

平行分层海域中电偶极子源的定位方法研究

杜初阳^{1,2}, 陈 聪¹, 黄高聪²

(1. 海军工程大学基础部, 湖北武汉 430033; 2. 海军92326部队, 广东湛江 524002)

摘 要: 针对平行分层海域中电偶极子源的定位问题, 提出利用三个电场强度传感器同时确定场源位置、场源强度及分界面方位共9个参量的方法. 首先借助镜像法及边界条件推导了三层平行分层海域中电偶极子源在海水中产生电场强度的矩阵表达式, 引入场强传递矩阵, 然后通过传递矩阵求逆的方法消除电偶极子源的偶极矩参数, 得到以电偶极子源位置及分界面方位为未知量的非线性方程组, 将待确定的9个未知参数减少为6个待拟含量, 并通过拟合的方法得到电偶极子源位置和分界面方位的最优解. 最后通过仿真算例检验所提方法的有效性. 结果表明, 该定位方法在一定条件下可以较精确地确定场源位置、分界面方位. 该方法经适当完善还可以应用于鱼雷等水下航行器的制导过程.

关键词: 平行分层海域; 电偶极子; 定位; 镜像法; 传递矩阵

中图分类号: U665 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2021)09-1761-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20200356

Research on Localization Method of Electric Dipole Sources in Parallel Layered Seas

DU Chu-yang^{1,2}, CHEN Cong¹, HUANG Gao-cong²

(1. Department of Basic Courses, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China;

2. The Navy Unit No.92326, Zhanjiang, Guangdong 524002, China)

Abstract: Aiming at the location of electric dipole sources in parallel layered seas, a method of using three electric field intensity sensors to simultaneously determine the field source position, electric dipole moment, and interface orientation is proposed. First, the matrix expressions of electric field strength generated by electric dipole sources in three layers of parallel and layered seas in seawater were derived by using the mirror method and boundary conditions. The field strength transfer matrix was introduced, and the electric dipoles were eliminated by the inversion of the transfer matrix. The parameters of the dipole moments of the sub-sources are used to obtain a set of nonlinear equations in which the position of the electric dipole source and the orientation of the interface are unknown. The 9 unknown parameters to be determined are reduced to 6 quantities to be fitted, and the optimal solution of the electric dipole source position and interface orientation is obtained through the fitting method. Finally, the validity of the proposed method is verified by simulation examples. The results show that the localization method can accurately determine the position of the field source and the orientation of the interface under certain conditions. The method can also be applied to torpedo guidance process after proper improvement.

Key words: parallel layered seas; electric dipole; locating; method of images; transfer matrix

1 引言

舰船或潜艇在海洋环境中航行, 会产生水下电场, 是很重要的目标特性^[1-3]. 在当前舰艇消声及消磁技术取得突破进展的情况下, 利用水下电场来对目标进行搜索、定位、跟踪和打击是值得重视的新思路^[4-6]. 研究表明, 其水下电场场源一般可等效于位于舰艇的螺旋

桨、通海阀、导流罩等处的电偶极子^[7,8]. 因此研究舰艇目标的水下电场定位问题也就是研究平行分层海域中电偶极子源的定位问题. 另外, 研究所得方法也可以供地质勘探^[9]、水下导航、医学检查^[10]等其他相似应用领域参考.

目前海水中电偶极子源的定位思路主要是利用测

点的标量电位或者电场强度来对电偶极子源的位置及偶极矩进行拟合. 如陈聪等人开展了利用标量电位对场源参数进行拟合的研究工作^[11], 但由于采用了复杂的测点阵列, 导致测点数据冗余, 定位算法复杂. 为减少定位算法的复杂程度, 部分学者研究了利用电场强度定位电偶极子源的方法. 如包中华等人研究了两层分层海域中水平直流电偶极子源的定位方法^[12], 吴重庆等人研究了无限大空间中电偶极子源的定位方法^[13], 李涛、卢新城等人研究了三层海域中水平电偶极子的定位方法^[14, 15]等. 但实际应用中, 水下电场场域一般应视为三层平行分层海域, 且实际水下电场场源的等效偶极矩方向也不一定只是水平的或垂直的. 另外, 实际海洋中, 洋流的作用会导致所投放的场强探测器位置不断变动; 还有些应用场景中, 场强探测器本身就是运动的, 例如将探测器安装在鱼雷等水下航行器上以满足制导需求, 这些都导致在实际定位问题中, 探测器的深度和方位参数也是未知的, 因此定位过程中的未知参量数量增加, 定位难度也大大增加.

为满足实际应用场景, 本文在场强探测器的深度和方位未知的情况下, 针对三层平行分层海域中任意电偶极子源的定位问题, 研究利用3个场强传感器测得的电场强度确定电偶极子源的位置、偶极矩及探测器的深度和方位参数共9个未知参量的方法. 其中, 由于场强探测器一般是将多个场强传感器固定在底座平台上, 人为加工过程易于保持场强传感器的测量轴方向的一致性, 因此若以场强探测器为参照系, 则探测器的深度和方位参数等价于探测器距离海水-空气分界面的垂直距离和海水-空气分界面相对于参照系的方位. 为此, 本文首先推导出平行分层海域中电偶极子源的电场强度的矩阵表达式, 然后借助场强矩阵的求逆运算, 减少待定未知量的个数, 再通过拟合的方法得到待定未知量所满足的非线性方程组的最优解. 仿真算例表明该方法的有效性.

2 平行分层海域中电偶极子在海水中产生的电场分布

三层平行分层海域中媒质的电导率和电容率分别为 $\epsilon_i, \sigma_i (i=1, 2, 3)$, 下标 1, 2, 3 分别表示空气、海水和海底, 其中空气电导率 $\sigma_1=0 \text{ S/m}$, 海水的深度为 h . 在海水中以场强探测器为参照系, 为简单起见, 可取一传感器为坐标原点, 以传感器的测量轴方向为坐标轴正方向, 建立直角坐标系如图 1 所示. 电偶极子 p 位于 $r_0=(x_0, y_0, z_0)$ 处, 其电偶极矩为 P , 坐标原点 o 距离海水-空气分界面 S_1 的垂直距离为 d_1 , 海水-空气分界面 S_1 的单位法向向量为 n_1 , 其方向由海水指向空气, 海水-海底分界面 S_2 的单位法向向量为 n_2 , 其方向由海水指向海底, 向量

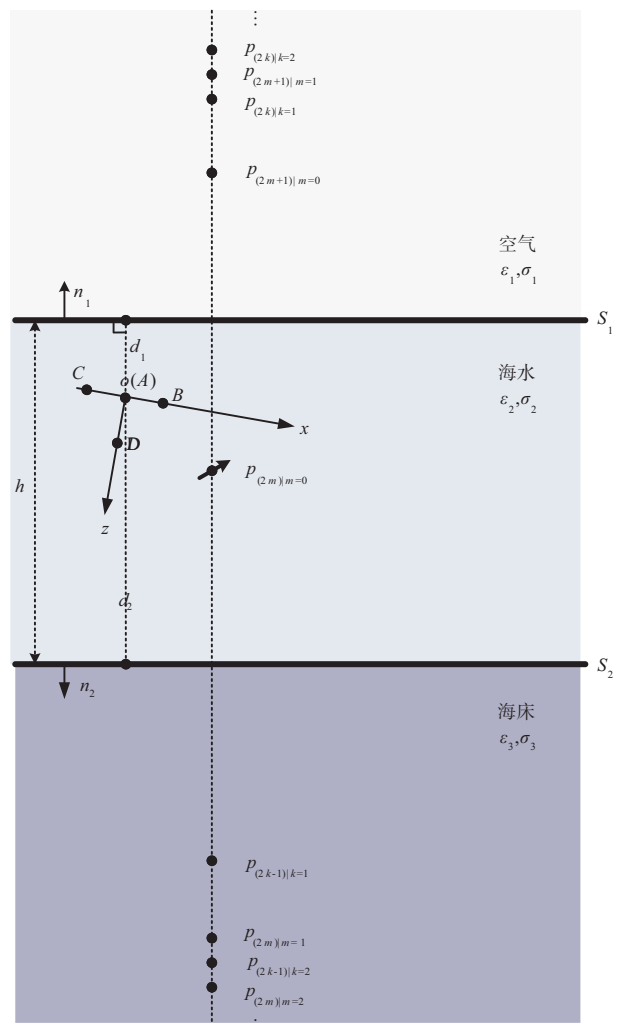


图 1 平行分层海域中镜像电偶极子的相对位置示意图

n_1 与 z 轴正方向成 β 角, 其在 $x-o-y$ 平面的投影与 x 轴正方向成 α 角.

由以上参数设置可知, 坐标原点 o 距离海水-海底分界面 S_2 的距离为 $d_2=h-d_1$, 且 $n_1=(\sin\beta \cos\alpha, \sin\beta \sin\alpha, \cos\beta)$, $n_2=-(\sin\beta \cos\alpha, \sin\beta \sin\alpha, \cos\beta)$. 文献[16]根据镜像法提出, 三层平行分层海域模型中, 位于海水中的直流电偶极子源在海水中场点处产生的电场等效为无限大海水区域中电偶极子源及其在两个分界面之间形成的镜像电偶极子在场点处产生的电场的叠加.

下文首先根据镜像法推导镜像电偶极子的位置矢量并用矩阵的形式表示, 然后利用静电场的边界条件推导镜像电偶极子的电偶极矩并用矩阵的形式表示, 最后求出电偶极子源及各个镜像电偶极子在场点的电场强度, 从而得到三层平行分层海水中电偶极子源在海水中电场强度的矩阵表达式.

2.1 镜像电偶极子的位置矢量的矩阵表示

将海水中的电偶极子源 p 及其在“海水-空气”分界

面 S_1 和“海水-海床”分界面 S_2 之间来回镜像形成的镜像电偶极子分组表示为 $p_{(2m)} \setminus p_{(2m+1)}$ 和 $p_{(2k-1)} \setminus p_{(2k)}$ 等, 相对位置如图 1 所示, 其中整数 $m=0, 1, 2, \dots, k=1, 2, 3, \dots$.

其中 $p_{(2m)l=0}$ 表示电偶极子源 p , $p_{(2m+1)l=0}$ 表示电偶极子源 p 关于分界面 S_1 的一次镜像电偶极子, 后续 $p_{(2m)} \setminus p_{(2m+1)}$ 表示一次镜像电偶极子 $p_{(2m+1)l=0}$ 在分界面 S_2 和分界面 S_1 之间来回镜像形成的镜像电偶极子. 同理 $p_{(2k-1)lk=1}$ 表示电偶极子源 p 关于分界面 S_2 的一次镜像电偶极子, 后续 $p_{(2k)} \setminus p_{(2k-1)}$ 表示一次镜像电偶极子 $p_{(2k-1)lk=1}$ 在分界面 S_1 和分界面 S_2 之间来回镜像形成的镜像电偶极子. 电偶极子组 $p_{(2m)} \setminus p_{(2m+1)} \setminus p_{(2k-1)} \setminus p_{(2k)}$ 的电偶极矩分别记为 $P_{(2m)} \setminus P_{(2m+1)} \setminus P_{(2k-1)} \setminus P_{(2k)}$.

设分界面 S_1 对应的镜像变换矩阵为 Q_1 , 则 $Q_1 = I - 2n_1 n_1$ (矩阵 I 为 3 阶单位矩阵), 同理分界面 S_2 对应的镜像变换矩阵为 $Q_2 = I - 2n_2 n_2 = Q_1$. 根据镜像法原理, 结合图 1 中的位置矢量关系可得镜像电偶极子的位置矢量分别为

$$\begin{cases} \overline{op_{(2m)}} = \overline{op} Q_1^{2m} + 2d_1 n_1 \left(\sum_{i=1}^m Q_1^{2i-1} \right) + 2d_2 n_2 \left(\sum_{i=1}^m Q_1^{2i-2} \right) \\ \overline{op_{(2m+1)}} = \overline{op} Q_1^{2m+1} + 2d_1 n_1 \left(\sum_{i=1}^{m+1} Q_1^{2i-2} \right) + 2d_2 n_2 \left(\sum_{i=1}^m Q_1^{2i-1} \right) \\ \overline{op_{(2k-1)}} = \overline{op} Q_1^{2k-1} + 2d_2 n_2 \left(\sum_{i=1}^k Q_1^{2i-2} \right) + 2d_1 n_1 \left(\sum_{i=1}^{k-1} Q_1^{2i-1} \right) \\ \overline{op_{(2k)}} = \overline{op} Q_1^{2k} + 2d_2 n_2 \left(\sum_{i=1}^k Q_1^{2i-1} \right) + 2d_1 n_1 \left(\sum_{i=1}^k Q_1^{2i-2} \right) \end{cases} \quad (1)$$

其中整数 $m=0, 1, 2, \dots, k=1, 2, 3, \dots, i=1, 2, 3, \dots$. 矩阵 Q_1^{2m} 表示 $2m$ 个镜像变换矩阵 Q_1 相乘.

2.2 镜像电偶极子的电偶极矩的矩阵表示

2.2.1 仅存在海水和空气的分界面 S_1

如图 2 所示, 若场点 M 位于海水中时, 由镜像法可知镜像电偶极子 p'_{S_1} 位于空气中与 p 对称的位置; 若场点 M 位于空气, 则镜像电偶极子 p''_{S_1} 位于海水中与 p 相同的位置.

结合稳恒电场的两个边界条件^[17], 即分界面上电位连续及传导电流密度法向分量连续, 可得到镜像电偶极子 p'_{S_1} 和 p''_{S_1} 的电偶极矩分别为:

$$\begin{cases} P'_{S_1} = \eta_1 P Q_1 = P Q_1 \\ P''_{S_1} = \frac{\epsilon_1}{\sigma_2} (P + P Q_1) \end{cases} \quad (2)$$

此处 $\eta_1 = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_2 + \sigma_1} = 1$, 矩阵 Q_1 的定义同前, 下标 S_1

表示关于分界面 S_1 的镜像电偶极子.

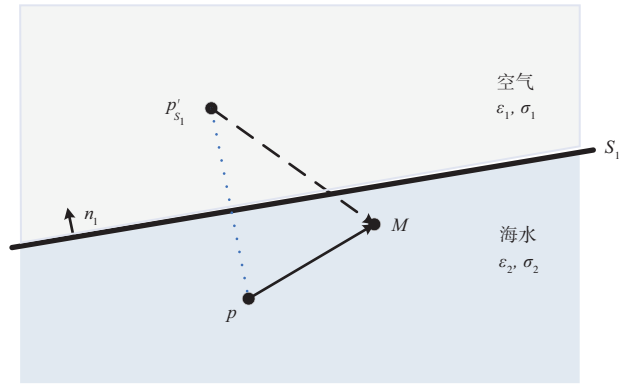


图 2 场点位于海水中时电偶极子与像的位置关系

2.2.2 仅存在海水和海床的分界面 S_2

若场点 M 位于海水中时, 由镜像法可知镜像电偶极子 p'_{S_2} 位于海床中与 p 对称的位置; 若场点 M 位于海床, 则镜像电偶极子 p''_{S_2} 位于海水中与 p 相同的位置. 经同样分析得

$$\begin{cases} P'_{S_2} = \eta_2 P Q_2 \\ P''_{S_2} = -\eta_2 P \end{cases} \quad (3)$$

此处 $\eta_2 = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_2 + \sigma_3}$, 矩阵 Q_2 定义同前, 下标 S_2 表示关于分界面 S_2 的镜像电偶极子.

2.2.3 同时存在两个平行分界面

由式(2)、(3)结合图 1 可得平行分层海域中的电偶极子源 p 在分界面 S_1 和分界面 S_2 之间不断“镜像”形成的镜像电偶极子的电偶极矩分别为

$$\begin{cases} P_{(2m)} = \eta_1^m \eta_2^m P Q_1^m Q_2^m = \eta_2^m P Q_1^{2m} \\ P_{(2m+1)} = \eta_1^{m+1} \eta_2^m P Q_1^{m+1} Q_2^m = \eta_2^m P Q_1^{2m+1} \\ P_{(2k-1)} = \eta_1^{k-1} \eta_2^k P Q_1^{k-1} Q_2^k = \eta_2^k P Q_1^{2k-1} \\ P_{(2k)} = \eta_1^k \eta_2^k P Q_1^k Q_2^k = \eta_2^k P Q_1^{2k} \end{cases} \quad (4)$$

其中常数 η_1, η_2 同前.

2.3 海水中电场强度分布的矩阵表示

根据以上分析, 电偶极子组 $p_{(2m)} \setminus p_{(2m+1)} \setminus p_{(2k-1)} \setminus p_{(2k)}$ 表示了电偶极子源和全部的镜像偶极子, 所以如图 1 所示的海域中电偶极子源 p 在海水中场点 M 处产生的电场强度等于全空间为海水时电偶极子 $p_{(2m)} \setminus p_{(2m+1)} \setminus p_{(2k-1)} \setminus p_{(2k)}$ 在场点产生的电场强度之和.

又根据文献[12], 无限大海域中电偶极子源 p 在场点 M 处产生的电场强度可用场强传递矩阵 T 表示, 即 $E = PT$, 其中传递矩阵 $T = \frac{1}{4\pi\sigma_2 R^3} (3RR - R^2 I)$, 相对位置矢量 R 表示场点 M 相对于电偶极子源 p 的位置矢量, R 为 R 的模.

因此全空间为海水时电偶极子组 $p_{(2m)} \setminus p_{(2m+1)} \setminus$

$p_{(2k-1)}$ 、 $p_{(2k)}$ 在海水中场点 M 处的场强传递矩阵 $T_{(2m)}^M$ 、 $T_{(2m+1)}^M$ 、 $T_{(2k-1)}^M$ 、 $T_{(2k)}^M$ 可表示为

$$\left\{ \begin{aligned} T_{(2m)}^M &= \frac{\left(3R_{(2m)}R_{(2m)} - \left(R_{(2m)}\right)^2 I\right)}{4\pi\sigma_2\left(R_{(2m)}\right)^5} \\ T_{(2m+1)}^M &= \frac{\left(3R_{(2m+1)}R_{(2m+1)} - \left(R_{(2m+1)}\right)^2 I\right)}{4\pi\sigma_2\left(R_{(2m+1)}\right)^5} \\ T_{(2k-1)}^M &= \frac{\left(3R_{(2k-1)}R_{(2k-1)} - \left(R_{(2k-1)}\right)^2 I\right)}{4\pi\sigma_2\left(R_{(2k-1)}\right)^5} \\ T_{(2k)}^M &= \frac{\left(3R_{(2k)}R_{(2k)} - \left(R_{(2k)}\right)^2 I\right)}{4\pi\sigma_2\left(R_{(2k)}\right)^5} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

其中 $R_{(2m)}$ 、 $R_{(2m+1)}$ 、 $R_{(2k-1)}$ 、 $R_{(2k)}$ 分别表示场点 M 相对于电偶极子组 $p_{(2m)}$ 、 $p_{(2m+1)}$ 、 $p_{(2k-1)}$ 、 $p_{(2k)}$ 的位置矢量,表达式为

$$\left\{ \begin{aligned} R_{(2m)} &= \overrightarrow{oM} - \overrightarrow{op_{(2m)}} \\ R_{(2m+1)} &= \overrightarrow{oM} - \overrightarrow{op_{(2m+1)}} \\ R_{(2k-1)} &= \overrightarrow{oM} - \overrightarrow{op_{(2k-1)}} \\ R_{(2k)} &= \overrightarrow{oM} - \overrightarrow{op_{(2k)}} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

进而可得电偶极子源在场点 M 处产生的场强为

$$E_M = P \left(\sum_{m=0}^{\infty} \left(\eta_2^m Q_1^{2m} T_{(2m)}^M + \eta_2^m Q_1^{2m+1} T_{(2m+1)}^M \right) + \sum_{k=1}^{\infty} \left(\eta_2^k Q_1^{2k-1} T_{(2k-1)}^M + \eta_2^k Q_1^{2k} T_{(2k)}^M \right) \right) \quad (7)$$

同样可将 M 处的电场强度表示为 $E_M = PT_M^{\text{up}}$. 显然,矩阵 T_M^{up} 为三层平行分层海域中电偶极子源在海水中场点 M 处的电场强度传递矩阵.

3 电偶极子源的定位方法

设在如图 1 所示的坐标系中(以场强传感器 A 所在的点为坐标原点,以场强传感器的测量轴为坐标轴的正方向建立直角坐标系),场强传感器 A 、 B 、 C 的坐标分别为 $(0, 0, 0)$ 、 (x_b, y_b, z_b) 、 (x_c, y_c, z_c) ,传感器测量的电场强度分别为 E_A 、 E_B 、 E_C . 本文所要解决的定位问题即求解电偶极子源 p 的坐标 (x_0, y_0, z_0) 及其偶极矩 P 、坐标原点 o 距离“海水-空气”分界面 S_1 的垂直距离 d_1 、向量 n_1 与 z 轴正方向的夹角 β 、向量 n_1 在 x - o - y 平面的投影与 z 轴正方向的夹角 α ,共 9 个未知参量.

由已知条件及式(6)可得场强传感器 A 、 B 、 C 相对于电偶极子组 $p_{(2m)}$ 、 $p_{(2m+1)}$ 、 $p_{(2k-1)}$ 、 $p_{(2k)}$ 的位置矢量为 $R_{(2m)}^A$ 、 $R_{(2m)}^B$ 、 $R_{(2m)}^C$ 、 $R_{(2m+1)}^A$ 、 $R_{(2m+1)}^B$ 、 $R_{(2m+1)}^C$ 、 $R_{(2k-1)}^A$ 、 $R_{(2k-1)}^B$ 、 $R_{(2k-1)}^C$

$R_{(2k-1)}^C$ 、 $R_{(2k)}^A$ 、 $R_{(2k)}^B$ 、 $R_{(2k)}^C$,根据(5)式和(7)式可写出

$$\begin{cases} E_A = PT_A^{\text{up}} \\ E_B = PT_B^{\text{up}} \\ E_C = PT_C^{\text{up}} \end{cases} \quad (8)$$

其中平行分层海域中电偶极子源对传感器 A 、 B 、 C 的传递矩阵分别为

$$\begin{aligned} T_A^{\text{up}} &= \sum_{m=0}^{\infty} \left(\eta_2^m Q_1^{2m} T_{(2m)}^A + \eta_2^m Q_1^{2m+1} T_{(2m+1)}^A \right) \\ &\quad + \sum_{k=1}^{\infty} \left(\eta_2^k Q_1^{2k-1} T_{(2k-1)}^A + \eta_2^k Q_1^{2k} T_{(2k)}^A \right) \\ T_B^{\text{up}} &= \sum_{m=0}^{\infty} \left(\eta_2^m Q_1^{2m} T_{(2m)}^B + \eta_2^m Q_1^{2m+1} T_{(2m+1)}^B \right) \\ &\quad + \sum_{k=1}^{\infty} \left(\eta_2^k Q_1^{2k-1} T_{(2k-1)}^B + \eta_2^k Q_1^{2k} T_{(2k)}^B \right) \\ T_C^{\text{up}} &= \sum_{m=0}^{\infty} \left(\eta_2^m Q_1^{2m} T_{(2m)}^C + \eta_2^m Q_1^{2m+1} T_{(2m+1)}^C \right) \\ &\quad + \sum_{k=1}^{\infty} \left(\eta_2^k Q_1^{2k-1} T_{(2k-1)}^C + \eta_2^k Q_1^{2k} T_{(2k)}^C \right) \end{aligned}$$

传递矩阵 $T_{(2m)}^A$ 、 $T_{(2m)}^B$ 、 $T_{(2m)}^C$ 、 $T_{(2m+1)}^A$ 、 $T_{(2m+1)}^B$ 、 $T_{(2m+1)}^C$ 、 $T_{(2k-1)}^A$ 、 $T_{(2k-1)}^B$ 、 $T_{(2k-1)}^C$ 、 $T_{(2k)}^A$ 、 $T_{(2k)}^B$ 、 $T_{(2k)}^C$ 分别表示全空间为海水时电偶极子组 $p_{(2m)}$ 、 $p_{(2m+1)}$ 、 $p_{(2k-1)}$ 、 $p_{(2k)}$ 在传感器 A 、 B 、 C 的场强传递矩阵. 理论上将电场强度 E_A 、 E_B 、 E_C 带入方程组式(8)可以直接解出 9 个未知量. 但由于场强传感器 A 、 B 、 C 的测量值 E_A 、 E_B 、 E_C 含有一定的噪声,直接将测量值带入方程组式(8)求解可能导致方程组矛盾. 因此可以对方程组式(8)中含有的 9 个待定量进行拟合,从而得到方程组式(8)的最优解. 但是在实际数值计算时,同时对 9 个未知量拟合,计算量大,且结果并不准确,因此有必要通过一定的方式减少待拟合的未知量的数量.

由文献[5]可知,传递矩阵 $T_{(2m)}^A$ 、 $T_{(2m)}^B$ 、 $T_{(2m)}^C$ 、 $T_{(2m+1)}^A$ 、 $T_{(2m+1)}^B$ 、 $T_{(2m+1)}^C$ 、 $T_{(2k-1)}^A$ 、 $T_{(2k-1)}^B$ 、 $T_{(2k-1)}^C$ 、 $T_{(2k)}^A$ 、 $T_{(2k)}^B$ 、 $T_{(2k)}^C$ 可逆,同样分析可得,平行分层海域中传递矩阵 T_A^{up} 、 T_B^{up} 、 T_C^{up} 也可逆,即有

$$\begin{cases} P = E_A \left(T_A^{\text{up}} \right)^{-1} \\ P = E_B \left(T_B^{\text{up}} \right)^{-1} \\ P = E_C \left(T_C^{\text{up}} \right)^{-1} \end{cases} \quad (9)$$

进而可得:

$$\begin{cases} E_A \left(T_A^{\text{up}} \right)^{-1} = E_B \left(T_B^{\text{up}} \right)^{-1} \\ E_A \left(T_A^{\text{up}} \right)^{-1} = E_C \left(T_C^{\text{up}} \right)^{-1} \end{cases} \quad (10)$$

方程组式(10)中仅含有 6 个未知量. 将测得的电场强度 E_A 、 E_B 、 E_C 带入方程组式(10),再求其最小二乘解即为电偶极子源 p 坐标 (x_0, y_0, z_0) 和参数 d_1 及方位参

数 α, β 的最优解. 然后再将电偶极子源坐标和参数 d_1 及方位参数 α, β 的值带入式(9), 即可解得电偶极子源 p 的电偶极矩 P .

4 仿真算例

根据第3节中的定位方法, 在图1的坐标系中设电场强度传感器 A, B, C 分别位于 $(0, 0, 0, 0, 0)$ m、 $(2, 0, 1, 0, -1, 0)$ m、 $(1, 0, -1, 5, 3, 0)$ m处, 海水深度 $h=100, 0$ m, 海水电导率 $\sigma_2=4, 0$ S/m, 海床电导率 $\sigma_3=0, 4$ S/m.

假设电偶极子源 p 位于海水中, 其坐标 $(x_0, y_0, z_0) = (5, 0, 11, 0, 24, 0)$ m, 强度为 $P=(4, 0, 1, 5, 0, 8)$ Am, 传感器 A 距离海水-空气分界面 S_1 的垂直距离 $d_1=10, 0$ m、向量 n_1 与 z 轴正方向的夹角 $\beta=\pi/3$ 、向量 n_1 在 x - o - y 平面的投影与 x 轴正方向的夹角 $\alpha=\pi/4$. 根据第二节中的场强式(7)可计算得到该电偶极子源在 A, B, C 处的电场强度, 本文在仿真算例中, 将用这种方式得到的电场强度计算值加上一定量的白噪声后作为测量值.

结合本文2中所述定位方法, 可采用如图3所示流程图来完成具体的定位流程.

假设场强传感器的测量精度为 λ , 仿真计算时所加

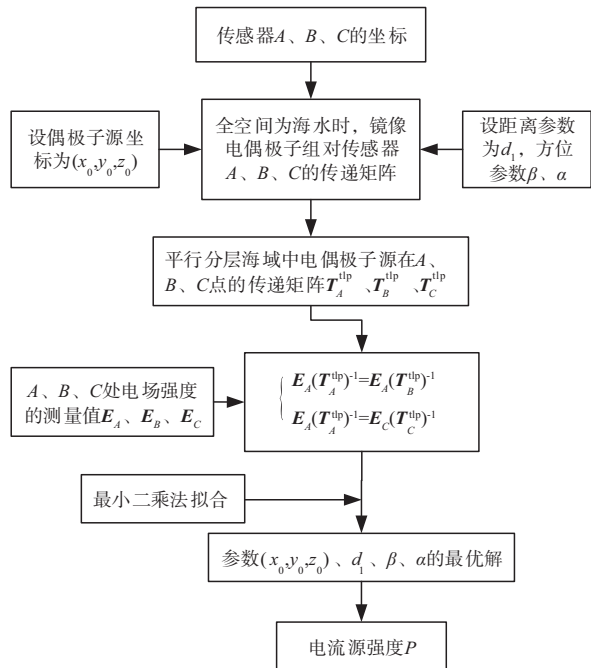


图3 平行分层海域中电偶极子源定位的流程图

高斯白噪声幅度采用测量精度 λ 与标准正态分布 $N(0, 1)$ 的积描述. 以传感器 A 处的电场强度的测量值 E_A 为例, 设计算值为 E_{A0} , 所加噪声强度为 E_n , 即 $E_A = E_{A0} + E_n$, 其中 E_n 的三个分量 E_{nx}, E_{ny}, E_{nz} 是服从 $\lambda * N(0, 1)$ 分布的随机数.

为了准确的表达定位方法的精度, 本文采用定位位置与场源实际位置的绝对距离来描述定位误差, 绝对距离越小, 定位精度越高; 距离参数 d_1 、方位参数 α, β 采用相对误差描述定位精度.

分别在场强探测器的测量精度 λ 为 10^{-8} V/m 和 10^{-9} V/m 条件下, 利用前述方法重复定位 50 次, 将计算的位置参数、距离参数和方位参数的平均值作为定位结果. 所得电偶极子源位置的定位值如图4所示, 且可计算电偶极子源坐标的平均定位值 $(\bar{x}_0, \bar{y}_0, \bar{z}_0)$ 与实际值的距离 $\bar{\delta}$ 、电偶极矩平均定位值 \bar{P} 与实际值 P 的相对误差 $(\bar{\delta}P / P)$ 及分界面参数 α, β, d_1 的平均定位值的相对误差 $\bar{\delta}\alpha/\alpha, \bar{\delta}\beta/\beta, \bar{\delta}d_1/d_1$, 见表1.

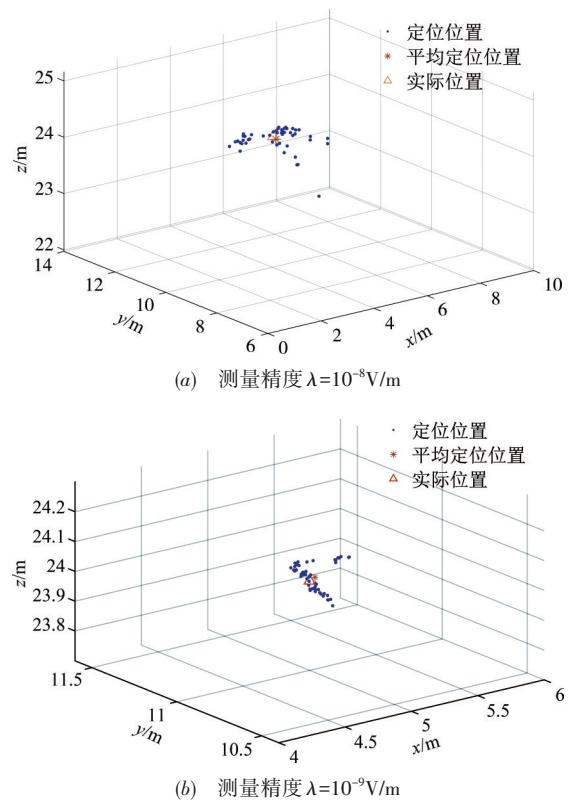


图4 不同测量精度时电偶极子源的定位结果

表1 平行分层海域中电偶极子源的定位结果

$\lambda/(V/m)$	$(\bar{x}_0, \bar{y}_0, \bar{z}_0) / m$	$(\bar{\alpha}; \bar{\beta}) / m$	\bar{d}_1 / m	\bar{P} / Am	$\bar{\delta} / m$	$\bar{\delta}\alpha/\alpha; \bar{\delta}\beta/\beta$	$\bar{\delta}d_1/d_1$	$\bar{\delta}P / P$
10^{-8}	(4.42, 10.29, 24.15)	(0.79; 1.01)	10.24	(3.88, 1.39, 1.03)	0.93	0.1%; 3.8%	2.4%	(3.0%, 26.0%, 28.8%)
10^{-9}	(5.06, 11.00, 23.99)	(0.78; 1.05)	10.00	(3.99, 1.48, 0.79)	0.06	1.3%; 0.1%	0.1%	(0.3%, 1.3%, 1.3%)

由图4和表1的数据可知,在仿真算例设定的条件下,当场强探测器所测量精度高于 10^{-9} V/m,采用本文方法所得场源坐标定位值与实际值的平均偏差在0.06m附近,场源偶极矩与实际值平均相对偏差为1.3%(取偶极矩三分量中相对偏差的最大值),探测器距离分界面 S_1 的垂直距离与实际值平均相对偏差小于0.1%,方位参数 α, β 与实际值平均相对偏差小于1.3%。这说明在一定测量精度条件下,利用本文所述方法来对平行分层海域中电偶极子源进行定位的方法是可行的。

5 结论

在场强探测器的深度和方位未知的情况下,针对三层平行分层海域中任意电偶极子源的定位问题,本文提出了一种基于测点场强实现对电偶极子源定位的方法。该方法与以往海水中电偶极子源定位方法相比,主要有以下特点:

(1)基于传递矩阵实现定位。本文利用镜像法推导了三层平行分层海域中电偶极子在海水中电场强度的矩阵表达式,该表达式形式简洁、适用性更广,可以求解任意方向电偶极子在海水中的电场强度。

(2)可以仅利用少量测量值同时确定电偶极子源位置、电偶极矩及分界面方位共9个参数。利用两个测点的电场强度通过传递矩阵求逆得到电偶极子源的偶极矩相等的方法,消除了电偶极子源的偶极矩参数,使待定参数减少为电偶极子源位置、分界面方位共6个参数。算法简洁,计算量小,便于实际应用。

(3)以探测器为参照物建立坐标系进行分析和表达定位结果,大大方便了探测器位置不断变动时的定位过程的实现,如在鱼雷等水下航行器的被动制导或其他应用过程中,有望获得应用。

参考文献

- [1] Holt R. Detection and measurement of electric fields in the marine environment[A]. Proceedings of the Underwater Defence Technology [C]. London, UK: Underwater Defence Technology, 1996. 96 – 101.
- [2] 王向军, 张建春, 徐庆林. 层流介质中曲面螺旋桨旋转对腐蚀静电场的影响[J]. 电子学报, 2019, 47(11): 2330 – 2336.
Wang X J, Zhang J C, Xu Q L. The influence of rotating curved surface propeller on the corrosion electrostatic field in laminar medium[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(11): 2330 – 2336.(in Chinese)
- [3] Luan D Y. A new ship's underwater electric field measure method[A]. 2010 2nd International Conference on Industrial and Information Systems[C]. Dalian, China: IEEE, 2010. 365 – 368.
- [4] Wang X J, Liu D H, Zhu W B, et al. Underwater target detection based on electric-field sensor line array[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 713/714/715: 337 – 342.
- [5] Snyder J, Silverman Y, Bai Y, et al. Underwater object tracking using electrical impedance tomography[A]. 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems[C]. Vilamoura-algarve, Portugal: IEEE, 2012. 520 – 525.
- [6] 张华, 王向军, 单潮龙, 等. 基于目标静电场的水中兵器制导方法研究[J]. 电子学报, 2013, 41(3): 470 – 474.
Zhang H, Wang X J, Shan C L, et al. Research of guidance method based on the electrostatic field of target for underwater weapon[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(3): 470 – 474.(in Chinese)
- [7] Hirota M, Teranishi Y, Nanaura K. Study on underwater electric fields of a dipole moment in shallow water[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1996, 35(5): 2870 – 2878.
- [8] 姜润翔, 张伽伟, 林春生. 基于点电荷模型的腐蚀相关静电场快速预测方法研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(4): 735 – 743.
Jiang R X, Zhang J W, Lin C S. Study of quick prediction method for ship corrosion related static electric field based on point charge source model[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(4): 735 – 743.(in Chinese)
- [9] 李建飞, 王文涛, 景建恩. 层状地电模型中有限长导线源电磁场的正演计算[J]. 勘察科学技术, 2016, (6):35 – 39.
Li J F, Wan W T, Jing J E. Forward calculation of electromagnetic field with finite length electric wires source in layered model[J]. Site Investigation Science and Technology, 2016, (6):35 – 39. (in Chinese)
- [10] 肖春燕, 雷银照. 分层球形导体中任意位置直流电流元产生电位的解析解[J]. 物理学报, 2005, 54(4): 1950 – 1957.
Xiao C Y, Lei Y Z. Analytical solution of electric potential produced by a direct current point source located in a multilayered spherical volume conductor[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(4): 1950 – 1957.(in Chinese)
- [11] 陈聪, 李定国, 龚沈光. 基于拉氏方程的舰船静态电场深度换算[J]. 电子学报, 2010, 38(9): 2025 – 2029.
Chen C, Li D G, Gong S G. Research on the extrapolation of the static electric field of ships based on Laplace equation[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(9): 2025 – 2029.(in Chinese)
- [12] 包中华, 龚沈光, 孙剑英, 等. 使用双矢量传感器定位深

海中水平直流电偶极子源[J]. 海军工程大学学报, 2011, 23(3): 53 – 57.

Bao Z H, Gong S G, Sun J Y, et al. Localization of a horizontal electric dipole source embedded in deep sea by using two vector-sensors[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2011, 23(3): 53 – 57.(in Chinese)

- [13] 吴重庆, 赵爽. 电偶极子源定位问题的研究[J]. 物理学报, 2007, 56(9): 5180 – 5184.

Wu C Q, Zhao S. Study on the localization of the electric dipole sources[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(9): 5180 – 5184.(in Chinese)

- [14] 李涛, 王向军, 嵇斗. 浅海中时谐水平电偶极子定位研究[J]. 舰船电子工程, 2015, 35(5): 142 – 146.

Li T, Wang X J, Ji D. Time-harmonic horizontal dipole in coastal[J]. Ship Electronic Engineering, 2015, 35(5): 142 – 146.(in Chinese)

- [15] 卢新城, 龚沈光, 周骏, 等. 海水中时谐水平电偶极子的准近场定位[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2005, 29(3): 331 – 334.

Lu X C, Gong S G, Zhou J, et al. Quasi-near field localization of a time-harmonic HED in sea water[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2005, 29(3): 331 – 334.(in Chinese)

- [16] 陈聪, 李定国, 蒋治国, 等. 二次等效法求三层媒质中静态

电偶极子的场分布[J]. 物理学报, 2012, 61(24): 244101.

Chen C, Li D G, Jiang Z G, et al. Electric field of a static electric dipole in three-layer medium model using secondary equivalent method[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(24): 244101.(in Chinese)

- [17] David K. Cheng. Field and Wave Electromagnetics [M]. Second Edition. 北京:清华大学出版社,2018. 11 – 144.

作者简介



杜初阳 男,1990年9月出生于湖北省随州市,现为海军工程大学在读硕士,主要研究方向为水下目标特性.

E-mail:945392800@qq.com.



陈聪 女,1971年4月出生于湖北省武汉市,现为海军工程大学教授、博士,主要研究方向为水下目标特性.

E-mail:cckx7145@163.com.