

基于文氏方向谱的海浪感应磁场仿真

迟 铖, 王 丹, 陈晓露

(海军潜艇学院 水下作战信息遥感研究所, 山东 青岛 266071)

摘要:根据 Maxwell 电磁理论, 在地磁场中运动的海水将产生磁场; 利用 Weaver 建立的海浪感应磁场模型, 结合文氏方向谱, 从理论上计算了海浪在地磁场中感应磁场的强度及频率分布特性, 分析可得, 随着风速的增加, 海浪感应磁场对应主频率变小, 而感应磁场幅值变大; 随着深度的增加, 海浪感应磁场按指数衰减。

关键词:海浪; 电磁场; 文氏方向谱; 频谱

本文引用格式:迟铖, 王丹, 陈晓露. 基于文氏方向谱的海浪感应磁场仿真[J]. 四川兵工学报, 2014(5): 146-148.

中图分类号:P733.6

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2014)05-0146-03

Simulation of the Ocean Wave Induced Magnetic Field Based on the Venn Direction Spectrum

CHI Cheng, WANG Dan, CHEN Xiao-lu

(Satellite Remote Sensing Military Application Institute,
Navy Submarine Academy, Qingdao 266071, China)

Abstract: According to the Maxwell theory, motion of the ocean waves will generate electromagnetic field. This paper built the relationship between the sea surface wind field and the magnetic field induced by the waves using the wave induced magnetic field model, and analyzed the frequency spectrum distribution of wave induced magnetic field. The simulation results show that with the increase of the wind velocity, the frequency of wave induced magnetic rate becomes smaller, but the amplitude becomes bigger. With the increase of the depth, the induced magnetic field is damping according to the exponential equation.

Key words: ocean waves; electromagnetic field; Venn direction spectrum; frequency spectrum

Citation format: CHI Cheng, WANG Dan, CHEN Xiao-lu. Simulation of the Ocean Wave Induced Magnetic Field Based on the Venn Direction Spectrum[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014(5): 146-148.

海水是一种良导体, 在地磁场中运动会激发感应磁场, 而海浪感应磁场是进行海洋电磁探测的重要干扰源。因此了解风成海浪感应磁场的大小及频率分布可用于海洋电磁探测的噪声的消除, 提高探测的精度。前人对海浪感应产生的磁场已经做了深入的研究, 建立了海浪感应磁场模型。本文利用 Weaver^[1] 建立的海浪运动在地磁场中产生的磁场的数学模型^[2], 结合文氏方向谱, 仿真分析不同风速下充分成长的海浪感应磁场的强度及频率分布特性, 本文的结果对于海洋电磁探测具有重要的意义。

1 文氏方向谱

文氏方向谱^[3]不仅能正确地反映风速风向的影响, 还能真实地反映海浪成长状态的变化, 更符合实际的多变海况。文氏方向谱的具体表达式如下:

$$\bar{F}(\tilde{\omega}, \theta) = \begin{cases} \frac{k_1 k_3}{k_2} P \cos^n \theta \tilde{\omega}_\theta^{p\theta} e^{-\frac{p\theta}{q\theta}(\tilde{\omega}_\theta^{q\theta-1})} & \tilde{\omega} \leq \tilde{\omega}_i \\ \frac{\bar{F}(\tilde{\omega}_i, \theta) \tilde{\omega}_i^4}{\tilde{\omega}^4} & \tilde{\omega} \geq \tilde{\omega}_i \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中:

$$\begin{aligned}\bar{F}(\tilde{\omega}, \theta) &= \omega_0 F(\omega, \theta) / m_0, \tilde{\omega}_\theta = \tilde{\omega} / (k_2 \cos^2 \theta) \\ \tilde{\omega} &= \omega / \omega_0, \tilde{\omega}_r = \omega_r / \omega_0 \\ n &= n_1 - n_2 + n_3, n_1 = 9.798 - 1.633P \\ n_2 &= -0.20 + 0.0333 \ 3P, n_3 = 1.80 - 0.30P \\ k_2 &= 0.990 + 0.001 \ 667P, k_3 = 1.047 + 0.034 \ 32P \\ p_\theta &= eP_\theta + 1 \ q_\theta = eP_\theta, p_\theta = k_3 P \cos^3 \theta, P = \omega_0 S(\omega_0) / m_0\end{aligned}$$

其中: θ 是分波波向与主波波向(近似为平均风向)之间的夹角,即相对方位角; P 为成长因子,是一个无量纲量,用来表征频谱的尖度,也是用来反映风浪成长状态的一个物理量; P_θ 则相应的用来表征 θ 方向上的谱尖度因子; e 为自然对数的底; ω_l 是平衡域的下限角频率; ω_0 是主峰频率; m_0 是能谱的零阶矩; V_{wind} 为海面 10 m 高度处的风速 (m/s); g 为重力加速度; 其他引入的参数,如 $n, n_1 \sim n_3, k_1 \sim k_3, p_\theta$ 和 q_θ 等,则分别为 P 和 θ 的函数。

在给定风速的条件下,成长因子 P 、主峰频率 ω_0 、主峰波数 k_0 、主峰波长 λ_0 之间还存在着如下的关系式

$$\begin{cases} P = 1.69 \omega_0 V_{\text{wind}} / g \\ k_0 = \omega_0^2 / g \\ \lambda_0 = 2\pi / k_0 \end{cases} \quad (2)$$

文氏方向谱是一个三参量谱^[4],它的具体形式和成长因子 P 息息相关;同时,文氏方向谱是一个无因次谱,即归一化谱。

利用式(1)可以仿真某一风速条件下,充分成长的海浪对应不同方向角、不同频率的能量即海浪方向谱图,如图 1 所示。

利用海浪谱模型计算出对应不同角频率的海浪能量,根据能谱与振幅的关系

$$a^2 = 2F(\omega, \theta) \quad (3)$$

可计算得到对应不对频率的海浪的振幅。

2 海浪感应磁场理论

采用 Weaver^[1]建立的海浪运动在地磁场中产生的磁场的数学模型,其示意如图 2 所示。图 2 中 $OXYZ$ 是一直角坐标系^[5], Z 轴正方向指向海底, X 轴指向海浪传播的方向,坐标原点位于海平面 ($z=0$)。 a 代表海浪波动的振幅。 I 为地磁场的磁倾角, θ 为海浪传播方向与地磁北极的夹角,用 $\hat{e}_x, \hat{e}_y, \hat{e}_z$ 分别代表 X, Y, Z 坐标轴的单位矢量。设海水、空气中的磁导率都为 μ 。

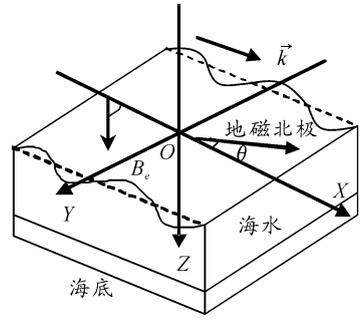


图 2 海浪感应磁场数学模型示意图

假设地磁场的磁感应强度大小为常数,则由图 2 得

$$\vec{B}_e = B_e (\cos I \cos \theta \hat{e}_x - \cos I \sin \theta \hat{e}_y + \sin I \hat{e}_z) \quad (4)$$

假设海水是不可压缩的无旋流体^[6],充满 $z > 0$ 的半无限空间,海洋表面波浪为平面简谐波,角频率为 ω ,则海水运动的速度可表示为

$$\vec{V} = -\omega a (i \hat{e}_x + \hat{e}_y) \exp(i\omega t - ikx - kz) \quad (5)$$

式(5)中, $k = \omega^2 / g$, g 为重力加速度。联立 Maxwell 方程^[7]可解得磁感应强度的分量为

$$B_x = \frac{1}{4} \beta A (2kz - 1) e^{-kz} \cdot e^{i(\omega t - kx + \frac{\pi}{2})} \quad (6)$$

$$B_z = \frac{1}{4} \beta A (2kz + 1) e^{-kz} \cdot e^{i(\omega t - kx)} \quad (7)$$

其中 $A = akB_e (\sin I + i \cos I \cos \theta)$, $\beta = \gamma / k^2 = \frac{\mu \sigma g^2}{\omega^3}$, $\gamma = \mu \sigma \omega$

3 仿真分析

为了分析海浪感应磁场的频率及强度特性,利用海浪谱模型仿真计算不同风速条件下,海浪感应磁场的大小,如图 3 至图 5 所示。仿真条件如下:地磁场强度大小为 $F = 4.5 \times 10^4$ nT,磁倾角为 $I = \pi/3$,海浪与磁北极的夹角为 $\pi/6$,计算 10 m 水深处的感应磁场大小。

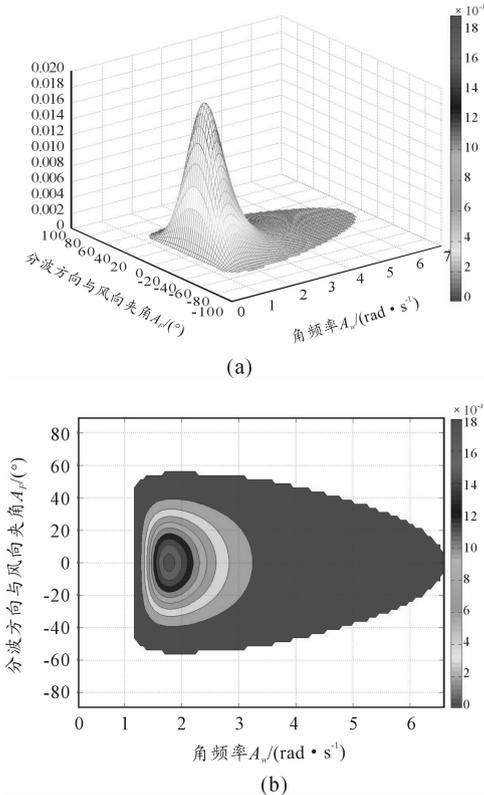


图 1 海浪方向谱(风速 5 m/s)

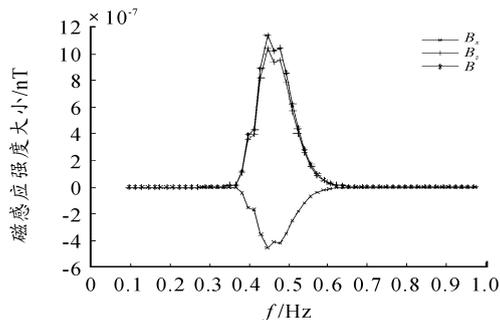


图3 海浪感应磁场与频率的关系(2 m/s 风速)

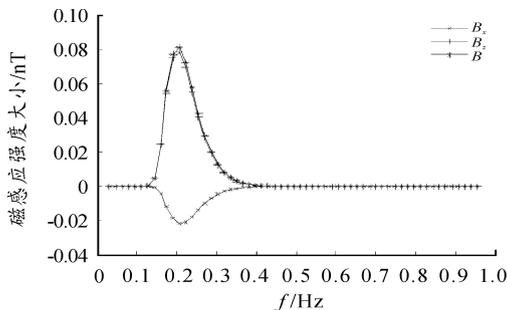


图4 海浪感应磁场与频率的关系(6 m/s 风速)

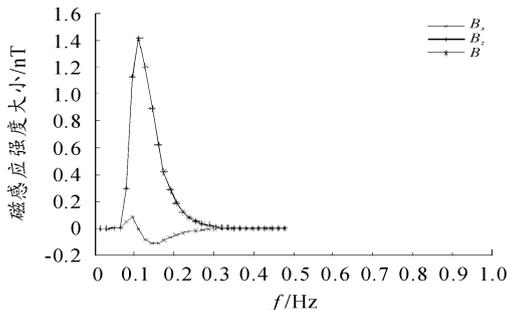


图5 海浪感应磁场与频率关系(12 m/s 风速)

由仿真结果可得海浪感应磁场相对较弱,当风速为 2 m/s 时,产生的感应磁场可以忽略不计,仅风速达到 10 m/s 以上时,才会产生 1 nT 以上的感应磁场。海浪感应磁场分布与海浪谱分布类似:对于不同风速,存在海浪主频即能量最大的频率。在低频部分(小于主频部分),随着频率的增加,感应磁场强度增加;而超过主频的高频部分,随着频率的增加,感应磁场强度减少。

为了便于分析,比较不同风速条件下的海浪感应磁场的主频率及最大值如图 6、图 7 所示。

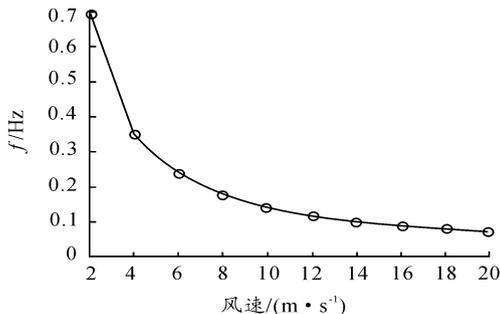


图6 不同风速引起的海浪主频率

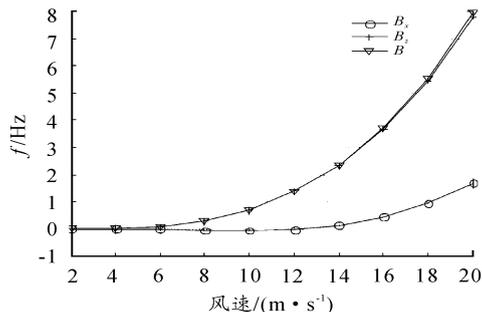


图7 不同风速感应磁场强度最大值

由仿真结果可得,随着风速的增加,海面波高变大,海浪感应磁场随之变大,如图 7 所示,当风速达到 20 m/s 时,感应磁场强度可以达到 8 nT;随着风速的增加,海浪的主频率减小,如图 6 所示,当风速高于 14 m/s 时,感应磁场的主频率低于 0.1 Hz。

4 结束语

本文利用文氏方向谱,对不同风速下的海浪进行了模拟,并利用海浪感应磁场模型对不同风速下的海浪感应磁场进行了仿真分析,得出了感应磁场的幅值及频谱分布,随着风速的增加,海浪感应磁场对应主频率变小,而感应磁场幅值变大。海浪感应磁场是小量,其在海面附近小于 10 nT。综上所述,海浪产生的感应低频磁场是小扰动,对于海洋目标探测^[8]而言,仅在高海况条件下需考虑海浪的影响;其磁场频率主要在 0.1 Hz 以下。

参考文献:

- [1] MACLURE K C, HAFER R A, WEAVER J T. Magnetic variations produced by ocean swell [J]. Nature, 1964, 204:1290.
- [2] WEAVER J T. Magnetic variations associated with ocean waves and swell [J]. Journal of Geophysical Research. 1965, 70(8):1921-1929.
- [3] 文圣常,余宙文. 海浪理论与计算原理[M]. 北京:科学出版社, 1985.
- [4] 叶安乐,李凤歧. 物理海洋学[M]. 青岛:青岛海洋大学出版社, 1990.
- [5] 张自力,魏文博,李庚伟,金胜. 海浪感应磁场的频谱特性. [J]. 渤海大学学报:自然科学版, 2006(12):354-357.
- [6] 唐劲飞,龚沈光,王金根. 海浪产生磁场的能量分布计算[J]. 海洋学报, 2002(5):45-51.
- [7] 唐劲飞,龚沈光,王金根. 基于 Neumann 谱和 PM 谱的海浪产生磁场的能量分布计算[J]. 海军工程大学学报, 2001(4):82-86.
- [8] 魏文博,邓明,谭捍东. 我国海底大地电磁探测技术研究的进展[J]. 地震地质, 2001, 23(2):565-584.

(责任编辑 周江川)