

文章编号: 2095-4980(2017)04-0656-07

基于 complex-EOF 的高频地波雷达海流数据的空时特性

沈志奔^{1,2}, 吴雄斌², 邓海华¹, 彭亮¹, 董梁¹

(1.武汉第二船舶设计院, 湖北 武汉 430205; 2.武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430079)

摘要: 利用布设在高频地波雷达福建示范区的东山、龙海 2 个雷达站的约 3 天的海流数据进行矢量正交经验函数分析。分析结果表明前 3 个模态的方差贡献率分别为 91%、4%和 1.4%, 累计方差贡献率达到了 96%, 是主要模态。模态 1 的空时分布特性表明模态 1 主要反映了半日潮流的信息, 并且在一定程度上反映了水深分布的信息; 模态 2 的空时分布特性表明模态 2 主要反映了风生流以及流场旋转特性的信息; 模态 3 的空时分布特性表明模态 3 主要反映了上升流的信息。

关键词: 矢量正交经验函数分析; 高频地波雷达; 模态; 海流; 空时特性

中图分类号: TN95; TP717

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201704.0656

Complex-EOF analysis of ocean surface currents measured by High Frequency Surface Wave Radar

SHEN Zhiben^{1,2}, WU Xiongbin², DENG Haihua¹, PENG Liang¹, DONG Liang¹

(1. Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan Hubei 430205, China;

2. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan Hubei 430079, China)

Abstract: The complex Empirical Orthogonal Function(complex-EOF) analysis is performed on three days' ocean surface currents measured by two High Frequency Surface Wave Radar(HFSWR) systems located at Fujian province. The results show that the first three modes explain 91%, 4% and 1.4% of the variance, respectively. The cumulative variance reaches 96%, which are the main modes. The spatial and temporal distribution characteristics of mode 1 show that mode 1 mainly contains the information of semidiurnal tidal currents and reflects the information of water depth to a certain extent. Mode 2 mainly reveals the information of wind-driven current and shows the rotary characteristics of ocean surface currents. Mode 3 mainly reflects the information of upwelling currents.

Keywords: complex Empirical Orthogonal Function analysis; High Frequency Surface Wave Radar; mode; ocean surface currents; spatial and temporal characteristics

高频地波雷达(HFSWR)利用短波(3~30 MHz)在海洋表面绕射传播衰减小的特点可以探测 300 km 范围内的海洋表面运动目标。同时,随着海洋表面对电波信号的一二阶散射理论的建立,高频地波雷达可以大面积、全天候、实时地给出观测海域的海流结果^[1]。目前世界很多国家都致力于高频地波雷达的研究,并且研发出了很多成熟的产品,如美国的海洋环境动态监测雷达(Coastal Ocean Dynamics Application Radar, CODAR)、德国的波浪雷达(Wave Radar, WERA)及中国的海态监测分析雷达(Ocean State Monitoring and Analyzing Radar, OSMAR)等^[2-4]。高频地波雷达观测得到的流场经过大量的海上对比实验,验证了海流的准确性,推动了高频地波雷达海流观测的业务化运行,为研究当地的流场空时特性提供了很好的数据支持。研究流场的空时变化对海岸工程、航道利用、水产养殖及环境保护等都有着重要的意义。

正交经验函数(EOF)分析方法最早由统计学家于 1902 年提出,并由 Lorenz 于 1956 年首先引入气象和气候研究^[5]。EOF 分析起初只针对标量场,后来被拓展来进行矢量场数据分析(complex EOF 或 vector EOF)。EOF 原理是将数据场分解为一系列正交的特征函数或者模态,一般来说,前几个模态就可以表征数据的空时变化特性并且可以用相应的物理现象来进行解释。由于其在提取物理量场的空时特性方面具有巨大的优势,EOF 分析目前被

广泛应用于其他各个领域,如海洋领域。Sultan 等用 EOF 方法分析了波斯湾海域 4 个定点约 100 天海流数据的水平及垂直方向的空时分布特性^[6]。Kaihatu 等通过对高频地波雷达观测得到的海流的处理,比较了 2 种处理矢量场的正交经验函数分析方法(complex EOF 和 real-vector EOF)的优劣^[7]。Marmorino 等利用 real-vector EOF 分析了切萨皮克海湾的 23 天的高频地波雷达海流数据,同时展示了由 EOF 分析得到的浮力外流的特性^[8]。李云芳等利用 EOF 分析方法分析了东海海域海表温度场的空时特性^[9]。王雪竹等通过调和分析和 EOF 分析方法分析了南海中部深水海盆的 3 个站点的近 6 个月的流速观测资料,研究了该海区的潮流空间结构特征^[10]。张旭等利用 4a 的 Argo 剖面序列,通过 EOF 分析,得出了台湾以东海域声速垂直结构的空时变化特征^[11]。Yaremchuk 等研究了通过 EOF 分析方法进行表面流场的重构技术^[12]。庄锐铨等研究了基于 vector EOF 分析方法的琼州海峡定点锚系站的余流特性^[13]。

本文利用布设在高频地波雷达福建示范区的东山、龙海 2 个 OSMAR 雷达站的约 3 天(2008 年 8 月 2 日~8 月 4 日)海流数据进行 complex EOF 分析,给出了该海域各主要模态的空时分布特性。

1 数据与方法

1.1 complex EOF 介绍

complex EOF 分析的基本原理是找到一个能够最优地描述矢量场的复数标量场,使得两者之间的内积最大。由于其方法原理在前人的研究中已有详细的介绍,这里只给出其处理高频地波雷达海流场数据的基本流程。假设海流场为 $U(X_m, t_n) = u(X_m, t_n) + jv(X_m, t_n)$, 其中 $X_m = (x, y)$, $m=1-M$, 代表 M 个空间点的坐标; $n=1-N$, 代表时间序列长度为 N 。 $j=(-1)^{1/2}$, 表示虚数。 u, v 分别为海流的东分量和北分量。其计算流程如下:

将海流场 $U(X_m, t_n)$ 做距平处理,即对每个空间点上的海流的时间序列做减去这个时间序列的均值海流的处理。将处理完后的海流场仍记为 $U(X_m, t_n)$ 。

计算海流场 $U(X_m, t_n)$ 的协方差矩阵 $R(X_i, X_m)$:

$$R(X_i, X_m) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N U(X_i, t_n) U^*(X_m, t_n) \quad (1)$$

计算 $R(X_i, X_m)$ 的特征根 λ 和特征向量 $\Phi(X_m)$, 使得两者满足下式:

$$\sum_{m=1}^M R(X_i, X_m) \Phi(X_m) = \lambda \Phi(X_i) \quad (2)$$

式中: $\Phi(X_m)$ 和 λ 均为 $M \times M$ 维的矩阵, 其中 $\Phi(X_m)$ 的每一列之间都是相互正交的, 其可以表示为 $\Phi(X_m) = \Phi_u(X_m) + \Phi_v(X_m)$, u, v 分别为海流的东分量和北分量。 λ 具有以下的形式:

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_M \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中特征根是按从大到小顺序排列, 即 $\lambda_1 > \lambda_2 > \cdots > \lambda_M$, 每个特征值对应着 $\Phi(X_m)$ 中的一列特征向量值, 也称为一个模态, 特征值的大小可以用来表示此模态对总体流场的方差贡献率。

计算特征向量对应的时间系数 T :

$$T = \Phi(X_m) U(X_m, t_n) \quad (4)$$

式中 T 中每行数据就是对应每个模态的时间系数。

1.2 数据介绍

高频地波雷达 OSMAR 系统是采用线性调频中断连续波(Frequency Modulated Interrupting Continuous Wave, FMICW)体制的宽波束雷达, 工作带宽为 30 kHz, 发射天线为三元八木天线, 接收天线为八元非线性阵列, 表 1 给出了该系统的主要技术参数。该雷达利用海洋回波对阵列通道幅度和相位进行软件实时在线校正; 每个扫频周期的回波经过快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)得到距离谱, 对每个距离的回波数据进行相干积累后进行第 2 次 FFT 就可以得到回波多普勒谱。利用多重信号分类法(Multiple Signal Characteristic, MUSIC)算法来实现对信号波达方向(Direction of Arrival, DOA)的超分辨估计。通过单个地波雷达站可以得到海流的径向流信息,

可以看到这一特征,第67个模态以后的曲线近乎平行并趋近于1。由于此次观测时长为67 h,而在第67个模态后特征根的值有明显突变,说明观测时间的长短会影响 complex EOF 的特征根分布的结果。通过累计方差贡献率的曲线也可以看出前3个模态的累计方差贡献率达到96%,说明前3个模态已经能很好地表征本次实验期间流场的特性。

2.2 主要模态的空时分布特性

由上节的结论可以知道 complex EOF 的前3个模态已经能很好地表征实验期间的流场特性,这里就主要研究前3个模态的空间特征向量和时间系数的分布特性(以下简称为空时分布特性)。

图3给出了模态1的空时分布特性,箭头的大小和方向代表特征向量的幅值和方向,为了显示清楚,每4个网格点给出一个结果,背景颜色代表特征向量的幅值。模态1的方差贡献率为91%(图2)。从图3(a)可以看出模态1的特征向量方向分布均匀,在近海岸,其为东南方向,随着离海岸距离增加,慢慢逆时针旋转变为正东方向。其特征向量的幅值范围为0.010 5~0.029 9,其幅值从正北方向(以观测海域中心为参考点,下同)至正南及东南方向逐渐增强。与该海域的水深分布相比(图1(a))可以发现模态1的特征向量分布与水深分布密切相关,在正北水深较深,特征向量的幅值较小。相反,在南部及东南部水深较浅(台湾浅滩所在地),其特征向量的幅值较大。说明模态1反映了水深分布的影响。图4(a)给出了经过准调和分析后的 M_2 分潮潮流椭圆半长轴幅值空间分布^[15],对比图3(a)和图4(a)发现两者具有很高的相似性,都是在北部幅值较小,向南部及东南部逐渐增大,说明模态1主要反映了半日潮流的信息。

图3(b)显示了模态1的时间系数的幅度和相位变化,从图中可以看出明显的半日潮流变化规律,且其相位主要集中在东北-西南方向,与台湾海峡 M_2 分潮潮流椭圆走向一致。对其东分量和北分量分别做FFT可以得到如图4(b)的频率谱,从图中可以看到东分量和北分量的频率谱的尖峰(位于频率0.074 63 h^{-1} 处,约等于13.40 h)主要集中在半日潮频率附近,且北分量的幅值远大于东分量的,说明北分量的半日潮流信号更强一些。从东分量的频率谱图上还可以看到位于浅水分潮位置处(位于频率0.016 42 h^{-1} 处,约等于6.09 h)有一个明显的尖峰,证明了模态1在一定程度上反映了水深的信息。

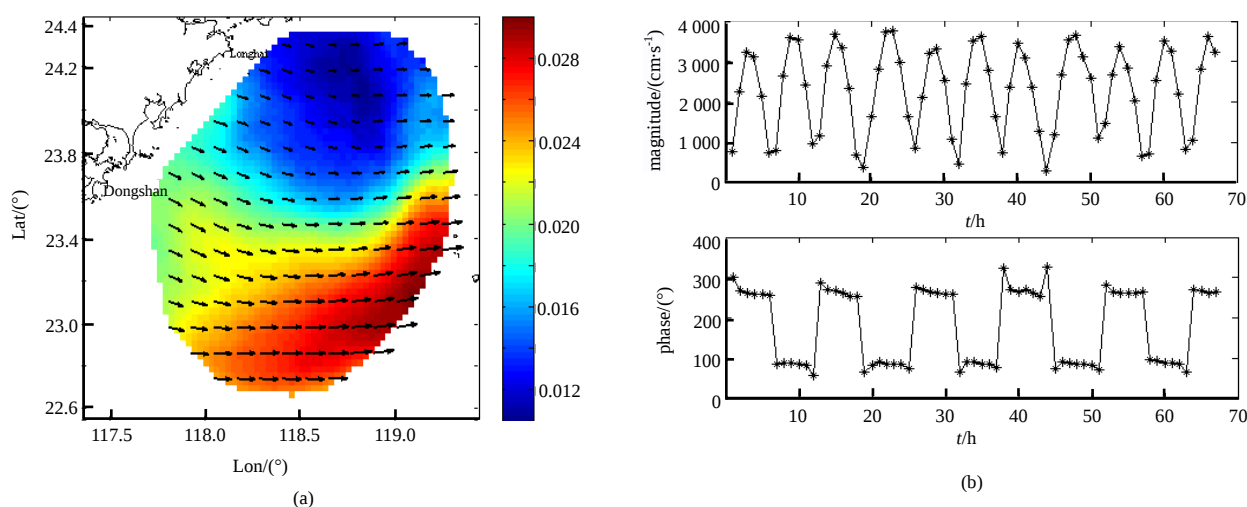


Fig.3 (a) Spatial distribution of the eigenvector of mode 1; (b) magnitude(upper panel) and phase(lower panel) of the time coefficient of mode 1.

图3 (a) 模态1的特征向量的空间分布; (b) 模态1时间系数的幅度和相位变化

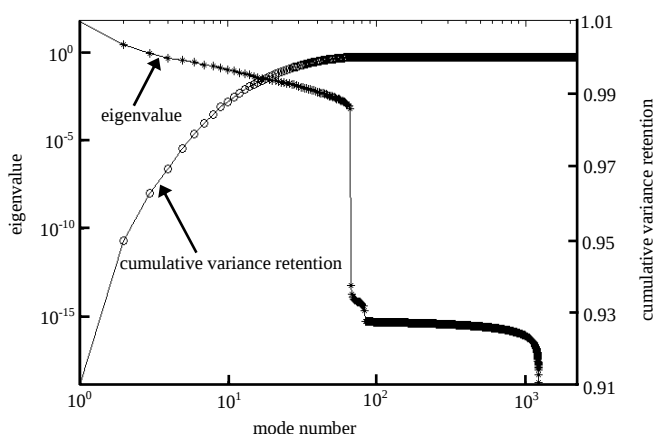


Fig.2 Eigenvalue spectrum and the cumulative variance retention for the complex EOF analysis

图2 complex EOF 各个模态的特征根大小及其对应的累计方差贡献率

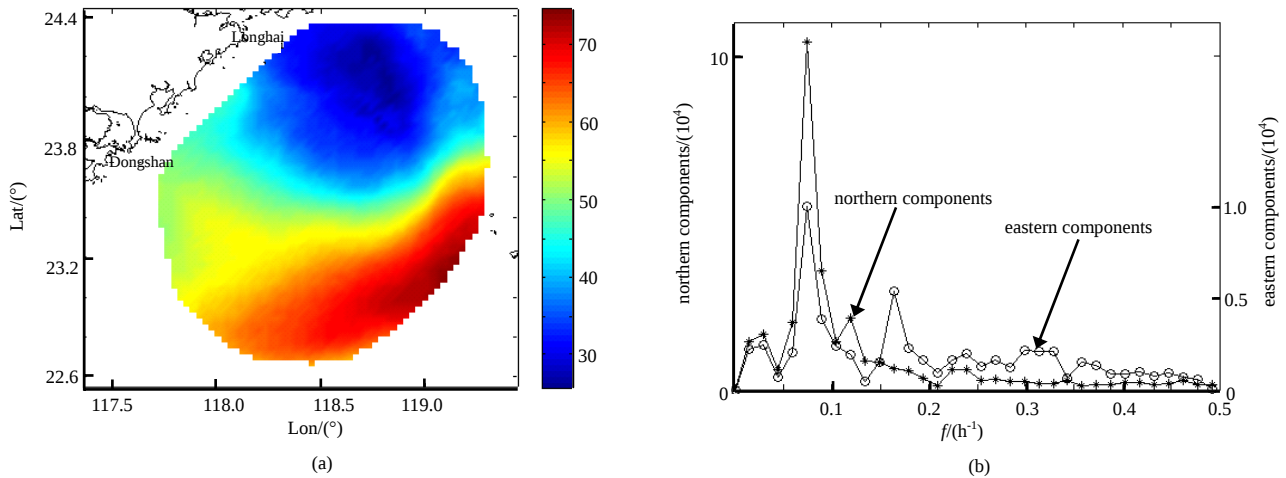


Fig.4 (a) Spatial distribution of the length of the semi-major axis of M_2 ; (b) frequency spectrum of the south and north components of the time coefficient of mode 1

图 4 (a) M_2 分潮椭圆半长轴幅值空间分布; (b) 模式 1 时间系数的东西分量的频率谱

图 5 给出了模式 2 的空时分布特性, 模式 2 的方差贡献率为 4%(图 2)。从图 5(a)可以看出模式 2 的特征向量的方向呈顺时针旋转, 并且在东南部形成一个漩涡, 说明模式 2 反映了海流的旋转特性。模式 2 的特征向量的幅值从北部向南部及东南部逐渐减小, 之后又慢慢增大。图 5(b)给出了模式 2 的时间系数的幅度和相位变化, 可以看出前 60 h 时间系数的幅度值基本在 0~500 cm/s 之间变化, 后面 7 h 幅度值突然变大。根据实验期间的值班日志, 前 60 h 风速较小, 一般维持在 3 m/s 并且有明显的风向变化, 后 7 h 风速突然增大到约 7 m/s 并且风向维持在西南方向。图 5(b)的变化和记录的风速风向的变化吻合得很好, 说明模式 2 基本反映了试验期间的风生流信息。

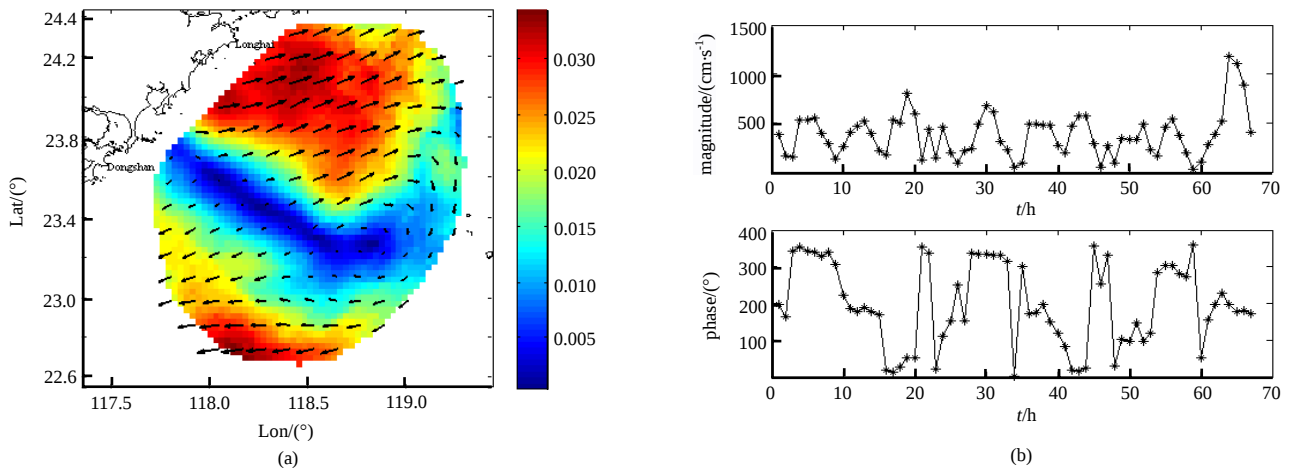


Fig.5 (a) Spatial distribution of the eigenvector of mode 2; (b) magnitude and phase of the time coefficient of mode 2.

图 5 (a) 模式 2 的特征向量的空间分布; (b) 模式 2 时间系数的幅度和相位变化

图 6 给出了模式 3 的空时分布特性, 模式 3 的方差贡献率为 1.4%(图 2)。从图 6(a)可以看出模式 3 的特征向量在观测海域的中下部存在一个明显的辐散中心, 由于上升流一般会形成如图 6(a)的辐散中心, 所以模式 3 基本反映了上升流的信息。由于模式 3 的方差贡献率仅为 1.4%, 说明上升流相对半日潮流和风生流来说所占的比例较小, 在整体海流中占次要成份。图 6(b)中时间系数的幅度在第 20 h 处有个最大峰值, 说明上升流可能在该时刻达到最大值。

3 结论

本文利用布设在高频地波雷达福建示范区的东山、龙海 2 个 OSMAR 雷达站的约 3 天(2008 年 8 月 2 日~8 月 4 日)海流数据进行 complex EOF 分析, 给出了主要模式的空时分布特性。主要结果如下:

- 1) 前 3 个模式的方差贡献率分别为 91%, 4%和 1.4%, 累计方差贡献率达到了 96%, 是主要模式, 可以很

好地表征本次实验期间流场的特性。

2) 模态 1 的特征向量方向分布均匀,在近海岸,其为东南方向,随着离海岸距离增加,慢慢逆时针旋转变为正东方向。其特征向量的幅值的分布和 M_2 分潮潮流椭圆半长轴幅值以及水深的空间分布相似。模态 1 的时间系数呈现明显的半日潮流特性,其东分量和北分量的 FFT 的峰值也集中在半日潮频率附近,说明模态 1 主要反映了观测海域流场的半日潮流信息,并且一定程度上反映了水深的分布信息。

3) 模态 2 特征向量的方向呈顺时针旋转,并且在东南部形成一个漩涡。其时间系数的变化和观测期间记录的风场变化一致,说明模态 2 主要反映观测海域期间海流场的风生流信息,并在一定程度上显示了海流场的旋转特性。

4) 模态 3 的特征向量在观测海域的中下部存在一个明显的辐散中心,主要反映了观测海域海流场的上升流信息。

5) 由于模态 1~3 的方差贡献率之比为 91:4:1.4,所以半日潮流在观测海域的海流场中所占比重最大,风生流次之,上升流最小。

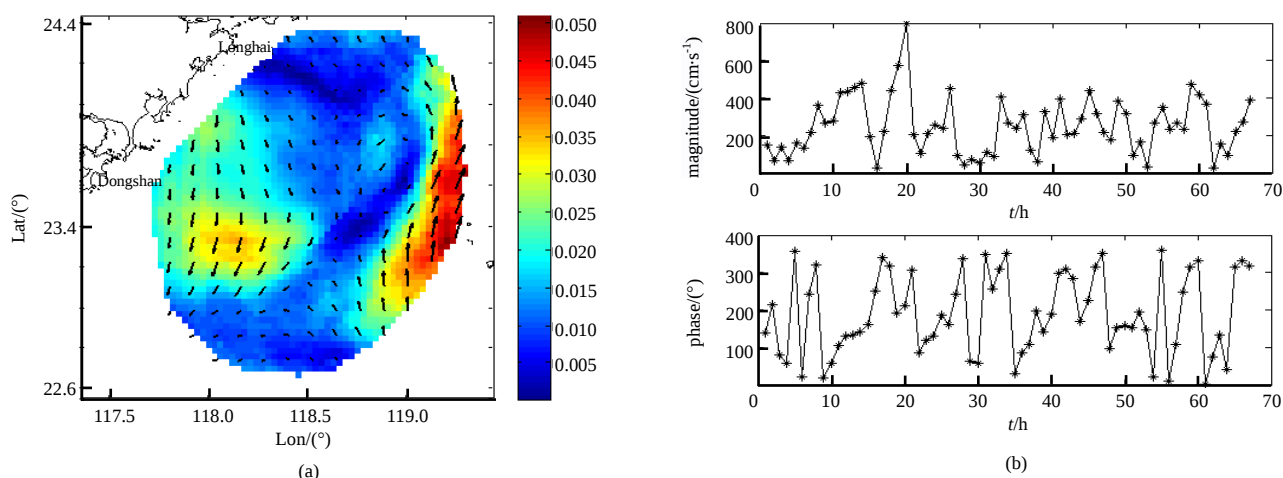


Fig.6 (a) Spatial distribution of the eigenvector of mode 3; (b) magnitude and phase of the time coefficient of mode 3.

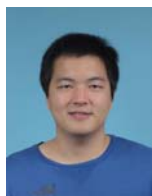
图 6 (a) 模态 3 的特征向量的空间分布; (b) 模态 3 时间系数的幅度和相位变化

参考文献:

- [1] BARNES L. HF radar—the key to efficient wide area maritime surveillance[Z]. London:ICG Publishing LTD, 1998,115–118.
- [2] BARRICK D E. 30 Years of CMTC and CODAR[C]// IEEE/OES 9th Working Conference on Current Measurement Technology. Charlston,SC,USA:IEEE, 2008:131–136.
- [3] ESSEN H H,GURGEL K W,SCHLICK T. On the accuracy of current measurements by means of HF radar[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2000,25(4):472–480.
- [4] LIU L,WU X,CHENG F,et al. Algorithm for HF radar vector current measurements[J]. Journal of Oceanography, 2007,63(1): 47–66.
- [5] LORENZ E N. Statistical forecasting program: empirical orthogonal functions and statistical weather prediction[J]. Sci Rep, 1956,409(2):997–999.
- [6] SULTAN S A R,ELGHRIBI N M. EOF analysis of the velocity fields in the Arabian Gulf[J]. Oceanologica Acta, 1998,21(1): 47–57.
- [7] KAIHATU J M,HANDLER R A,MARMORINO G O,et al. Empirical orthogonal function analysis of ocean surface currents using complex and real-vector methods[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 1998(15):927–941.
- [8] MARMORINO G O,SHAY L K,HAUS B K,et al. An EOF analysis of HF Doppler radar current measurements of the Chesapeake Bay buoyant outflow[J]. Continental Shelf Research, 1999,19(2):271–288.
- [9] 李云芳,郭佩芳,李广云. 东海海域海表温度场的 EOF 分析[J]. 海洋湖沼通报, 2007(3):1–4. (LI Yunfang, GUO Peifang, LI Guangyun. The EOF analysis of the sea surface temperature in the East China Sea[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2007(3):1–4.)
- [10] 王雪竹,李培良,张婷婷. 南海中部深水海盆的潮流垂直结构[J]. 海洋学报(中文版), 2009,31(1):20–27. (WANG Xuezhu, LI Peiliang, ZHANG Tingting. Vertical structure of the tide current in the central deep basin of the South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica(in Chinese), 2009,31(1):20–27.)

- [11] 张旭,张永刚,张健雪,等. 台湾以东海域声速剖面序列的 EOF 分析[J]. 海洋科学进展, 2010,28(4):498-506. (ZHANG Xu,ZHANG Yonggang,ZHANG Jianxue,et al. EOF analysis of sound speed profiles in sea area east of Taiwan[J]. Advance in Marine Science(in Chinese), 2010,28(4):498-506.)
- [12] YAREMCHUK M,SENTCHEV A. A combined EOF/variational approach for mapping radar-derived sea surface currents[J]. Continental Shelf Research, 2011,31(7-8):758-768.
- [13] 庄锐铨,潘伟然,张国荣,等. 基于矢量经验正交分析方法的琼州海峡定点锚系站余流分析[J]. 应用海洋学学报, 2013, 32(1):117-124. (ZHUANG Ruixin,PAN Weiran,ZHANG Guorong,et al. Vector EOF analysis of residual current of an anchor station in the Qiongzhou Strait[J]. Journal of Applied Oceanography(in Chinese), 2013,32(1):117-124.)
- [14] 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, 2003,46(3):340-346. (WU Xiongbin,YANG Shaolin,CHEN Feng,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.)
- [15] 方国洪. 潮汐预报的几种方法(一)[J]. 海洋科学, 1977,1(1):40-43. (FANG Guohong. Some methods for tide prediction (one)[J]. Marine Science, 1977,1(1):40-43.)

作者简介:



沈志奔(1986-), 男, 湖北省襄阳市人, 博士, 工程师, 主要研究方向为海洋遥感.
email:shenzhiben@163.com.

吴雄斌(1968-), 男, 武汉市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为高频地波雷达海洋遥感.

邓海华(1979-), 男, 武汉市人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为数据信号处理.

彭亮(1983-), 男, 武汉市人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为数据信号处理.

董梁(1989-), 男, 湖北省黄石市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为雷达信号处理.

中国兵工学会第二十届引信学术年会征文通知

为了进一步推动我国引信技术的繁荣发展,提升引信行业各单位核心发展力、创新力、竞争力,经研究决定,中国兵工学会第二十届引信学术年会将于 2017 年第三季度召开,现面向全国引信行业各单位的科技工作者征集论文。

一、年会主题: 引信技术创新驱动发展。

二、征文范围:

1) 军民融合发展战略中引信技术的机遇与挑战; 2) 引信基础理论、设计、开发、规范等的创新成果及发展趋势; 3) 引信开发、生产的新技术、新工艺、新体系、基础核心器件及部件的新进展; 4) 新武器、新平台、新威胁目标与引信技术; 5) 不敏感弹药引信技术; 6) 引信炸点及毁伤控制技术; 7) 引信抗干扰及强电磁对抗环境下新理论、新技术; 8) 引信靶场试验、测试及实战使用环境考核的新思路、新方法、新技术; 9) 引信产品在设计、开发、检验、贮存、使用(含全弹道环境、全寿命周期)等方面的安全性、可靠性问题和解决方法; 10) 科技新成果、新技术对引信技术发展的影响及技术融合的重点和发展方向。

三、征文要求: 本次年会召开前将评选出优秀论文,请各单位投稿的作者按下列要求认真准备论文。

- 1) 论文需贴近本次年会议题,有较强的学术性、针对性和前瞻性;
- 2) 论文内容事实准确,观点明确,条理清楚,数据可靠,未在国内外正式出版物上发表过;
- 3) 作者提交的论文必须通过所在单位的保密审查,文责自负,论文内容不得涉密;
- 4) 论文应包括:题目,作者名,单位名,所在地,邮编,中文摘要,中文关键词,正文,参考文献,作者简介(包含单位名称、详细通信地址、邮政编码、固定电话和手机号码);

5) 排版要求如下:纸张大小: A4, 页面设置: 上边距 2.5 cm, 下边距 2 cm, 左边距 2.5 cm, 右边距 2.5 cm, 页眉 1.5 cm, 页脚 1.75 cm; 文档网格: 选择“只指定行网格”每页 45 行。论文模板参见 www.tcykz.com 网站“读者园地”栏中的“引信学术年会论文模板”。为方便排版,请各位作者严格按照模板提交论文。具体方法: 下载模板——清除原文格式——粘贴到模板。论文格式按照科技论文标准规范,要求用 Word 2003 及以上版本软件排版。

四、投稿须知事项:

根据 2016 年引信专业委员会工作会议纪要的精神,本次年会将对所征集到的论文进行优秀论文评选活动,并遴选出部分具有代表性优秀论文在大会上进行交流。优秀论文评选完成后还将编辑出版《第二十届引信学术年会论文集》,并向《兵工学报》、《探测与控制学报》等国内核心期刊推荐发表。故请论文作者务必于 2017 年 5 月 30 日前请将论文全文电子版以附件形式发送至年会电子邮箱: tcykz@263.net, 邮件标题格式为“论文提交—xxx(论文题目)—xxx(作者姓名)—xxx(作者单位)”。

五、主办单位及联系方式:

主办单位: 中国兵工学会引信专业委员会, 机电动态控制重点实验室, 解放军军械工程学院弹药保障与安全评估军队重点实验室。

承办单位: 《探测与控制学报》编辑部。

联系人: 刘云 13659266136 029-88156201 029-88156204

通信地址: 西安市雁塔区吉祥路 99 号, 邮编: 710065

六、年会举办的具体时间和地址另行通知。