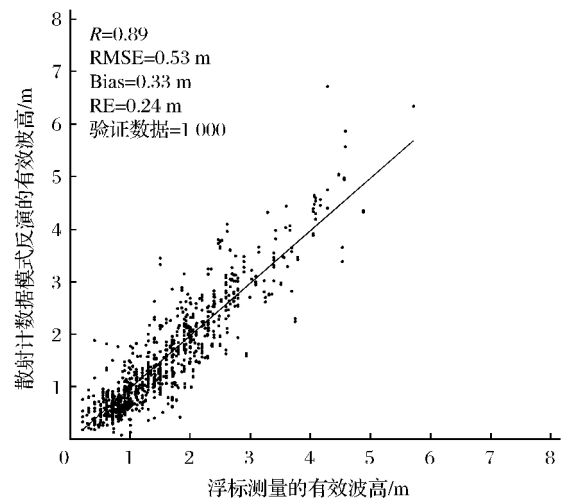


图 4 完全成长风浪海况下反演的波浪参数  $H_{1/3}$

Fig. 4  $H_{1/3}$  retrieved in full developing wind-wave

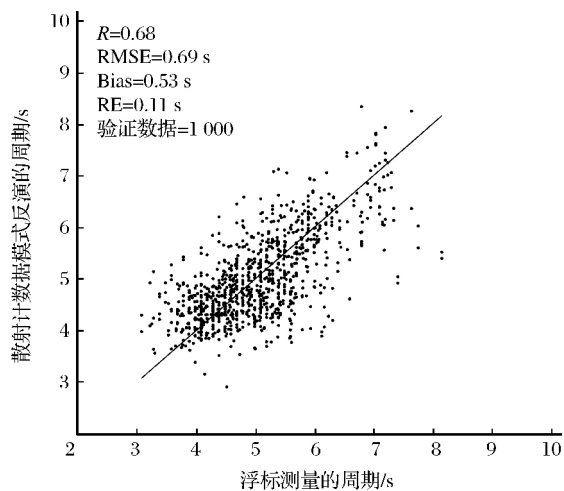


图 5 完全成长风浪海况下反演的波浪参数  $T$   
Fig. 5  $T$  retrieved in full developing wind-wave

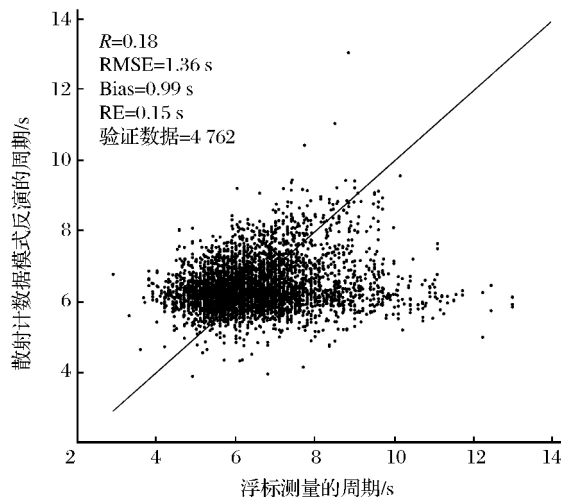


图 7 涌浪海况下反演的波浪参数  $T$   
Fig. 7  $T$  retrieved in swell wave

3.3 涌浪海况下

在涌浪海况下,共有 9 762 对数据参加建模 (5 000 对)与验证 (4 762 对)。图 6 显示验证模式,有 4 762 对数据参加验证。反演  $H_{1/3}$  与浮标  $H_s$  对比相关系数( $R$ )0.65,均方根误差(RMSE)0.90 m,绝对误差(Bias)0.64 m,相对误差(RE)0.29 m。图 7 显示把图 6 反演的有效波高加入周期反演,验证模式有 4 762 对数据参加验证。反演平均周期( $T_r$ )与浮标观测平均周期( $T_b$ )对比相关系数( $R$ )0.18,均方根误差(RMSE)1.36 s,绝对误差(Bias)0.99 s,相对误差(RE)0.15 s。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\omega_k^1 - \omega_k^2)^2} \quad (2)$$

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |\omega_k^1 - \omega_k^2| \quad (3)$$

$$RE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (|\omega_k^1 - \omega_k^2| / \omega_k^1) \quad (4)$$

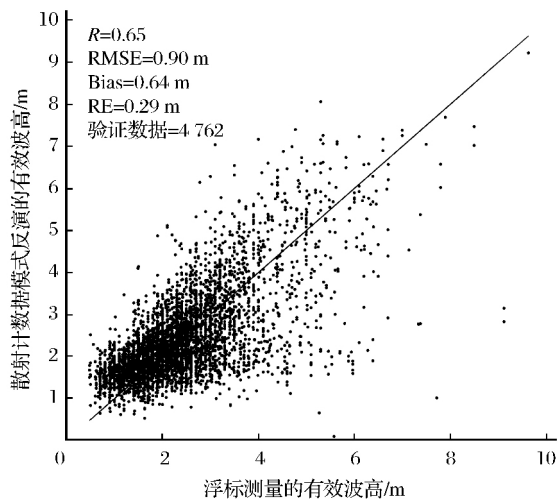


图 6 涌浪海况下反演的波浪参数  $H_{1/3}$   
Fig. 6  $H_{1/3}$  retrieved in swell wave

表 4  $H_{1/3}$  和  $T$  来自神经网络反演误差对比

Table 4 RMSE of  $H_{1/3}$  and  $T$  for BP-NN inversion

海况	项目	$H_{1/3}$	$T$
发展中风浪 占主导	相关系数	0.88	0.52
	均方根误差	0.57 m	1.04 s
	绝对误差	0.44 m	0.63 s
	相对误差	0.27 m	0.13
完全发展风浪 占主导	相关系数	0.89	0.68
	均方根误差	0.53 m	0.69 s
	绝对误差	0.33 m	0.53 s
	相对误差	0.24 m	0.11 s
涌浪占主导	相关系数	0.65	0.18
	均方根误差	0.90 m	1.36 s
	绝对误差	0.64 m	0.99 s
	相对误差	0.29 m	0.15 s

4 结 语

从采用方法和以上反演结果以及相关系数、均方根误差、绝对误差和相对误差分析来看,在完全成长海况下,无论是反演的有效波高和周期,其均方根误差分别为 0.53 m 和 0.69 s,结果比较好;其次是发展中的海浪海况,反演的有效波高和周期,其均方根误差分别为 0.57 m 和 1.04 s;最后是涌浪,反演的有效波高和周期,其均方根误差分别为 0.90 m 和 1.36 s。此方法不但反演了有效波高,而且反演了周期,这个结果在反演波周期方面比原有结果<sup>[5-6]</sup>有很大改进。从研究结果来看,要提高波浪参数反演精度,风场和有效波高的反演精度是关键。今后将会关注不同分辨率、不同波段和极化方式散射计数据反演结果。

## 参考文献 (References):

- [1] Hwang P A, Teague W J, Jacobs G A, *et al.* A Statistical Comparison of Wind Speed, Wave Height, and Wave Period Derived from Satellite Altimeters and Ocean Buoys in the Gulf of Mexico Region[J]. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 1998, 103(C5): 10451-10468.
- [2] Tran N, Chapron B, Vandemark D. Effect of Long Waves on Ku-band Ocean Radar Backscatter at Low Incidence Angles Using TRMM and Altimeter Data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(4): 542-546.
- [3] Durden S L, Vesecky J F. A Physical Radar Cross-section Model for a Wind-driven Sea with Swell[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1985, 10(4): 445-451.
- [4] Quilfen Y, Chapron B. Relationship between ERS Scatterometer Measurement and Integrated Wind and Wave Parameters [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, 21, 368-373.
- [5] Guo Jie, He Yijun, Chu Xiaoqing, *et al.* Wave Parameters Retrieved from QuikSCAT Data[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2009, 35: 345-351.
- [6] Guo J, He Y J, Perrie W, *et al.* Significant Wave Heights Estimated from ERS-1/2 Scatterometer Data[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2009, 27: 123-127.
- [7] Karaev V Y, Meshkov E M. Features of Sea Wave Classification in Problems of Remote Sensing[J]. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2013, 49(9): 919-929.
- [8] Panfilova M, Karaev V, Guo J. Slope Variance Obtaining from Buoy Data and Validation by TOPEX/POSEIDON Measurements[J]. *IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean*, 2015, DOI: 10. 1109/RADIO. 2015. 7323371.

## Based on Wave Parameters Inversion Model Experiment by Scatterometer Data Improved Algorithm

Guo Jie<sup>1</sup>, He Yijun<sup>2</sup>, Zhang Biao<sup>2</sup>, Vladimir Yurjevich Karaev<sup>3</sup>,  
M. A. Panfilova<sup>3</sup>, V. Yuriy Titchenko<sup>3</sup>

(1. *Shandong Provincial Key Laboratory of Coastal Environmental Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China;*

*2. School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;*

*3. Department of Hydrophysics, Institute of Applied Physics, Russian Academy of Science, Nizhny Novgorod, Russia, 46603950)*

**Abstract:** A new model is proposed to estimate the significant wave height and average period with ERS-1/2 scatterometer data. The relationship between the wind speed and significant wave height in full developing wind-wave domination is established by Russian scholars. Through this formula, the data that based on the ERS1/2 data and the NDBC buoys data matching were distinguished into three states; developing wind-wave, full developing wind-wave and swell wave, respectively. The significant wave heights and average period are retrieved by Back Propagation neural network, the root mean square is 0.53, 0.57, 0.90 m and 0.69 s, 1.04 s, 1.36 s in three states, respectively. This method inversion significant wave height and period is found that the full developing wind-wave domination is best effect, in turn, is the developing wind-wave, the last is swell wave. The study provides the basis for scatterometer data inversion of wave parameters. It makes the biggest possible inversion wave parameters in large area.

**Key words:** Significant wave height; Average period; Back Propagation (BP) neural network; ERS1/2 data; Buoys data