

高频地波雷达风速直接反演的经验模型

楚晓亮^{*①②} 张杰^① 王曙曜^② 纪永刚^① 王祎鸣^①

^①(国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266061)

^②(中国海洋大学信息科学与工程学院 青岛 266100)

摘要: 利用风浪经验模型从高频地波雷达(HFSWR)的回波谱数据中反演风速需要有效波高等先验信息,因此风速的反演受有效波高反演精度的影响。该文基于风浪经验模型,利用风速和高频地波雷达海面回波二阶谱与一阶谱能量之比的关系,发展了无需波高信息的风速直接反演的经验模型。将风速反演经验模型应用到高频地波雷达风速的反演中,对两部不同频率的雷达在不同海域获得的数据进行了比较分析,结果表明,该文中采用的经验模型能够有效地对风速进行反演,其中三参数模型的结果略好于双参数模型。

关键词: 高频地波雷达; 风速反演; 经验模型

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)04-1013-04

DOI: 10.11999/JEIT140850

An Empirical Model for Wind Speed Inversion Directly from High Frequency Surface Wave Radar Sea Echo

Chu Xiao-liang^{①②} Zhang Jie^① Wang Shu-yao^② Ji Yong-gang^① Wang Yi-ming^①

^①(First Institute of Oceanography of National Bureau of Oceanography, Qingdao 266061, China)

^②(College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The information of the significant wave height is needed in the wind speed inversion from the sea echo of High Frequency Surface Wave Radar (HFSWR) by using the empirical model of wind waves. Therefore, the accuracy of the significant wave height has an effect on the wind speed inversion. Based on the empirical model of wind waves, a wind speed inversion empirical model for wind retrieval without the information of wave height is developed, which uses the relationship between the wind speed and ratio of second-order to first-order spectrum energies. The inversion model is applied to the wind speed extraction. And the data obtained from two radars with different frequency in different detecting area are analyzed. The results show that the proposed model can be used to extract the wind speed from the HFSWR sea echo and the results of which three-parameter model are better than the two-parameter model.

Key words: High Frequency Surface Wave Radar (HFSWR); Wind speed inversion; Empirical model

1 引言

高频地波雷达在海洋探测中具有大范围、全天候及实时性的优势,由于雷达的回波谱中含有丰富的海态信息,因此从回波谱中可以提取海面流场、风场和海浪等信息。目前,利用高频地波雷达进行风速反演时,通常是先获取有效波高后,再借助风浪模型计算出来。有效波高的反演最初是基于文献[1]以高频电磁波海面雷达散射理论为基础而建立的反演经验模型。利用此模型与实测数据拟合分析获得相应的拟合参数,从而求得波高,此模型在工程

上适用性较强。在此基础上,文献[2-4]对模型进行了修正,文献[5]采用这一经验模型利用多频雷达对有效波高进行了反演。另外一些学者则提出了几种通过反演出浪高谱而获得有效波高的方法^[6-12],通过这些方法获得有效波高及相应的峰波频率后,利用风浪充分发展条件下的风浪模型即可求得风速^[13]。还有一些学者通过寻找有效波高与雷达回波多普勒谱特征值间的关系来获得风速,如文献[14]在风浪充分发展的条件下,通过建立风速与二阶谱峰值频率位置之间的关系来反演风速,并通过实验数据验证了该方法的实用性,但这种方法对获得二阶谱峰值点位置的精确度要求较高。文献[15]通过人工神经网络方法对风速进行了反演,取得了不错的结果。文献[16]建立了海面风速与有效波高的经验模型,通过对实测数据的反演对比验证了该模型的稳定性。在

2014-06-26 收到, 2015-01-06 改回

国家自然科学基金重点项目(61032011)和中国博士后科学基金(2013M531559)资助课题

*通信作者: 楚晓亮 xlchu@ouc.edu.cn

实际应用中, 经验模型方法比较简单实用, 但在求解风速时都增加了反演波高这一环节, 即在对高频地波雷达反演风速进行定标时需要先获得有效波高的反演值或实测值。本文根据风浪经验模型, 直接建立了二阶谱与一阶谱能量之比和风速关系的双参数经验模型, 减少了反演有效波高的环节。在此基础上, 发展了风速反演的三参数经验模型, 通过高频地波雷达反演风速与风速计数据的对比, 表明双参数模型和三参数经验模型都能很好地进行风速的反演, 并且三参数经验模型反演的结果略好于双参数模型。

2 基本模型

根据风浪经验模型(SMB)(SMB: 是由 Sverdrup, Munk and Bretschneider 3 个人名的首字母组成), 以风浪为主导的海面风速与波高满足^[13]

$$\frac{gH_s}{V_{10}^2} = 0.26 \tanh \left[\left(\frac{1}{f_p V_{10}} \right)^{3/2} \frac{(3.5g)^{3/2}}{10^2} \right] \quad (1)$$

式中, g 是重力加速度, H_s 是有效波高, V_{10} 是海面上方 10 m 处风速, f_p 是峰值频率。式(1)不宜直接求解, 只能采用迭代等方法。SMB 关系式可以简化成的经验公式为^[17]

$$gH_s/V_{10}^2 = A(gX/V_{10})^B \quad (2)$$

文献[16]基于式(2)建立了海面风速与有效波高的经验模型, 风速可表示为

$$V = aH_s^b \quad (3)$$

式中, a 和 b 是待定系数。通过经验模型反演出有效波高, 但是利用此模型进行风速反演在很大程度上依赖于海面有效波高的反演^[16]。

有效波高的反演可根据文献[1]的经验模型求解。

$$H_s^2 = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sigma^{(2)}(\omega)}{W(\omega)} d\omega \left/ \left(k_0^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \sigma^{(1)}(\omega) d\omega \right) \right. \quad (4)$$

式中, k_0 为雷达波数, ω 为多普勒频率, $\sigma^{(2)}$ 和 $\sigma^{(1)}$ 分别为二阶和一阶雷达散射截面, $W(\omega)$ 表示与两列海浪波矢之间耦合作用相关的权函数。式(4)可以改写成

$$H = (\sqrt{2}/k_0) R_w^{1/2} \quad (5)$$

R_w 为二阶谱能量与一阶谱能量的加权之比。由于加权系数只依赖于多普勒频率, 对于一定的区间可视为常数, 文献[3]利用了二阶谱能量与一阶谱能量的无权重比值 R , 将式(5)简化为

$$H = (a/k_0) R^{0.5} \quad (6)$$

文献[2]则将式(5)推广为

$$H = (a/k_0) R^b \quad (7)$$

式中, a 和 b 仍然为待定系数。

将式(6)代入式(3), 可以得到高频地波雷达海面回波二阶谱能量与一阶谱能量之比和风速关系的双参数模型, 即

$$V = aR^b \quad (8)$$

式(8)中参数 a 包含了雷达波数 k_0 。由此可见, 对于在风作用下充分成长的海面来说, 可以不用通过求解 H_s , 而直接建立比值 R 与风速的关系, 从而对风速进行反演求解。式(8)与有效波高计算式(7)形式上基本相同, 在统计分析时, 需要对 a , b 参数进行拟合。为使风速 V 与 R 更加有效地拟合, 本文中对式(8)进行改进, 加入第 3 个参数 c 以加强拟合曲线的上、下偏移的调节, 形成三参数模型, 即

$$V = aR^b + c \quad (9)$$

3 风浪经验模型的应用

本文采用中船重工鹏力(南京)大气海洋系统有限公司研发的高频地波雷达系统分别在福建(2013 年 10 月份)和滨海(2013 年 2 月份)获得的实验数据对模型进行验证。雷达系统的发射频率分别为 7.815 MHz 和 10.750 MHz, 该雷达系统采用了收发分开共站体制, 其工作带宽为 30 kHz, 发射天线为三元八木天线, 接收天线为 24 元双排阵型, 反演风浪时采用了数字波束合成技术, 具体的雷达系统参数见表 1。

福建海域的高频雷达数据是 2013 年 10 月份获得的, 风速反演区域距离雷达站点 75 km, 与正北方向夹角为 90°, 频率为 7.815 MHz。将反演区域内布放浮标所提供的风速数据作为比测数据。图 1 给出了雷达反演风速结果与浮标数据风速结果的散点图, 根据式(9)三参数模型, 拟合得到 a , b , c 为 46.67, 0.35 和 -15.29, 相关系数为 0.73, 均方根误差为 1.73m/s。图 2 给出了拟合后的雷达反演结果与浮标数据的比较图, 从图中看出二者结果总体符合较好。根据式(8)双参数模型对雷达数据和浮标数据拟合得到 a 和 b 分别为 51.62 和 0.98, 均方根误差为 1.82 m/s, 相关系数为 0.71, 数据散点图和比较结果如图 3 和图 4 所示, 从拟合结果上看, 式(9)模型反演结果要略好于式(8)模型。比较图 2 和图 4, 在浮标风

表 1 高频地波雷达系统指标

参数	指标
工作频率(MHz)	7.815/10.750
发射功率(W)	200
距离分辨率(km)	5
方位分辨率(°)	(风、浪)10
时间分辨率(min)	10

速在 18 m/s 左右情况下，三参数模型要显著好于双参数模型。对于风速较小(<6 m/s)的情况下，两种模型得到的结果与实测结果差别都较大。由于这两种模型都是风浪经验模型，都需要满足风浪充分发展的海态条件。因此，风速较小情况下，海浪无法得到足够的能量，不能充分发展，因而得到的误差较大。

滨海海域采用的是从 2013 年 02 月 01 号 8 点到 2013 年 02 月 18 号 23 点的数据，雷达频率为 10.75 MHz，选取参考点位置距离雷达站点大约 30 km，与正北方向夹角为 85°。风速实测数据选取滨海岸基自动气象站风速计同一时段的观测数据。利用三参数模型得到的结果如图 5 和图 6 所示。图 5 给出了风速计与高频地波雷达反演风速的散点图，拟合得到 $a = 14.24$, $b = 0.24$, $c = -4.09$, 相关系数为 0.5, 均方根误差为 1.99 m/s。相关系数较低，但均方根误差可以接受。图 6 给出了风速计和高频地波雷达风速比较图。从图上看，虽然风速计测量的风速和

高频雷达反演的风速符合不太理想，但还是能够反映出风速的变化趋势。图中部分对应风速计风速较高的数据，雷达反演结果误差较大。这一方面由于风速计距雷达反演区域约为 30 km，会造成一定的误差；另一方面，通过观察雷达多普勒谱，发现相对应的地波雷达二阶谱较小，因此可以解释为虽然风速较大，但是由于海浪没有充分发展，无法得到足够的能量，从而导致地波雷达二阶谱较小并且不稳定，反演结果较差。另外，较大的误差也有可能来自雷达系统或风场的不均匀分布。

根据两部雷达的数据得到的拟合结果如表 2 所示，综合比较分析可以发现：(1)雷达频率较低(7.815 MHz)，在风浪充分成长下，其反演高速率较之低风速要好；而对于雷达频率较高时(10.750 MHz)，反演低风速较之低频雷达要好一些，这符合高频地波雷达的遥感机理；(2)综合两个频率的雷达数据风速反演结果，三参数模型反演的结果略好于双参数模型的结果；(3)风速经验模型对于充分成长的海浪，反演结果较好，而对于不充分成长的海浪，对风速反演结果误差较大，有一定的局限性。

表2 不同模型的风速拟合参数

数据	拟合类型	a	b	c	相关系数	均方根误差(m/s)
福建数据	双参数	51.62	0.98	-	0.71	1.82
福建数据	三参数	46.67	0.35	-15.29	0.73	1.73
滨海数据	双参数	11.56	0.52	-	0.50	2.06
滨海数据	三参数	14.24	0.24	-4.09	0.50	1.99

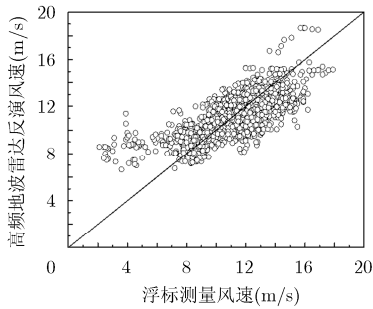


图 1 福建雷达三参数模型反演风速结果与浮标数据散点图

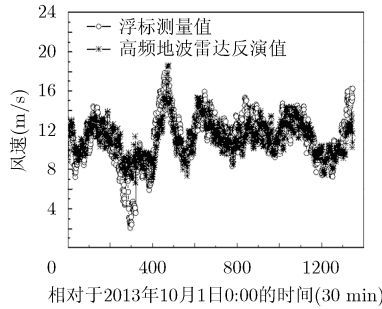


图 2 福建雷达三参数模型反演风速结果与浮标比较图

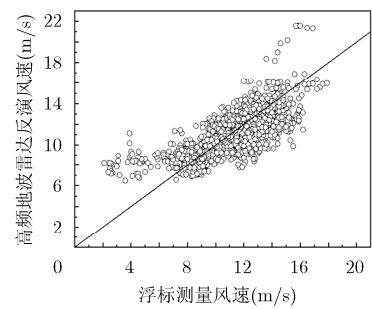


图 3 福建雷达双参数模型反演风速结果与浮标数据散点图

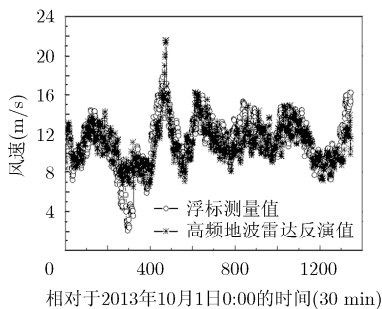


图 4 福建雷达双参数模型反演风速结果与浮标比较图

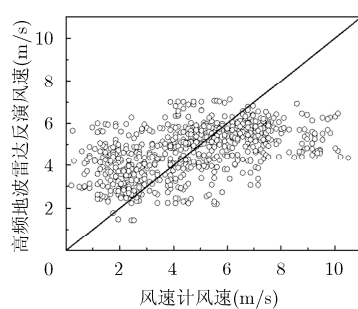


图 5 滨海雷达三参数模型反演风速结果与风速计数据散点图

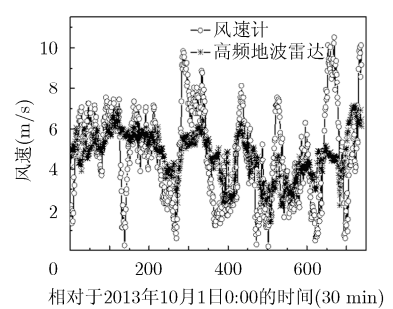


图 6 滨海雷达三参数模型反演风速结果与风速计比较图

4 结论

本文在风浪经验模型的基础上,建立了风速和
高频地波雷达海面回波二阶谱能量与一阶谱能量之
比的关系,发展了无需波高信息的高频地波雷达风
速直接反演的经验模型。反演风速经验模型适合以
风浪为主导,并充分发展的海面。文中采用两部不
同频率的雷达在不同海域的数据进行了比较分析,
结果表明,文中采用的经验模型能够有效地对风速
进行反演,并且三参数模型反演的结果略好于双参
数模型。不过从反演结果上看,对于风浪还没有充
分成长的海面,该模型应用受到限制。另外,本文
共采用了 48 天的数据,数据量相对较少,三参数
模型相对于双参数模型的优势有待于获取更多数
据进行分析。

致谢: 感谢中船重工鹏力(南京)大气海洋信息系
统有限公司周涛研究员提供的高频地波雷达数据
及比测数据。

参考文献

- [1] Barrick D and Weber B. On the nonlinear theory for gravity waves on the ocean's surface. Part II: interpretation and applications[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1977, 7(1): 11-21.
 - [2] Maresca J W Jr and Georges T. Measuring rms wave height and the scalar ocean wave spectrum with HF skywave radar[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1980, 85(C5): 2759-2771.
 - [3] Heron S and Heron M. A comparison of algorithms for extracting significant wave height from HF radar ocean backscatter spectra[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, 15(5): 1157-1163.
 - [4] 吴雄斌, 李伦, 李炎. 高频地波雷达海面有效波高探测实验研究[J]. *海洋与湖沼*, 2012, 43(2): 210-216.
Wu Xiong-bin, Li Lun, Li Yan, *et al.* Experimental research on significant wave height detecting with HFSWR OSMAR071[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2012, 43(2): 210-216.
 - [5] Zhao Chen, Chen Ze-zong, Jiang Yan-ni, *et al.* Exploration and validation of wave-height measurement using multifrequen HF radar[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2013, 30(9): 2189-2202.
 - [6] Lipa B and Barrick D. Extraction of sea state from HF radar sea echo: mathematical theory and modeling[J]. *Radio Science*, 1986, 21(1): 81-100.
 - [7] Wyatt L. The measurement of the ocean wave directional spectrum from HF radar Doppler spectra[J]. *Radio Science*, 1986, 21(3): 473-485.
 - [8] Howell R and Walsh J. Measurement of ocean wave spectra using narrow beam HF radar[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1993, 18(3): 296-305.
 - [9] Hisaki Y. Nonlinear inversion of the integral equation to estimate ocean wave spectra from HF radar[J]. *Radio Science*, 1996, 31(1): 25-29.
 - [10] Green J and Wyatt L. Row-action inversion of the Barrick-Weber equations[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2006, 23(3): 501-510.
 - [11] 李伦, 吴雄斌, 龙超, 等. 基于正则化方法的高频地波雷达海浪方向谱反演[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(1): 219-229.
Li Lun, Wu Xiong-bin, Long Chao, *et al.* Regularization inversion method for extracting ocean wave spectra from HFSWR sea echo[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(1): 219-229.
 - [12] 李伦, 吴雄斌, 徐兴安. 基于优化理论的高频地波雷达海浪参数反演[J]. *物理学报*, 2014, 63(3): 441-451.
Li Lun, Wu Xiong-bin, and Xu Xing-an. Optimization method for extracting ocean wave parameters from HFSWR[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(3): 441-451.
 - [13] 文必洋, 黄为民, 王小华. OSMAR2000 探测海面风浪场原理与实现[J]. *武汉大学学报(理学版)*, 2001, 47(5): 642-644.
Wen Bi-yang, Huang Wei-min, and Wang Xiao-hua. The principle and realization of sounding ocean's wave height and wind with OSMA2000[J]. *Journal of Wuhan University (Nature Science Edition)*, 2001, 47(5): 642-644.
 - [14] Green D, Gill E, and Huang W. An inversion method for extraction of wind speed from high-frequency ground-wave radar oceanic backscatter[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(10): 3338-3346.
 - [15] Shen W, Gurgel K, and Voulgaris G. Wind-speed inversion from HF radar first-order backscatter signal[J]. *Ocean Dynamics*, 2012, 62: 105-121.
 - [16] 李伦, 吴雄斌, 徐兴安, 等. 高频地波雷达风速反演经验模型[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2012, 37(9): 1096-1098.
Li Lun, Wu Xiong-bin, Xu Xing-an, *et al.* An empirical model for wind speed inversion by HFSWR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(9): 1096-1098.
 - [17] 文圣常, 余宙文. 海浪理论与计算原理[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 469-473.
Wen Sheng-chang and Yu Zhou-wen. *Ocean Wave Theory and Calculation Principle*[M]. Beijing: Science Press, 1984: 469-473.
- 楚晓亮: 男, 1977 年生, 博士, 讲师, 研究方向为 X 波段导航雷达和
高频地波雷达海态反演。
张 杰: 男, 1963 年生, 博士, 研究员, 研究方向为海洋遥感。
王曙曜: 男, 1988 年生, 硕士生, 研究方向为高频地波雷达海洋
参数反演。
纪永刚: 男, 1977 年生, 博士, 副研究员, 研究方向为高频地波
雷达海态反演及目标探测。
王祎鸣: 男, 1977 年生, 硕士, 助理研究员, 研究方向为高频地
波雷达信号处理及杂波抑制。