

海浪对水下电磁场幅值影响的分析

王永斌, 陈卫东, 杜 义

(海军工程大学电子工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要:讨论了海浪波动基本规律,分析了海浪波动对水下接收点电磁场幅值的影响。理论计算表明,这种影响取决于海浪的有效波高和电波穿透深度的比值。在近似正态分布的海浪作用下,水下场强幅值呈现出对数正态分布的规律。海浪波动会造成场强均值增加和场强幅值波动。海浪对场强幅值的影响随着电磁场频率的下降显著地降低。

关键词:海浪;电磁场

中图分类号: TN011 **文献标识码:** A

由于海水的电导率较大,电磁波在海水中传播时的衰减比在空间传播时大得多;但是较低频率的电磁波由于具有较大的穿透深度,随着海洋电磁学的发展,在水下通信、探测和定位中将有越来越广泛的应用。

无线电波向海面下的传播,基本上是一个沿着海平面的法线方向向下传播的衰减行波,其场强由海水的复波数决定^[1]。文献[1]、[2]给出了电磁波在平面海面下传播的公式;但实际海面是不断起伏的,海浪运动的周期为0.1—30s^[3],会影响电磁波场强的幅度。海面上各面元与水平面的倾角是不断变化的,对面元采用边界条件^[4]分析方法计算场强困难极大。本文以海面按一定统计规律浮动为条件,近似分析海浪对水下电磁场幅值分布的影响。

1 水下接收点电场强度的统计分布

由于大海中波浪形状变化极为复杂,用严格的数学形式表达几乎不可能,对于研究水下接收点电场变化统计规律而言也没有必要。这里将问题适当简化,只考虑海水中水平电场分量(它在实际中远大于垂直分量),在已知海水的水文状况(海水电导率、海浪的统计分布)下,求解有海浪时的水下电场分布规律。

如图1所示,海浪的传播波形中,相邻波峰与波谷的垂直距离为波高 H ,已知它是个近似正态分布的随机变量^[5], $H \sim N(\mu_H, \sigma_H^2)$, μ_H 和 σ_H 分别是波高的均值和标准差。进入海水的水平电场分量接近垂直向下传播,设水下接收点的深度为 Z ,则 Z 也是正态分布的,平均深度是 μ_z ,依据正态分布的公式,它的分布密度为:

$$f_z(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-\mu_z}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (1)$$

收稿日期:2003-12-01;修订日期:2004-03-21

作者简介:王永斌(1961—),男,山西省晋中市人,硕士,教授,主要从事海军通信研究。

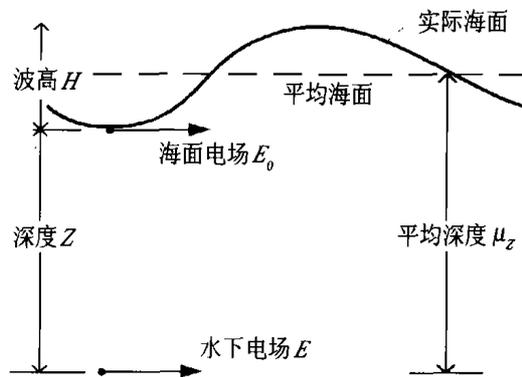


图 1 海面下电磁波传播示意图

Fig. 1 Propagation of electromagnetic wave under water

式中 $\sigma_z = \sigma_H/2$ 。在 $\omega\epsilon/\sigma \ll 1$ 条件下 (ω 为电磁波角频率, ϵ 为海水的介电常数, σ 为海水电导率), 设 E_0 是海面的水平电场幅值, 则接收点的电场幅值变量 E 为:

$$E = E_0 \exp(-Z/\delta) \quad (2)$$

式中 δ 是穿透深度, 它等于 $(2/\omega\sigma\mu)^{1/2}$, μ 是海水磁导率。所以 E 的分布密度为:

$$f_E(E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\xi E}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln E - \lambda}{\xi}\right)^2\right] \quad (3)$$

其中 $\xi = \sigma_z/\delta$, $\lambda = \ln E_0 - \mu_z/\delta$ 。式(3)表明接收点的电场幅值是符合对数正态分布^[6]的随机变量, 即 $E \sim \ln(\lambda, \xi^2)$ 。可以计算出电场幅值的均值 μ_E 和均方差 σ_E^2 :

$$\mu_E = \exp(\lambda + \xi^2/2) \quad (4)$$

$$\sigma_E^2 = \mu_E^2 [\exp(\xi^2) - 1] \quad (5)$$

电场幅值变量 E 在正数 a 和 b 之间的概率表达式可以用 $N(0, 1)$ 的分布函数 $\Phi(\cdot)$ 来表示:

$$P(a < E \leq b) = \Phi\left(\frac{\ln b - \lambda}{\xi}\right) - \Phi\left(\frac{\ln a - \lambda}{\xi}\right) \quad (6)$$

2 海浪对水下电场幅值影响的分析

分析海浪对水下电场的影响以无海浪时(理想海平面)的幅值为基准。海浪观测和预报一般给出有效波高 $H_{1/3}$, 其大小决定海浪的分级。根据海浪统计特征值^[5]之间的关系估算出标准差 σ_H 约为 $H_{1/3}/3$, 代入以上各式可得:

$$\mu_E = E_0 \exp(-\mu_z/\delta) \exp\left[\frac{(H_{1/3}/2\delta)^2}{18}\right] \quad (7)$$

$$\sigma_E = E_0 \exp(-\mu_z/\delta) \exp\left[\frac{(H_{1/3}/2\delta)^2}{18}\right] \sqrt{\exp\left[\frac{(H_{1/3}/2\delta)^2}{9}\right] - 1} \quad (8)$$

无海浪时 $H_{1/3} = 0$, 接收点的电场幅值为 $E_0 \exp(-\mu_z/\delta)$, 实质上这是平面海面状态下的接收点电场幅值, 记为无浪幅值 E_{off} , 以此作为分析海浪影响的参考标准。令 $\alpha = \mu_E/E_{off}$, 表示在海浪影响下电场幅值的相对均值; 令 $\beta = \sigma_E/E_{off}$, 表示电场幅值的相对标准差。 α 和 β 越大, 表明电场幅值的均值与无浪幅值相差越大, 幅值在均值周围的散布度越大,

也就是海浪对电场幅值的影响越大。从式(7)和(8)可见,有效波高的一半与穿透深度的比值 $H_{1/3}/2\delta$ 是电场幅值分布特征的决定因素,记为浪级比 θ 。当电波频率一定时,随着 θ 增大, α 和 β 也增大。所以在海浪的影响下,接收点检测的电平波动程度会加大,海浪可以形成 10Hz 以内的低频噪声。

图 2a、b 分别表示 α 、 β 和浪级比 θ 的关系。虽然随着浪级比的增大, α 和 β 都增加,但具有不同特点:在浪级比 θ 较小时, α 在无浪幅值基准上缓慢增加,而幅值的波动程度从无到有,增加很快; θ 较大时, α 增加加快,而幅值的波动程度增加变慢。显然,同一级海浪对不同频率的电场影响不同,电波频率越低则 θ 越小,海浪对电场幅值影响会显著降低。5 级海浪的有效波高为 2.5—4.0m,10kHz 的电磁波穿透深度为 2.52m,浪级比为 0.50—0.80,此时 α 为 0.12—0.30dB, β 为 -15.4—-11.1dB;100kHz 的电磁波穿透深度为 0.80m,浪级比为 1.57—2.51dB,此时 α 为 1.19—3.05dB, β 为 -3.8—-3.12dB。

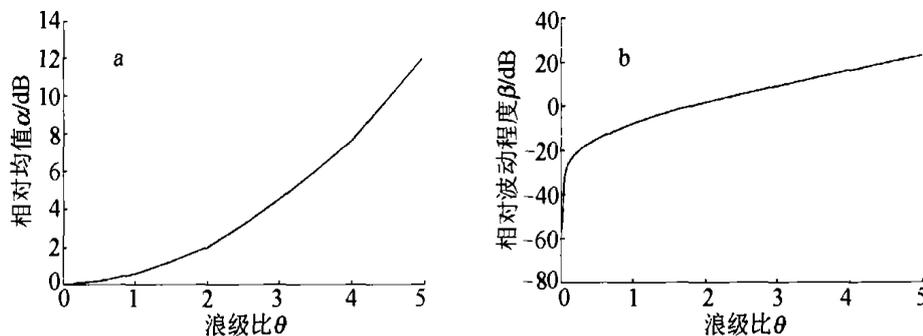


图 2 α 、 β 与 θ 的关系(以 E_{off} 为参考)

Fig. 2 Relationship between α , β and θ (with reference to E_{off})

若以无浪幅值为中心考察电场幅值 E 落在 $E_{off}(1 \pm \gamma)$ 范围内的概率 P_γ , $0 \leq \gamma < 1$, 幅值波动比 γ 表示考察范围内的电场波动值与 E_{off} 的比率。对于固定的 γ , P_γ 越大表明电场幅值越集中在无浪电场幅值附近,则海浪对电场幅值的影响就越小。所以概率 P_γ 定量地描述了海浪对电场幅值的影响程度。由式(6)得到:

$$P_\gamma = \Phi\left[\frac{3\ln(1+\epsilon)}{\theta}\right] - \Phi\left[\frac{3\ln(1-\epsilon)}{\theta}\right] \quad (9)$$

若 $\gamma \ll 1$, 式(9)简化为 $P_\gamma = 2\Phi(3\gamma/\theta) - 1$ 。表 1 列出了部分波动概率 P_γ 的数值。当浪级比在 0.3 以下时,接收点电场幅值波动比小于 10% 时的概率为 68%, 波动比小于 50% 时的概率为 87%。浪级比越大,电场幅值向外弥散的概率越大。5 级海浪时频率在 100Hz ($\theta < 0.08$) 以下,海浪对接收点电场幅值所造成的波动影响较轻,几乎可以忽略;但在 10kHz ($\theta > 0.5$) 以上,海浪对接收点电场幅值的影响较大。

表 1 接收点电场幅值在无浪幅值周围波动的概率 P_γ

Tab. 1 Fluctuating probability of electric field magnitude at receiving point P_γ

幅值波动比 γ	浪级比(半有效波高与穿透深度之比) θ				
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.1	0.99	0.87	0.68	0.55	0.45
0.5	1.00	0.95	0.87	0.93	0.77

3 结 论

海浪对水下接收点电场幅值产生影响,使水下电场幅度随海浪波动,此波动过程呈对数正态分布,其特征值取决于浪级比 θ 。不同频率的电磁波受海浪的影响不同,频率越高受海浪影响越大。

参考文献:

- [1] 王元坤. 电波传播概论[M]. 北京:国防工业出版社,1984. 25—26.
- [2] 梁高权. 甚低频波和超低频波的辐射与传播[M]. 武汉:海军工程大学电子工程学院,2002. 262—263.
- [3] (美)约瑟夫·M·毕晓普. 应用海洋学[M]. 李景光译. 北京:海洋出版社,1998. 50.
- [4] 毕德显. 电磁场理论[M]. 北京:电子工业出版社,1982. 305.
- [5] 许富祥. 海浪预报知识讲座第二讲,海浪要素及其特征[J]. 海洋预报,2001,18(2):78—80.
- [6] (美)Ang A H-S, Tang W H. 工程规划与设计中的概率概念(第2卷)[M]. 孙芳垂等译. 北京:冶金工业出版社,1991. 117—121.

EFFECT OF OCEAN WAVE ON MAGNITUDE OF UNDERWATER ELECTROMAGNETIC FIELD

WANG Yong-bin, CHEN Wei-dong, DU Yi

(Electric Engineering College, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The effect of ocean wave on magnitude of underwater electromagnetic field is discussed. It is shown that such effect is determined by the ratio of effective wave height to penetrating depth. Under the wave of approximate normal distribution, the magnitude of electromagnetic field presents logarithmic normal distribution. Wave can increase the mean value of the field strength and induce the fluctuating magnitude. The effect is reduced when the frequency of electromagnetic wave descends.

Key words: ocean wave; electromagnetic field