

基于移动节点的三维水下传感器网络定位^①

王美玲, 宋安军

(上海海事大学 信息工程学院, 上海 201306)

摘要: 为有效解决传感器节点在水中的移动性问题, 而节点移动主要是因为水流和随机干扰, 提出了一种基于移动节点的定位算法——MNLS(移动节点定位算法)。移动节点定位算法是在分析现有相关定位算法的基础之上, 提出了首先预测节点的运动轨迹, 然后进行节点的测距与定位的算法思路。利用 MATLAB 对算法进行了仿真, 实验结果表明 MNLS 与 Chan 算法相比较, 单个节点的定位精度以及不同速度下节点的定位精度都得到了提高。因此, 该算法对水下传感器网络定位有着实际的应用价值。

关键词: 水下传感器网络; 移动节点; 三维定位

3D Localization Based on Mobile Nodes for Underwater Sensor Network

WANG Mei-Ling, SONG An-Jun

(College of Information Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to effectively solve the sensors nodes mobility difficult problem in the water, the paper presents a localization algorithm based on mobile nodes—MNLS(mobile nodes localization algorithm). The main reasons of nodes mobility are the waterflow and random noise. The algorithm is on the basis of the analysis of the existing relevant localization algorithms, we present the idea which firstly forecasts nodes' trajectory, then calculates the nodes' distances and coordinates. The algorithm is simulated by MATLAB, and the results show that compared MNLS with Chan algorithm. The single node's positioning accuracy and different speed nodes' precision are all improved. So it has an application value for the underwater sensor network localization.

Key words: underwater sensor networks; mobile nodes; three-dimensional localization

1 引言

近几年来, 水下传感器网络的研究受到国内外高度重视, 且应用于军事与民用方面, 如反潜艇入侵检测、水下协同作战系统、水下环境监测、海洋地震海啸灾难等方面^[1]。其中, 对于大多数的应用中, 定位是必需环节之一。换言之, 定位是水下传感器网络的基础。然而, 由于水下环境的特殊性, 对传感器网络中节点定位也就提出了更高的要求^[2]。(1)水声的速度易受到水温、盐度、水压等因素的影响, 造成声速测距产生误差;(2)水声信道具有低带宽、高延迟、高错误率等特点, 严重限制了大数据量定位信息的传输;(3)水下节点具有移动性, 与陆上节点的定位相比, 增加了定位的难度。从而, 这些因素为水下传感器网络节

点定位带来巨大的挑战。

目前, 水下传感器网络定位算法的研究是相对较少。根据节点是否具有移动性, 分为静态定位算法、动态定位算法以及混合定位算法^[3]。其中, 静态定位算法中都是静止的节点, 如 ALS 算法^[4], UPS 算法^[5,6]等; 动态定位算法中都是移动的节点, 如 3DUT 算法^[7], SLMP 算法^[8]等; 在混合定位算法中既有静止的节点也有移动的节点, 如 SLUM 算法^[9], UDB 算法^[10]等。

实际上, 由于水下环境和水下设备的限制, 陆上节点的定位算法不能直接应用于水下。不断的对算法进行改进, 出现了许多不同的算法。其中文献[3]提出了 Mobil 算法, 该算法是对 SLMP 算法[]的改进, 计算量相对较大, 耗能较多。文献[11]提出的 AFLA 算法,

^① 收稿时间:2014-02-19;收到修改稿时间:2014-03-14

没有考虑海流的作用所引起的节点的移动. 文献[12]在时间同步的基础之上, 提出了一种循环三角定位算法, 仅适用于二维环境之下的水下定位. 文献[13]提出一种基于均值漂移和联合粒子滤波的移动节点定位算法, 是一种实时的定位算法. 文献[14]提出了一种基于 AUV 辅助的移动定位算法, AUV 需要的花费成本大. 因此, 在这些算法的基础之上, 本文提出了一种基于移动节点的定位算法 MNLS, 该算法首先预测节点的运动轨迹, 然后进行节点的测距与定位, 并且 MNLS 算法与 Chan 算法相比, 减少了定位误差, 提高了定位精度.

2 算法的设计

实际上, 在水流等因素的作用下, 节点不可能是静止不动的. 虽然假设节点是静止, 可以大略估计其位置, 但为了提高节点定位的精确度以及更加符合实际的节点的状态, 提出了 MNLS 算法. MNLS 算法包含两个阶段: 第一阶段为节点运动的预测; 第二阶段为测距与定位.

节点运动模型是在考虑海流以及随机干扰的情况下所建立的, 运用到了牛顿第二定律. 声波的传播速度由于受海水温度, 盐度, 压强等因素的影响, 速度是不断在变化的, 从而影响了测距的精确度, 在此算法中为了提高精度, 采用了一个充分考虑了海水温度, 盐度, 压强的影响的计算公式. 随机干扰主要是指环境噪声干扰, 而噪声干扰一般服从高斯分布, 所以假设随机干扰服从高斯分布.

2.1 节点的移动模型

MNLS 算法考虑了在海流动力场以及随机干扰的共同作用下, 节点的移动情况. 在运动模型中, 对于水下传感器网络节点的任一物理量, 都可以采用拉格朗日法^[15]来描述:

$$\dot{\mathbf{f}} = \mathbf{f}(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t) \quad (1)$$

其中, \mathbf{f} 为网络节点的某一物理量, (1)式表示初速度为 $(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0})$ 的传感器节点在 t 时刻的物理量的值或表达式.

在运动模型中, 所需的网络参数: 节点的质量表示为 m , 在 $t = t_0$ 时刻, 初始速度表示为 $\mathbf{v} = \mathbf{v}(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t)$ 或表示为

$$\begin{cases} v_x = v_x(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t) \\ v_y = v_y(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t) \\ v_z = v_z(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t) \end{cases} \quad (2)$$

海流动力场表示为 $\mathbf{F} = \mathbf{F}(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t)$ 或表示为

$$\begin{cases} F_x = F_x(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t) \\ F_y = F_y(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t) \\ F_z = F_z(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t) \end{cases} \quad (3)$$

加速度表示为 $\mathbf{a} = \mathbf{a}(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t)$ 或表示为

$$\begin{cases} a_x = a_x(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t) \\ a_y = a_y(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t) \\ a_z = a_z(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t) \end{cases} \quad (4)$$

随机扰动表示为 $\mathbf{U} = \mathbf{U}(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t)$ 或表示为

$$\begin{cases} U_x = U_x(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t) \\ U_y = U_y(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t) \\ U_z = U_z(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t) \end{cases} \quad (5)$$

根据统计学原理, 假设随机误差(即随机扰动)一般服从高斯分布, 即满足:

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-u)^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

在这种情况下, 传感器节点在 t 时刻的加速度表示形式:

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t) = \frac{\mathbf{F}(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t) + \mathbf{U}(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t)}{m} \quad (7)$$

可得节点在 x 轴, y 轴的加速度分别为:

$$\begin{aligned} a_x(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t) &= \frac{F_x(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t) + U_x(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t)}{m} \\ a_y(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t) &= \frac{F_y(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t) + U_y(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t)}{m} \end{aligned} \quad (8)$$

$$a_z(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t) = \frac{F_z(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t) + U_z(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t)}{m}$$

根据牛顿第二定律, 加速度与速度的关系:

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\mathbf{v}(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t + \Delta t) - \mathbf{v}(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t)}{\Delta t} = \frac{\partial \mathbf{v}(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t)}{\partial t} \quad (9)$$

可以得到节点的速度:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t) = \int_{t_0}^t \mathbf{a}(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t) dt = \int_{t_0}^t \frac{\mathbf{F}(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t) + \mathbf{U}(\mathbf{v}_{x0}, \mathbf{v}_{y0}, \mathbf{v}_{z0}, t)}{m} dt \quad (10)$$

即节点在 x 轴, y 轴的速度分别为:

$$\begin{aligned}
 v_x &= v_x(v_{x0}, v_{y0}, v_{z0}, t) = \int_{t_0}^t a_x(v_{x0}, v_{y0}, v_{z0}, t) dt = \int_{t_0}^t \frac{F_x(v_{x0}, v_{y0}, v_{z0}, t) + U_x(v_{x0}, v_{y0}, v_{z0}, t)}{m} dt \\
 v_y &= v_y(v_{x0}, v_{y0}, v_{z0}, t) = \int_{t_0}^t a_y(v_{x0}, v_{y0}, v_{z0}, t) dt = \int_{t_0}^t \frac{F_y(v_{x0}, v_{y0}, v_{z0}, t) + U_y(v_{x0}, v_{y0}, v_{z0}, t)}{m} dt \\
 v_z &= v_z(v_{x0}, v_{y0}, v_{z0}, t) = \int_{t_0}^t a_z(v_{x0}, v_{y0}, v_{z0}, t) dt = \int_{t_0}^t \frac{F_z(v_{x0}, v_{y0}, v_{z0}, t) + U_z(v_{x0}, v_{y0}, v_{z0}, t)}{m} dt
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

在运用算法时, 需要首先假设节点的初速度、质量, 海流动力场以及随机扰动等参数. 在一定的时间段内, 锚节点周期性($T_{interval}$)循环的向所有节点广播本身的信息.

2.2 测距与定位

在这一部分, 移动节点至少监听到三个锚节点的信息才能进行定位. 假设节点之间的通信是时间同步的, 三个锚节点的坐标分别为 $A(x_1, y_1, z_1)$, $B(x_2, y_2, z_2)$, $C(x_3, y_3, z_3)$, 未知节点的坐标为 $S(x, y, z)$, (x', y', z') , (x'', y'', z'') . 未知节点 S 到三个锚节点 A, B, C 的距离分别为 d_1, d_2, d_3 . 三个锚节点从 T_0 时刻的坐标信息分别在 T_1, T_2, T_3 到达 S , 时间差为 $\Delta T_i = T_i - T_0$. 为了简化计算, 假设 Z 轴的距离可以通过传感器节点本身可以测得, 所以 Z 轴的坐标值已知.

超声波在不同介质中有不同的传播速度, 而且在水介质中, 水声的传播速度主要受深度、温度和盐度的影响, 因此, 为了提高定位的精度, 采用以下公式近似计算^[16]水声的速度:

$$c = 1449.05 + 45.7t - 5.12t^2 + 0.23t^3 + (1.333 - 0.126t + 0.009t^2)(s - 35) + 16.3z + 0.18z^2
 \tag{12}$$

其中, t 为水体温度, z 为水的深度, s 为水的盐度. 因此, 可以得到节点间的距离为:

$$d_i = \int_{z_0}^{z_i} c \times \Delta T_i dz
 \tag{13}$$

综上所述, 根据得到节点间的距离, 可以得出以下方程组:

$$\begin{cases}
 (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = d_1^2 \\
 (x' - x_2)^2 + (y' - y_2)^2 + (z' - z_2)^2 = d_2^2 \\
 (x'' - x_3)^2 + (y'' - y_3)^2 + (z'' - z_3)^2 = d_3^2
 \end{cases}
 \tag{14}$$

其中,
$$\begin{cases}
 x' = x + \Delta T_i' \times v_x \\
 y' = y + \Delta T_i' \times v_y
 \end{cases}
 \tag{15}$$

同理, 计算 x'', y'' 的值. 第一个方程, 第二个方程分别减去第三个方程, 将二元二次的方程组降阶为二元一次的方程组, 并表示为线性方程组 $AX=B$, 其中:

$$A = \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_3 + c_3) & 2(y_1 - y_3 + c_4) \\ 2(x_2 - x_3 - c_1 + c_4) & 2(y_2 - y_3 - c_2 + c_4) \end{bmatrix}
 \tag{16}$$

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}
 \tag{17}$$

$$\begin{aligned}
 c_1 &= \Delta T_i' \times v_x, & c_2 &= \Delta T_i' \times v_y, & c_3 &= \Delta T_i' \times v_z, \\
 c_3 &= \Delta T_i'' \times v_x, & c_4 &= \Delta T_i'' \times v_y, & c_6 &= \Delta T_i'' \times v_z
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

$$B = \begin{bmatrix} x_1^2 - x_3^2 + y_1^2 - y_3^2 + 2c_3x_3 + 2c_4y_3 - c_3^2 - c_4^2 - d_1^2 + d_3^2 \\ x_2^2 - x_3^2 + y_2^2 - y_3^2 + 2c_1x_3 + 2c_2y_3 + c_1^2 - c_2^2 + c_2^2 - c_4^2 - d_2^2 + d_3^2 \end{bmatrix}
 \tag{19}$$

根据最小二乘法的原理, 计算得到节点的 x 轴, y 轴的坐标为:

$$\hat{X} = (A^T A)^{-1} A^T B
 \tag{20}$$

从而得到节点的三维坐标 (x, y, z) .

2.3 算法的实现

根据上述的原理, 算法的描述如下:

1) 节点移动预测

当 $t \leq T_{exchange}$ 时:

向所有的节点广播锚节点的坐标信息;

根据公式(11)计算和更新节点的速度;

$t = t + T_{exchange}$;

循环执行上述步骤.

2) 测距与定位

当 $Num_{node} \geq 3$ 时:

根据公式(13)计算节点的距离;

根据公式(20)计算节点的 x, y 坐标;

循环执行上述步骤.

3 仿真结果与分析

为了检验提出的节点移动算法的性能, 利用 Matlab 对算法进行仿真分析. 仿真时假设水下测试区域为 $200m \times 200m \times 200m$ 的正方体区域; 普通节点的部署服从随机均匀分布, 数量不少于 100 个; 所有节点的最大通信半径为 $50m$; 所有节点之间是时间同步的; 对于节点的移动速度按公式(11)计算, 水声的传播速度按公式(13)计算. 采用定位误差 E_n 作为节点自定位误差的评价标准, E_n 的计算公式如(21)所示,

$$E_i = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2}
 \tag{21}$$

其中 (x, y, z) , (x', y', z') , 分别为未知节点的实际位置和估计位置, i 表示第 i 个未知节点.

在以上假设的基础之上, 仿真实验分别运行论文中提出的节点移动算法与原始的 Chan 算法, 选取 100 个未知节点进行定位分析, 图 1 与图 2 分别表示两种

算法的节点自身定位误差。从图中比较可以看出,前者中大多数节点的定位误差近似在 10—40 之间,后者中大多数节点的定位误差大约在 10—60 之间;原始的 Chan 算法的误差波动范围要比 MNLS 算法的波动范围大,而且随着节点数目的增多 MNLS 算法比原始的 Chan 算法定位误差更小;单个节点的定位误差并不能反映算法的整体性能,平均误差更能看出算法的性能。所有节点平均误差公式如式(22),平均定位精确度公式如式(23):

$$error = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i \quad (22)$$

$$accuracy = error/R \quad (23)$$

其中, i 表示第 i 个未知节点; R 表示通信半径; N 表示未知节点的个数; E_i 表示第 i 个节点的误差。根据在仿真实验中所显示的结果数据,移动算法都比原始的 Chan 算法在所有节点的平均误差以及平均定位精确度方面都优越。

节点移动算法的重点在于研究节点的移动,图 3 表示节点的移动速度对定位误差的影响,可以看出,当节点的移动速度小于 2.5m/s 时,两种算法节点的定位误差相差很小,但是随着节点移动速度的增加,两种算法节点的定位误差就会逐渐增加,并且原始的 Chan 算法增长幅度大于 MNLS 算法定位误差的增长幅度。如图所示节点移动算法的误差比原始的 Chan 算法的误差小,主要是因为随着节点的移动锚节点与未知节点的传播距离就会不断变化,由于水下的复杂环境,就会影响节点间的测距,从而造成误差的增大,而在节点移动算法中考虑了海洋动力,海水温度、深度、盐度等其他因素的影响,节点的移动速度按公式(11)计算,水声的传播速度按公式(13)计算,从而提高了节点的定位精度。

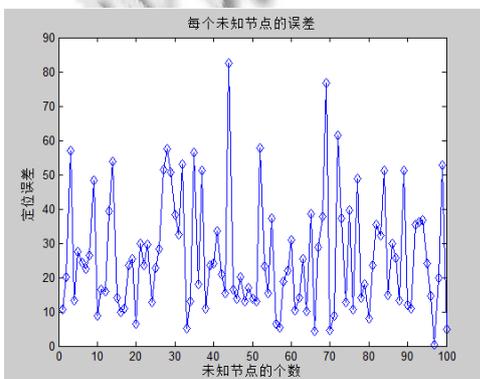


图1 MNLS算法节点定位误差

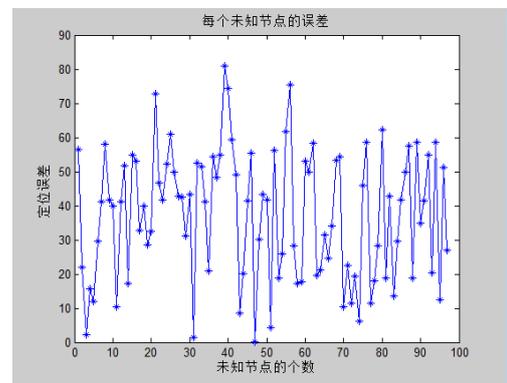


图2 Chan算法节点定位误差

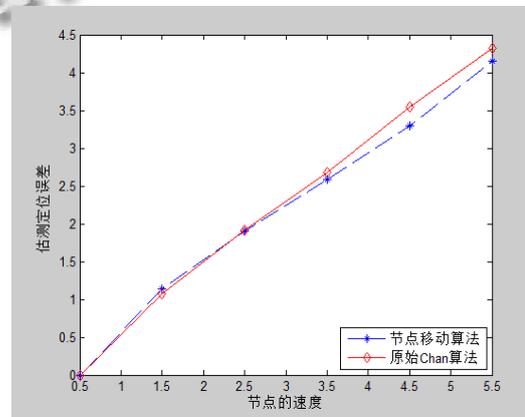


图3 节点的移动速度对定位误差的影响

4 总结

论文中提出的移动节点定位算法主要是研究三维水下环境移动节点的定位,通过预测节点的移动速度,再通过相对精确的传播速度公式进行测距,最后采用最大似然法估测节点的位置。原始的 Chan 算法主要是研究二维水下环境的定位。与 Chan 算法相比此算法的定位精度较佳。但是移动节点算法也有很多的不足之处,例如在仿真时算法的运行时间较长,在此方面算法有待提高,希望可以在以后的研究中继续改进与优化,从而得到定位性能更好的算法。

参考文献

- 1 Akyildiz I, Pompili D, Melodia T. State of the art in protocol research for underwater acoustic sensor networks. ACM, SIGMOBILE Mobile Computing and Communications, 2007, 11(4): 11–22.

- 2 陈荣,单志龙.大规模水下无线传感器网络定位误差抑制研究.计算机与现代化,2011,5:24.
- 3 Han G, Jiang J, Shu L, et al. Localization algorithms of underwater wireless sensor networks: A survey. *Sensors*, 2012, 12(2): 2026–2061.
- 4 Chandrasekhar V, Seah W. An area localization scheme for underwater sensor networks. *OCEANS 2006-Asia Pacific*. IEEE, 2007. 1–8.
- 5 Cheng X, Shu H, Liang Q. A range-difference based self-positioning scheme for underwater acoustic sensor networks. *Wireless Algorithms, Systems and Applications*, 2007. WASA 2007. Int. Conf. on. IEEE. 2007. 38–43.
- 6 Cheng X, Shu H, Liang Q, et al. Silent positioning in underwater acoustic sensor networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2008, 57(3): 1756–1766.
- 7 Isbitiren G, Akan OB. Three-dimensional underwater target tracking with acoustic sensor networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2011, 60(8): 3897–3906.
- 8 Zhou Z, Peng Z, Cui JH, et al. Scalable localization with mobility prediction for underwater sensor networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2011, 10(3): 335–348.
- 9 Callmer J, Skoglund M, Gustafsson F, et al. Silent localization of underwater sensors using magnetometers. *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing*, 2009, 2010: 32.
- 10 Luo H, Zhao Y, Guo Z, et al. Udb: using directional beacons for localization in underwater sensor networks. *Parallel and Distributed Systems*, 2008. ICPADS'08. 14th IEEE Int. Conf. on. IEEE. 2008. 551–558.
- 11 Ojha T, Misra S. MobiL: A 3-dimensional localization scheme for mobile underwater sensor networks. 2013 National Conference on Communications (NCC). IEEE. 2013. 1–5.
- 12 Guo Y, Liu Y. Localization for anchor-free underwater sensor networks. *Computers & Electrical Engineering*, 2013.
- 13 李昊,张歆,张小蓊.水下网络移动节点分布式定位算法.声学技术,2011,30(4):316–320.
- 14 罗海勇,李锦涛,赵方,等.基于均值漂移和联合粒子滤波的移动节点定位算法.传感技术学报,2009,22(3):378–386.
- 15 Allard G, Jacquet P, Mans B. Routing in extremely mobile networks. *Challenges in Ad Hoc Networking*. Springer US, 2006: 129–138.
- 16 Robert JU. Principles of underwater sound. New York: McGraw-Hill Book Company, 1983.