

采用电极对天线的水下通信电波传播分析^{*}

路洋洋^{**}, 王永斌, 翟琦

(海军工程大学 电子工程学院, 湖北 武汉 430033)

【摘要】对水下电极对天线发射电磁波的传播路径进行数学建模, 分析了水下电极对天线发射电磁波的电场表达式, 并对传播路径进行仿真研究, 重点分析了接收电场同传播距离、通信频率和接收深度的关系, 通过比较得出了侧面波的优越性。侧面波在水下远距离通信等方面有着十分重要的作用, 当前对侧面波的研究很少, 最后针对侧面波进行了重点分析, 并划分了具有实际意义的水下通信区域, 对各区域的三维合成电场进行了仿真研究。

【关键词】电极对; 电磁波; 侧面波; 水下通信

【中图分类号】 TN918

【文献标识码】 A

【文章编号】 1002-0802(2013)09-0015-04

Analysis on Electromagnetic Wave Transmission of Antenna Underwater Communication with Electric Dipoles

LU Yang-yang, WANG Yong-bin, ZHAI Qi

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

【Abstract】 The propagating route of electromagnetic wave transmitted by underwater electric dipoles is modeled. The equation of near electric field and the propagating routes are analyzed and simulated. The relationship between received electric field and propagating distance, communication band and received depth is particularly discussed. Comparison indicates the superiority of lateral wave. At present, the lateral wave plays an important role in long-distance underwater communication, but there is few study in this field, so the paper focuses on the analysis of lateral wave, describes the division of underwater communication area and the simulation of three-dimensional electric field.

【Key words】 electric dipoles; electromagnetic wave; lateral wave; underwater communication

0 引言

当在海水等媒质中以电磁波形式传递信号用于通信或者遥控时, 最好采用电极对天线。将信号电流馈入海水中, 电流从一个电极进入海水, 经海水流入另一个电极。波源和接收点均在海面以下时, 若距离海面较近, 则电磁波传播路径有三种: 直射波, 反射波和侧面波。文中先对此三种路径进行理论分析, 然后通过仿真得出侧面波的优越性, 最后再针对侧面波进行研究。

1 水下电极对天线发射电磁波的传播

1.1 水下电极对天线发射电磁波的传播路径理论分析

如图 1 所示, 海面以下有一电极对作发射天

* 收稿日期: 2013-04-07; 修回日期: 2013-08-19。

** 通讯作者: 981344572@qq.com。

线, 它发出的电磁波传播路径比较复杂, 假设海水是理想状态, 即不考虑电磁波在海水中的散射、绕射等复杂状况时, 水下发射电磁波的路径可归纳简化为以上三种路径: 直射波、反射波和侧面波^[1]。直射波是电磁波离开波源以后按照直线路径传到接收点, 反射波是电磁波经过海面反射, 最后被接收点接收, 侧面波是电磁波离开波源先穿过海面, 在海面上方的空气中传播一定距离以后, 有一小部分能量又进入海水中, 并向下传播至接收点。海水是一种导电介质, 它对电磁波的衰减很大, 在远离波源的地方其强度可忽略不计, 因此只研究电磁波实际可接收范围的电场。

根据麦克斯韦方程:

$$\nabla \times E = i\omega B, \quad \nabla \times B = \mu(-i\omega \tilde{\epsilon} E + J) \quad (1)$$

式中, $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon + \frac{i\sigma}{\omega}$, ε 为真空介电常数, σ 为海水电导率, J 为体电流密度, μ 为空间磁导率。

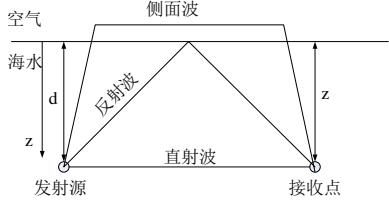


图1 水下电极对天线发射电磁波的传播路径对电场和电流密度进行坐标变换^[2]:

$$E(x, y, z) = \frac{1}{2\pi^2} \iint_{\infty} \bar{E}(\varepsilon, \eta, z) e^{i\varepsilon x + i\eta y} d\varepsilon d\eta \quad (2)$$

$$\bar{J}(\varepsilon, \eta, z) = \delta(z - d) \hat{x} \quad (3)$$

$$i\eta \bar{E}_z - \frac{\partial}{\partial z} \bar{E}_y = i\omega \bar{B}_x \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \bar{E}_x - i\varepsilon \bar{E}_z = i\omega \bar{B}_y \quad (5)$$

$$i\varepsilon \bar{E}_y - i\eta \bar{E}_x = i\omega \bar{B}_z \quad (6)$$

$$i\eta \bar{B}_z - \frac{\partial}{\partial z} \bar{B}_y = -i\omega \mu \varepsilon \bar{E}_x + \mu \delta(z - d) \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \bar{B}_x - i\varepsilon \bar{B}_z = -i\omega \mu \varepsilon \bar{E}_y \quad (8)$$

$$i\varepsilon \bar{B}_y - i\eta \bar{B}_x = -i\omega \mu \varepsilon \bar{E}_z \quad (9)$$

式中, \bar{E}_x , \bar{E}_y , \bar{E}_z , \bar{B}_x , \bar{B}_y , \bar{B}_z 分别为坐标转换后各分量的电场和磁感应强度。

根据式 (3) ~ (9) 求解出电场的各向分量, 然后代入式 (2), 可得出水下电极对天线激起的电场表达式为^[3]

$$E_{\rho} = -\frac{\omega \mu_0 I dl}{4\pi k_1^2} \cos \phi \cdot \left[\int_0^{\infty} \left(k_1^2 J_0(\lambda \rho) - \frac{\lambda^2}{2} [J_0(\lambda \rho) - J_2(\lambda \rho)] \right) \right. \\ \left. \gamma_1^{-1} e^{i\gamma_1 |z-d|} \lambda d\lambda + \int_0^{\infty} \left(\frac{\gamma_1 Q}{2} [J_0(\lambda \rho) - J_2(\lambda \rho)] - \frac{k_1^2 P}{2\gamma_1} [J_0(\lambda \rho) + J_2(\lambda \rho)] \right) \right. \\ \left. e^{i\gamma_1 |z+d|} \lambda d\lambda \right] \quad (10)$$

$$E_{\phi} = -\frac{\omega \mu_0 I dl}{4\pi k_1^2} \sin \phi \cdot \left[\int_0^{\infty} \left(k_1^2 J_0(\lambda \rho) - \frac{\lambda^2}{2} [J_0(\lambda \rho) + J_2(\lambda \rho)] \right) \right. \\ \left. \gamma_1^{-1} e^{i\gamma_1 |z-d|} \lambda d\lambda + \int_0^{\infty} \left(\frac{\gamma_1 Q}{2} [J_0(\lambda \rho) + J_2(\lambda \rho)] - \frac{k_1^2 P}{2\gamma_1} [J_0(\lambda \rho) - J_2(\lambda \rho)] \right) \right. \\ \left. e^{i\gamma_1 |z+d|} \lambda d\lambda \right] \quad (11)$$

$$E_z = -\frac{i\omega \mu_0 I dl}{4\pi k_1^2} \cos \phi \int_0^{\infty} \left(\pm e^{i\gamma_1 |z-d|} + Q e^{i\gamma_1 |z+d|} \right).$$

$$J_1(\lambda \rho) \lambda^2 d\lambda \quad (12)$$

式中, $d < z$ 时用正, $d \geq z$ 时用负号, $P = \frac{\mu_1 \gamma_2 - \mu_2 \gamma_1}{\mu_1 \gamma_2 + \mu_2 \gamma_1}$,

$$Q = \frac{\varepsilon_1 \gamma_2 - \varepsilon_2 \gamma_1}{\varepsilon_1 \gamma_2 + \varepsilon_2 \gamma_1}, \quad z < 0 \text{ 时 } j=1, \quad z < 0 \text{ 时 } j=2.$$

把体电流密度代入式 (10) ~ (12) 化简得

$$E_{\rho} = -\frac{\omega \mu_0 I dl}{4\pi k_1^2}.$$

$$\cos \phi [F_{\rho 0}(\rho, z-d) + F_{\rho 0}(\rho, z+d) + F_{\rho 1}(\rho, z+d)] \quad (13)$$

$$E_{\phi} = -\frac{\omega \mu_0 I dl}{4\pi k_1^2}.$$

$$\sin \phi [F_{\phi 0}(\rho, z-d) + F_{\phi 0}(\rho, z+d) + F_{\phi 1}(\rho, z+d)] \quad (14)$$

$$E_z = -\frac{i\omega \mu_0 I dl}{4\pi k_1^2}.$$

$$\cos \phi [F_{z 0}(\rho, z-d) + F_{z 0}(\rho, z+d) + F_{z 1}(\rho, z+d)] \quad (15)$$

上式电场的三个分量中 $F_{\rho 0}(\rho, z-d)$ 为直射波分量, $F_{\rho 0}(\rho, z+d)$ 为反射波分量, $F_{\rho 1}(\rho, z+d)$ 为侧面波表达式。直射波分量和反射波分量容易由积分表达式推导出严格的解析表达式。

对于直射波和反射波, F 的表达式为

$$F_{\rho 0}(\rho, z \pm d) =$$

$$-e^{ik_1 r} \left[\frac{2k_1}{r^2} + \frac{2i}{r^3} + \frac{(z \pm d)^2}{r^2} \left(\frac{ik_1^2}{r} - \frac{3k_1}{r^2} - \frac{3i}{r^3} \right) \right] \quad (16)$$

$$F_{\phi 0}(\rho, z \pm d) = -e^{ik_1 r} \left(\frac{ik_1^2}{r} - \frac{k_1}{r^2} - \frac{i}{r^3} \right) \quad (17)$$

$$F_{z 0}(\rho, z \pm d) = -e^{ik_1 r} \frac{\rho}{r} \frac{z \pm d}{r} \left(\frac{k_1^2}{r} + \frac{3ik_1}{r^2} - \frac{3}{r^3} \right) \quad (18)$$

此处 $r = \sqrt{\rho^2 + (z \pm d)^2}$, 上式中-代表直射波分量, +代表反射波分量。

对于侧面波, 很难求出其严格的解析表达式, 为了工程应用的方便, Banos 推导出了相对简洁的表达式, 电场的各项分量为^[4]

$$E_{\rho} \approx \frac{i\omega \mu_0}{2\pi k_1^2} \frac{\cos \phi}{\rho^3} e^{i[k_2 \rho + k_1(d+z)]},$$

$$E_{\phi} \approx -\frac{i\omega \mu_0}{\pi k_1^2} \frac{\sin \phi}{\rho^3} e^{i[k_2 \rho + k_1(d+z)]},$$

$$E_z \approx \frac{\omega \mu_0 k_2^2}{2\pi k_1^2} \frac{\cos \phi}{\rho^2} e^{i[k_2 \rho + k_1(d+z)]} \quad (19)$$

1.2 水下电极对天线发射电磁波的传播路径仿真分析

通过 MATLAB 对水下发射电极对天线的电场进行仿真分析, 得出了三种路径的场强曲线图。其中发射源深度为 0.5 m, 电流为 70 A, 两个电极间距

500 m, 方位角 $\Phi = \pi/4$ 。

从图 2 中可以看出, 对某一特定的频率, 随着通信距离的增大, 直射波和反射波衰减迅速, 当传播距离达到几十公里远时, 这两种传播方式便可忽略不计了, 此时侧面波占主导地位, 水下远距离通信主要依赖于侧面波传播。但在几十米的近距离通信中, 此三种传播方式相差不大, 原因在于接收点距离发射源比较近^[5], 信号比较强, 海水与空气对电磁波的衰减相对于信号的量值而言很小, 因此三种传播方式的差异就不明显了。

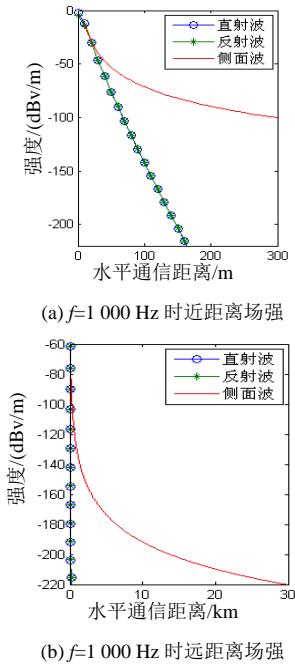
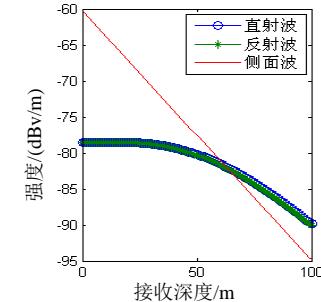
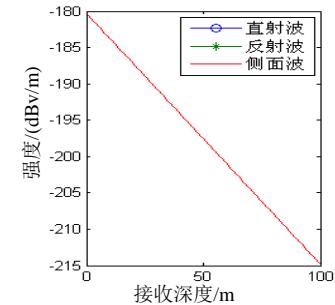


图 2 $f=1000$ Hz 时场强随着传播距离的变化曲线

图 3 表明, 随着接收深度的增加, 三种传播方式都有了不同程度的衰减, 但从总体上看, 侧面波随深度的衰减更快一些, 近似呈指数衰减。当传播距离较近时, 浅水区侧面波传输的场强要大于直射波和反射波, 但随着接收深度的增加, 侧面波急剧衰减, 接近 100 米时直射波和反射波传输的信号场强已经超过了侧面波。当几公里以上的远距离传输时, 直射波和反射波已经衰减的很小了, 此时检测到的只有侧面波, 它仍然是按照先前随深度的变化规律衰减。上述现象的原因是近距离传输、深水区接收时, 海水中传输的距离比较大, 海水对电磁波的衰减占据了主要地位, 而侧面波与其他两种方式相比又经历了两次穿越海面的衰减, 因此场强相对小一些^[6]。当浅水区接收时, 大气传播的路径比海水远的多, 而大气衰减比较小, 因此侧面波的场强比较大。此过程也可以理解为辐射到大气中的电磁波相当于一个新的发射源, 它辐射电磁波到海水中, 接收点接收到信号。



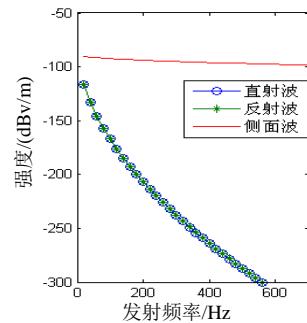
(a) 传播距离为 100 m, $f=100$ Hz 时的场强



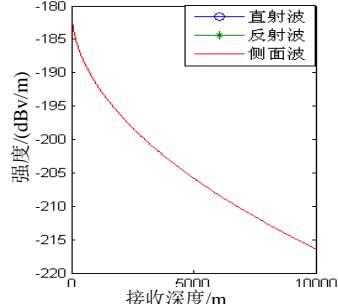
(b) 传播距离为 10 km, $f=100$ Hz 时的场强

图 3 $f=100$ Hz 时场强随着接收深度的变化曲线

从图 4 可以得出, 信号场强随着发射频率的增加而减小。当近距离传输时, 接收点距发射源比较近, 信号场强较大, 侧面波随频率的变化很小, 而直射波和反射波却急剧衰减。当远距离传输、频率达到几十 kHz 的甚低频时, 侧面波也衰减到比较小的数值了。频率越高, 电磁波在海水和空气中的衰减越大。理论上讲, 为了保证远距离深水通信, 频率越低越好, 但频率降低会导致信息传递速率低下等问题, 因此, 合理的选择频率也是影响通信质量的一个关键因素^[7]。



(a) 传播距离为 300 m 时的场强



(b) 传播距离为 10 km 时的场强

图 4 接收深度为 10 m 时场强随着发射频率的变化曲线

2 具有实际意义的水下通信区域划分及传播分析

通过上文理论分析可知，在三种传播路径中侧面波起着主要作用。目前电极对天线可接收到的信号大约为 0.01 nV，其对应的场强为 -220 dBv/m 。根据这一数值，将实际应用中侧面波的传输区域划分为远、中、近三层。远场电场的取值为 $-220 \sim -180 \text{ dBv/m}$ ，通过计算可得其对应的传播范围为 $8 \sim 30 \text{ km}$ ；中场电场的取值为 $-180 \sim -120 \text{ dBv/m}$ ，其对应的传播范围为 $0.9 \sim 8 \text{ km}$ ；近场电场的取值为 $-120 \sim -20 \text{ dBv/m}$ ，其对应的传播范围小于 900 m 。以上的划分方式在实际应用中有较好的指导意义。图 5 是侧面波远近中场的三维图。其中 $f=100 \text{ Hz}$ ，发射深度为 0.5 m ，接收深度为 10 m ，发射电流 70 A ，两电极间距 500 m 。

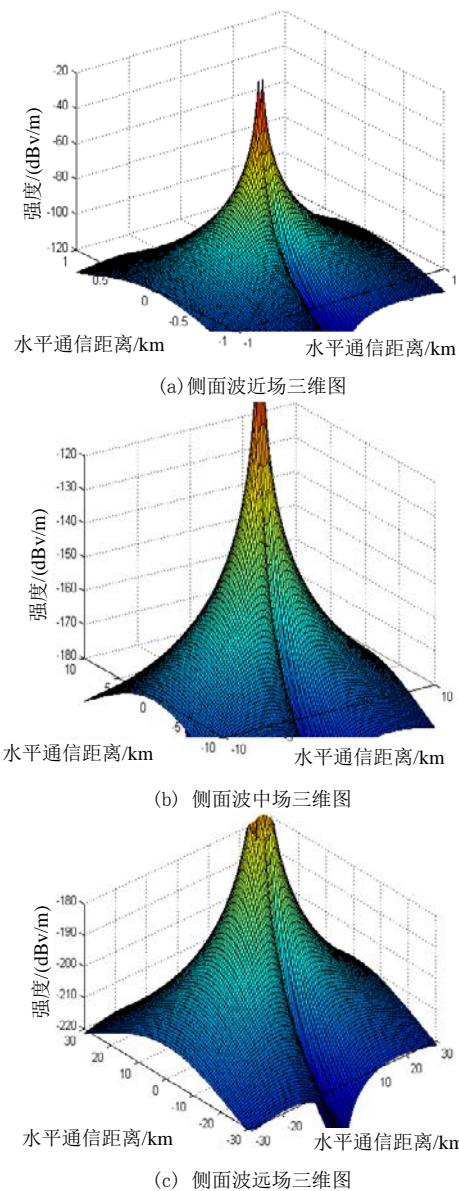


图 5 侧面波近、中、远场的三维曲线

从图 5 中可以看出，在超低频频段，侧面波近场的衰减要快于中场和远场，远场的衰减最慢。根据接收机的灵敏度，理论上可接收到的侧面波最远通信距离大约为 30 km ，考虑到噪声等的影响，实际应用中会更近一些。为了提高侧面波的通信距离，越来越多的改进方式正在被人们研究。比如提高发射功率，增加电极间距，提高接收机的灵敏度，选用好的电极材料等等^[8]，均可以扩大电极对天线的通信距离。

3 结语

分析了水下电极对发射天线发射的电波传播的几种方式：直射波、反射波和侧面波。研究并仿真比较了这几种方式在不同传播距离、工作频率和接收深度时的场强大小，显示出侧面波在远距离水下通信的优越性。最后针对侧面波进行了分析，研究了其近场、中场、远场的场强变化规律。以上研究为后续的实验和应用提供了参考。

参考文献

- [1] 斯公才, 张国强. 侧面波的研究 [J]. 科技通报, 1992, 8 (03) : 140-144.
- [2] 梁高权. 甚低频波和超低频波的辐射与传播 [D]. 武汉: 海军工程大学, 2002.
- [3] 潘威炎. 长波超长波极长波传播 [M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2004.
- [4] 关治. 数值计算方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.
- [5] 陈新华. 矢量阵信号处理技术研究 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004.
- [6] 谭涛, 王永斌. 潜水员水下近距离简易通信系统的设计 [J]. 通信技术, 2009, 42 (08) : 171-173.
- [7] 刘勇, 周新力, 裴瑞杰, 等. 基于抛物方程的海上电波传播研究 [J]. 通信技术, 2012, 45 (01) : 4-6.
- [8] 宋永东, 张建华. 基于 MATLAB 的 2DPSK 低频感应通信系统仿真设计 [J]. 通信技术, 2009, 42 (09) : 26-28.

作者简介:

路洋洋 (1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为数字通信理论术;

王永斌 (1961-), 男, 教授, 硕士, 主要研究方向为无线电通信;

翟琦 (1977-), 男, 讲师, 硕士, 主要研究方向为天线、电磁场。

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>