

甚低频远程遥控信号传输特性分析及接收方法

王伟¹, 曾凤²

(1. 成都理工大学 信息工程学院, 四川 成都 610059; 2. 浙江工业大学 理学院, 浙江 杭州 310032)

摘要:分析甚低频电磁波传播路径与方式, 给出场强的计算公式。推导了海水中的基本电磁波方程, 分析了电磁波的入水深度和入水后相位的变化, 特别是电场和磁场分量从水面传播到水下时场强的衰减, 并初步估算了甚低频遥控信号的入水深度。采用正交天线, 不论信号来自任何方向, 它接收到的都是最大值。

关键词:甚低频电磁波; 遥控水雷; 入水深度; 正交天线

中图分类号: TN011, TN827.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-5322(2007)03-0016-04

目前, 我国水雷大多为被动起爆型, 不利于战时机动和战后排雷。因此, 远距离对水雷进行遥控成为海军在未来高科技条件下局部战争, 特别是进行封锁作战时所面临的突出难题之一。甚低频电磁波具有良好的抗干扰能力, 在海水中具有较深的趋肤深度, 不失为远距离遥控水雷的有效手段, 而如何确定甚低频遥控信号的传播路径、作用距离、入水深度就成为亟待解决的关键技术。

1 传播路径与方式

1.1 传播路径

图1给出了甚低频电磁波从陆地到海洋的传播路径示意图。由于发射架建立在陆地上, 电磁波的传播路径将是陆地与海洋的混合路径。Millington、Wait 和 Walters 分别从实验和分析近似方面研究了混和路径问题。他们指出, 当传播路径从低电导率的陆地到海洋时, 场强实际上将随距

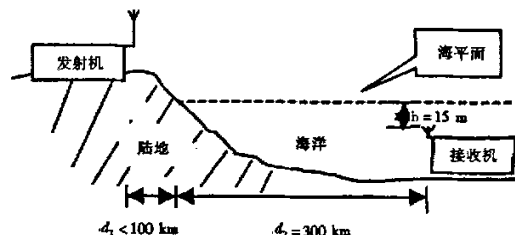


图1 传播路径示意图

Fig.1 Abridged general view of propagation path

离而增大(亦即所谓的恢复效应), 最后在第2媒介上以表面波的典型形式出现, 但是在甚低频段, 混和路径效应是很小的, 在小距离(通常小于500 km)上, 混和路径可用单一的海洋路径进行等效分析。

1.2 传播方式

根据 Watt 射线理论, 在甚低频段, 电磁波在小于500 km 距离上, 主要传播方式是地波与经过单一跳跃的天波, Bickel 的测量表明在400 km 的距离内地波与天波的组合电磁场近似等于地波电磁场。

1.2.1 地波传播特性

取坐标如图2所示, 电波能量沿轴方向传播, 由于地面(或水面)是导电媒质, 电波传播时就会产生衰减, 由电磁场基本理论可知, 地下水或水下(-X方向)传播的波由 E_{z1} 和 H_{y2} 分量产生的。换句话说, 电波在沿地面(或水面)传播过程中, 由大地(或海水)对电波能量的吸收作用而产生了沿电波方向上的电场纵向分量 E_{z1} 。若导电媒质相对复介电系数的绝对值满足下列条件:

$$|\epsilon_r| = |\epsilon_r - j60\lambda_0\sigma| \gg 1 \text{ 得到}$$

$$E_{z1} = \frac{E_{z1}}{\sqrt{\epsilon_r^2 + (60\lambda_0\sigma)^2}} e^{\frac{j}{2}(\arctan \frac{60\lambda_0\sigma}{\epsilon_r})} \quad (1)$$

$$E_{z2} = \frac{E_{z1}}{\sqrt{\epsilon_r^2 + (60\lambda_0\sigma)^2}} e^{\frac{j}{2}(\arctan \frac{60\lambda_0\sigma}{\epsilon_r})} \quad (2)$$

若已知 E_{z1} 值, 则其余各分量均可由以上各式

收稿日期: 2007-07-18

作者简介: 王伟(1983-), 男, 江苏泗洪人, 硕士, 主要研究方向为信号处理与系统通讯。

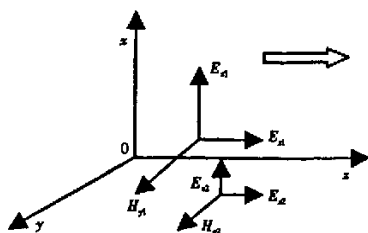


图2 场结构示意图

Fig.2 Structure of field intensity

求出。

1.3 地波场强计算

在甚低频段,混合路径(小于 500 km)可以等效为单一的海洋路径进行等效分析,在小距离内(400 km)地波与天波的组合电磁场近似等于地波电磁场。由此可得,在远离发射机时的垂直电场幅度为^[2]:

$$|E_N| \approx \frac{9.5 \times P_r^{\frac{1}{2}}}{d} |W_N| \quad (3)$$

式中, E_N 为垂直电场(V/m), P_r 为发射天线辐射功率(W), d 为接收点到发射点距离(m), W_N 为 Norton 表面波与距离成反比的场强之修正因子,甚低频在小距离传播时, $W_N \approx 1$ 。

2 海水中电波传播特性

当甚低频遥控信号由空气进入海水中后,其传输特性将发生变化,最重要的差异就是其传播规律中的衰减特性和相移特性,而这些差异的根源在于海水的导电性。

2.1 海水中电磁波基本方程

要分析海水中的电磁波传播特性,先从最基本的麦克斯韦方程出发,推导出海水中的电磁波基本方程。

$$\begin{cases} \nabla \cdot \vec{D} = \rho \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \end{cases} \quad (4)$$

式中电荷密度 ρ 和电流密度 $\vec{J}$ 的关系为:

$$\nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

对于各向同性媒质,则有

$$\begin{cases} \vec{D} = \rho \epsilon \vec{E} \\ \vec{B} = \mu \vec{H} \\ \vec{J} = \sigma \vec{E} \end{cases} \quad (6)$$

设海水中某区域内有自由电荷分布,其密度为 $\rho_0(t)$,由式(4)(6)

$$\begin{cases} \nabla \cdot \vec{D} = \rho \Rightarrow \nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \\ \vec{J} = \sigma \vec{E} \end{cases}$$

得到 $\nabla \cdot \vec{J} = \frac{\rho \sigma}{\epsilon}$ 代入式(5)得

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\sigma}{\epsilon} \cdot \rho_0(t) \quad (7)$$

解方程(7)得

$$\rho(t) = \rho_0 \cdot e^{(-\frac{\sigma}{\epsilon}t)} \quad (8)$$

若媒质呈良导体性质,则有

$$60\lambda_0\sigma \gg \epsilon, \Rightarrow \frac{\sigma}{\omega \cdot \epsilon} \gg 1 \quad (9)$$

而在甚低频段,海水性质满足(9)式,呈良导体状态,把(9)式代入(8)得 $\rho(t) = 0$ 。

由此,海水中甚低频条件下麦克斯韦方程为:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \vec{D} = 0 \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \end{cases} \quad (10)$$

2.2 海水中电磁波传播特性

对海水中甚低频条件下的基本电磁波方程求解,可得:

$$\begin{cases} \nabla^2 \cdot \vec{H} + \hat{K}^2 \cdot \vec{H} = 0 \\ \nabla^2 \cdot \vec{E} + \hat{K}^2 \cdot \vec{E} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中 $\hat{K}^2 = \omega^2 \mu \epsilon_s = \omega^2 \mu (\epsilon - j \frac{\sigma}{\omega})$ ^[3]

令 $\hat{K} = \beta - j\alpha$, 其中 β 为相位常数, α 为衰减常数。

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2} + 1 \right]}$$

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2} - 1 \right]}$$

又因为海水在甚低频条件下满足 $\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \gg 1$

则 $\alpha = \beta = \sqrt{\pi f \mu \sigma}$, $\hat{K}^2 = \sqrt{\mu \omega \sigma} \cdot e^{j\frac{\pi}{4}}$ 代入式(10)得

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot e^{-\alpha \cdot \vec{R}} \cdot e^{-j\beta \cdot \vec{R}} \quad \text{其中 } \vec{R} \text{ 为矢径}$$

$$\vec{H} = \sqrt{\frac{\sigma}{\omega \mu}} \cdot e^{j\frac{\pi}{4}} \times \vec{E}^{(4)}$$

① $\vec{E}$ 的相位比 $\vec{H}$ 相位超前约 $\frac{\pi}{4}$

② 本征阻抗 $|Z_c| = \left| \frac{\vec{E}}{\vec{H}} \right| = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}}, |G_c| = \frac{1}{|Z_c|}$

③ 波的相速度: $V_p = \frac{dR}{dt} = \frac{\omega}{\beta} = \sqrt{\frac{2\omega}{\mu\sigma}}$

④ 海水中波长: $\lambda = \frac{V_p}{f} = \sqrt{\frac{4\pi}{f\mu\sigma}}$

⑤ 穿透深度: $\sigma = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$

3 海水中遥控信号入水深度分析

海水中的电磁波传播随着深度增加,场强是随着指数衰减的,得到:

$$|E_z| = |E_{z1}| \cdot e^{-\alpha h} = \sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (12)$$

在甚低频段,取 $f = 15 \text{ K}$ 分析,水下场强水平分量幅度衰减值为:

$$d = 20 \lg e^{-\alpha h} = -20 \alpha h \cdot \lg e = -4.27 h \text{ dB}$$

表 1 15 K 甚低频信号在海水中的入水深度
与场强幅度衰减量关系

Table 1 Depth - enter water and field intensity
attenuation of 15 K VLF signal in seawater

入水深度 h/m	1 m	5 m	10 m	15 m
衰减分贝数/dB	4.27	21.3	42.7	64.05
衰减量	0.6	0.09	0.0073	0.000 63

其中海水的本构参数为 $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, $\sigma = 4 \text{ s/m}$, $\epsilon_r = 80$ 。

4 海水中甚低频遥控信号的接收

若天线辐射功率 $P_r = 1\ 000 \text{ kW}$, $f = 15 \text{ K}$, $d = 400 \text{ km}$, 在 $h = 15 \text{ m}$ 时代入(2)(3)(12)式, 计算得水平电场幅度为

$$|E_{zh}| = 7 \times 10^{-3} (\mu\text{V/m})$$

接收天线我们采用两个水平正交的磁性天线振子来实现全向接收,如图 3 所示。

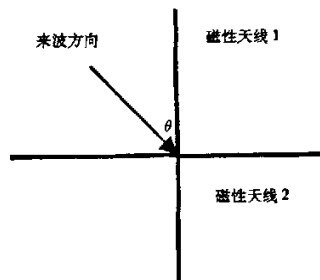


图 3 正交天线

Fig. 3 Orthogonal antennas

$$V_1 = E \cos \theta \cdot \cos \omega t$$

$$V_2 = E \sin \theta \cdot \cos \omega t$$

将天线 2 移相 90° 得

$$V_2 = E \sin \theta \cdot \cos(\phi_i + 90^\circ) = E \omega t \sin \theta \cdot \sin \omega t$$

$$V_h = V_1 + V_2 = E \cos(\omega t + \theta) \quad [5]$$

由上式可见合成电压的幅度恒等于 E , 不再随 θ 变化, 达到天线全向接收的目的。

5 结论

通过对甚低频电磁波传播特性的分析, 得到以下结论: (1) 在小距离(400 km 以内)上, 混合路径可以等效为单一的海洋路径, 而地波与天波的混合场强等效为单一的地波场强; (2) 电磁波由空气进入海水后, 场强按指数衰减, 为了在海水中能接收到信号, 载频不能过高; (3) 如果水雷的浮标天线在水下 15 m 展开, 对保持在 30 m 以下或更深安全深度的水雷进行遥控是可行的; (4) 与单个天线相比, 采用正交接收天线, 不论来波的方向如何, 它接收的信号都是最大值。

参考文献:

- [1] 刘培国, 毛钧杰. 电波与天线[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2004.
- [2] 沃特 A D. 甚低频无线电工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 1973.
- [3] 张效民, 相敬林, 尹雪飞. 水下自主导航体长波导航信号传输特性分析[J]. 水雷战与舰船防护, 1999(1): 36-39.
- [4] Liu Libo, Wu Xiangyang, Tu Jiannan. Modeling study of modification of the lower ionosp - here by VLF electromagnetic waves[J]. Chin. J. Space Sci, 2005, 17(2): 130-135.
- [5] 王伟, 郭大江. 甚低频遥控水雷全向数字接收机的研究[J]. 现代电子技术, 2007(12): 1-3.

Analysing Transmission Characteristic and Receiving Method of Very Low Frequency Remote Signal

WANG Wei¹, ZENG Feng²

(1. College of Information Engineering, Chengdu University of Technology, Sichuan Chengdu 610059, China;)
(2. College of Science, Zhejiang University of Technology, Zhejiang Hangzhou 310032, China)

Abstract: By analyzing transmission pathway and mode of VLF radio wave, calculation formula of field intensity is given. Basic radio wave equation underwater is deduced, underwater depth and phase change of radio wave are analyzed, especially, field intensity attenuation from up to underwater of electric field and magnetic field, estimation of the depth of VLF remote signal to enter water. Because of using orthogonal antennas, it receives signal which from all-round is strongest intensity.

Keywords: VLF radio wave; remote-control naval mine; depth-enter water; orthogonal antennas

(上接第7页)

参考文献:

- [1] Zadeh L A. The Concept of Linguistic Variable and Its Application to Approximate Reasoning[J]. *inform sci.* 1975(8):199-249.
- [2] Nilesch N Karnik, Jerry M Mendel. Type-2 Fuzzy Logic Systems[J]. *IEEE Transaction on Fuzzy Systems*, 1999(6):643-658.
- [3] John R I, Innocent P R, Barnes M R. Type-2 Fuzzy Sets and Neuro-fuzzy Clustering of Radiography Tibia Image[J]. *IEEE Int Conf. Fuzzy Sets*, 1998(5):1373-1376.
- [4] Nilesch, Karnik N. Operation on Type-2 Fuzzy Sets[J]. *IEEE, Fuzzy Sets and System*, 2001(22):327-348.
- [5] Liang O, Mendel J M. Overcoming Time-Varying Co-channel Interference Using Type-2 Fuzzy Adaptive Filter[J]. *IEEE Trans. Circuits Syst*, 2000(47):1419-1428.
- [6] Melin P, Castillo O. A new approach for quality control of sound speakers combining type-2 fuzzy logic and fractal theory[J]. in *Proc. FUZZY-IEEE. Int. conf.*, 2002(23):825-830.

A Study on Type-2 Fuzzy Logical System

GAO Jun

(College of Electrical and Information Engineering, Yancheng Institute of Technology, Jiangsu Yancheng 224003, China)

Abstract: On the basis of the systematical study on the Type-2 fuzzy logical system, the paper analyzes the basic theory and foundational structure of Type-2 fuzzy logical system, puts forward the corresponding ways to deal with practical problems by this system, directs the researchers to the future development and brings forward the problems that should be solved in the future.

Keywords: Type-2 fuzzy logical system; minimum t-form; primary membership; secondary membership