

“灿鸿”台风期间高频地波雷达数据分析

翁怡婵, 石少华, 程祥圣, 齐安翔, 孙同美

(国家海洋局 东海预报中心, 上海 200081)

摘要:分析了小型阵变频高频雷达在“灿鸿”台风期间海面风、浪、流遥测结果。将雷达观测结果与定点浮标数据进行比对,表现出很好的一致性。其中径向流相关系数为 0.92,均方根误差为 0.13 m/s,有效波高相关系数为 0.90,均方根误差为 0.50 m,平均波周期相关系数为 0.64,均方根误差为 1.12 s。风向相关系数为 0.55,均方根误差为 40.0°。风速相关系数为 0.68,均方根误差为 3.26 m/s。雷达对海流的探测能力最优,在高海况下对风、浪探测能力优于低海况下;雷达对“灿鸿”台风期间风、浪的探测延迟于浮标测量。结果表明小型阵变频高频地波雷达较好地反映了台风期间波浪场的空间分布及其发展变化情况,具有一定的灾害性海洋天气监测能力。

关键词:高频变频地波雷达;台风;有效波高;对比验证

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2017)04-0495-08

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2017.04.006

中国是世界上登陆台风最多,也是受台风灾害影响最严重的国家之一^[1]。因此实时准确地对台风进行监测对保证人民的生命和财产安全具有重要意义。目前,测量台风过程中的海洋要素(风、浪、流)的传统工具是浮标、潜标、海洋调查船等,这些测量方式最大的缺陷是受海况条件限制,而且所能覆盖的面积有限,无法全面、长时间连续地反映待测海域的海况,不能满足实际工作的应用需要。而高频地波雷达作为一种覆盖面广、全天候、高频次、低成本的岸基海洋表面动力学要素遥感设备,是实现海洋大范围实时监测的基本工具。

随着高频地波雷达的广泛应用,国内外不少学者开展了海洋要素的比测实验。比测实验大致分为三类^[2]:第一类是根据对海洋规律现有的经验认识,主要从宏观上进行比测。如朱大勇等利用闽南沿岸的地波雷达长期观测结果得出台湾海峡西南部海域表层海流主要由季风导致的顺岸流季节波动和常年存在的东北向背景流共同组成,这一规律同样由座底 ADCP 锚碇观测进一步揭示^[3]。Yukiharu 和 Tastsunori^[4]等通过高频地波雷达观测到冲绳岛东部的表面流在台风经过时的惯性振荡的水平变化,惯性振荡离岸大而近岸小。第二类是现场对比分析,主要是定点对比,与其他的海洋观测仪器进行比对。如吴雄斌^[5]等利用福建龙海的 osmar071 高频地波雷达与金门的波浪浮标进行有效波高的探测实验研究。第三类是发展规律、变化趋势以及整个场的空间分布对比,比如与海洋卫星的测量数据相比较^[2]。如龚子平等^[2]利用大面积海域内雷达测量风场与 QuikSCAT 卫星遥感数据进行对比分析,表明雷达与卫星数据在空间分布和发展趋势上都基本吻合。

2002 年,韩树宗等^[6]利用 2000-10 在浙江舟山海域进行的 osmar2000 和 SZF1-II 海上对比验证实验中,验证了 osmar2000 探测海浪要素的精度,并分析了误差成因。2005-08,龚子平等^[2]利用 0519 号台风“龙王”期间的高频地波雷达的测量数据与局部点的浮标数据对比,结果表明高频地波雷达较好地反映了台风期间台湾海峡内风场的空间分布及其发展变化情况。2010 年汕尾亚运会帆船赛期间,周浩等^[7]将 osmar-s 获取的汕尾海域近 1 个月连续的流速、流向、浪高、浪周期、风向、风速等与现场布放浮标实测数据对比,结果表

收稿日期:2016-09-12

资助项目:海洋公益性行业科研专项——沿海重点保障区域精细化综合预报系统示范应用(201305031-5)

作者简介:翁怡婵(1985-),女,福建安溪人,工程师,硕士,主要从事近海环境动力学方面研究. E-mail:wengyichan@eastsea.gov.cn

(王 燕 编辑)

明,osmar-s 给出的浪高、浪周期和风速参数结果的短期起伏性较大^[8],与现场海洋仪器的观测数据较为吻合,初步验证了 osmar-s 的风浪探测能力。

而小型阵变频高频雷达从小型天线(阵)设计、标准化设计、产品工艺、结构、环境适应性和可靠性等方面,提炼并固化较为成熟的软硬件技术,完善雷达硬件系统、雷达系统控制软件、风浪流反演算法及通道校准算法等。雷达系统的可靠性、稳定性和一致性以及雷达硬件和算法相较之前都有了一定程度的提高。小型阵列变频地波超视距雷达 osmar-M01 主要性能指标包括工作频段:7.5~27 MHz;雷达工作方式:4 频 FMICW 方式;距离分辨率:1~5 km 可变;雷达发射机峰值功率: ≤ 300 W;收发天线抗风能力:13 级台风;时间分辨率:10 min。2015 年第九号超强台风“灿鸿”于 2015-06-30 在西北太平洋洋面上生成。07-01 升格为热带风暴,07-11T16:40 以强台风级别在浙江省舟山朱家尖登陆,登陆时中心附近最大风力有 14 级,风速 45 m/s,于 07-13 凌晨在朝鲜西南部地区消散。本文给出了台风期间雷达获取的部分观测数据,并结合浮标测量数据进行对比分析,评估高频地波雷达对灾害性海洋过程的监测能力。

1 数据及处理

本研究中小型阵变频高频地波雷达分别位于朱家尖和嵊山雷达站,两部雷达相距约 100 km,因受地形的限制,雷达辐射角分别只有 90°和 120°,覆盖范围为舟山群岛以东偏南海域,雷达设定为 10 min 扫描一次,最大探测范围 122°27′~124°33′E,29°06′~31°09′N,经纬向分辨率均为 0.05°。浮标站位布设于地波雷达观测海域内,浮标集成海流、海浪、风等要素观测。浮标站距离嵊山较近,相距 21 km,且浮标站已到达朱家尖站高频雷达探测的边缘位置。海流数据的获取率在 60%左右(图 1)。因此,本文重点比对嵊山站雷达的风浪探测结果和径向流结果。海流、海浪、海面风观测分别采用 Nortek(阔龙)ADCP、美国 YOUNG 公司型号 05103 的风速风向测量仪及波浪骑士波浪测量仪,将 ADCP、风、浪测量仪集成在 3 m 浮标上,这种观测方式既可以实时传输数据,又能保证数据质量,安全性较高。图 1 为高频变频地波雷达、“灿鸿”台风路径及浮标分布图。



图 1 高频地波雷达、浮标位置分布及“灿鸿”台风路径图

Fig.1 Location of the radar and buoy as well as the Typhoon “Chan-Hom” track

浮标数据时间范围为 2015-06-16—08-11,每隔 30 min 一个观测值;雷达数据时间范围为 2015-03-01—11-29,每隔 10 min 一个观测值。由于浮标和雷达的观测间隔不同,对比时,以浮标资料的观测时间和浮标的地理位置作为基准^[9],高频地波雷达的观测数据选用与浮标距离最近的雷达元的数据进行插值获得的时间序列。具体插值方法:按 delaunay 三角剖分方法先找出 ADCP 位置点四周的雷达观测场的 3 个网格点,

构成三角形,然后线性内插,从而获得准同步的雷达和浮标观测数据。径向流的处理方式^[10]为将 ADCP 的实测矢量流投影至所选径向流雷达元方位角 φ 的径向方向,当 ADCP 实测海流流速和流向分别为 u_{ADCP} 和 θ 时,投影径向流 $RS_{\text{ADCP}} = u_{\text{ADCP}} \times \cos(\varphi - \theta)$ 。

经过上述处理,雷达和浮标两组资料同步性较好,可完整获取“灿鸿”整个台风过程的连续观测数据。

2 结果与分析

2.1 径向流的对比

图 2 中,因雷达测量的径向流速为表层海流的等效值,故取浮标 1.1 m 深度的海流数据在嵎山站方向上的投影值与嵎山站雷达测量的径向流数据相比较。由图 2 可见,雷达径向流与投影径向流的变化特征相当一致,为明显的半日潮流变化。受“灿鸿”的影响,流速呈现明显增长的趋势,而在此之后,流速逐渐回落。图 3 为径向流序列对应的散点图,径向流序列的散点基本集中在 $y = x$ 线的两侧,二者相关系数为 0.92,均方根误差为 0.13 m/s。

地波雷达海流的验证误差有两个来源^[10-11],即雷达和传统仪器的海流测量误差,以及地波雷达与实测仪器观测目标的差异。主要表现在以下方面:1)浮标 ADCP 测量的是海洋上某较小区域的海洋环境动力要素值,而高频地波雷达探测的是在约几十平方公里范围内的等效平均值。2)仪器的观测误差。地波雷达本身的硬件偏差、反演算法的误差以及浮标 ADCP 本身的分辨率和测量精度,最后都在比测结果上有误差贡献。3)时间差异。变频高频地波雷达每 10 min 提供一组数据,浮标每 30 min 输出一组实测数据,因此雷达的测量结果与现场测量结果在时间上不一样,需要对雷达结果进行时间上的插值,这也是造成误差的一个原因。

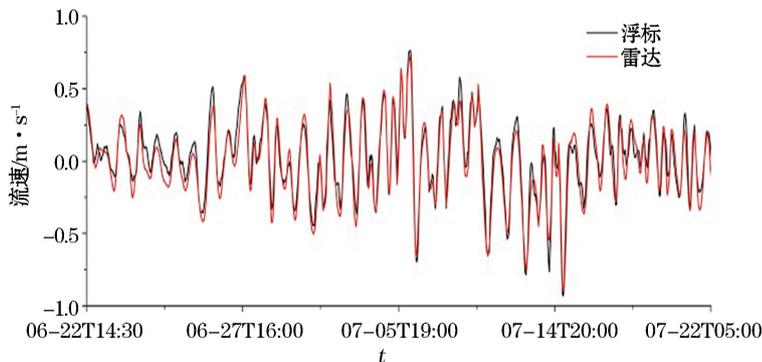


图 2 2015 年定点浮标海流投影值与嵎山站雷达测量径向流序列对比

Fig.2 The time series of radial current recorded by the radar and buoy in 2015

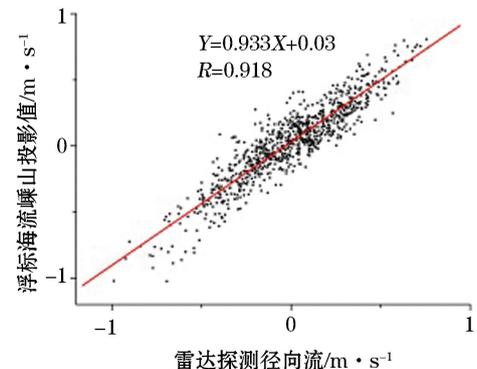


图 3 径向流序列对应的散点图

Fig.3 Scatter plot of the radial current recorded by the radar and buoy

2.2 海面风的对比

雷达与浮标风速的时间序列对比图见图 4,“灿鸿”台风期间风速、风向散点图见图 5 和图 6。风向的相关系数为 0.554,均方根误差为 40.0° ,风速的相关系数为 0.68,均方根误差为 3.26 m/s 。从图 4 可以看出,浮标先于雷达达到最大值。这是因为浮标是通过携带的 YOUNG 05103 直接观测风场,而雷达则是通过一阶和二阶海洋回波谱中提取风速和风向的信息,风场变化反应到海洋回波上需要一定的时间,这使得雷达观测的风场变化趋势要滞后于浮标观测。从图 4 还可以明显看出,浮标风速较小时,雷达与浮标偏差较大。

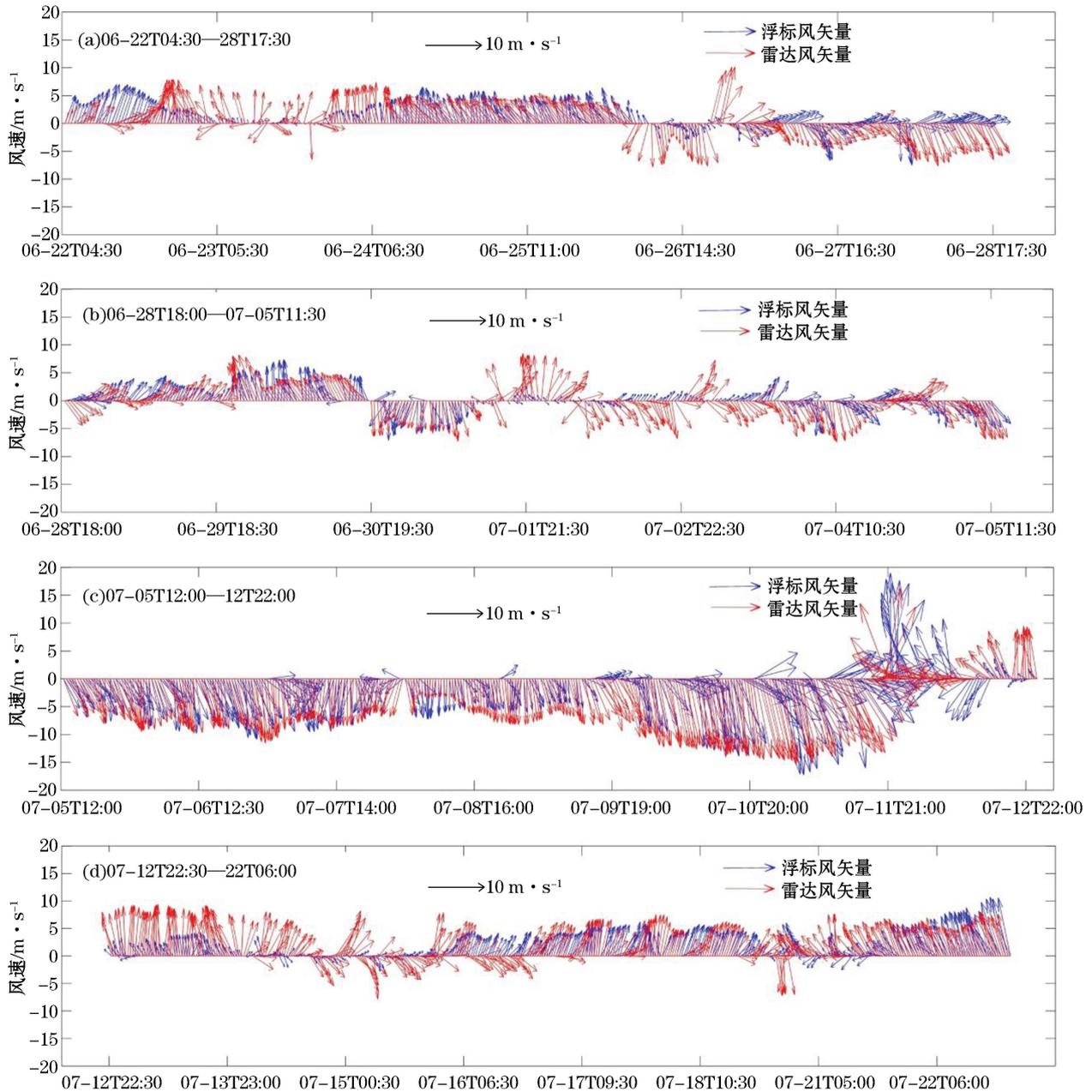


图 4 2015 年雷达与浮标风速的时间序列对比图

Fig.4 The time series of wind speed recorded by the radar and buoy in 2015

以浮标观测的平均风速为基准,对不同风力等级下雷达风速和风向的探测误差进行统计,结果如图 6 所

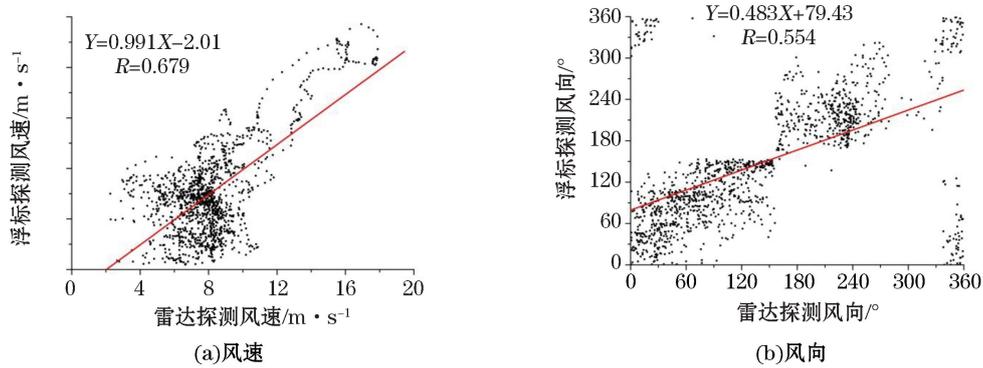


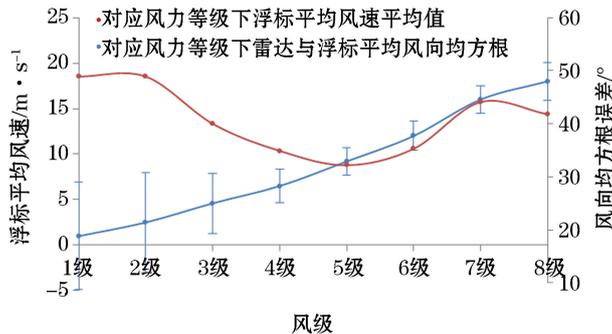
图5 雷达与浮标风速和风向结果的散点对比

Fig.5 Scatter plot of wind speed and wind direction recorded by the radar and buoy

示。以均方根误差为例,1~5级风级下,风越大,雷达观测平均风速和风向的误差越小;5~7级下,平均风速误差变化不大,风向误差随风级变大而变大;7~8级,风速误差增大,风向误差稍有减小。1~2级风力下,雷达平均风速的平均绝对误差为5.28~5.73 m/s,均方根误差为5.5~5.9 m/s,平均风向的平均绝对误差为39.3°~41.7°,均方根误差均为48.9°,误差明显大于其他风力条件下,说明高频地波雷达在较低风速下测量精度较低。风力在5级的时候,雷达测量精度是最优的,风速均方根误差为1.5 m/s,风向均方根误差为32.2°。为保证雷达的探测距离,工作频率设定为7.5~10 MHz,而在这个频率下,如果风速较小的话,保证产生Brgg散射的海浪是不饱和的,雷达所测量的风场是不准确的^[12-15]。

“灿鸿”台风登陆时雷达捕获的平均风力为8级,浮标平均风速为18 m/s,风速均方根误差为2.08 m/s,风向均方根误差为41.8°,说明雷达结果能较好地反映台风期间的海面风速风向变化的全过程。

总体来看,雷达的测量值大于实测的风速值,风速、风向均方根误差指数分别为3.26 m/s、40°,雷达对“灿鸿”台风期间风的探测延尺于浮标,地波雷达风向基本能反映真实的风向过程。



注:误差线表示雷达与浮标平均风速的均方根误差

图6 不同风力等级下雷达与浮标测风的比测结果

Fig.6 Comparison of wind measurements by the radar and buoy under different wind speeds

2.3 海面浪的对比

“灿鸿”期间浮标与雷达同步观测的有效波高对比如图7和图8所示。从图7可以看出,浮标和雷达所反映的有效波高变化趋势均是先增大后减小,趋势相同,且表现出很强的相似性。图8为有效波高对应的散点图,有效波高的散点基本集中在 $y = x$ 线的两侧,二者相关系数为0.90,均方根误差为0.50 m。从07-09T23:00从强台风级变为超强台风级并逐步影响观测站海域时,浮标与雷达观测的有效波高均急速增

大,于07-11达到最大值,浮标于03:00达到最大值,雷达于14:00达到最大值;07-11T10:00之后“灿鸿”由强台风级转为台风级,07-11T19:00之后由台风级转为强热带风暴级,灿鸿强度减弱,浮标与雷达观测的有效波高也随之开始降低,至12日,有效波高降低至台风到来之前的水平。与风场一样,浮标测量的有效波高变化趋势要超前于雷达。

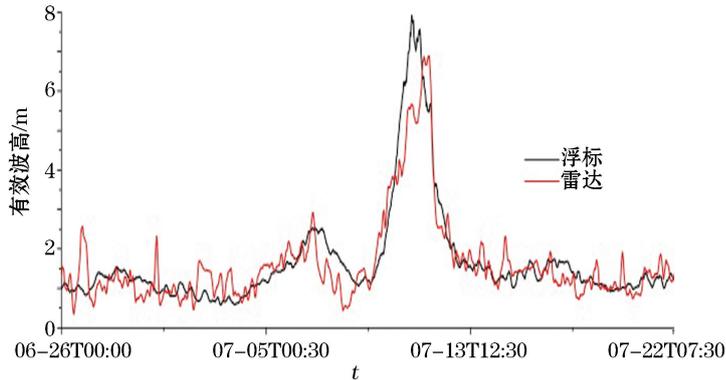


图7 2015年浮标测量有效波高与雷达测量有效波高序列对比

Fig.7 The time series of surface wave height recorded by the radar and buoy in 2015

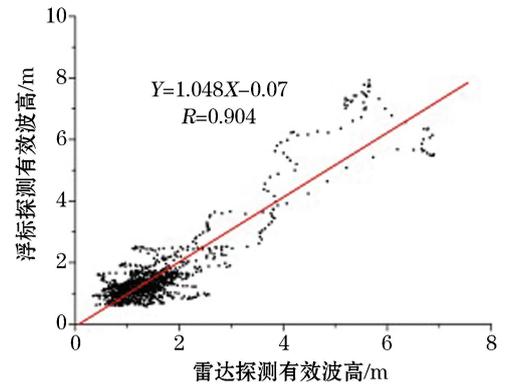


图8 有效波高对应的散点图

Fig.8 Scatter plot of surface wave height recorded by the radar and buoy

平均波周期对比图见图9和图10。由图可知,雷达与浮标数据反映的平均波周期变化趋势大致一致,该图也反映出平均波周期与有效波高相同的变化特性:在台风过境前后,浮标与雷达观测的平均波向数据吻合较好。平均波周期的反演效果的相关系数为0.638,均方根误差为1.12 s。

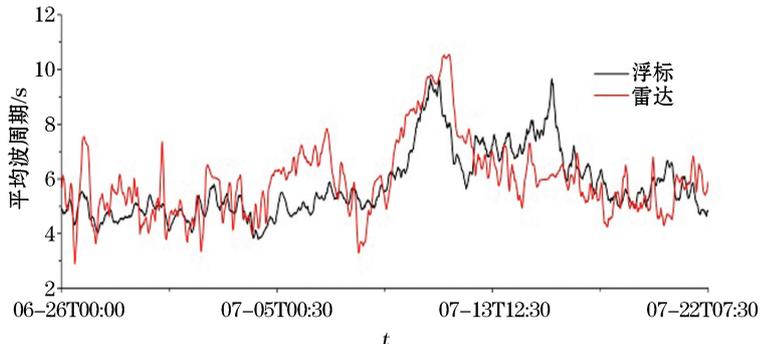


图9 浮标测量平均波周期与雷达测量平均波周期序列对比

Fig.9 The time series of mean wave period recorded by the radar and buoy

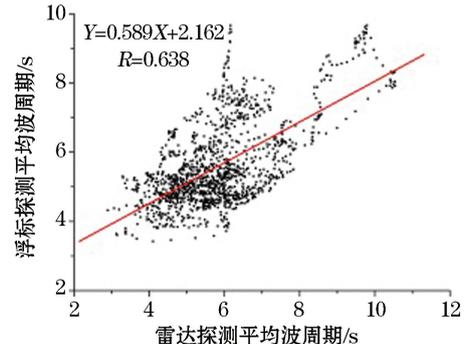


图10 平均波周期对应的散点图

Fig.10 Scatter plot of mean wave period recorded by the radar and buoy

图11a,11b,11c分别为2015-07-09T08:00,07-11T17:00,07-12T03:00三个时刻雷达输出的波浪场分布。图11a为台风过境前的波浪场分布,此时刻“灿鸿”七级风圈半径为400 km,七级风圈尚未到达雷达探测扇形区域内。图11b为“灿鸿”过境时波浪场分布,可以明显看到波高急速增大,有效波高的最大值由1.30 m上升到3.72 m。图11c为台风过境后波浪场分布,此时“灿鸿”强度减弱,从图7也可以看到,浮标与雷达观测的有效波高也快速降低。蓝色值区域(为高值区域)随着台风路径的转移而变化。雷达探测波高的变化趋势与台风路径是一致的。

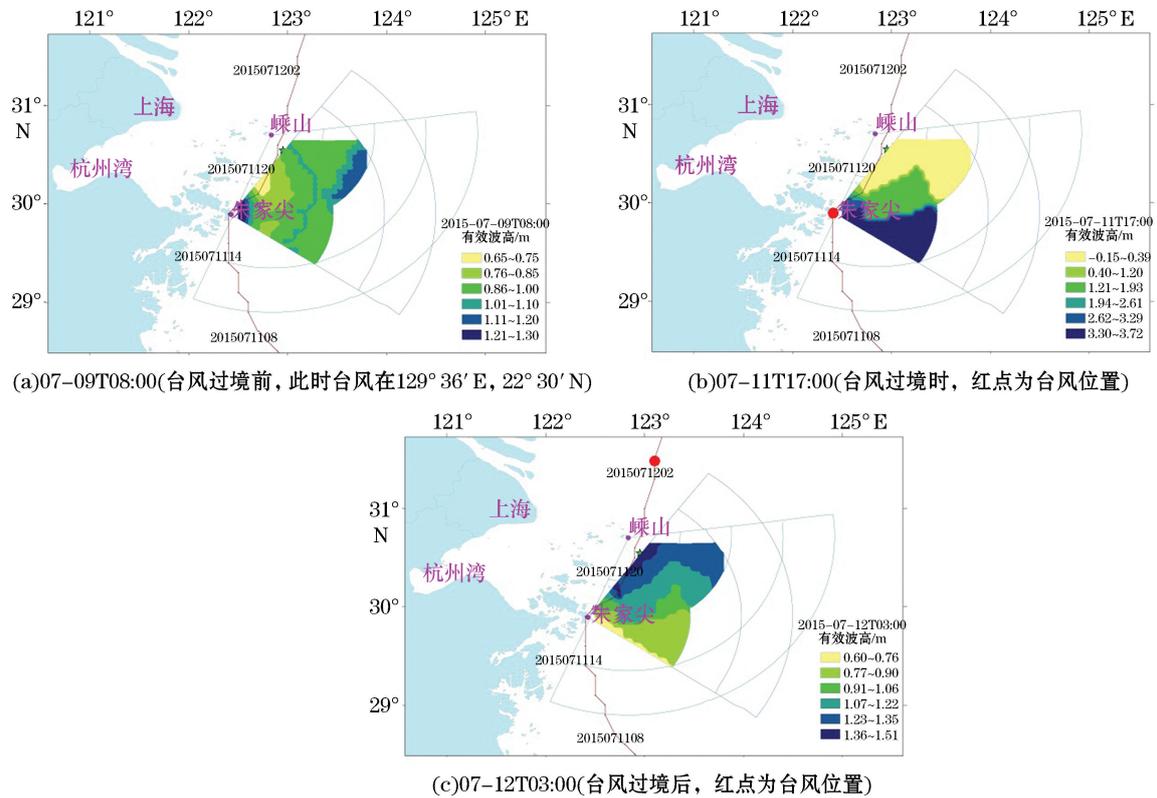


图 11 “灿鸿”台风期间有效波高分布

Fig.11 Radar detected ocean surface wave height during Typhoon “Chan-Hom”

3 结 语

本文对“灿鸿”台风期间舟山海域海面完整实时的风、浪、流监测,与浮标的对比可以看出,二者吻合程度较高,表现出了良好的灾害性海洋天气的监测能力。雷达对海流的探测能力最优,在高海况下对风、浪探测能力优于低海况下,另外,雷达对“灿鸿”台风期间风、浪的探测延迟于浮标测量。总体来讲,相对于浮标的单点观测,具有大区域、高分辨率、实时性监测能力的雷达能更好地满足海洋灾害监测。

参考文献(References):

- [1] WANG M J. The impacts of assimilating retrieved winds from Doppler radar observations on the intensity and track forecasts of Typhoon Jangmi(2008) and its mechanisms[D]. Nanjing: Nanjing University, 2014. 王明筠. 雷达反演同化对台风蔷薇(2008)强度和路径预报影响及其机制研究[D]. 南京: 南京大学, 2014.
- [2] GONG Z P, KE H Y, WU X B, et al. HF radar observation of Longwang Typhoon in the Taiwan Strait[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(6): 1695-1702. 龚子平, 柯亨玉, 吴雄斌, 等. “龙王”台风期间高频地波雷达数据分析[J]. 地球物理学报, 2007, 50(6): 1695-1702.
- [3] ZHU D Y, LI L, LI Y, et al. Seasonal and interannual variations of surface current in the southern Taiwan Strait to the west of Taiwan Shoals[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(11): 1339-1344. 朱大勇, 李立, 李炎, 等. 台湾海峡西南部表层海流季节变化的地波雷达观测[J]. 科学通报, 2008, 53(11): 1139-1344.
- [4] YUKIHARU H, TASTSUNORI N. Horizontal variability of near-inertial oscillations associated with the passage of a typhoon[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(12): 1-20.
- [5] WU X B, LI L, LI Y, et al. Experimental research on significant wave height detecting with HFSWR osmar071[J]. Oceanologia et Limno-

- logia Sinica, 2012, 43(2): 210-216. 吴雄斌, 李伦, 李炎, 等. 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.
- [6] HAN S Z, WANG H L, GUO P F, et al. A technological study of sensing ocean hydrological parameters with high frequency ground wave radar[J]. Journal of Ocean University of Qingdao(Natural Science), 2002, 32(5): 687-694. 韩树宗, 王海龙, 郭佩芳, 等. 高频地波雷达反演海浪的海上对比验证方法研究[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 2002, 32(5): 687-694.
- [7] ZHOU H, WEN B Y, WU S C, et al. Sea states observation with a portable HFSWR during the 16th Asian Games Sailing Competition [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2012, 27(2): 293-300. 周浩, 文必洋, 吴石才, 等. 亚帆赛间便携式高频地波雷达的海态观测[J]. 电波科学学报, 2012, 27(2): 293-300.
- [8] WEI G M, SHANG S P, HE Z G, et al. Performance of wave-wind detection by portable radar HFSWR OSMAR-S 100[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2016, 47(1): 52-60. 魏国妹, 商少平, 贺志刚, 等. OSMAR-S 100 便携式高频地波雷达海浪和海面风探测性能分析[J]. 海洋与湖沼, 2016, 47(1): 52-60.
- [9] WANG J, WEN X, LIU C X, et al. Wave observation during tropical cyclones based on the X-band radar[J]. Marine Forecasts, 2012, 29(5): 59-64. 王静, 文啸, 刘春霞, 等. 基于 X 波段雷达的台风浪观测分析[J]. 海洋预报, 2012, 29(5): 59-64.
- [10] ZHU D Y. Application of high frequency ground wave radar to coastal ocean; A case study in the Taiwan Strait[D]. Xiamen: Xiamen University, 2008. 朱大勇. 高频地波雷达在近海区域的应用研究——以台湾海峡为例[D]. 厦门: 厦门大学, 2008.
- [11] ZHU D Y, LI Y, GUO X G, et al. Review of studies on the validation of surface currents measured by high-frequency radar[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2013, 32(4): 1-7. 朱大勇, 李炎, 郭小钢, 等. 高频地波雷达海流验证研究述评[J]. 热带海洋学报, 2013, 32(4): 1-7.
- [12] GONG Z P, KE H Y, HOU J C, et al. Error analyze of current measurements by HF Surfaccal Wave Radar[J]. Journal of Wuhan University(Nature Science Edition), 2007, 53(3): 356-360. 龚子平, 柯亨玉, 侯杰昌, 等. 高频地波雷达海洋表面流测量误差分析[J]. 武汉大学学报(理学版), 2007, 53(3): 356-360.
- [13] ZHAO C. Research and application of multi-frequency HF ground wave radar sea state inversion technology[D]. Wuhan: Wuhan University, 2012. 赵晨. 变频高频地波雷达海态反演技术的研究与应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2012.
- [14] WEI S, KLAUS-WERNER G, GEORGE V, et al. Wind-speed inversion from HF radar first-order backscatter signal[J]. Ocean Dynamics, 2012, 62: 105-121.
- [15] HUANG W M, WU S C, KE H Y, et al. Extraction of wind stress from HF Radar Sea-Echo Doppler Spectra[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 1999, 4(1): 71-73.

High Frequency Radar Data Analysis During Chan-Hom Typhoon Period

WENG Yi-chan, SHI Shao-hua, CHENG Xiang-sheng, QI An-xiang, SUN Tong-mei

(Marine Forecast Center of East China Sea, SOA, Shanghai 200081, China)

Abstract: This paper provides the observation results of wind, wave and current derived from the high frequency radar during the Typhoon Chan-Hom. The radar measurements show good agreements with buoy observations. The root-mean-square error of radar-derived radial current, significant wave height, mean wave period, wind speed and wind direction are 0.13 m/s, 0.50 m, 1.12 s, 3.26 m/s, 40.0°, respectively; and the corresponding correlation coefficients are 0.92, 0.90, 0.64, 0.68, and 0.55, respectively. Results show that for all the parameters described above, the radar monitoring ability of the surface current is the best. The radar monitoring ability of wind and wave in the high sea state is better than that in the normal sea condition. In addition, during Typhoon Chan-Hom, radar detection of wave and wind is delayed to that of buoy. The results indicate that the radar system congruously displayed the wave field and evolutions, which can be used in surveillance of disaster ocean weather.

Key words: multi-frequency HF ground wave radar; typhoon; significant wave height; verification

Received: September 12, 2016