

Doi:10.11840/j.issn.1001-6392.2023.02.001

舟山海域高频地波雷达表层流探测试验

刘玉龙, 李程, 杨扬, 郑兵, 苗庆生, 徐珊珊, 李维禄, 丁峰

(国家海洋信息中心, 天津 300171)

摘 要: 2015年4月7—30日, 在浙江省舟山近海海域开展了“嵊山-朱家尖”小型阵列变频高频地波雷达系统的海上比测试验, 通过雷达观测数据与定点 ADCP 海流资料的比对检验了地波雷达表层流探测性能。径向流比对结果显示, 测点与雷达法向夹角越小, 距离雷达距离越近, 径向流比测结果越好, 雷达探测的结果越可靠。嵊山站径向流与 ADCP 观测结果的各站总体平均误差为 7.98 cm/s, 平均均方根误差为 15.34 cm/s, 平均相关系数为 0.89, 朱家尖站径向流与 ADCP 观测结果的各站总体平均误差为 6.24 cm/s, 平均均方根误差为 12.36 cm/s, 平均相关系数为 0.81。根据矢量流比对结果显示, 矢量流速与 ADCP 观测结果的各站总体平均误差为 4.82 cm/s, 平均均方根误差为 15.03 cm/s, 平均相关系数为 0.44。设置在嵊山、朱家尖两个雷达站双站探测的核心区域(两个雷达站连线的中垂线上, 并且与两个雷达站构成一个近似直角三角形)的站点比测结果更加理想, 当流速大于 0.25 m/s 时, 对于核心区域平均后的流向均方根误差为 24.9°。

关键词: 高频地波雷达; 表层流; 比测

中图分类号: P714+.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-6932(2023)02-0121-08

Sea surface currents detection in Zhoushan offshore sea by HF surface wave radar

LIU Yulong, LI Cheng, YANG Yang, ZHENG Bing, MIAO Qingsheng,

XU Shanshan, LI Weilu, DING Feng

(National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China)

Abstract: From April 7 to 30, 2015, the National Marine Data and Information Service carried out an offshore comparison test of the 'Shengshan-Zhujiajian' small array variable high frequency ground wave radar system in the offshore waters of Zhoushan, Zhejiang Province. The ground current detection performance of the radar was tested by comparing the radar observation data with the fixed point ADCP current data. According to the results of the radial current comparison, smaller angle between the measurement point and radar normal force and closer distance from the radar lead to more reliable radial flow ratio measurement results and the radar detection results. The overall average error of the radial flow and ADCP observations at Shengshan station for each station is 7.98 cm/s, the average root mean square error is 15.34 cm/s, and the average correlation coefficient is 0.89. The overall average error of the radial flow and ADCP observations at Zhujiajian Station for each station is 6.24 cm/s, the average root mean square error is 12.36 cm/s, and the average correlation coefficient is 0.81. According to the results of vector flow comparison, the overall average error of each station of vector flow velocity and ADCP observation is 4.82 cm/s, the average root mean square error is 15.03 cm/s, and the average correlation coefficient is 0.44. The comparison test results of the stations in the core area (located on the mid-pipeline of the line, connecting the two radar stations, forming an approximate right triangle with the two radar stations) of the two radar stations in Shengshan and Zhujiajian are more satisfactory. When the flow velocity is greater

收稿日期: 2022-09-02; 修订日期: 2022-11-04

基金项目: 国家重点研发计划重点专项 (2021YFC3101600; 2017YFC1405300); 国家自然科学基金青年科学基金 (42206226)

作者简介: 刘玉龙 (1982—), 博士, 副研究员, 主要从事水文气象资料管理研究, 电子邮箱: lichengnmdis@163.com

通信作者: 李程, 硕士, 工程师, 电子邮箱: 344784704@qq.com

than 0.25 m/s, the root mean square error of the flow direction after averaging for the core area is 24.9° .

Keywords: HF surface wave radar; surface currents; comparison test

高频地波雷达利用垂直极化的高频(3~30 MHz)电磁波在海洋表面绕射传播衰减小的特点,能超视距探测风场、浪场、流场等海洋动力学参数和海上低速移动目标。在海洋环境监测领域,地波雷达依靠其覆盖范围广、观测距离远等优势成为现阶段实现近海表层流场实时观测的重要手段,可以弥补传统定点观测仪器的不足,提高沿海海域海洋环境实时监测能力,在气象预报、防灾减灾、航运、海洋科学研究等方面有广阔的应用前景^[1]。

根据海洋公益性行业科研专项经费项目“小型海洋环境监测表面波雷达产业化关键技术与示范”的实施要求,2015年4月7—30日,国家海洋信息中心在浙江省舟山近海海域组织开展了“嵊山—朱家尖”小型阵变频高频地波雷达系统的海上比测试验,评估地波雷达在不同距离、不同方位上的表层流探测性能^[2],为雷达校准提供数据支撑。

“嵊山—朱家尖”小型阵变频高频地波雷达系统是由嵊山地波雷达站和朱家尖地波雷达站组成,分别部署在浙江省舟山市的嵊泗镇和朱家尖。两部雷达相距100 km左右,探测范围覆盖舟山群岛以东偏南海域(122.45°E — 124.55°E , 29.10°N — 31.15°N),由于雷达站地形的限制,辐射角度分别为 120° 和 90° ,最大有效探测距离为200 km。均方差量误差指标方面:流速 ≤ 15 cm/s(中间区域),流向 $\leq 25^{\circ}$ (流速 >10 cm/s时)。

1 比测方案制定

比测试验海域位于舟山嵊山和朱家尖之间的海域,范围为 122°E — 124.3°E , 29.5°N — 30.5°N ,该区域具有典型的东海海域特征,潮流以往复流为主,大潮平均流速在0.5~1 m/s之间。

基于地波雷达系统的特点,本文在研究海域设置14个站位,采用多普勒声学海流剖面仪(ADCP)分别进行连续观测25 h(不少于一个潮周期)的定点海流观测,站位分布如图1和表1所示。通过与雷达观测结果的误差分析来检验雷达

在不同距离、不同方位上流速和流向探测能力^[3]。具体站位设置方案如下:

(1) 在两部雷达连线中垂线上依次取5个点(1#、2#、3#、4#、5#),各站点距离两部雷达的距离依次为70 km、90 km、110 km、130 km、150 km,重点验证两部雷达的探测精度随距离的变化情况;

(2) 以2#站点与朱家尖雷达连线为半径(90 km),以雷达不同的探测方位,再依次选取3个站点(7#、9#、11#),共同验证朱家尖雷达的探测精度随方位的变化情况;

(3) 以2#站点与嵊山雷达连线为半径(90 km),以雷达不同的探测方位,再依次选取3个站点(8#、10#、12#),共同验证嵊山雷达的探测精度随方位的变化情况;

(4) 在4#与11#站点之间选择14#站点,此三个站点共同验证嵊山雷达的探测精度随方位的变化情况(约130 km处);

(5) 在4#与13#站点之间选择15#站点,此三个站点共同验证朱家尖雷达的探测精度随方位的变化情况(约130 km处)。

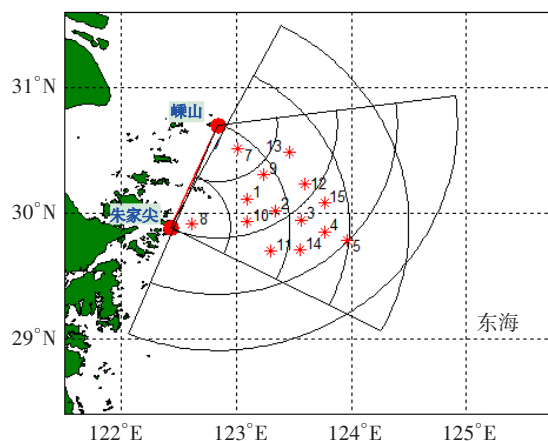


图1 比测试验站位空间分布

2 数据处理与质量控制

本文在2015年4月7—30日海上比测期间共获取数据6 300组,其中ADCP采用由表层向下打的方式,每0.4 m设置1层,采样时间设定为

表1 比测试验站位基本信息

站位	经度/°E	纬度/°N	距朱家尖/km	距嵎山/km	观测时长/h
1#	123.091 1	30.117 8	70	70	连续 25
2#	123.342 2	30.025 8	90	90	连续 25
3#	123.562 2	29.949 2	110	110	连续 25
4#	123.763 9	29.855 3	130	130	连续 25
5#	123.963 9	29.788 6	150	150	连续 25
7#	123.026 0	30.506 8	90	30	连续 25
8#	122.632 1	29.907 9	20	90	连续 25
9#	123.239 2	30.308 1	90	60	连续 25
10#	123.091 1	29.935 0	65	90	连续 25
11#	123.295 0	29.701 0	90	125	连续 25
12#	123.593 6	30.241 6	120	90	连续 25
13#	123.455 6	30.488 9	120	65	连续 25
14#	123.552 2	29.709 2	110	135	连续 25
15#	123.763 5	30.088 3	130	110	连续 25

120 s，每 5 min 获取 1 组海流数据，本文在分析过程中，将 ADCP 的 2 m 深度观测值定义为表层流数值。地波雷达每 10 min 输出一组海流数据，观测期间，嵎山、朱家尖两部地波雷达的径向流数据获取率较好，分别为 99.5% 和 99.1%，各站详细的数据获取率如表 2 所示。

表2 比测试验站位基本信息

站位	雷达	径向流数据获取率	站位	雷达	径向流数据获取率
1#	嵎山	100%	9#	嵎山	100%
	朱家尖	100%		朱家尖	99%
2#	嵎山	100%	10#	嵎山	100%
	朱家尖	100%		朱家尖	100%
3#	嵎山	100%	11#	嵎山	99%
	朱家尖	100%		朱家尖	100%
4#	嵎山	100%	12#	嵎山	100%
	朱家尖	96%		朱家尖	100%
5#	嵎山	100%	13#	嵎山	96%
	朱家尖	97%		朱家尖	95%
7#	嵎山	98%	14#	嵎山	100%
	朱家尖	100%		朱家尖	100%
8#	嵎山	100%	15#	嵎山	100%
	朱家尖	100%		朱家尖	100%

本文在对地波雷达和 ADCP 观测的流数据进行比测分析前，进行了必要的质量控制，主要包括以下几个步骤：

(1) 范围检验。对已有海流资料统计分析，得到海流各要素的取值变化范围，认为大于 2 m/s 的水平流速为异常值，须剔除。

(2) 尖峰检验。针对观测要素进行尖峰检验，如出现较大的突变，则判定其为异常值，需进一步分析。

(3) 连续性检验。时间接近（一个小时内）的流速差值在一定范围内，认为流速差大于 0.5 m/s 为异常，认定流速不连续^[4]。

经质量控制后的 ADCP 观测的海流资料数据有效率为 98%，质量问题主要体现在部分层深的数量良好率低于 60%；经质量控制后的地波雷达观测的海流资料数据有效率为 97.2%，质量问题主要体现在个别点位的海流数据不通过范围检验和连续性检验。综上所述，经数据质量控制的海流数据可满足本文数据比测分析的要求。

3 数据比测方法

由于比测分析的反演参数和评价方法存在诸多差异，比测验证所使用的反演参数一般为径向流流速、径向流方位角、矢量流流速流向、矢量流东分量、矢量流北分量等，利用同步观测序列进行误差统计与相关分析进行直接评价^[5]。其中各种误差定义如下：

绝对误差:

$$\Delta x_i = x_i - y_i \quad (1)$$

相对误差:

$$\delta x_i = \Delta x_i / y_i \quad (2)$$

平均误差:

$$\mu(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i \quad (3)$$

比值:

$$r = x_i / y_i \quad (4)$$

均方根误差:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (5)$$

标准偏差:

$$\delta x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

平均绝对误差:

$$m_{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i \quad (7)$$

平均绝对误差的标准误差:

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i - m_{\Delta})^2} \quad (8)$$

相关系数:

$$r = \frac{\sum x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sqrt{[\sum x_i^2 - n \bar{x}^2][\sum y_i^2 - n \bar{y}^2]}} \quad |r| \leq 1 \quad (9)$$

式中: x_i 表示雷达测量结果, y_i 为实测结果, $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 分别表示其平均值, n 为样本个数。

绝对误差、相对误差和平均误差可以从总体上说明地波雷达观测值与 ADCP 仪器实测值的差别大小。均方根差值可以从统计学角度反映地波雷达观测值偏离 ADCP 仪器实测值的程度大小, 均方根差值越小, 说明地波雷达观测值与 ADCP 仪器实测值吻合程度越高, 反之越低。标准偏差反映地波雷达观测值与本身平均值偏离程度的大小, 平均绝对误差的标准偏差反映地波雷达观测值与 ADCP 仪器实测值的绝对误差与其平均值偏离程度的大小, 其值越小, 说明绝对误差的变化越小, 反之越大。相关系数是反映地波雷达观测值与 ADCP 仪器实测值变化相关性的系数, 正相关数值范围为 0~1, 数值越大代表两组数据相关性越好; 负相关数值范围为 -1~0, 数值越小代表两组数据负相关性越好, 0 则说明两组数据无相关性^[6]。

4 数据比测和误差分析

4.1 直读海流计与 ADCP 矢量流比对结果分析

表 3 是 14 个站位的直读海流计定点矢量流与 ADCP 测得的 2 m 层矢量流流速、流向对比的误差分析结果。从比测结果上看, 除了 4# 站位的流速比对结果不理想之外, 其他站位的一致性都比较好, 准确地反映了站位所在海域的海流特征, 平均绝对误差、均方根和相关系数等参数均在合理范围内, 验证了本次试验将 ADCP 测得的 2 m 层海流作为表层流的可靠性。经后期进一步与船上调查人员讨论了解, 由于 4# 站位观测点海域存在大量水草, 对 ADCP 的信号产生影响造成其比对结果不理想。

4.2 径向流对比结果分析

表 4 是 14 个站位的地波雷达径向流与 ADCP 测得的流速、流向分解为径向流的对比误差分析结果。从比测结果上看, 站位的两部雷达径向流与 ADCP 矢量流分解径向流的一致性均较好, 可准确反映站位所在海域的海流特征, 平均绝对误差、均方根和相关系数等参数均在合理范围内。其中, 嵊山站径向流与 ADCP 观测结果的各站总体平均误差为 7.98 cm/s, 平均均方根误差为 15.34 cm/s, 平均相关系数为 0.89; 朱家尖站径向流与 ADCP 观测结果的各站总体平均误差为 6.24 cm/s, 平均均方根误差为 12.36 cm/s, 平均相关系数为 0.81。由于朱家尖站电磁环境复杂, 且比测期间有流星雨发生^[7], 受到的干扰较大, 个别比测点相关系数不够理想。

根据径向流比对结果显示, 8#、10#、14# 朱家尖雷达站的比测结果要优于嵊山雷达站的比测结果, 原因是这些站离朱家尖站的距离较近, 离嵊山站的距离较远; 其他站位嵊山雷达站的比测结果要优于朱家尖雷达站的比测结果, 原因是这些站离嵊山站的距离较近, 且与嵊山雷达站的法向夹角更小。可见测点距离雷达距离越近, 雷达资料质量越好, 测点与雷达的法向夹角越小, 雷达资料质量越好。

4.3 矢量流对比结果分析

表 5 是 14 个站位的雷达矢量流与 ADCP 测得的矢量流流速、流向的对比误差分析结果。从比测结

表3 直读海流计与 ADCP 矢量流数据误差分析

站 位	矢量流	平均绝对误差	平均绝对误差的标准差	均方根误差	相关系数
1#	流速/ $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	0.30	6.30	6.31	0.91
	流向/ $^{\circ}$	18.98	38.35	42.79	0.93
2#	流速/ $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	0.008	7.22	7.22	0.90
	流向/ $^{\circ}$	27.23	47.47	54.73	0.93
3#	流速/ $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	0.93	3.79	3.91	0.96
	流向/ $^{\circ}$	10.79	15.21	18.65	0.99
4#	流速/ $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	9.39	10.96	14.43	0.48
	流向/ $^{\circ}$	8.02	25.36	26.60	0.97
5#	流速/ $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	0.89	5.41	5.48	0.90
	流向/ $^{\circ}$	2.83	65.00	65.06	0.72
7#	流速/ $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	6.07	5.28	8.05	0.96
	流向/ $^{\circ}$	21.74	41.48	46.83	0.88
8#	流速/ $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	7.34	3.70	8.22	0.99
	流向/ $^{\circ}$	19.75	48.17	52.07	0.87
9#	流速/ $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	1.82	6.12	6.39	0.94
	流向/ $^{\circ}$	21.05	69.32	72.44	0.84
10#	流速/ $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	3.40	5.82	6.72	0.81
	流向/ $^{\circ}$	32.08	73.29	80.01	0.77
11#	流速/ $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	4.42	5.32	6.92	0.90
	流向/ $^{\circ}$	1.64	21.76	21.82	0.99
12#	流速/ $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	1.36	2.81	3.12	0.98
	流向/ $^{\circ}$	22.84	40.76	46.73	0.84
13#	流速/ $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	0.27	3.97	3.98	0.91
	流向/ $^{\circ}$	3.30	27.38	27.58	0.96
14#	流速/ $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	0.78	4.55	4.62	0.95
	流向/ $^{\circ}$	0.77	16.53	16.55	0.99
15#	流速/ $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	5.49	7.42	9.23	0.77
	流向/ $^{\circ}$	8.74	39.81	40.76	0.97

果上看，所有站位的雷达矢量流与 ADCP 实测海流流速、流向的一致性均较好，可准确反映站位所在海域的海流特征，平均绝对误差、均方根和相关系数等参数均在合理范围内。其中，矢量流速与 ADCP 观测结果的各站总体平均误差为 4.82 cm/s，平均均方根误差为 15.03 cm/s，平均相关系数为 0.44。比测期间单日内矢量流速的波动较小，因此矢量流的相关系数并不能准确反映实际情况；矢量流向与 ADCP 观测结果的各站总体平均误差为 20°，平均均方根误差为 47.62°，平均相关系数为 0.83。当流速大于 0.25 m/s 时比测流向，核心区域（130 km 以内的比测点 1#、2#、3#、9#、10#、11#、12#、13#）的平均

后均方根误差为 24.9°。

矢量流比对结果显示，设置在嵎山、朱家尖两个雷达站连线的中垂线上，并且与两个雷达站构成一个近似直角三角形的站点 3#、9#、10# 比测结果更加理想，这是因为这些站点位于双站探测的核心区域内，合成结果更理想。

5 结论

2015 年 4 月 7—30 日，国家海洋信息中心在浙江省舟山近海海域开展了“嵎山—朱家尖”小型阵变频高频地波雷达系统的海上比测试验，通

表4 地波雷达与 ADCP 径向流数据误差分析

站 位	站名	平均绝对误差/cm·s ⁻¹	平均绝对误差的标准差/cm·s ⁻¹	均方根误差/cm·s ⁻¹	相关系数
1#	嵎山	16.05	8.83	18.32	0.94
	朱家尖	11.22	12.33	16.67	0.77
2#	嵎山	11.08	10.05	14.96	0.79
	朱家尖	3.34	12.68	13.11	0.52
3#	嵎山	2.09	6.55	6.88	0.97
	朱家尖	8.24	12.19	13.71	0.89
4#	嵎山	5.03	7.84	9.32	0.94
	朱家尖	10.67	8.61	13.71	0.87
5#	嵎山	1.08	9.69	9.75	0.85
	朱家尖	0.08	14.05	14.05	0.65
7#	嵎山	8.80	9.60	13.03	0.95
	朱家尖	2.61	15.10	15.32	0.67
8#	嵎山	10.77	37.45	38.97	0.72
	朱家尖	1.71	7.26	7.46	0.97
9#	嵎山	8.19	11.66	14.25	0.96
	朱家尖	5.53	11.32	12.31	0.83
10#	嵎山	7.23	15.42	17.03	0.70
	朱家尖	1.48	7.81	7.95	0.87
11#	嵎山	0.42	14.01	14.01	0.93
	朱家尖	2.02	10.83	11.02	0.90
12#	嵎山	19.80	7.36	21.12	0.93
	朱家尖	20.53	8.39	12.34	0.90
13#	嵎山	6.73	6.05	9.06	0.97
	朱家尖	5.09	11.56	12.64	0.80
14#	嵎山	9.02	20.29	19.91	0.89
	朱家尖	9.42	7.38	11.97	0.94
15#	嵎山	5.56	5.94	8.15	0.94
	朱家尖	5.54	9.40	10.91	0.81

过14个定点ADCP观测站的布设,评估地波雷达在不同距离、不同方位上的表层流探测性能。表层流各参数的探测性能总结如下:

雷达可测量的流速范围为0~300 cm/s,超出该范围数值软件直接屏蔽,流向范围为0~360°。受到实际海情的限制,统计期间所观测到的最大流速为124 cm/s。

从径向流结果分析,嵎山站径向流与ADCP观测结果的各站总体平均误差为7.98 cm/s,平均均方根误差为15.34 cm/s,平均相关系数为0.89,朱家尖站径向流与ADCP观测结果的各站总体平均误差为6.24 cm/s,平均均方根误差为12.36 cm/s,平均相关系数为0.81。由于朱家尖站电磁环境复杂,且比测期间有流星雨发生,受到的干扰较大,

个别比测点相关系数不够理想。根据径向流比对结果显示,测点与雷达法向夹角越小,距离雷达距离越近,径向流比测结果越好,雷达探测的结果越可靠。

从矢量流结果分析,矢量流速与ADCP观测结果的各站总体平均误差为4.82 cm/s,平均均方根误差为15.03 cm/s,平均相关系数为0.44。比测期间单日内矢量流速的波动较小,因此矢量流的相关系数并不能准确反映实际情况;当流速大于0.25 m/s时,核心区域(130 km以内的比测点1#、2#、3#、9#、10#、11#、12#、13#)平均后的流向均方根误差为24.9°。矢量流比对结果显示,设置在嵎山、朱家尖两个雷达站双站探测的核心区域(两个雷达站连线的中垂线上,并且与两个雷

表5 地波雷达与ADCP矢量流数据误差分析

站 位	矢量流	平均绝对误差	平均绝对误差的标准差	均方根误差	相关系数
1#	流速/cm·s ⁻¹	3.82	15.86	16.32	0.30
	流向/°	34.55	79.04	56.41	0.72
2#	流速/cm·s ⁻¹	2.77	12.58	12.88	0.19
	流向/°	25.28	88.67	68.54	0.75
3#	流速/cm·s ⁻¹	5.53	10.88	12.21	0.69
	流向/°	26.63	38.66	36.57	0.92
4#	流速/cm·s ⁻¹	2.89	10.06	10.47	0.28
	流向/°	16.12	31.64	48.71	0.96
5#	流速/cm·s ⁻¹	2.55	10.63	11.13	0.59
	流向/°	24.72	54.88	65.74	0.58
7#	流速/cm·s ⁻¹	0.98	13.89	13.93	0.59
	流向/°	24.43	77.76	81.59	0.53
8#	流速/cm·s ⁻¹	15.38	21.08	26.10	0.49
	流向/°	12.89	31.77	34.29	0.95
9#	流速/cm·s ⁻¹	10.59	12.80	16.62	0.61
	流向/°	2.97	22.54	23.34	0.99
10#	流速/cm·s ⁻¹	3.34	10.54	11.05	0.52
	流向/°	10.12	26.85	28.69	0.98
11#	流速/cm·s ⁻¹	0.25	12.62	12.62	0.70
	流向/°	0.61	29.73	27.54	0.79
12#	流速/cm·s ⁻¹	5.23	17.28	18.05	0.11
	流向/°	32.47	64.54	61.22	0.70
13#	流速/cm·s ⁻¹	0.15	14.13	14.13	0.35
	流向/°	16.44	19.72	25.67	0.98
14#	流速/cm·s ⁻¹	8.16	19.15	20.82	0.52
	流向/°	22.67	30.25	37.10	0.96
15#	流速/cm·s ⁻¹	5.96	12.84	14.16	0.19
	流向/°	31.44	63.95	71.27	0.87

达站构成一个近似直角三角形)的站点比测结果更加理想。

总体上看,本次比测试验结果可验证“嵊山—朱家尖”高频地波雷达站的探测性能,在后续的工作中可结合相关项目设置长期连续观测站,经历比较复杂的海况变化过程,对地波雷达整体性能进行更好的测试和评价。

致谢: 武汉大学陈泽宗教授团队在地波雷达数据反演方面提供了支持,中国海洋大学在海试期间提供了后勤保障工作,在此一并致谢。

参 考 文 献

[1] 沈志奔. 高频地波雷达海流应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.

- [2] 李程, 李欢, 王慧, 等. 1509号台风灿鸿期间“朱家尖—嵊山”高频地波雷达数据分析[J]. 海洋学研究, 2017, 35(1): 41–46.
- [3] 杨锦坤, 苗庆生, 刘玉龙. 岸基高频地波雷达资料后处理技术研究[J]. 海洋通报, 2015, 34(6): 623–630.
- [4] 吴雄斌, 杨绍麟, 程丰, 等. 高频地波雷达东海海洋表面矢量流探测试验[J]. 地球物理学报, 2003(3): 340–346.
- [5] 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.
- [6] 徐珊珊, 杨锦坤, 武双全, 等. 渤海中部海域表层潮流和余流特征分析[J]. 海洋通报, 2017, 36(2): 128–134.
- [7] 王晓亮, 徐晶晶, 杨华, 等. 多功能新型高频变频地波雷达舟山海域径向海流探测试验[J]. 海洋技术, 2013, 32(1): 11–15.
- [8] 吴文彬, 陈健. 地波雷达海上比测试验站址和仪器选择的考虑[J]. 海洋技术学报, 2016, 35(6): 1–4.
- [9] 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(3): 356–360.

(下转第194页)