

OSMAR-S 型高频地波雷达在南海北部 遥测海表面流的数据检验

郑世浩^{1,2}, 宁浩³, 梁广建¹, 刘均¹

(1.中国人民解放军 92682 部队, 广东 湛江 524001; 2.中国海洋大学 海洋与大气学院, 山东 青岛 266100;

3.广东海洋大学 海洋与气象学院, 广东 湛江 524088)

摘要:为掌握 OSMAR-S 型高频地波雷达在南海北部遥测海表面流的误差分布情况, 首先分析该型雷达测流的空间分布情况, 发现在雷达连线中间区域存在盲区。将雷达测流数据与 ADCP 测流数据进行比对, 中间区域流速误差小于其他区域。为得到更为全面的分析, 对雷达测流数据进行潮流调和分析, 计算得到潮流和余流, 并分别与预报系统的潮流数据、气象站风场数据进行比对, 在计算中采用快速 Fourier 变换进行数据滤波处理。结果显示在雷达电磁波覆盖的向外海一侧中间区域, 特别是在与两雷达站夹角接近 90°的区域, 测流精度高于其他区域, 并基于以上结论给出了雷达使用中的建议。

关键词:高频地波雷达; 快速 Fourier 变换; 调和分析; 相关性分析

中图分类号:P731 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-2029(2019)03-0001-06

海流的观测仪器有很多种, 常用的海流计有机械旋桨式海流计、电磁海流计、声学多普勒海流计、声学多普勒海流剖面仪^[1]。这些海洋仪器通常只能用于定点观测或走航观测, 难以获取大范围、较长时间和空间分辨率的观测数据; 采用锚系阵列观测则存在布放和回收困难、费用高昂等问题。基于漂流浮标和卫星遥感数据, 通过计算可以获取大范围、长时间序列的海流数据^[2], 但数据的时间和空间分辨率较低, 而且在低纬海区地转关系不适用, 难以利用卫星高度计数据计算地转流。

高频地波雷达的工作原理是利用高频电磁波随水传播的特点, 探测海洋表面流的反射回波信号, 通过海洋波浪对高频电波的传输和衰减特性, 演算出海流的流速流向等海洋数据^[3]。高频地波雷达分为阵列式和紧凑便携式两类: 阵列式雷达占地面积大, 对场地要求较为苛刻, 设备维护成本高; 紧凑便携式雷达无需专门为其天线开辟场地, 选址、建站与维护相对容易很多, 安装适应性强, 是高频

地波雷达发展的主要方向^[4]。从国外利用 ADCP 与紧凑便携式地波雷达比对验证看, 美国北卡罗来纳州的 OSCAR 系统反演流速均方差在 7~9 cm/s 之间, 相关系数在 0.8 以上^[5]; 加利福尼亚州的 SeaSonde 系统反演流速均方差在 7~19 cm/s 之间, 相关系数在 0.39~0.77 之间^[6]。

武汉大学分别研制有 OSMAR 系列阵列式和 OSMAR-S 系列紧凑便携式高频地波雷达, 已在国内多个海域开展试用工作^[7], 计算得到了雷达测流流速和流向误差的大小, 但关于雷达覆盖范围内误差的空间分布和在南海的试用情况尚未有专门研究。本文利用 ADCP 测流数据、潮流数据和风场数据检验该型雷达的性能, 掌握其误差分布特点, 为该型雷达的应用提供参考。

1 数据来源

OSMAR-S 型高频地波雷达于 2012 年安装于

广东省湛江市硇洲岛 ($110^{\circ}37'23''\text{E}$ 、 $20^{\circ}55'48''\text{N}$)和茂名市电白县北山村 ($111^{\circ}16'26''\text{E}$ 、 $21^{\circ}25'48''\text{N}$)两站开始试用。该型雷达的特点是探测距离远、监测面积大、投资较少,能够对海洋进行全天候的实时观测,具备良好的机动性,可根据任务特点,灵活选择安装地点或平台。安装于该地的雷达型号为 OSMAR-S100(J),查阅该型雷达使用说明:雷达工作频率为 $13\pm 0.5\text{ MHz}$,波长为 23 m ,最大探测距离约 100 km 。该型雷达的布设要求主要有:(1)在海边并贴近海面,高度不大于 100 m ,前方 120 m 范围内无岛屿、山体、建筑物等;(2)满足深水条件,即水深大于 $1/4$ 个波长(6 m),两站之间的水平距离大于雷达探测距离的 $1/2$ (50 km);(3)应远离电磁干扰区,一个波长范围内应避免存在较长金属物。

根据以上观测要求,于 2014 年底对上述雷达观测场地进行了现场考察。考察发现:(1)两雷达站位于海岬处,距离海面高度均小于 100 m ,前方海面开阔,没有岛屿、山体、建筑物等遮挡;(2)雷达覆盖海域大部分水深大于 6 m ,两站的水平距离约 86 km ;(3)雷达站周边为农村,远离电磁干扰区,无其他电磁干扰物。以上均满足雷达布设要求。

为检验雷达测流数据的误差分布情况,选取以下数据进行比对:

(1) 雷达测流数据。数据时段为 2015 年 6 月 15 日–23 日。如图 1 所示,红色六角星为两雷达站位置,分别命名为雷达 A(位湛江市硇洲岛)和雷达 B(位茂名市电白县北山村),以两站为圆心的蓝色实线扇形区域为单站电磁波理论覆盖范围,半径为 100 km ,扇形区共同覆盖范围即为雷达测流区域。

(2) ADCP 测流数据。海上作业时间为 2015 年 6 月 17 日–22 日,使用测流设备为 300 k ADCP ,每个站点测量时间不少于 1 h ,共获取到 11 个测站的海流数据。如图 1 所示,红色虚线框内的红色五角星即为 ADCP 测站位置。

(3) 潮流数据。在雷达覆盖范围内选取 8 个站点,使用国家海洋局第一海洋研究所研发的《中国海及邻近海区海流保障单用户系统》计算潮流,时段与雷达测流数据同步。如图 1 所示,绿色实心圆点 C1~C8 即为潮流站点位置。

(4) 风场数据。气象观测站位于 $111^{\circ}23'26''\text{E}$ 、 $21^{\circ}26'24''\text{N}$,位置较为靠近雷达测流海区,数据时段为 2015 年 6 月 15 日–30 日,其中测风仪安装高度为 14 m 。如图 1 所示,红色实心正方形即为气象站

位置。

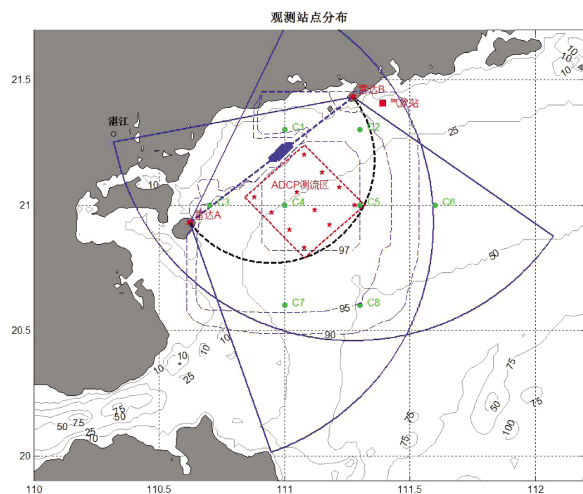


图 1 观测站点分布(地形数据来源为 NOAA 的 ETOPO1 数据,灰色曲线为等深线,线上数值为水深。)

Fig.1 Observing Site Distribution (The topographic data source is NOAA's ETOPO1 data, the gray curve is the isobath line, and the line value is the water depth.)

由于雷达在实际工作中存在缺测情况,首先计算雷达测流数据的时间序列连续性,即观测期间内有观测数据的时刻占起止时间长度的比值。如图 1 所示,蓝色细虚线为雷达测流数据的时间序列连续性,可以看出:时间序列连续性为 90% 的雷达测流覆盖区域大致与理论覆盖区域相当,但并不完全一致;蓝色粗虚线为在两雷达连线,该连线面向外海一侧的中间区域,时间序列连续性达到 97% 以上,该值向外海方向逐渐减小;在该连线面向陆地一侧,时间序列连续性迅速下降;在该连线的中间区域,即图 1 中蓝色填充部分,时间序列连续性为 0,可视作雷达盲区。

2 计算方法

2.1 对实测数据的预处理

(1) 雷达测流数据。时间分辨率为 20 min ,空间分辨率为 3.3 km ,选取数据比对期间内的最邻近位置的海流数据。

(2) ADCP 测流数据。测流方式为坐底式观测,时间步长为 10 min ,层长 2 m 。各层数据存在差异,为确保尽量获取近表层的海流数据,实际操作中是取 $0\sim 3\text{ m}$ 层内仪器姿态良好、质量高的数据进行比对。

(3) 风场数据。时间分辨率为 10 min ,使用前对数据进行滤波处理,剔除噪音数据。

2.2 统计方法

(1) 标准差

假定 ADCP 测流数据为标准数据,计算雷达测流数据与 ADCP 测流数据的标准差为:

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

式中: $\bar{x}_i$, $\bar{y}_i$ 分别为相同时间和位置的雷达和 ADCP 测流数据。

(2) 相关系数

相关系数是标准化变量的协方差,可以用来度量两变量之间的相关关系,且与两变量的单位无关。两变量相关系数约接近 1 则正相关性越强,越接近 0 则相关性越差。相关系数公式为:

$$r_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s_x} \right) \left(\frac{y_i - \bar{y}}{s_y} \right) \quad (2)$$

式中: $\bar{x}$ 与 $\bar{y}$ 分别为两变量 x 与 y 的样本平均值; s_x 和 s_y 分别为两变量的标准差。

(3) 滤波方法

利用快速 Fourier 变换(FFT)技术把时域下的数据转换到频域,将高频部分赋值为 0,再利用 FFT 技术将频域下的序列值转换回时域^[10]。离散序列 $x(j)$ 的离散 Fourier 变换和逆离散 Fourier 变换的表达式为:

$$X(k) = \sum_{j=1}^N x(j) e^{-i(\frac{2\pi}{N})(j-1)(k-1)} \quad (3)$$

$$x(j) = \left(\frac{1}{N} \right) \sum_{k=1}^N X(k) e^{i(\frac{2\pi}{N})(j-1)(k-1)} \quad (4)$$

式中: $k=1, 2, \dots, N$, $j=1, 2, \dots, N$ 。

(4) 调和分析

使用基于 Matlab 开发的 t_tide 程序包^[11],得到 $M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1$ 8 个主要分潮的调和常数,进而计算潮流和余流。

3 比对结果

3.1 与 ADCP 测流数据比对

ADCP 是当前广泛使用的高精度测流设备,常用于与高频地波雷达进行数据比对。将各测站海流与对应时刻的雷达测流数据绘制矢量图,如图 2 中左图所示,其中红色箭头为 ADCP 测流,蓝色箭头为雷达测流。将各测站雷达测流数据与 ADCP 测流数据比对,得到流速和流向差值分布直方图,如图 2 中右图所示。从图 2 中可以看出,部分测站雷达测

流明显不同于 ADCP 测流结果,可能是雷达系统工作时存在某种问题,因此在分析时重点对位于海区中部的 T2-2、T2-3、T2-4、T3-4 4 个测站进行海流数据分析。

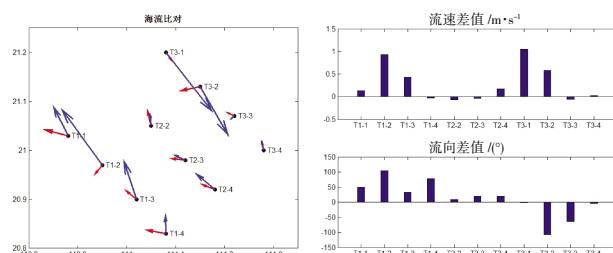


图2 各测站海流比对

Fig.2 Current Comparison of Each Site

(1) 误差分析

以上 4 个测站的流速平均误差为 0.03 m/s,流向平均误差为 14°,即偏向顺时针方向 14°。

(2) 标准差分析

计算误差的标准差,判断以上 4 个测站的误差离散情况:

(a) 流速误差的标准差为 0.11 m/s;

(b) 流向误差的标准差为 11°。

从以上比对情况来看,在雷达测流的中间区域,流速和流向误差均较小。受客观条件制约,ADCP 测流数据量较少,误差的随机性较强,不足以全面准确验证雷达性能,需要通过其他方式对数据继续进行比对。

3.2 与潮流数据比对

为检验 OSMAR-S 型高频地波雷达测流数据的潮流性质,在雷达测流区域内选取 8 个站点,水平分布情况如图 1 所示,站点信息如表 1 所示,其中夹角表示该点与两雷达站的夹角大小。可以看到,各站点水深均满足雷达工作要求。

表 1 各站点位置信息

Tab.1 Location Information of Each Site

站号	位置	水深 /m	夹角 / (°)	站号	位置	水深 /m	夹角 / (°)
C1	21°18'N, 111°00'E	15	161	C2	21°18'N, 111°18'E	20	107
C3	21°00'N, 110°42'E	15	174	C4	21°00'N, 111°00'E	26	133
C5	21°00'N, 111°18'E	34	92	C6	21°00'N, 111°36'E	42	57
C7	20°36'N, 111°00'E	35	67	C8	20°36'N, 111°18'E	54	62

从雷达测流数据中提取这 8 个站点的海流数据,在进行数据预处理之后,进行潮流调和分析,计算得到潮流和余流。从《中国海及邻近海区海流保障单用户系统》中提取出对应位置和时间段的潮流数据。将两种方法得到的潮流数据分解为潮流东分量和北分量,分别作相关性分析,如表 2 所示。

表 2 各站点潮流相关性

Tab.2 Tidal Current Correlation of Each Site								
点位站号	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
标准 差 /m·s ⁻¹	东							
	分量	0.09	0.06	0.45	0.08	0.07	0.07	0.29
	北							
	分量	0.24	0.08	0.29	0.17	0.09	0.09	0.12
相关 系数	东							
	分量	0.97	0.96	0.04	0.92	0.91	0.88	-0.26
	北							
	分量	0.64	0.76	-0.55	0.75	0.90	0.71	0.64

从表 2 中可以看出,C2,C4,C5,C6,C8 号站点,两种方法计算的潮流东、北分量的最大标准差在 0.08~0.17 m/s 之间,最小相关系数的绝对值在 0.71~0.96 之间;C1,C3,C7 站点,最大标准差在 0.24~0.45 m/s 之间,最小相关系数的绝对值在 0.04~0.64 之间。对比表 1 可以看出,C2,C4,C5,C6,C8 号站点与两雷达站夹角在 62°~133°之间,而 C1,C3 站点与两雷达站夹角在 161°~174°之间。可以初步判断,与两雷达站夹角接近 90°的区域,潮流的相关性要高于夹角接近 180°的区域。

3.3 与风场数据比对

表层流受风场影响较大,二者理论上具有较强的相关性。将气象站的风场数据与在上节中计算得到的各站点余流数据进行比对,并做相关性分析,如表 3 所示。

表 3 各站点余流与风的相关性

Tab.3 CorrelationBetween Residual Flow and Wind of Each Site								
点位站号	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
相关系数	0.80	0.71	0.54	0.79	0.75	0.47	0.14	0.23

从表 3 中可以看出,C1,C2,C4,C5 号站点流速与风速相关系数在 0.71~0.80 之间;C3,C6,C7,C8

号站点相关系数低于 0.6。以相关系数较大的 C5 号站点为例,绘制余流和风速随时间变化曲线,如图 3 所示,绿色曲线为风速,对应右侧绿色纵轴;蓝色曲线为余流流速,对应左侧蓝色纵轴。

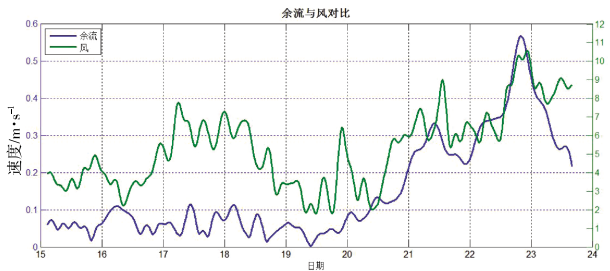


图 3 C5 号站点点余流流速与风速示意

Fig.3 Residual Flow Velocity and Wind Speed at C5 Site

观测期间,测站所处海区受 1508 号台风“鲸鱼”外围影响。从图 3 中可以看出,20 日之前,风速不超过 8 m/s(4 级风),余流最大为 0.12 m/s,二者数值均较小,相关性不强;从 20 号期起风速加强,同时 C5 号站点所测余流流速明显增大,二者均在 22 日夜间达到最大值,体现了较为明显的相关性。

3.4 误差分布情况

将表 2 与表 3 中的统计数据导入 ODV 软件^[12]中绘制各要素水平分布图。如图 4 所示,分图 a 为潮流东分量平均误差,单位 m/s;分图 b 为潮流北分量平均误差,单位 m/s;分图 c 为潮流东分量相关系数;分图 d 为潮流北分量相关系数;分图 e 为余流与风的相关系数。站点在分图 a、b 中的颜色越接近深蓝色,则表明该站点平均误差越小;在分图 c、d、e 中的颜色越接近深红色,则表明该站点相关系数越大。

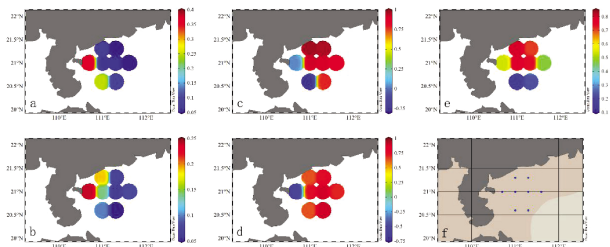


图 4 各站点误差与相关性分布情况

Fig.4 Distribution Error and Correlation of Each Site

图 1 中黑色粗虚线为以两雷达站连线为直径做圆周的曲线,根据圆的几何定理,黑色曲线上的点与两雷达站的夹角为 90°,而蓝色粗虚线上的点与两雷达站的夹角为 180°。可以看出,8 个站点中,距离图 1 中蓝色粗虚线最近的 C3 号站点,与两个雷达站夹角为 174°,综合各项指标最差;各项指标均较好的为 C2,C4,C5 号站点,这些站点大致分布

于图1中黑色粗虚线附近,与两个雷达站夹角为 $92^{\circ}\sim 133^{\circ}$,其中C5号站点与两个雷达站夹角为 92° ,综合各项指标最好。由此可以看出,相对而言,与两雷达站的夹角更接近 90° 的区域,雷达测流精度更高。

4 结 论

本文在现有ADCP观测资料的基础上,综合潮流数据、风场数据,与雷达测流数据依次比对,总结出OSMAR-S型高频地波雷达遥测海表面流场的性能、误差空间分布和使用建议。

(1) 时间序列连续性为90%的雷达测流覆盖区域大致与理论覆盖区域相当,但并不完全一致;在该连线的中间区域,存在雷达盲区。

(2) 该型雷达测流数据在中间区域流速误差为 0.03 m/s ,但空间分布不均匀;在两雷达站连线向外

海一侧的中间区域,在时间序列连续性和测流精度方面均高于雷达测流区域的边缘。

(3) 在上述测流精度较高的海区,从雷达测流数据中可以分辨出明显的潮流特征,潮流东、北分量的最大标准差在 $0.08\sim 0.17\text{ m/s}$ 之间,最小相关系数在 $0.71\sim 0.96$ 之间;余流流速与风速相关系数在 $0.71\sim 0.80$ 之间。而在上述测流精度较低的海区,以上数据指标较差。

(4) 鉴于该型雷达具备良好的机动性,建议在使用中应尽可能使目标海区位于与两雷达站夹角接近 90° 的中间区域,以充分发挥其性能优势。

由于ADCP实测测流数据较少,为尽量得到更为全面的比对结果,使用由潮流预报系统计算得到的潮流数据和气象站实测风场数据依次与雷达测流数据进行比对作为补充。若要进行更为精确的分析,需要更长时间序列的实测海流数据进行比对。

参考文献:

- [1] 侍茂崇,高郭平,鲍献文. 海洋调查方法[M]. 青岛:中国海洋大学出版社,2016.
SHI Mao-chong, GAO Guo-ping, BAO Xian-wen. Methods of marine survey[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2016.
- [2] 刘科峰,蒋国荣,陈奕德,等. 基于卫星漂流浮标的南海表层海流观测分析[J]. 热带海洋学报,2014,33(05):13-21.
LIU Ke-feng, JIANG Guo-rong, CHEN Yi-de, et al. Analysis of upper-ocean surface currents of the South China Sea derived from satellite-tracked drifter data[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2014, 33(05): 13-21.
- [3] Barrick D E. History present status and future directions of H F surface wave radars in the US [C]// Proceedings of the International Conference on Radar. New York: IEEE Press, 2003: 652-655.
- [4] 孙芳,刘玉红,李佳讯. 高频地波雷达的发展与应用现状分析[J]. 海洋测绘,2018,38(4):22-24.
SUN Fang, LIU Yuhong, LI Jiaxun. Review of developments and applications status of high-frequency radar[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2018, 38(4): 22-24.
- [5] Shay L. Current structure variations detected by high-frequency radar and vector-measuring current meters[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 1998, 15(1):237-256.
- [6] Emery B M, Washburn L, Harlan J A. Evaluating radial current measurements from CODAR high-frequency radars with moored current meters[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2004, 21(8):1259-1271.
- [7] 薛佳丽,潘增弟. 地波雷达观测数据验证的软件实现及初步分析[J]. 海洋科学进展,2010,28(3):372-381.
XUE Jia-li, PAN Zeng-di. Software programming and preliminary analysis to verify ground wave radar observational data of oceanic current[J]. Advances in Marine Science, 2010, 28(3): 372-381.
- [8] 文必洋,李自立,周浩,等. 便携式高频地波雷达东海洋山海域探测深度试验[J]. 电子与信息学报,2010,32(04):998-1002.
Wen Bi-yang, Li Zi-li, Zhou Hao, et al. Test for the detection depth with HF portable ground wave radar at Yangshan area of Eastern China Sea[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(04): 998-1002.
- [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),2007,53(3):356-360.
GONG Ziping, KE Hengyu, HOU Jiechang, et al. Error analyze of current measurements by HF surface wave radar [J]. Journal of Wuhan University: Natural Science Edition, 2007, 53(3): 356-360.

- [10] 杨洪国, 黄强. GOCE 引力梯度数据滤波方法的设计与结果分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2014, 34(3): 146–150.
Yang Hongguo, Huang Qiang. Design of filtering method of GOCE gravity gradient and analysis of result [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2014, 34(3): 146–150.
- [11] Pawlowicz R, Beardsley B, Lentz S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE [J]. Comput & Geosci, 2002, 28: 929–937.
- [12] Schlitzer R. Ocean data view [EB/OL]. <https://odv.awi.de>, 2018.

Data Verification of OSMAR–S HF Ground Wave Radar for the Remote Sea Surface Current in the Northern South China Sea

ZHENG Shi-hao^{1,2}, NING Hao³, LIANG Guang-jian¹, LIU Jun¹

1. Troop 92682, People's Liberation Army, Zhanjiang 524001, Guangdong Province, China;

2. College of Ocean and Atmosphere Science, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong Province, China;

3. College of Ocean and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, Guangdong Province, China

Abstract: In order to grasp the error distribution of the OSMAR–S HF ground wave radar for the remote sea surface currents in the northern South China Sea, the spatial distribution of the radar current data is firstly analyzed, and it is found that there is a blind zone in the middle of the radar connection. The radar current data are compared with the ADCP current data, and the current velocity error in the middle region is found to be smaller than in other regions. In order to obtain a more comprehensive analysis, the harmonic analysis method is applied, the tidal current and residual current are calculated and compared with the tidal current data of the forecast system and the wind data of the weather station, respectively, with the fast Fourier transform for data filtering used in the calculation process. The results show that in the middle region of the outward sea side covered by the radar electromagnetic waves, especially in the region close to 90° between the two radar stations, the current accuracy is higher than in other regions. Based on the above conclusions, some recommendations for the use of radars are given in this paper.

Key words: HF ground wave radar; fast Fourier transform; harmonic analysis; correlation analysis