

DOI: 10.13245/j.hust.211217

高频雷达海流观测中流速测量误差的传播

赖叶平¹ 王玉皞¹ 周浩² 徐新军³

(1. 南昌大学信息工程学院, 江西 南昌 330031; 2. 武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉 430072; 3. 武汉海兰瑞海海洋科技有限公司, 湖北 武汉 430073)

摘要 为了分析高频雷达输出的径向流测量误差和矢量流测量误差之间的关系, 从矢量流合成的过程出发, 推导了任意雷达站点数目情况下的误差几何缩放因子的解析表达式, 该表达式表明雷达站点的数目和位置均会影响误差几何缩放因子的值. 此外, 利用实测数据分析了实际情况下径向流误差和矢量流误差之间的关系, 结果表明: 给出的误差几何缩放因子可以很好地量化径向流误差与矢量流误差的关系, 但是矢量流误差与径向流误差的定量关系也受到矢量流合成过程中具体的处理方法的影响.

关键词 雷达应用; 遥感; 海洋表面流; 海流测量; 测量误差

中图分类号 TN959.72; P715.7 **文献标志码** A **文章编号** 1671-4512(2021)12-0094-05

Error transfer from radial to total vector current in high-frequency radar oceanic surface current measurement

LAI Yeping¹ WANG Yuhao¹ ZHOU Hao² XU Xinjun³

(1. School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Wuhan Hailan Ruihai Marine Science and Technology Co. Ltd., Wuhan 430073, China)

Abstract To study the relationship between radial current measurement error and total vector current measurement error in high-frequency radar, an analytical model for the geometric dilution of precision (GDOP) was presented, based on the total vector current calculation process. The presented model suggests that the GDOP is controlled by both the number of the radar stations and their positions. Besides, actual relationship between the radial current measurement error and total vector current measurement error was also analyzed using dataset collected by a field experiment. The results indicate that the derived GDOP can well quantify the error between the radial currents and the total vector currents. Nevertheless, the quantitative relationship between radial current measurement error and total vector current measurement error is also affected by the total vector current calculation method.

Key words radar applications; remote sensing; sea surface current; current measurements; measurement error

工作在3~30 MHz的高频雷达是一种超视距探测海洋表面状态的重要工具^[1-2]. 在合适的工作参数配置下, 利用雷达发射信号与海面波浪的布拉格(Bragg)后向散射, 并结合多普勒效应, 高频雷达能够测量超过300 km的海洋表面流^[3]. 目前, 高频雷达输出的海洋表面流可以应用在很多领域, 例如海洋与气候研究^[4]、海洋污染物或漂浮物追踪^[5]、

海岸和港口管理等.

在实际应用中, 高频雷达同时输出两种海洋表面流场, 即径向流场和矢量流场. 径向流场能够直接从单个雷达收集到的海洋回波中提取, 而矢量流场则必须由至少两个雷达站得到的径向流场进行矢量合成, 因此径向流的测量误差将会传递到矢量流的测量结果中. 虽然目前的一些研究分析了径向流

收稿日期 2021-04-23.

作者简介 赖叶平(1991-), 男, 博士; 王玉皞(通信作者), 教授, E-mail: wangyuhao@ncu.edu.cn.

基金项目 国家自然科学基金青年基金资助项目(41906171); 高等学校博士后科学基金资助项目(2020T130275).

测量误差对矢量流测量的影响, 但是却没有描述矢量流误差与径向流误差之间量化关系的模型. 文献[6]通过仿真确认了中等程度的径向流方位估计误差将会导致 15% 的矢量流流速误差和 9° 的矢量流流向误差. 文献[7]也指出矢量流误差与径向流误差是正相关的, 但是这些研究都没有给出矢量流误差与径向流误差之间的定量关系模型. 文献[8]引入了误差几何缩放因子来描述径向流误差与矢量流误差之间的关系, 但是没有给出该因子的解析表达式. 文献[9]虽然给出了误差几何缩放因子的解析表达式, 但是该表达式把矢量流误差分解成沿着流向和垂直于流向两个方向, 这种矢量流误差分解方式与矢量流通常地按照东西和南北分量的表示方式不符. 文献[10]全面地分析了径向流误差的来源, 并表示在未来的工作中将研究径向流误差到矢量流误差的转移关系.

在已有研究的基础上, 本研究将推导任意雷达站点数目下径向流误差到矢量流误差的传播关系的解析表达式. 此外, 将利用实测数据来检验实际中误差几何缩放因子与径向流误差和矢量流误差之间的关系是否符合.

1 误差转移关系

当利用高频雷达测量海洋表面流时, 单个雷达站点仅能够测得径向流, 要得到矢量流则须要利用至少两个以上间隔合适距离的雷达站输出的径向流来进行矢量合成^[11]. 为了一般化, 这里考虑利用 m ($m > 1$) 个雷达站来测量矢量流. 图 1 展示了 m 个站点情况下矢量流与各个雷达站测得的径向流之间的几何关系, 用 v_i ($i = 1, 2, \dots, m$) 表示第 i 个雷达站测量得到的径向流, 对应的矢量流 V 则可表示为东西分量 v_e 和南北分量 v_n 之和.

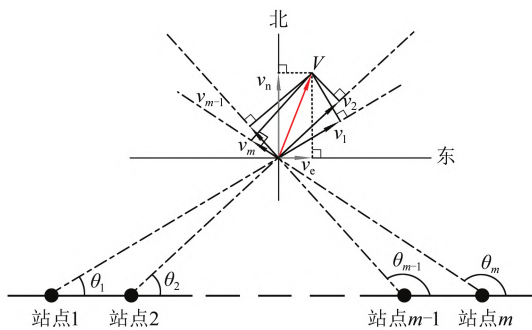


图 1 矢量流与径向流的几何关系

实际上, 每一个雷达测得的径向流都是矢量流在该雷达视角方向上的投影, 根据这种投影关系有

$$[v_1, v_2, \dots, v_m]^T = \mathbf{b} [v_e, v_n]^T, \quad (1)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \\ \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \\ \vdots & \vdots \\ \cos \theta_m & \sin \theta_m \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 θ_i 为以第 i 个雷达站点为参考的被测海面元位置所在的方位角. 因此, 根据式(1)有

$$[v_e, v_n]^T = (\mathbf{b}^T \mathbf{b})^{-1} \mathbf{b}^T [v_1, v_2, \dots, v_m]^T. \quad (3)$$

把式(2)带入式(3)有

$$v_e = \lambda \sum_{i=1}^m v_i (\cos \theta_i \sum_{j=1}^m \sin^2 \theta_j - \sin \theta_i \sum_{j=1}^m \sin \theta_j \cos \theta_j); \quad (4)$$

$$v_n = \lambda \sum_{i=1}^m v_i (\sin \theta_i \sum_{j=1}^m \cos^2 \theta_j - \cos \theta_i \sum_{j=1}^m \sin \theta_j \cos \theta_j), \quad (5)$$

式中

$$\lambda = \left[\sum_{i=1}^m \cos^2 \theta_i \sum_{j=1}^m \sin^2 \theta_j - \left(\sum_{i=1}^m \cos \theta_i \sin \theta_i \right)^2 \right]^{-1}. \quad (6)$$

由于每个雷达站点的径向流观测结果是相互独立的, 因此 v_e 和 v_n 的误差可表示为:

$$\delta_e = \lambda \sqrt{\sum_{i=1}^m \delta_i^2 \left(\cos \theta_i \sum_{j=1}^m \sin^2 \theta_j - \sin \theta_i \sum_{j=1}^m \sin \theta_j \cos \theta_j \right)^2}; \quad (7)$$

$$\delta_n = \lambda \sqrt{\sum_{i=1}^m \delta_i^2 \left(\sin \theta_i \sum_{j=1}^m \cos^2 \theta_j - \cos \theta_i \sum_{j=1}^m \sin \theta_j \cos \theta_j \right)^2}, \quad (8)$$

式中 δ_i , δ_e 和 δ_n 分别为第 i 个雷达站的径向流均方根误差、矢量流东西分量的均方根误差和南北分量的均方根误差. 显然, 式(7)和(8)就是径向流测量误差到矢量流测量误差的传播函数.

利用文献[9]中的方法, 可以得到径向流误差到矢量流误差的误差几何缩放因子. 假设 $\delta_1 = \delta_2 = \dots = \delta_m = \delta$, 那么根据该因子的定义 $G_e = \delta_e / \delta$ 和 $G_n = \delta_n / \delta$, 有:

$$G_e = \lambda \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\cos \theta_i \sum_{j=1}^m \sin^2 \theta_j - \sin \theta_i \sum_{j=1}^m \sin \theta_j \cos \theta_j \right)^2}; \quad (9)$$

$$G_n = \lambda \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\sin \theta_i \sum_{j=1}^m \cos^2 \theta_j - \cos \theta_i \sum_{j=1}^m \sin \theta_j \cos \theta_j \right)^2}. \quad (10)$$

这里的方位角 θ_i 显然仅和观测海面元位置有关, 虽然这里以各个站点位于同一条直线上的情况来讨论(图 1), 但是以上所有式子显然也适用于站点不在同一条直线上的情况; 因此, 式(9)和(10)还可用于优化多个雷达站点建站时的站点位置选取. 当 $m = 2$ 时, 式(9)和(10)可简化成:

$$G_e = \sqrt{(\sin^2 \theta_1 + \sin^2 \theta_2) / \sin^2 (\theta_2 - \theta_1)}; \quad (11)$$

$$G_n = \sqrt{(\cos^2 \theta_1 + \cos^2 \theta_2) / \sin^2 (\theta_2 - \theta_1)}. \quad (12)$$

利用式(9)和(10), 整个雷达观测区域内每一个

位置的误差几何缩放因子都可以计算出来. 图2展示了利用两个、三个及四个雷达站点测量矢量流的情形下探测区域内 G_e 和 G_n 的空间分布, 图中 x 和 y 分别是水平方向和纵向的距离坐标. 由于 G_e 和 G_n 仅和观测点与雷达站点的相对位置有关, 因此在计算空间分布时引入一个距离 L 来对所有的距离做归

一化处理. 对于两个雷达站点的情况, 假设两个雷达站点分别位于图中黑点标注的位置 $(-0.5L, 0)$ 和 $(0.5L, 0)$. 而对于三个雷达站点的情况, 假设三个雷达站分别位于 $(-0.75L, 0)$, $(0, 0)$ 和 $(0.75L, 0)$. 类似地, 四个站点的情况下, 它们的位置也都在图中用黑点标注了.

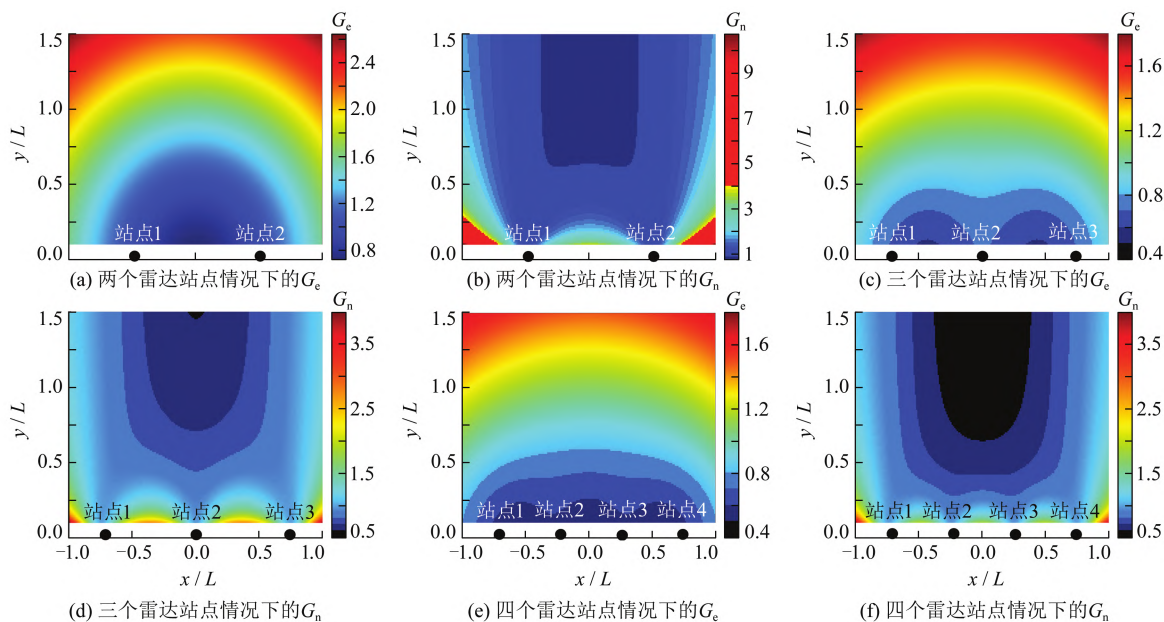


图2 G_e 和 G_n 的空间分布

从图2的空间分布图可以看出: G_e 在距离雷达站点最远处具有最大值, 在连接相邻两个雷达站点的垂直平分线上出现最小值; G_n 在雷达测量域的左右两端有最大值, 而在连接所有雷达位置的垂直平分线处具有最小值. 另外, 随着雷达站点的增加, G_e 和 G_n 在整体上均减小, 这表明可以通过部署更多的雷达站点来减小矢量流的测量误差. 但是通过增加雷达站点来减小测量误差可能不易实现, 因为建立和维护更多雷达站点意味着成本的增加. 此外, 在实际应用中的高频雷达测流系统, G_e 和 G_n 的空间分布可能与图2不同, 因为实际中雷达站点的位置可能不规则. 但是可以肯定, 一旦确定了所有雷达站点的位置, 测量范围内各处的误差几何缩放因子就可以根据式(9)和(10)计算得到.

2 实验数据

从2019年5月30日上午9:00开始至次日上午9:20, 本课题组在琼州海峡进行了海洋表面流场观测与对比实验. 图3显示了该实验的地图, 图中: W 为纬度(北纬); J 为经度(东经). 此次实验采用两部相距约为 14 km 的雷达来测量海流, 称这两个站分别为新海港站和恒大站, 本实验仅使用两个雷达

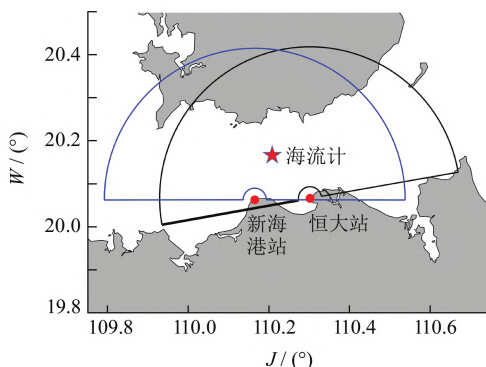


图3 现场实验地图

站点来观测海流. 在实验过程中, 两部雷达的工作频率均为 25 MHz, 工作带宽为 120 kHz, 相应的距离分辨率为 1.25 km, 图3中的两个扇形就是这两部雷达的探测范围. 这两部雷达每 20 min 独立生成一场径向流, 将这两个站点的径向流进行矢量合成就能够得到矢量流. 此外, 在两部雷达的测量区域内部署了一个海流计, 对于新海港站来说, 海流计所在的方位角为 68.83° , 这个角度等效于式(11)和(12)中的 θ_1 . 而对于恒大站来说, 海流计位置所在的方位角为 131.18° , 这个角度等效于式(11)和(12)中的 θ_2 . 这两个参数是从径向流误差传递到矢量流误差的关键参数. 利用式(11)和(12), 可以得到海

流计位置上的 G_e 和 G_n 分别为 1.35 和 0.85.

3 结果与讨论

为了证明推导的误差传递模型与实际中径向流误差和矢量流误差关系的一致性, 本研究以海流计测得的海流为真实海流来分析雷达测得的径向流误差和矢量流误差及其关系. 两部雷达在海流计位置处测得的径向流与海流计测量结果的比较见文献 [12], 新海港站和恒大站测得的径向流均方根误差分别为 $\delta_1 = 13.50$ cm/s 和 $\delta_2 = 10.83$ cm/s. 矢量流的东西和南北分量与海流计记录结果的比较如图 4 所示. 东西分量和南北分量的均方根误差分别为 $\delta_e = 12.38$ cm/s 和 $\delta_n = 10.98$ cm/s.

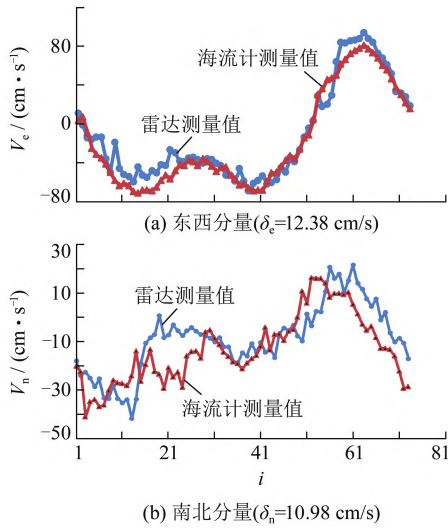


图 4 雷达与海流计的矢量流测量结果

G_e 和 G_n 为从径向流到矢量流的误差缩放系数. 若 $\delta_1 = \delta_2 = \delta$, 则有 $\delta_e = G_e \delta$ 和 $\delta_n = G_n \delta$. 但是, 本研究中 $\delta_1 \neq \delta_2$, 因此可以推断 $G_e \min(\delta_1, \delta_2) < \delta_e < G_e \max(\delta_1, \delta_2)$, 并且 $G_n \min(\delta_1, \delta_2) < \delta_n < G_n \max(\delta_1, \delta_2)$, 其中: $\min(\delta_1, \delta_2)$ 表示取最小值; $\max(\delta_1, \delta_2)$ 表示取最大值. 考虑本研究中的 δ_1 和 δ_2 以及海流计位置处的 G_e 和 G_n , 有 $G_n \min(\delta_1, \delta_2) = 9.04$ cm/s, $G_n \max(\delta_1, \delta_2) = 11.31$ cm/s; 另外 $G_e \min(\delta_1, \delta_2) = 14.53$ cm/s, $G_e \max(\delta_1, \delta_2) = 17.97$ cm/s, 因此理论上 $14.53 \leq \delta_e \leq 17.97$, 且 $9.04 \leq \delta_n \leq 11.31$. 比较本研究中的 δ_e 和 δ_n 可知: δ_n 位于理论区间内, 但是 δ_e 略小于推断出的理论均方根值范围的下限, 这种超出理论范围的现象是由于径向流场的网格和矢量流场的网格无法一一对齐, 每个经纬网格点上的矢量流都须要根据以用户定义的半径为中心的圆内的所有径向流来计算. 这里尝

试更改这个半径, 将默认的半径 2 km 更改为 4 km, 而后 δ_e 降低到 10.54 cm/s. 东西分量均方根值的进一步减小证明 δ_e 小于推断出的理论均方根值范围的下限, 是由于雷达测量得到的每个位置上的矢量流还与周围的径向流有关.

为了进一步检验本研究给出的误差传播模型与实验中产生的实际均方根值之间的关系的一致性, 对径向流和矢量流的动态均方根值进行分析. 定义一个瞬态均方根

$$R(M) = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{t=t_1}^{t_M} [v(t) - v'(t)]^2}, \quad (13)$$

式中: $R(M)$ 为瞬态均方根值, 实际上就是前 M 个样本的均方根值; $v(t)$ 为时刻 t 的雷达测量值; $v'(t)$ 为时刻 t 的海流计测量值; t 为采样时刻; t_1 为观测序列的第一个时刻, 即 2019 年 5 月 30 日 9:20; $M = 1, 2, \dots, 73$ 为采样时刻的索引. 此数据源瞬态均方根值体现了实验期间均方根值的动态变化过程, 因此针对雷达测得的东西分量和南北分量的 $R(M)|_{M=73}$ 分别等于图 4(a) 和 (b) 中给出的均方根值. 这里定义 $R_1(M)$, $R_2(M)$, $R_e(M)$ 和 $R_n(M)$ 分别为新海港站测得的径向流的瞬态均方根值、恒大站测得的径向流的瞬态均方根值、矢量流的东西分量的瞬态均方根值和矢量流的南北分量的瞬态均方根值, 图 5 显示了这些瞬态均方根值. 正如预期的那样, 该变量显示东西分量和南北分量的瞬态均方根值与径向流的瞬态均方根值在趋势上非常符合. 此外, 瞬态均方根值的最后一个值 (或 $M = 73$) 等于前文提到的均方根值.

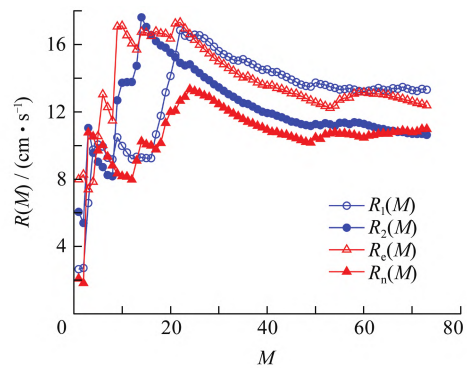


图 5 瞬态均方根

进一步地, 这里利用径向流的瞬态均方根值, 根据本文的模型式 (7) 和 (8) 来计算东西分量和南北分量的模型推断的瞬态均方根值, 然后将根据模型计算出的瞬态均方根值与观测数据得到的均方根值进行比较. 根据式 (7) 和 (8) 有:

$$\zeta_c(M) = \sqrt{\frac{R_1^2(M)\sin^2\theta_2 + R_2^2(M)\sin^2\theta_1}{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}}; \quad (14)$$

$$\zeta_n(M) = \sqrt{\frac{R_1^2(M)\cos^2\theta_2 + R_2^2(M)\cos^2\theta_1}{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}}, \quad (15)$$

式中 $\zeta_c(M)$ 和 $\zeta_n(M)$ 为模型计算出的东西和南北分量的瞬态均方根值. 因此, 检验 $\zeta_c(M)$ 和 $\zeta_n(M)$ 与 $R_c(M)$ 和 $R_n(M)$ 的一致性, 则可以验证模型的有效性. 图 6 显示了 $R_c(M)$ 对比 $\zeta_c(M)$ 和 $R_n(M)$ 对比 $\zeta_n(M)$ 的散点图, 从图中可以清楚地看出, 从数据直接计算出的瞬态均方根值 $R_n(M)$ 与模型计算出的瞬态均方根值 $\zeta_n(M)$ 非常符合. 但是, $R_c(M)$ 和 $\zeta_c(M)$ 之间存在一个固定偏差, 实际数据的瞬态均方根值总是大于模型计算出的瞬态均方根值, 这里的偏差是由矢量流合成方法引起的. 这些结果表明本研究给出的误差传播模型可以量化径向流误差和矢量流误差之间的关系. 此外, 本文的分析还为用误差几何缩放因子描述从径向流到矢量流的误差传播提供了全面的解释.

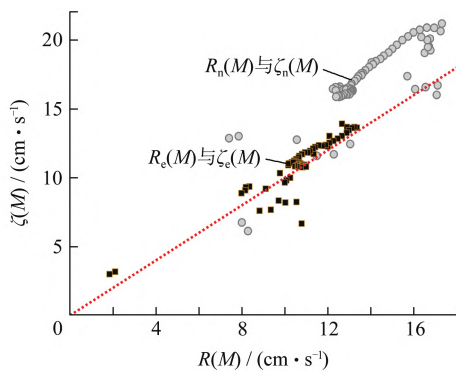


图 6 模型计算的瞬态均方根与实际数据均方根的比较

4 结语

本研究推导了任意雷达站点情景下误差几何缩放因子的解析模型, 为验证该模型的有效性, 利用连续 24 h 的现场实验数据集, 分析了实际的径向流误差和矢量流误差的关系, 并通过对比模型计算结果验证了模型的有效性. 本研究给出的误差几何缩放因子可以很好地量化径向流误差和矢量流误差的定量关系, 但是矢量流误差与径向流误差的关系也受到矢量流合成过程中具体的处理方法的影响.

参 考 文 献

[1] DOMPS B, DUMAS D, GUÉRIN C A, et al. High-

frequency radar ocean current mapping at rapid scale with autoregressive modeling[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2021, 46(3): 891-899.

[2] BOURG N, MOLCARD A. Northern boundary current variability and mesoscale dynamics: a long-term HF radar monitoring in the north-western Mediterranean Sea [J]. Ocean Dynamics, 2021, 71(8): 851-870.

[3] ROARTY H, COOK T, HAZARD L, et al. The global high frequency radar network[J]. Frontiers in Marine Science, 2019, 6: 164.

[4] LAI Y, ZHOU H, YANG J, et al. Submesoscale eddies in the Taiwan Strait observed by high-frequency radars: detection algorithms and eddy properties[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2017, 34(4): 939-953.

[5] ABASCALA J, SANCHEZ J, CHIRI H, et al. Operational oil spill trajectory modelling using HF radar currents: a northwest European continental shelf case study [J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, 119(1): 336-350.

[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] LORENTE P, SOTO-NAVARRO J, FANJUL E A, et al. Accuracy assessment of high frequency radar current measurements in the Strait of Gibraltar[J]. Journal of Operational Oceanography, 2014, 7(2): 59-73.

[8] CHAPMAN R D, GRABER H C. Validation of HF radar measurements[J]. Oceanography, 1997, 10(2): 76-79.

[9] GRABER H C, HAUS B K, CHAPMAN R D, et al. HF radar comparisons with moored estimates of current speed and direction: expected differences and implications[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1997, 102(C8): 18749-18766.

[10] EMERY B M, WASHBURN L. Uncertainty estimates for SeaSonde HF radar ocean current observations[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2019, 36(2): 231-247.

[11] PADUAN J D, GRABER H C. Introduction to high-frequency radar: reality and myth[J]. Oceanography, 1997, 10(2): 36-39.

[12] 赖叶平, 王玉峰, 周浩, 等. 便携式近程高频地波雷达海流对比试验[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 36-39.