

# 海洋环境水下电场时频特征分析

江立军

(海军驻大连地区军代表室, 辽宁 大连 116021)

**摘要:** **目的** 掌握海洋环境水下电场主要能量来源和衰减规律。**方法** 结合理论研究环境电场幅值随时间的变化规律,重点分析水下环境电场不同频带的频谱分布,最后计算得到海洋环境水下电场不同频点的幅值在整个频带所占比重。**结果** 海洋环境水下电场随海水电导率和海水运动强度的减弱,幅值降低,能量主要集中在0.01~1 Hz的低频以及工频处,在一定的空间范围内海洋环境水下电场的一致性较强。**结论** 实验结果与理论分析结果具有一定的吻合度。

**关键词:** 海洋环境水下电场; 时频特征; 能量分配

**DOI:**10.7643/issn.1672-9242.2014.05.012

**中图分类号:** TB56      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2014)05-0058-04

## Time-frequency Characteristic Analysis of Underwater Electric Field in Ocean Environment at Shallow Sea

JIANG Li-jun

(Naval Agent's Room in Dalian Region, Dalian 116021, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To master the main energy source and attenuation law of underwater electric field in ocean environment. **Methods** The variation environmental electric field amplitude with time was studied in combination with the theories. The frequency spectral distribution at different frequency bands of the underwater environmental electric field was analyzed in detail. Finally, the proportions of the amplitude values at different frequency points in the whole frequency band of the underwater electric field in ocean environment were calculated. **Results** The results showed that the amplitude of the underwater electric field in ocean environment reduced with the decrease of the conductivity and the movement of the sea water. The energy was mainly concentrated in the 0.01~1 Hz low frequency and power frequency range. The ocean environment electric field showed strong consistency within certain space range. **Conclusion** The experimental results showed a certain degree of agreement with the theoretical analysis results.

**KEY WORDS:** underwater electric field in ocean environment; time-frequency characteristic; energy distribution

海洋环境水下电场是舰船目标探测和识别的主要背景场之一,其特性直接影响水下电场测量系统

对弱信号的检测能力。海洋环境水下电场根据场源形式不同,可分为天然电场和人为因素形成的电场。

收稿日期: 2014-06-18; 修订日期: 2014-07-08

Received: 2014-06-18; Revised: 2014-07-08

作者简介: 江立军(1960—),男,辽宁大连人,高级工程师,主要研究方向为雷达与电子对抗。

Biography: JIANG Li-jun(1960—), Male, from Dalian, Liaoning, Senior engineer. Research focus: radar and electronic countermeasures.

天然电场包括大地电场、海流和海洋波浪产生的电场、物理化学成因的电场以及生物电效应等几类电场<sup>[1]</sup>。人为因素形成的海洋环境水下电场主要是指工业干扰中的 50 Hz 工频及其谐波。

由于海洋环境水下电场是非平稳的随机过程,它与季节、气候、时间及海况等环境因素息息相关,因此文中拟从时间和频率域的联合分布来研究环境电场的变化规律和能量分配,从而可以确定电场在不同时间和频率上的能量分布以及衰减规律。

文中所用数据均来自与一套长基线水下电场测量系统。测试系统所用电极 4 只,以 1 只电极作为参考电极,其他电极与之差分,共构成 3 组测量体,用于获取水下电场数据。试验测试方法为将 4 只测量电极沿一条直线依次布放于海底。由于受到海水作用,需利用 GPS 记录每只电极的实际布放位置,根据电极的位置信息将 3 组测量体数据修正到同一条直线。

### 1 时频分布

主要采用线性时频分析方法对环境电场信号进行处理,研究了不同空间位置、连续观测的长基线水下电场时频分布。根据所要分析的对象,选择合适的的数据长度,具体的处理步骤如下:

- 1) 选择不同时间点合适的样本。
- 2) 将需要分析的数据串联起来,组成一组数据。
- 3) 时频分析。将串联起来的数据作时频分析,选择合适的窗函数、FFT 点数、重叠率、显示的频率和幅度范围。
- 4) 在时频图的时间轴上,标注准确的时间。

分析结果如下:

图 1 中横坐标表示分析频段为 0.01 ~ 1000 Hz,纵坐标表示测试时间为从当天的上午 09:00 至次日的上午 08:00,图中颜色的深浅代表电场的强度信息(已归一化)。从不同测量体的时频分析结果中可以看出,布放在不同位置处的电场表现出类似的时频分布特性。能量集中在 0.01 ~ 1 Hz 的低频带和 50 Hz 工频及谐波处,这部分能量主要来自于天然电场中的海洋大地电场、海水运动感应电场和周边的工业干扰。

随着时间的推移,在凌晨 1—3 点时电场强度最低,各测量体电场幅度随时间衰减和增强的变化趋势一致。根据理论分析,海面波浪产生的电场三分

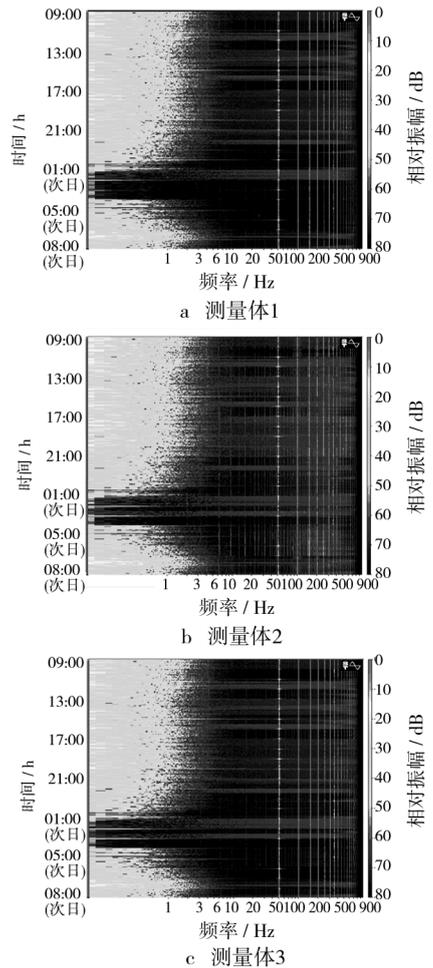


图 1 不同测量体连续观测的时频

Fig. 1 Time frequency diagram of continuous observation with different measurements

量解析公式为<sup>[2]</sup>:

$$E_x = i \left( \frac{\eta(\varepsilon_1 m + \hat{\varepsilon} \xi)}{m(\varepsilon_1 \eta + \hat{\varepsilon} \xi)} \exp(-\eta z) - \exp(-mz) \right) U \cdot \exp(i\omega t - imx) \quad (1)$$

$$E_y = \left( \frac{m + \xi}{\eta + \xi} \exp(-\eta z) - \exp(-mz) \right) V \exp(i\omega t - imx) \quad (2)$$

$$E_z = \left( \frac{\varepsilon_1 m + \hat{\varepsilon} \xi}{\varepsilon_1 \eta + \hat{\varepsilon} \xi} \exp(-\eta z) - \exp(-mz) \right) U \exp(i\omega t - imx) \quad (3)$$

式中:  $\eta = \sqrt{m^2 + i\omega\mu(\sigma + i\omega\varepsilon)}$ ;  $\xi = \sqrt{m^2 - \omega^2\mu\varepsilon}$ ;

$$\hat{\varepsilon} = \varepsilon_2 - i \frac{\sigma}{\omega}; \quad U = \frac{\alpha\sigma F \cos I \sin \theta}{\hat{\varepsilon}}; \quad V = \frac{\alpha\omega\sigma F (\cos I \sin \theta - i \sin I)}{\sigma + i\omega\varepsilon};$$

$m$  为海浪的波数,  $m = \omega^2/g$ ;

$\omega$  为海浪运动的角频率;  $\mu$  表示海水磁导率;  $\sigma$  表示海水电导率;  $\varepsilon$  表示海水介电常数;  $\varepsilon_2$  表示海底介电常数;  $F$  为海洋表面地磁场幅值;  $I$  为磁倾角;  $\theta$  为磁偏角;  $a$  为海浪的波幅。其中, 变化最大的两个参数是海浪波幅和海水电导率, 它们也是影响海面波浪感应电场幅值的重要参数。在凌晨 1—3 点时, 海水水温下降而导致海水电导率降低, 并且根据试验记录, 此时海面非常平静, 达到 0 级海况, 海水运动强度明显减弱, 从而最终导致海水运动感应电场的能量降低。

## 2 频谱分布

文中从时频图中对连续观测的环境电场能量分布进行了定性分析, 以下针对不同频点的电场进行定量研究, 目的是掌握电场在不同空间位置的能量分布以及衰减情况, 分析结果见表 1 和如图 2 所示 (样本选择的时间点为上午 10:00)。

表 1 不同频点幅值变化以及所占比重

Table 1 Changes in the amplitude of different frequency and the proportion of the amplitude

频点 / Hz	幅值/ $\mu\text{V}$				所占比重 均值/%
	测量体 1	测量体 2	测量体 3	最大差值	
0.01	515.32	430.69	341.08	174.24	2.32
0.02	427.23	357.75	283.32	143.92	1.93
0.05	313.80	263.01	204.40	109.41	1.41
0.1	111.91	94.54	73.31	38.60	0.50
0.2	68.99	58.21	45.17	23.82	0.31
0.5	91.36	77.28	59.57	31.80	0.41
1	11.00	9.24	7.21	3.79	0.05
2	3.68	3.84	2.42	1.43	0.02
5	0.75	0.59	0.47	0.28	0.01
10	0.54	1.09	0.27	0.82	0.01
工频(50)	1117.90	928.87	722.47	395.46	4.99

注: “所占比重均值”指 3 个测量体不同频点幅值在全频带所占比重的均值

观察 0.01 ~ 1 Hz 频段各测量体的频谱分布曲线, 三者的变化趋势一致, 并且频率越低, 幅值差别越大 (这是由于电极距不同引起电场空间增益不同所致)。可见, 海洋环境电场在 0.01 ~ 1 Hz 频段具有很强的空间相关性, 它主要由天然电场中的海水运动感应电场引起。海面波浪感应电场的周期与波

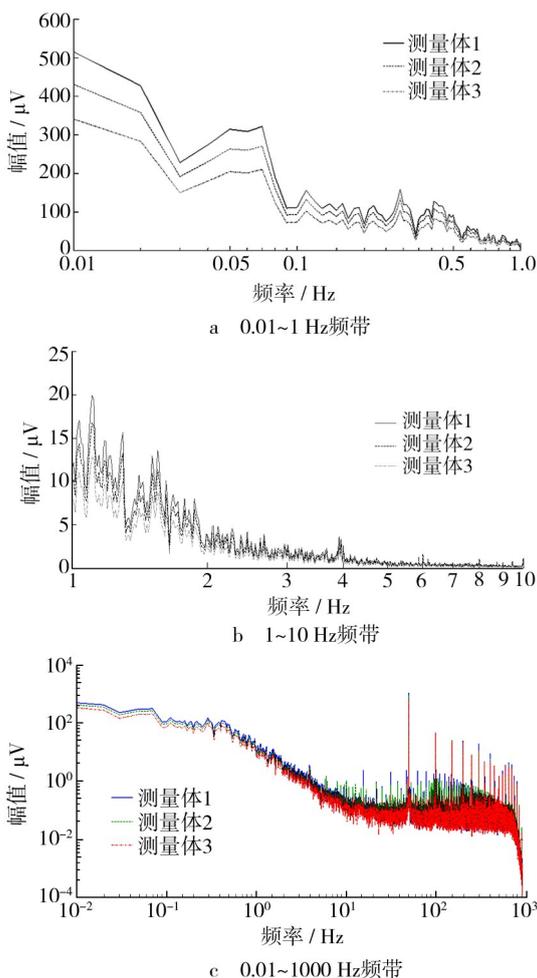


图 2 不同测量体频带频谱曲线

Fig. 2 Spectrum curve at different band with different measurements

浪的周期一致, 其频率范围主要集中在 0.08 ~ 0.5 Hz<sup>[3]</sup>。涌浪产生的电场幅度较大, 频率约为 0.1 Hz<sup>[4]</sup>。

观察 1 ~ 10 Hz 频段的频谱分布曲线, 1 ~ 5 Hz 频段内 3 个测量体的频谱衰减趋势一致性也比较强, 但 3 个测量体幅值之间的差异较 0.01 ~ 1 Hz 频段明显变小。在 5 ~ 10 Hz 频段, 不同位置处电场的频谱幅值随机性增强, 幅值大小已不存在明显差异, 衰减强度也明显减弱, 3 个测量体所测电场频谱曲线基本重合。这主要是由于海洋大地电场的影响, 海水媒质具有高电导性, 对高频电磁波具有强烈的吸收作用, 因此海洋大地电场能量主要集中在 10 Hz 以下频段。

观察 0.01 ~ 1000 Hz 频段电场幅值的衰减曲

线,在10~1000 Hz的交变电场部分,海洋环境工频电场所占比重最大<sup>[5-6]</sup>,但工频电场及其谐波的幅值和个数存在差异。除工频及谐波之外,三者交变电场的幅值接近。引起工频电场和谐波不同的原因主要为测量体距离海岸线的距离不同所致。

### 3 结语

海洋环境水下电场能量的主要成分为0.01~10 Hz低频和50 Hz工频电场,其中0.01~10 Hz低频成分主要来源于天然电场并且在不同空间位置电场频谱的衰减趋势一致,表明海洋环境电场在低频相关性很强,这源于海洋大地电场和海水运动在一定的区域内具有空间一致性。工频电场是10~1000 Hz频带能量最强的频点,它主要来源与测试海域附近陆上的大功率发电、送变电设施及电器设备,随与海岸线的距离变化急剧衰减。

### 参考文献:

[1] 林春生,龚沈光.舰船物理场[M].北京:兵器工业出版社,2007.

LIN Chun-sheng, GONG Shen-guang. Physical Field of Warship[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2007.

[2] PODNEY W. Electromagnetic Fields Generated by Ocean

Waves[J]. Journal of Geophysical Research, 1979, 80 (C21): 2977—2990.

[3] 王永斌,陈卫东,杜义.海浪对水下电磁场幅度影响的分析[J].热带海洋学报,2005,24(1):37—40.

WANG Yong-bin, CHEN Wei-dong, DU Yi. The Effects Analysis of Electromagnetic Field Amplitude Underwater on Influence of Wave[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2005, 24(1): 37—40.

[4] 张自力,魏文博,刘保华,等.海浪感应电磁场的理论计算[J].海洋学报,2008,30(1):42—46.

ZHANG Zi-li, WEI Wen-bo, LIU Bao-hua, et al. Theoretical Calculation of Electromagnetic Field Generated by Ocean Waves[J]. Journal of Oceanography, 2008, 30(1): 42—46.

[5] 李琳琳,吕俊军.海洋环境工频磁场量级的快速估计方法[J].装备环境工程,2011,8(3):94—97.

LI Lin-lin, LYU Jun-jun. Fast Estimation Method of Power Frequency Magnetic Field Magnitude of Ocean Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(3): 94—97.

[6] 史晓陶.海洋环境交变电场变化规律研究[J].装备环境工程,2011,8(6):100—103.

SHI Xiao-tao. Study of Alternating Electric Field Variation of Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(6): 100—103.

(上接第16页)

DENG Chun-yan, PEI Jin-hua. Modeling and Process Simulating About Folding and Inflating of Omni-Directional-Type Airbag[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, 41: 97—102.

[10] 郝贵祥.空降车空投着陆响应分析及缓冲气囊系统参数优化方法研究[D].北京:装甲兵工程学院,2011.

HAO Gui-xiang. Research on Impact Responses of Airborne Tracked Vehicle and Parameter Optimization for Airbag System[D]. Beijing: Academy of Armored Forces Engineering, 2011.

[11] 王红岩,洪煌杰,李建阳,等.空降车缓冲气囊系统特性仿真及其参数优化方法研究[J].兵工学报,2012, 33(12):1461—1466.

WANG Hong-yan, HONG Huang-jie, LI Jian-yang, et al. Research on Simulation and Optimization of Cushion Characteristic of Airbags for Airborne Vehicle[J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(12): 1461—1466.

[12] WANG Hong-yan, HONG Huang-jie, HAO Gui-xiang, et al. Characteristic Verification and Parameter Optimization of Airbags Cushion System for Airborne Vehicle[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(1): 50—57.

[13] Douglas C M. Design and Analysis of Experiments[M]. USA: John Wiley & Sons, 2005.

[14] 周杰,张渝,安治国,等.基于遗传算法的锻模阻力墙结构多目标优化设计[J].机械工程学报,2010, 46(14):85—90.

ZHOU Jie, ZHANG Yu, AN Zhi-guo, et al. Multi-objective Optimization Design of Forging-Die Resistance Wall Structure Based on Genetic Algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(14): 85—90.

[15] BELYTSCHKO T, LU Y Y, GU L. Element-Free Galerkin Methods[J]. Int J Numer Meth Engng, 1994(37): 229—256.