

## 便携式高频地波雷达东海洋山海域探测深度试验

文必洋<sup>①</sup> 李自立<sup>①</sup> 周浩<sup>①</sup> 石振华<sup>①</sup> 吴世才<sup>①</sup> 王晓亮<sup>②</sup> 杨华<sup>②</sup> 李四明<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(武汉大学电子信息学院 武汉 430079)

<sup>②</sup>(国家海洋局东海预报中心 上海 200081)

<sup>③</sup>(武汉德威斯电子技术有限公司 武汉 430074)

**摘要:** 为了验证采用紧凑型接收天线的便携式高频地波雷达系统(OSMAR-S)的探测性能,于 2007 年 11 月在洋山海域进行了 OSMAR-S 与其他海洋测量设备的现场探测对比验证试验。试验设计了定点固定水深测量与坐底剖面测量相结合的连续现场对比监测方式,把雷达获得的表面流探测数据与其他设备得到的不同深度的海流观测数据进行对比。通过试验数据分析,OSMAR-S 系统的探测深度和精度都得到了验证,能够满足实时监测海洋表面流的需要。同时试验也填补了高频雷达探测深度没有试验验证的空白。

**关键词:** 高频地波雷达; 海洋表面流; 比测; 探测深度

中图分类号: TN959.72

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)04-0998-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00337

## Test for the Detection Depth with HF Portable Ground Wave Radar at Yangshan Area of Eastern China Sea

Wen Bi-yang<sup>①</sup> Li Zi-li<sup>①</sup> Zhou Hao<sup>①</sup> Shi Zhen-hua<sup>①</sup>  
Wu Shi-cai<sup>①</sup> Wang Xiao-liang<sup>②</sup> Yang hua<sup>②</sup> Li Shi-ming<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

<sup>②</sup>(East China Sea Forecasting Center, State of Oceanic Administration, Shanghai 200081, China)

<sup>③</sup>(Wuhan Devices Electronic Technology Co., Ltd, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to test the measurement capability of HF ground wave radar system (OSMAR-S) with compact receiving antenna, verification tests of OSMAR-S system against in situ measurements had been accomplished on Nov. 12-17, 2007. A observation method is used in the test for continuously comparison. The method is composed of fixed point survey at fixed depth and section survey at bottom, and compared the surface current data acquired by OSMAR-S with different depth current data acquired by others. The results confirm the detection precision and depth of OSMAR-S and indicate OSMAR-S is meet the need of sea real-time monitoring. The test also fill the blank that it is no test to confirm the detection depth of HF ground wave radar.

**Key words:** HF ground wave radar system; Sea surface current; Compared to measuring; Detection depth

### 1 引言

海洋流场的实时监测和测量是海洋科学考察的重要内容。目前,应用于测量海流的仪器设备很多,而高频地波雷达是近二十年发展起来的探测海洋动力学参数的先进设备。相关国家都相继研制出高频地波雷达系统,并应用于海洋表面状态的监测和研究,开展了各种相关的对比实验<sup>[1-4]</sup>。

武汉大学电波传播实验室于 1987 年开始研究应用于海态监测的高频雷达系统,经过二十多年的连续研究,在阵列式高频地波雷达技术的研究方面

取得了可喜的成绩,其研制的探测距离为 200 km 的高频地波雷达 OSMAR200X 已在浙江和福建分别建立了两个应用示范区<sup>[5]</sup>。为了更好的推广高频地波雷达海洋环境监测技术,降低建站与使用成本,武汉大学电波传播实验室研制了基于紧凑天线阵的便携式高频地波雷达系统 OSMAR-S 试验样机,并与武汉德威斯电子技术公司合作生产了工程样机。

为了验证便携式高频地波雷达系统的实用性,参考对比以往验证对比实验的内容,在上海洋山海域特别制定并实施了多种比测设备参加的验证便携式高频地波雷达系统探测深度的对比验证实验。这一有针对性的验证对比实验弥补了以往实验中没有专门针对雷达的探测深度进行对比验证这一空白,为更好地了解雷达系统的性能提供了多方面

2009-03-16 收到, 2009-09-21 改回

国家 863 计划项目(2007AA09Z101)和国家自然科学基金(60671039)资助课题

通信作者: 李自立 enishizli@hotmail.com

的实验数据。

## 2 便携式高频地波雷达系统概述

### 2.1 高频雷达电磁波在海水中的传播

海洋中的各种盐类几乎完全电离, 产生了大量的离子, 由此海水成为了导电介质。海水根据电磁波频率的不同, 导电性能也相应会发生改变。海水在中波波段的电性质类似良导体, 而在微波波段则类似电介质, 短波波段电性质处于两者之间。电磁波在海水中传播时, 当经过一定的传播距离  $D$ , 电磁波的振幅衰减为原来的  $1/e$ , 这个传播的距离  $D = \lambda/8\pi$ 。

### 2.2 高频地波雷达的探测原理

早在 20 世纪 70 年代, Barrick 建立了海洋回波一阶和二阶散射截面方程, 为利用高频雷达探测海洋表面状态参数提供了比较完整的理论依据<sup>[6]</sup>。便携式高频地波雷达是利用垂直极化电磁波沿海面绕射传播的原理实现对海洋状态参数的远程探测。

### 2.3 OSMAR-S 的系统构成

便携式高频地波雷达是一部相干散射雷达。OSMAR-S 主要由频率综合器、同步控制电路、发射机、发射天线、单极子/交叉环接收天线<sup>[7]</sup>、多通道接收机、信号处理机组成。OSMAR-S 雷达系统的波形体制为线性调频中断连续波(FMICW)<sup>[8]</sup>。雷达系统占地面积很少, 无需进行专门的天线阵场地建设。OSMAR-S 通过对接收信号的预处理, 再结合雷达分辨率计算对应回波处的海洋径向到表面流速<sup>[9]</sup>。通过间隔一定距离的双站雷达同时获得同一地点的不同方向的径向流, 通过矢量合成的方法, 获得该点的矢量流<sup>[10]</sup>。雷达工作频率为 12-13 MHz, 最大探测距离 100 km, 径向距离分辨率 2.5 km。流速分辨率为 5 cm/s, 角度分辨率为 2.5°。根据前面的深度公式得到探测深度大概为 1.0 m。

## 3 验证对比实验方案

### 3.1 实验目的

OSMAR-S 雷达系统探测的对象是海洋表面流。海洋调查规范里规定海流观测的表层是指海面下 3 m 深度以内的海流, OSMAR-S 雷达系统具体的探测深度为多少需要通过对比其他测量设备来进行实际验证。本次对比验证实验利用标准海流探测设备和 OSMAR-S 雷达系统进行连续深度和时间的现场同步监测, 通过分析对比不同观测设备所得到的数据, 验证 OSMAR-S 雷达系统探测的性能和深度。

### 3.2 实验方案

为了更加全面的检验 OSMAR-S 雷达系统的性

能, 挑选了几种具有代表性且应用比较广泛的测量设备作为对比仪器。其中有“SLC9-2”型直读式海流计, SONTEK 公司生产的 ADP 声学多普勒流速剖面仪和“RCM-9”型安德拉海流计。

实验海区位于大、小洋山附近海域。在岱山和嵎泗分别建有两个便携式高频地波雷达试验站, 雷达最大径向探测距离为 100 km。本次实验选取该海域中两个定点 A4 点(122° 11.25'E, 30° 43.48' N)和海床基(122° 02.088'E, 30° 37.807' N)两个同步连续观测点, 设计了基于剖面测量对比为主, 点测量仪器为辅助的实验对比方案。在 A4 点, 在 0.5 m 水深处用直读式海流计测量, 在 1 m 水深处采用安德拉海流计测量, 同时投放 ADP 以 1 m 为一层进行坐底式剖面测量。而放置在大、小洋山之间的海床基观测站也是采用的 ADP 坐底测量的方法。

## 4 实验对比结果

海洋表面流一般是缓变的, 双站 OSMAR-S 雷达系统每 20 min 一场的表面流矢量流场图。由于 A4 点的直读式海流计数据与该处历史统计观测数据偏离太多, 本文不做讨论。图 1 为 OSMAR-S 雷达系统的矢量海流流场图; 图 2 为海床基和 A4 点 ADP 剖面上分层测量的数据与 OSMAR-S 雷达系统的观测数据对比图。将实验中各个测量设备的数据结果进行统计分析。表 1 反映的是海床基多层水深流速流向相关系数; 表 2 反映的是 A4 点 ADP 多层水深流速流向相关系数; 表 3 是所有设备的同深度对比数据参数统计表。

## 5 实验结果分析

### 5.1 多层水深观测对比分析

(1)在 A4 观测点, 比较图 2(a)-2(c), ADP 探测流速的变化幅度根据深度的变化逐渐减小, 在 5 m 水深处, 雷达探测流速曲线与 ADP 曲线吻合得最好。在角度对比中, 除了 5 m 水深以上少数时段外, 其他时间对比曲线都是吻合的比较好的。剔除偏离变化规律的时间段, 得到表 2 的结果。流速相关系数同样沿水深经过一个先变大再变小的过程, 最大值出现在 5 m 层为 0.93; 流向相关系数最大值出现在 1 m 和 2 m 层为 0.98, 然后就逐渐变小。

(2)在海床基位置, 比较图 2(e)-2(g), ADP 探测流速的变化幅度根据深度的变化逐渐减小。在 3 m 水深处, 雷达探测流速曲线与 ADP 曲线吻合得最好。总体上, 两者变化趋势一致。从分层角度对比看, 除了 1 m 层角度对比曲线存在一定差异外, 沿水深其他层对比曲线都吻合得比较好。通过表 1 的分析, 流速相关系数沿水深经过一个先变大再变

小的过程，最大值出现在 3 m 层为 0.86；流向相关系数最大值出现在 2 m 层为 0.93。

(3)在表 1 和表 2 中，相关系数表示雷达测量值与对比设备测量值之间的关联程度，是一个无量纲的数值。比较表 1 和表 2 中相关系数的最大值，无论流速还是流向都是 A4 点的数据大于海床基处的数据。比较流速相关系数的变化规律，两者基本一样都是先变大后变小，只是最大值的深度不同；同时，相关系数的变化范围也是 A4 点好于海床基。比较流向相关系数的变化规律，除去海床基最上层外，都是至上而下减小，符合海流流向沿深度变化的规律，只是 A4 点变化的速度和范围大于海床基。产生差异的原因主要是两个观察点所处位置的环境因素的影响。

### 5.2 单层水深观测对比分析

A4 点断面 ADP 和海床基处 ADP 都取水面下 2 m 深度的测量值作为对比数据，安德拉海流计测量的是 1 m 深度的海流数值。基于以上不同仪器的测量范围，海流测量作用范围取为水深 1~2 m 之间。通过计算 OSMAR-S 雷达系统探测数据与各个对比仪器的观测数据的相关系数得到表 3 的结果。在表 3 中，平均比值、平均相对误差和相关系数都是无量纲的量；平均误差和均方差的单位：流速为(m/s)；

角度为(°)。

比较表 3 中各种探测设备与 OSMAR-S 观测的相关系数，A4 站位的安德拉海流计与 OSMAR-S 观测数据的相关系数最大，流速和流向的相关系数分别为 0.94 和 0.99。安德拉海流计流速测量误差为 ±1 cm/s，角度测量误差为 ±2°，精度是在所有比测仪器中最高的，而 OSMAR-S 与它的相关系数最好，如果以安德拉海流计的测量数据作为该水深处最贴近真实值的数值，则可以反映出 OSMAR-S 雷达系统探测数值在该水深处探测的可靠性。

### 5.3 探测深度分析

根据理论分析计算，OSMAR-S 雷达系统采用的是高频段频率，对海水的穿透能力不会超过 2 m 水深，基本上是靠接受海洋表面回波来进行海洋探测。而实验对比数据显示，表面流探测数值与海流吻合得最好的不是在海洋的表面，而是在海面一下某个深度的位置，这个深度在理论上是雷达所采用频率的电磁波所达不到的。产生这样的结果的原因：首先，根据海流沿水深的分层理论，海洋表面到水下一定深度的海流状态参数都基本接近，因此雷达电磁波可以探测水面下一定深度的海流状态参数；其次，海洋表面的海浪的运动基本反映了表面海流的运动，表面海流的运动可以用流层内中心深度的

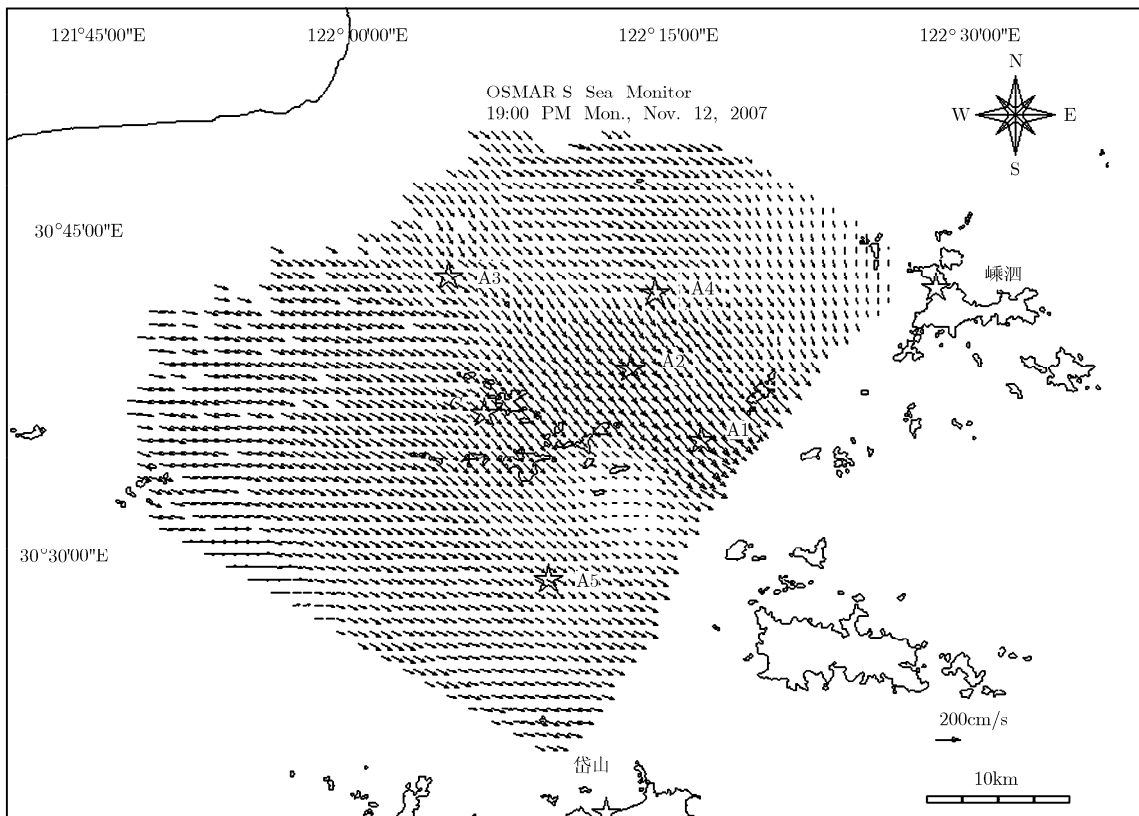


图 1 OSMAR-S 雷达系统的矢量海流流场图

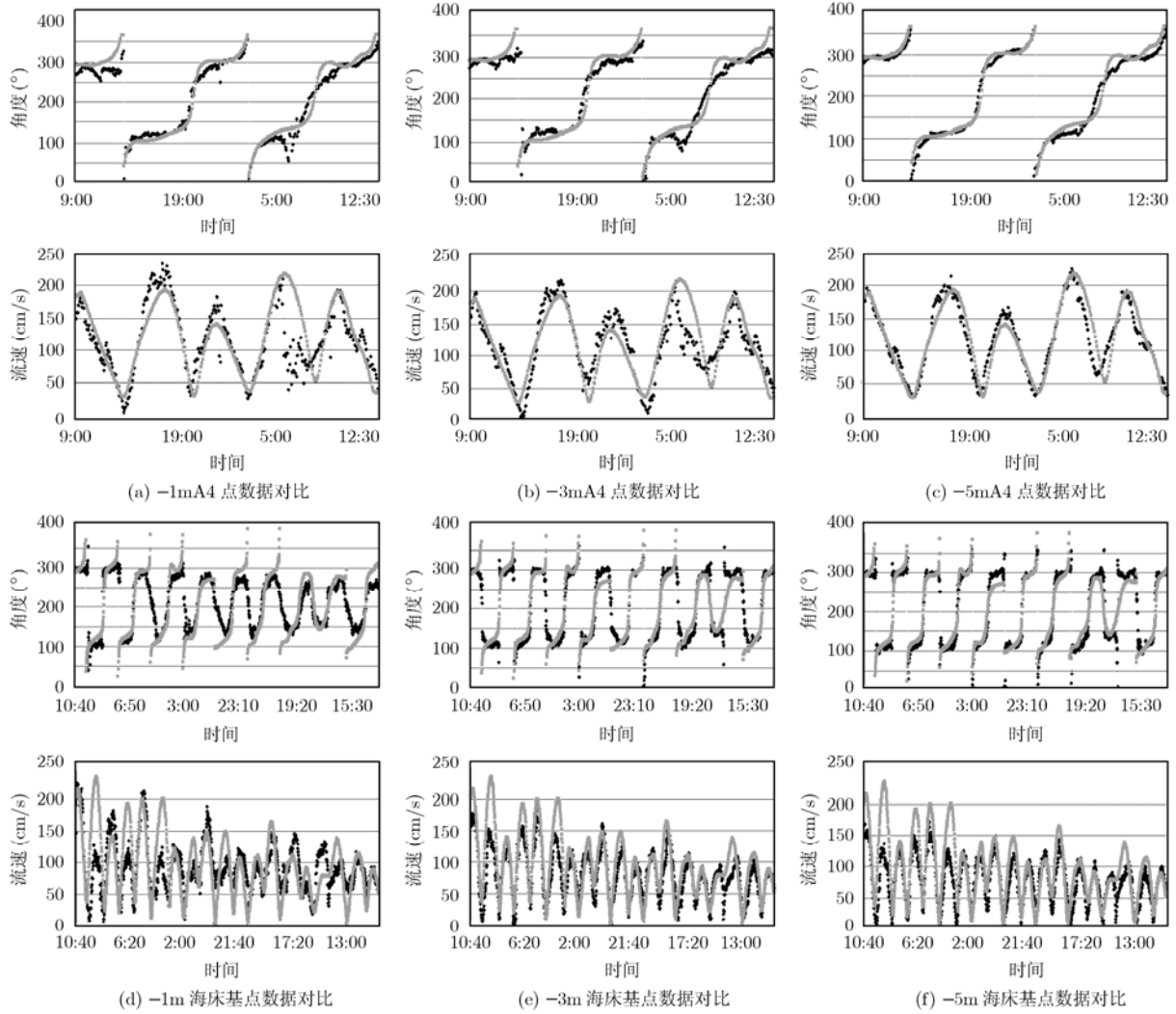


图 2 矢量流观测数据对比图((a)-(f)浅色点为雷达数据, (a)-(c)深色点为 ADP 数据, (d)-(f)深色点为海床基数据)

海流状态参数来表示, 而 OSMAR-S 雷达系统是通过海浪探测表面流的运动, 所以得到的探测值最接近的应该是表面流层内中心深度的海流数值, 并不是海面上的数值。

表 1 海床基多层水深流速流向相关系数

水深(m)	流速相关系数	流向相关系数
1	0.58	0.81
2	0.78	0.92
3	0.84	0.93
4	0.86	0.90
5	0.81	0.89
6	0.77	0.89
7	0.74	0.90
8	0.69	0.87
9	0.65	0.85

表 2 A4 点多层水深流速流向相关系数

水深(m)	流速相关系数	流向相关系数
1	0.76	0.98
2	0.84	0.98
3	0.84	0.92
4	0.90	0.94
5	0.93	0.90
5	0.91	0.88
7	0.88	0.84
8	0.85	0.83
9	0.81	0.81

根据实验数据结果对比及参数统计分析, 结合理论分析参考, OSMAR-S 雷达系统探测的表面海流所处的深度尽管受到环境因素的影响, 但是还是基本处于以 3 m 深度以内的最上层海流, 探测数据

表 3 同层水深对比数据参数统计

		平均误差	平均比值	平均相对误差	均方差	相关系数
A4	流速	-4.27	0.98	-0.02	19.96	0.94
安德拉	流向	6.28	1.06	0.06	17.05	0.99
A4	流速	-0.57	1.04	0.04	29.53	0.84
ADP	流向	7.70	1.04	0.04	21.74	0.99
安德拉	流速	-3.70	0.996	-0.004	21.46	0.92
ADP	流向	-2.20	1.15	0.15	32.89	0.94
海床基	流速	14.57	1.30	0.30	35.36	0.78
ADP	流向	-4.35	0.99	-0.01	31.34	0.93

与这一深度海流状态参数最吻合。

## 6 结束语

便携式高频地波雷达系统在东海洋山海域对比验证实验中, 采用了多种标准海流测量设备, 制定了以剖面对比为主的现场同时监测方案, 方案主要考察了 OSMAR-S 雷达系统的探测海洋表面流的水深, 填补了以往实验数据上的空白, 同时也验证 OSMAR-S 雷达系统探测表面海流的准确性和可靠性。整个实验符合国家海洋调查的规范, 目的明确, 方案合理, 过程顺畅, 验证了 OSMAR-S 雷达系统的实用性能, 符合大面积实时海洋表面流探测的相关要求。

## 参考文献

- [1] Roarty H, Kohut J, and Glenn S. Intercomparison of an ADCP, ADP, standard and long-range HF radar: influence of horizontal and vertical shear[C]. Current Measurement Technology, Proceedings of the IEEE/OES Seventh Working Conference, San Diego, Calif., March, 2003: 75-78.
  - [2] Yoshikawa Y, Matsuno T, and Malubayashi K, *et al.* A surface velocity spiral observed with ADCP and HF radar in the Tsushima strait[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(6): C06022.
  - [3] Long R and Barrick D. Surface current measurements during safe seas 2006: Comparison and validation of measurements from high-frequency radar and the quick release estuarine buoy[C]. Oceans 2007, Proceedings of the MTS/IEEE OCEANS'07 Conference, Vancouver, October, 2007: 1-7.
  - [4] Carter O, Peter W, and Libe W, *et al.* Interpretation of coastal HF radar-derived surface currents with high-resolution drifter data[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2007, 24(4): 666-680.
  - [5] 吴雄斌, 杨绍麟, 吴世才等. 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, 46(3): 340-346.  
Wu Xiong-bin, Yang Shao-lin, and Wu Shi-cai, *et al.* Ocean surface currents detection at the Eastern China Sea by HF surface wave radar[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2003, 46(3): 340-346.
  - [6] Barrick D E. Extraction of wave parameters from measured HF radar sea-echo Doppler spectra[J]. *Radio Science*, 1977, 12(3): 415-424.
  - [7] 陈江, 吴雄斌, 文必洋等. 采用便携式天线的近海海洋表面流探测[J]. *武汉大学学报(理学版)*, 2005, 51(1): 105-108.  
Chen Jiang, Wu Xiong-bin, and Wen Bi-yang, *et al.* Ocean surface current detection by HF ground wave radar with portable antenna system[J]. *Wuhan University Journal (Natural Science Edition)*, 2005, 51(1): 105-108.
  - [8] Khan R H and Mitchell D K. Waveform analysis for high frequency FMICW radar[J]. *IEEE Proceedings-F*, 1991, 138(5): 411-419.
  - [9] 严颂华, 吴世才, 吴雄斌等. 基于神经网络的高频地波雷达目标到达角估计[J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(2): 339-342.  
Yan Shong-hua, Wu Shi-cai, and Wu Xiong-bing, *et al.* DOA estimation based on neural network for HFGWR[J]. *Journal of Electronic & Information Technology*, 2008, 30(2): 339-342.
  - [10] Liu L, Wu X B, and Cheng F, *et al.* Algorithm for HF radar vector current measurements[J]. *Journal of Oceanography*, 2007, 63(1): 47-66.
- 文必洋: 男, 1961年生, 教授, 博士生导师, 从事高频地波雷达海洋环境监测技术等研究。  
李自立: 男, 1979年生, 博士, 从事高频雷达海洋回波信号处理等研究。  
周浩: 男, 1978年生, 副教授, 博士, 从事雷达信号处理等研究。