

一种水下无线传感网目标位置和环境传播参数的联合估计方法

技术领域

本发明涉及水下无线传感网节点定位技术领域，具体涉及一种目标位置和环境传播参数的联合估计方法。

背景技术

作为海洋立体监测系统重要组成部分，水下无线传感器网络（简称 Underwater Wireless Sensor Networks, UWSNs）是其重要基础与支撑，它能够为海域安全保障、海洋环境保护、智能船舶的安全航行等活动提供更好的技术手段和信息平台。在 UWSNs 中若感知的数据未带有位置信息，则该数据将变得没有意义。因此，如何获取较为精确的位置定位既是海洋监测应用的需求，也是研究 UWSNs 其它理论问题的基础。

然而，如何在复杂多变的水下环境中获取较为准确的位置信息仍是一个亟待解决的难题。一方面信号在水下传播的分层效应，使得测距定位精度较低；另一方面，信号在水下传播的模型参数，特别是环境传播因子往往随着水下温度、湿度及盐度的变化而变化，进一步增大了定位误差。现有存在的定位技术针对上述问题没有很好的解决方案，无法在信号存在分层效应的水下环境且环境传播参数未知情况下获取较高的定位精度。

《海洋传感网目标节点定位关键技术研究》（梅骁峻 上海海事大学）第五章中提出考虑水面上的无线电信号传播，其场景为 2D，该论文没有考虑到水下声信号传播时同时存在分层效应以及吸收效应来构建测距模型，并且水下声信号传播场景为 3D，水下场景的技术复杂度以及精度要求也有很大不同，因此该文章没有解决水下无线传感在环境传播参数未知情况下准确定位的问题。

发明内容

本发明的目的在于提供一种水下传感网目标位置和环境传播参数的联合估计方法（TLESE），以解决高动态海洋环境中，信号在分层效应及环境参数未知导致定位精度下降的问题。通过本发明的实施，可在上述恶劣条件下获取较高的定

位精度。

为了达到上述目的，本发明通过以下技术方案实现：

一种水下传感网目标位置和环境传播参数的联合估计方法，其特征是，包含以下步骤：

S1、根据声信号在水下的分层传播效应，构建基于斯涅尔定律和射线追踪定理的接收信号强度的测距模型；所述斯涅尔定律结合所述射线追踪定理获取第*i*个锚节点到目标节点的距离 d'_i ：

$$d'_i = -\left(ax_3^t + b\right) \frac{\theta^x - \theta^i}{a \cos \theta^x} \quad (1)$$

其中， a 表示梯度参数， b 表示声波在水面传播速度， θ^i 和 θ^x 分别表示第*i*个锚节点和目标节点的接收信号角度，它们的取值范围为 $[-\pi/2, \pi/2]$ ；根据所述目标节点的距离 d'_i 构建接收信号强度的测距模型；

S2、通过多次一阶泰勒级数展开式构造以环境传播参数及目标位置为变量的目标函数；

S3、运用二分法通过对变量进行粗粒度估计；

S4、根据粗粒度估计的值进行线性展开并通过迭代再优化，进一步提升解的精度，得到目标位置的估计值：

$$\mathbf{x}_{\kappa+1}^t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\mathbf{a}_i^t + d'_i \frac{(\mathbf{x}_{\kappa}^t - \mathbf{a}_i^t)^T}{\|\mathbf{x}_{\kappa}^t - \mathbf{a}_i^t\|} \right) \quad (2)$$

其中， $\mathbf{x}_{\kappa}^t$ 为第 κ 次目标位置估计值， $\mathbf{a}_i^t$ 为*t*时刻第*i*个锚节点的位置， d'_i 为第*i*个锚节点与目标节点间的距离， N 为水下部署的含有位置信息的浮标传感器节点的个数。

步骤S1所述根据声信号在水下的分层传播效应，构建基于斯涅尔定律的接收信号强度的测距模型，具体包含：

S11、若水下部署*N*个含有位置信息的浮标传感器节点，即锚节点以及一个目标节点。假设*t*时刻第*i*个锚节点的位置为 $\mathbf{a}_i^t = [a'_{i1}, a'_{i2}, a'_{i3}]^T$ ，目标节点*t*时刻的

位置为 $\mathbf{x}^t = [x_1^t, x_2^t, x_3^t]^T$ ；假设所有节点都配有压力传感器，能精确知悉其自身的深度信息；根据声信号在水下的传播速度模型，可得：

$$C(z) = az + b \quad (3)$$

其中， a 表示梯度参数； z 表示水深； b 表示声波在水面传播速度； $C(z)$ 表示在水深为 z 时的声信号传播速度求解函数。

S12、根据斯涅尔定律，可得：

$$\frac{\cos \theta}{C(z)} = \frac{\cos \theta^i}{C(a_{i3}^t)} = \frac{\cos \theta^x}{C(x_3^t)} = k \quad (4)$$

其中， θ^i 和 θ^x 分别表示第 i 个锚节点和目标节点的接收信号角度，它们的取值范围为 $[-\pi/2, \pi/2]$ ； k 表示常数。

S13、基于所述公式（1）获取锚节点和目标间的距离信息，通过路径损耗模型得到水下环境中基于信号强度的测距模型，为：

$$P_{ri}^t = P_s^t - PL(d_0) - 10\alpha^t \log_{10} \frac{d_i^t}{d_0} - \alpha^f d_i^t + \gamma_i^t \quad (5)$$

其中， P_{ri}^t 表示第 i 个锚节点在 t 时刻收到的目标节点的功率； P_s^t 表示目标节点在 t 时刻的发射功率； $PL(d_0)$ 表示参考距离为 d_0 时的损失值， d_0 通常为 1 m； α^t 表示信号的环境传播参数； d_i^t 为第 i 个锚节点与目标节点间的距离； γ_i^t 则表示对于第 i 个锚节点在 t 时刻的信号衰减噪声，假设每一时刻的噪声方差相等，若其服从均值为零，方差为 σ_i^2 的高斯分布，则可表示为 $\gamma_i^t \sim G(0, \sigma_i^2)$ ； α^f 表示信号的吸收因子，可根据索普定理根据发射频率获取，即：

$$\alpha^f = 0.11 \frac{f^2}{1 + f^2} + 44 \frac{f^2}{4100 + f^2} + 2.75 \times 10^{-4} f^2 + 0.003 \quad (6)$$

步骤 S2 所述通过多次一阶泰勒级数展开式构造以环境传播参数及目标位置为变量的目标函数，具体包含：

S21、假设 $c_{\max} = \alpha^f d_{i_{\max}}^t$ ，其中 $d_{i_{\max}}^t$ 为锚节点和目标最大的距离值。根据欧拉几何定理及信号处理原理，当水下监控区域面积确定时，信号的吸收效应导致的最大误差 $c_{\max}$ 是可以确定的。

S22、根据 S13 所得表达式 (5) 进行移项变换, 并且平方各锚节点与目标节点在 t 时刻的距离可得:

$$\left(d_i^t\right)^2 = d_0^2 10^{\frac{\hat{P}_0^t - P_{ri}^t - c_{\max} + \gamma_i^t}{5\alpha^t}} \quad (7)$$

其中, d_i^t 为第 i 个锚节点与目标节点间的距离, γ_i^t 表示对于第 i 个锚节点在 t 时刻的信号衰减噪声, d_0 为参考距离, 通常为 1 m, P_{ri}^t 表示第 i 个锚节点在 t 时刻收到的目标节点的功率, α 表示信号的环境传播参数;

S23、利用指数函数泰勒一阶展开式 $a^x = 1 + x \ln a$, 对 $10^{\frac{\gamma_i^t}{5\alpha^t}}$ 进行泰勒一阶展开, 当参考距离 $d_0 = 1$ m 时, S22 中式 (7) 可表示为:

$$\left(d_i^t\right)^2 \approx 10^{\frac{\hat{P}_0^t - P_{ri}^t - c_{\max}}{5\alpha^t}} \cdot \left(1 + \frac{\ln 10}{5\alpha^t} \gamma_i^t\right) \quad (8)$$

其中, d_i^t 为第 i 个锚节点与目标节点间的距离, γ_i^t 表示对于第 i 个锚节点在 t 时刻的信号衰减噪声, P_{ri}^t 表示第 i 个锚节点在 t 时刻收到的目标节点的功率, α 表示信号的环境传播参数;

S24、引入参数 α_0^t , 使得 $\alpha^t = \alpha_0^t (1 + (\alpha^t - \alpha_0^t) / \alpha_0^t)$, 且 $\tilde{\delta} \triangleq (\alpha^t - \alpha_0^t) / \alpha_0^t$, 其中 $\alpha_0^t \neq 0$; 当 $\tilde{\delta}$ 较小时, α_0^t 趋近于 α 。则 S23 中式 (8) 可转化为:

$$\left(d_i^t\right)^2 \approx 10^{\frac{\hat{P}_0^t - P_{ri}^t - c_{\max}}{5\alpha_0^t(1+\tilde{\delta})}} \cdot \left(1 + \frac{\ln 10}{5\alpha^t} \gamma_i^t\right) \quad (9)$$

其中, d_i^t 为第 i 个锚节点与目标节点间的距离, γ_i^t 表示对于第 i 个锚节点在 t 时刻的信号衰减噪声, P_{ri}^t 表示第 i 个锚节点在 t 时刻收到的目标节点的功率, α 表示信号的环境传播参数;

S25、假设 $|\tilde{\delta}|$ 较小, 即 $1/(1+\tilde{\delta}) \approx 1-\tilde{\delta}$, 对 $1/(1+\tilde{\delta})$ 进行泰勒一阶展开, 则:

$$\left(d_i^t\right)^2 \approx \rho_i^{(1-\tilde{\delta})} \cdot \left(1 + \frac{\ln 10}{5\alpha^t} \gamma_i^t\right) \quad (10)$$

其中, $\rho_i = 10^{\frac{\hat{P}_0 - P_H - c_{\max}}{5\alpha_0^t}}$, d_i^t 为第 i 个锚节点与目标节点间的距离, γ_i^t 表示对于第 i 个锚节点在 t 时刻的信号衰减噪声, α 表示信号的环境传播参数;

S26、然而 S25 中式 (10) 仍是非线性, 且较难求解, 故假设 $|\tilde{\delta} \ln \rho_i|$ 较小, 利用指数函数的泰勒一阶展开式, 对 $\rho_i^{-\delta}$ 进行泰勒一阶展开, 则可进一步转化为:

$$(d_i^t)^2 \approx \rho_i (1 - \tilde{\delta} \ln \rho_i) \cdot \left(1 + \frac{\ln 10}{5\alpha^t} \gamma_i^t\right) \quad (11)$$

其中, d_i^t 为第 i 个锚节点与目标节点间的距离, γ_i^t 表示对于第 i 个锚节点在 t 时刻的信号衰减噪声, α^t 表示信号的环境传播参数, $\tilde{\delta}$ 如 S24 所示;

S27、在求得距离平方后, 构建基于权值的最小二乘框架:

$$\arg \min_{\mathbf{x}^t} \sum_{i=1}^N \omega_i \left[\|\mathbf{x}^t - \mathbf{a}_i^t\|^2 - (d_i^t)^2 \right]^2 \quad (12)$$

其中, $\omega_i = 1 - d_i^t / \sum_{i=1}^N d_i^t$, $\|\cdot\|$ 为二阶范数, d_i^t 为第 i 个锚节点与目标节点间的距离, $\mathbf{a}_i^t$ 为 t 时刻第 i 个锚节点的位置;

S28、令 $\theta^t = [\chi^t, x_1^t, x_2^t, x_3^t, \tilde{\delta}^t]^T$, 展开 S27 中式 (12), 可得:

$$\begin{aligned} J(\theta^t) &= \min_{\theta^t} \left\| w(A\theta^t - B) \right\|^2 \\ s.t. (\theta^t)^T D \theta^t + 2f^T \theta^t &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $\omega = \text{diag}([\omega_1^2, \dots, \omega_N^2])$,

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -2(\mathbf{a}_1^t)^T & \rho_1 \ln \rho_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & -2(\mathbf{a}_N^t)^T & \rho_N \ln \rho_N \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \rho_1 - \|\mathbf{a}_1^t\|^2 \\ \vdots \\ \rho_N - \|\mathbf{a}_N^t\|^2 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{0}_{1 \times k} & 0 \\ 0 & \mathbf{I}_k & 0 \\ 0 & \mathbf{0}_{1 \times k} & 0 \end{bmatrix}, f = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \\ \mathbf{0}_{(k+1) \times 1} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$\mathbf{I}$ 和 $\mathbf{0}$ 分别表示单位矩阵和零矩阵。

步骤 S3 所述运用二分法通过对变量进行粗粒度估计, 具体包含:

S31、引入乘子 λ , 在每一时刻根据式 (14) 对其值进行求解, 即:

$$\lambda = \left((A^T \omega A + \lambda D)^{-1} (A^T \omega B - \lambda f) \right)^T D \left((A^T \omega A + \lambda D)^{-1} (A^T \omega B - \lambda f) \right) \quad (15);$$

S32、根据式 (15) 求解每一时刻中最优的乘子 λ^* ，即：

$$\lambda^* = \max \left[-\text{diag} \left(A^T \omega A \right), \lambda \right] \quad (16) ;$$

S33、根据得到的最优乘子 λ^* ，可算出粗粒度估计的变量值，即：

$$\theta' = \left(A^T \omega A + \lambda^* D \right)^{-1} \left(A^T \omega B - \lambda^* f \right) \quad (17) ;$$

S34、求得变量 θ' 后，环境传播参数的估计值即为 $\hat{\alpha}' = \alpha'_0 \left(1 + \theta' \Big|_{5,1} \right)$ ，其中 $\theta' \Big|_{5,1}$ 为待求变量 θ' 的第 5 行第 1 列；为进一步优化路径损耗因子的估计值，利用得出的位置信息，即 $\theta' \Big|_{2:4,1}$ 来求解路径损耗因子的平均值，即：

$$\bar{\alpha}' = \frac{\sum_{i=1}^N \hat{P}_0^i - P_{\pi}^t - c_{\max}}{10 \log_{10} \prod_{i=1}^N \hat{d}_i^t} \quad (18)$$

其中， $\hat{d}_i^t$ 为未知节点估计位置信息； $\theta' \Big|_{2:4,1}$ 到锚节点间的估计距离。

步骤 S4 所述根据粗粒度估计的值进行线性展开并通过迭代再优化，进一步提升解的精度，得到目标位置的估计值，具体包含：

S41、根据 S34 得到的粗粒度目标估计值 $\hat{\mathbf{x}}' = \theta' \Big|_{2:4,1}$ 作为初始值，即 $\hat{\mathbf{x}}'_0$ 。根据泰勒级数一阶展开在第 κ 次对估计值进行线性化处理，可得：

$$S(\mathbf{x}^t | \mathbf{x}_\kappa^t) = \sum_{i=1}^N \left(\left\| \mathbf{x}^t - \mathbf{a}_i^t \right\|^2 - 2d_i^t \left\| \mathbf{x}_\kappa^t - \mathbf{a}_i^t \right\| \right) - 2 \sum_{i=1}^N d_i^t \frac{(\mathbf{x}_\kappa^t - \mathbf{a}_i^t)^T}{\left\| \mathbf{x}_\kappa^t - \mathbf{a}_i^t \right\|} (\mathbf{x}^t - \mathbf{x}_\kappa^t) \quad (19) ;$$

S42、将 S41 式 (19) 对 $\mathbf{x}^t$ 进行求导并化简可得第 $\kappa+1$ 次的目标位置估计为所述的公式 (2)。

本发明与现有技术相比具有以下优点：建立了具有分层效应且环境传播参数未知的 UWSNs 测距模型，并且能够在每一时刻联合估计环境传播参数以及目标位置，提高了定位的精度。与现有技术《海洋传感网目标节点定位关键技术研究》论文相比，而本发明考虑的是水下声信号传播，其场景为 3D，并且还考虑到信号在水下传播的分层效应以及吸收效应来构建的测距模型。另外，在算法的求解过程中，本发明提出的求解方法融合了二分法以及基于泰勒级数展开的线性再优化法，明显区别于该论文的第五章相关方法。更重要的是，本发明提出的方法是针对水下场景，在计算复杂度以及精度都有着明显的提升。因此，本发明在定位场

景、模型建立以及算法求解过程都与该论文的第五章有着本质的区别，并且本发明定位性能比该论文第五章节提出的方法更优。

附图说明

图 1 为本发明一种水下传感网目标位置和环境传播参数的联合估计方法流程图。

图 2 (a)、图 2 (b) 为本发明不同锚节点数量对应的估计误差。

图 3 (a)、图 3 (b) 为本发明不同锚节点对目标位置以及环境传播参数（路径损耗因子）的估计误差。

图 4 (a)、图 4 (b) 为本发明不同吸收因子对目标位置以及环境传播参数（路径损耗因子）对应的估计误差。

具体实施方式

以下结合附图，通过详细说明一个较佳的具体实施案例，对本发明做进一步阐述。

图 1 表示本发明一种水下传感网目标位置和环境传播参数的联合估计方法流程图，具体包含：

S1、根据声信号在水下的分层传播效应，构建基于斯涅尔定律和射线追踪定理的接收信号强度的测距模型；所述斯涅尔定律结合所述射线追踪定理获取第 i 个锚节点到目标节点的距离 d_i' ：

$$d_i' = -\left(ax_3^i + b\right) \frac{\theta^x - \theta^i}{a \cos \theta^x} \quad (1)$$

其中， a 表示梯度参数， b 表示声波在水面传播速度， θ^i 和 θ^x 分别表示第 i 个锚节点和目标节点的接收信号角度，它们的取值范围为 $[-\pi/2, \pi/2]$ ；根据所述目标节点的距离 d_i' 构建接收信号强度的测距模型：

S2、通过多次一阶泰勒级数展开式构造以环境传播参数及目标位置为变量的目标函数：

S3、运用二分法通过对变量进行粗粒度估计；

S4、根据粗粒度估计的值进行线性展开并通过迭代再优化，进一步提升解的精度，得到目标位置的估计值：

$$\mathbf{x}_{k+1}^t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\mathbf{a}_i^t + d_i^t \frac{(\mathbf{x}_k^t - \mathbf{a}_i^t)^T}{\|\mathbf{x}_k^t - \mathbf{a}_i^t\|} \right) \quad (2)$$

其中, $\mathbf{x}_k^t$ 为第 k 次目标位置估计值, $\mathbf{a}_i^t$ 为 t 时刻第 i 个锚节点的位置, d_i^t 为第 i 个锚节点与目标节点间的距离, N 为水下部署的含有位置信息的浮标传感器节点的个数。

本实施案例中, 所述的步骤 S1 具体包含:

S11、若水下部署 N 个含有位置信息的浮标传感器节点, 即锚节点以及一个目标节点。假设 t 时刻第 i 个锚节点的位置为 $\mathbf{a}_i^t = [a_{i1}^t, a_{i2}^t, a_{i3}^t]^T$, 目标节点 t 时刻的位置为 $\mathbf{x}^t = [x_1^t, x_2^t, x_3^t]^T$; 假设所有节点都配有压力传感器, 能精确知悉其自身的深度信息; 根据声信号在水下的传播速度模型, 可得:

$$C(z) = az + b \quad (3)$$

其中, a 表示梯度参数; z 表示水深; b 表示声波在水面传播速度; $C(z)$ 表示在水深为 z 时的声信号传播速度求解函数。

S12、根据斯涅尔定律, 可得:

$$\frac{\cos \theta}{C(z)} = \frac{\cos \theta^i}{C(a_{i3}^t)} = \frac{\cos \theta^x}{C(x_3^t)} = k \quad (4)$$

其中, θ^i 和 θ^x 分别表示第 i 个锚节点和目标节点的接收信号角度, 它们的取值范围为 $[-\pi/2, \pi/2]$; k 表示常数。

S13、获取锚节点和目标间的距离信息 (即所述的公式 (1)) 后, 通过路径损耗模型得到水下环境中基于信号强度的测距模型, 为:

$$P_{ri}^t = P_s^t - PL(d_0) - 10\alpha^t \log_{10} \frac{d_i^t}{d_0} - \alpha^f d_i^t + \gamma_i^t \quad (5)$$

其中, P_{ri}^t 表示第 i 个锚节点在 t 时刻收到的目标节点的功率; P_s^t 表示目标节点在 t 时刻的发射功率; $PL(d_0)$ 表示参考距离为 d_0 时的损失值, d_0 通常为 1 m; α^t 表示信号的环境传播参数; d_i^t 为第 i 个锚节点与目标节点间的距离; γ_i^t 则表示对于第 i 个锚节点在 t 时刻的信号衰减噪声, 假设每一时刻的噪声方差相等, 若其服从均

值为零，方差为 σ_i^2 的高斯分布，则可表示为 $\gamma_i^t \sim G(0, \sigma_i^2)$ ； α^f 表示信号的吸收因子，可根据索普定理根据发射频率获取，即：

$$\alpha^f = 0.11 \frac{f^2}{1+f^2} + 44 \frac{f^2}{4100+f^2} + 2.75 \times 10^{-4} f^2 + 0.003 \quad (6)。$$

所述的步骤 S2 具体包含：

S21、假设 $c_{\max} = \alpha^f d_{i_{\max}}^t$ ，其中 $d_{i_{\max}}^t$ 为锚节点和目标最大的距离值。根据欧拉几何定理及信号处理原理，当水下监控区域面积确定时，信号的吸收效应导致的最大误差 $c_{\max}$ 是可以确定的。

S22、根据 S13 所得表达式 (5) 进行移项变换，并且平方各锚节点与目标节点在 t 时刻的距离可得：

$$(d_i^t)^2 = d_0^2 10^{\frac{\hat{P}_0^t - P_{ri}^t - c_{\max} + \gamma_i^t}{5\alpha^t}} \quad (7)$$

其中， d_i^t 为第 i 个锚节点与目标节点间的距离， γ_i^t 表示对于第 i 个锚节点在 t 时刻的信号衰减噪声， d_0 为参考距离，通常为 1 m， P_{ri}^t 表示第 i 个锚节点在 t 时刻收到的目标节点的功率， α^t 表示信号的环境传播参数。

S23、利用指数函数泰勒一阶展开式 $a^x = 1 + x \ln a$ ，对 $10^{\frac{\gamma_i^t}{5\alpha^t}}$ 进行泰勒一阶展开，当参考距离 $d_0 = 1$ m 时，S22 中式 (7) 可表示为：

$$(d_i^t)^2 \approx 10^{\frac{\hat{P}_0^t - P_{ri}^t - c_{\max}}{5\alpha^t}} \cdot \left(1 + \frac{\ln 10}{5\alpha^t} \gamma_i^t \right) \quad (8)$$

其中， d_i^t 为第 i 个锚节点与目标节点间的距离， γ_i^t 表示对于第 i 个锚节点在 t 时刻的信号衰减噪声， P_{ri}^t 表示第 i 个锚节点在 t 时刻收到的目标节点的功率， α^t 表示信号的环境传播参数。

S24、引入参数 α_0^t ，使得 $\alpha^t = \alpha_0^t (1 + (\alpha^t - \alpha_0^t) / \alpha_0^t)$ ，且 $\tilde{\delta} \triangleq (\alpha^t - \alpha_0^t) / \alpha_0^t$ ，其中 $\alpha_0^t \neq 0$ ；当 $\tilde{\delta}$ 较小时， α_0^t 趋近于 α^t 。则 S23 中式 (8) 可转化为：

$$(d_i^t)^2 \approx 10^{\frac{\hat{P}_0^t - P_{ii}^t - c_{\max}}{5\alpha_0^t(1+\tilde{\delta})}} \cdot \left(1 + \frac{\ln 10}{5\alpha^t} \gamma_i^t\right) \quad (9)$$

其中, d_i^t 为第 i 个锚节点与目标节点间的距离, γ_i^t 表示对于第 i 个锚节点在 t 时刻的信号衰减噪声, P_{ii}^t 表示第 i 个锚节点在 t 时刻收到的目标节点的功率, α 表示信号的环境传播参数。

S25、假设 $|\tilde{\delta}|$ 较小, 即 $1/(1+\tilde{\delta}) \approx 1-\tilde{\delta}$, 对 $1/(1+\tilde{\delta})$ 进行泰勒一阶展开, 则:

$$(d_i^t)^2 \approx \rho_i^{(1-\tilde{\delta})} \cdot \left(1 + \frac{\ln 10}{5\alpha^t} \gamma_i^t\right) \quad (10)$$

其中, $\rho_i = 10^{\frac{\hat{P}_0^t - P_{ii}^t - c_{\max}}{5\alpha_0^t}}$, d_i^t 为第 i 个锚节点与目标节点间的距离, γ_i^t 表示对于

第 i 个锚节点在 t 时刻的信号衰减噪声, α 表示信号的环境传播参数。

S26、然而 S25 中式 (10) 仍是非线性, 且较难求解, 故假设 $|\tilde{\delta} \ln \rho_i|$ 较小, 利用指数函数的泰勒一阶展开式, 对 $\rho_i^{-\tilde{\delta}}$ 进行泰勒一阶展开, 则可进一步转化为:

$$(d_i^t)^2 \approx \rho_i (1 - \tilde{\delta} \ln \rho_i) \cdot \left(1 + \frac{\ln 10}{5\alpha^t} \gamma_i^t\right) \quad (11)$$

其中, d_i^t 为第 i 个锚节点与目标节点间的距离, γ_i^t 表示对于第 i 个锚节点在 t 时刻的信号衰减噪声, α 表示信号的环境传播参数, $\tilde{\delta}$ 如 S24 所示。

S27、在求得距离平方后, 构建基于权值的最小二乘框架:

$$\arg \min_{\mathbf{x}^t} \sum_{i=1}^N \omega_i \left[\|\mathbf{x}^t - \mathbf{a}_i^t\|^2 - (d_i^t)^2 \right]^2 \quad (12)$$

其中, $\omega_i = 1 - d_i^t / \sum_{i=1}^N d_i^t$, $\|\cdot\|$ 为二阶范数, d_i^t 为第 i 个锚节点与目标节点间的

距离, $\mathbf{a}_i^t$ 为 t 时刻第 i 个锚节点的位置;

S27、令 $\boldsymbol{\theta}^t = [\chi^t, x_1^t, x_2^t, x_3^t, \tilde{\delta}]^T$, 展开 S27 中式 (12), 可得:

$$\begin{aligned} J(\boldsymbol{\theta}^t) &= \min_{\boldsymbol{\theta}^t} \text{imize } \left\| \mathbf{A} \boldsymbol{\theta}^t - \mathbf{B} \right\|^2 \\ \text{s.t. } (\boldsymbol{\theta}^t)^T \mathbf{D} \boldsymbol{\theta}^t + 2 \mathbf{f}^T \boldsymbol{\theta}^t &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $\omega = \text{diag}([\omega_1^2, \dots, \omega_N^2])$,

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -2(\mathbf{a}_1^t)^T & \rho_1 \ln \rho_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & -2(\mathbf{a}_N^t)^T & \rho_N \ln \rho_N \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \rho_1 - \|\mathbf{a}_1^t\|^2 \\ \vdots \\ \rho_N - \|\mathbf{a}_N^t\|^2 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{0}_{1 \times k} & 0 \\ 0 & \mathbf{I}_k & 0 \\ 0 & \mathbf{0}_{1 \times k} & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{f} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \\ \mathbf{0}_{(k+1) \times 1} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$\mathbf{I}$ 和 $\mathbf{0}$ 分别表示单位矩阵和零矩阵。

所述步骤 S3 具体包含:

S31、引入乘子 λ , 在每一时刻根据式 (14) 对其值进行求解, 即:

$$\lambda = \left((A^T \omega A + \lambda D)^{-1} (A^T \omega B - \lambda \mathbf{f}) \right)^T D \left((A^T \omega A + \lambda D)^{-1} (A^T \omega B - \lambda \mathbf{f}) \right) \quad (15)$$

S32、根据式 (15) 求解每一时刻中最优的乘子 λ^* , 即:

$$\lambda^* = \max \left[-\text{diag}(A^T \omega A), \lambda \right] \quad (16)$$

S33、根据得到的最优乘子 λ^* , 可算出粗粒度估计的变量值, 即:

$$\theta^t = (A^T \omega A + \lambda^* D)^{-1} (A^T \omega B - \lambda^* \mathbf{f}) \quad (17)$$

S34、求得变量 θ^t 后, 环境传播参数的估计值即为 $\hat{\alpha}^t = \alpha_0^t (1 + \theta^t|_{5,1})$, 其中 $\theta^t|_{5,1}$ 为待求变量 θ^t 的第 5 行第 1 列; 为进一步优化路径损耗因子的估计值, 利用得出的位置信息, 即 $\theta^t|_{2,4,1}$ 来求解路径损耗因子的平均值, 即:

$$\bar{\alpha}^t = \frac{\sum_{i=1}^N \hat{P}_0^t - P_{ri}^t - c_{\max}}{10 \log_{10} \prod_{i=1}^N \hat{d}_i^t} \quad (18)$$

其中, $\hat{d}_i^t$ 为未知节点估计位置信息; $\theta^t|_{2,4,1}$ 到锚节点间的估计距离。

所述的步骤 S4 具体包含:

S41、根据 S34 得到的粗粒度目标估计值 $\hat{\mathbf{x}}^t = \theta^t|_{2,4,1}$ 作为初始值, 即 $\hat{\mathbf{x}}_0^t$ 。根据泰勒级数一阶展开在第 κ 次对估计值进行线性化处理, 可得:

$$S(\mathbf{x}^t | \mathbf{x}_\kappa^t) = \sum_{i=1}^N \left(\|\mathbf{x}^t - \mathbf{a}_i^t\|^2 - 2d_i^t \|\mathbf{x}_\kappa^t - \mathbf{a}_i^t\| \right) - 2 \sum_{i=1}^N d_i^t \frac{(\mathbf{x}_\kappa^t - \mathbf{a}_i^t)^T}{\|\mathbf{x}_\kappa^t - \mathbf{a}_i^t\|} (\mathbf{x}^t - \mathbf{x}_\kappa^t) \quad (19)$$

S42、将 S41 式 (18) 对 $\mathbf{x}^t$ 进行求导并化简可得第 $\kappa+1$ 次的目标位置估计值

为所述公式 (2)。

为验证本发明方法 (简称 TLESE 算法) 的有效性, 仿真实验在 Matlab R2021b 进行。针对不同的场景, 对比现有算法 USR, PLSE, 和 TSE, 以最小均方根误差 (RSME) 作为评价指标来评估算法的性能, 即:

$$RMSE_{x^t} = \sqrt{\frac{1}{MC} \sum_{nu=1}^{MC} (\hat{x}^t - x^t)^2}, RMSE_{\alpha^t} = \sqrt{\frac{1}{MC} \sum_{nu=1}^{MC} (\hat{\alpha}^t - \alpha^t)^2} \quad (20)$$

其中, MC 表示蒙特卡洛仿真总次数; nu 表示蒙特卡洛仿真次数。

此外, 为模拟海洋中的动态场景, 在仿真中设置每一次蒙特卡洛仿真的锚节点和目标节点位置是变化的。其他固定参数的设置如下: $a=0.1$, $b=1473$ m/s, $P_0=-55$ dBm, $MC=1000$, $\kappa=1000$, 仿真区域边长为 50 m; 另外由于而 α' 经验值通常为 2 至 6, 若 α'_0 取值范围太小或太大, 相应的 δ 会过小或过大, 则通过步骤 S25 一节泰勒级数展开的式 (9) 将无效, 故选取中位数 4.75 作为 α'_0 的值, 即 $\alpha'_0=4.75$ 。

图 2 (a) 和图 2 (b) 表示在 $N=8$, $\alpha^f=0.06$ 情况下, 不同噪声对目标位置以及环境传播参数的估计误差。从图中可以看出, 随着噪声的增加, 对应的定位误差亦增加。对于目标位置的估计中, 本发明提出的方法 TLESE 由于融合了线性迭代再优化的方法, 其定位精度要明显好于另外三种方法。同样的结果可以在图 2 (b) 环境参数估计误差中得到, 虽然本发明提出的方法随着噪声的增加, 其环境参数估计误差增大, 但总体估计性能要好于另外三种方法。

图 3 (a) 和图 3 (b) 表示在 $\alpha^f=0.06$, $\sigma_i^2=3$ dB 情况下, 不同锚节点对目标位置以及环境传播参数的估计误差。由于锚节点数量的增加, 可用于估计的水下声信号传播的接收信号强度 (RSS) 信息亦随之增加, 故各算法的估计误差随着锚节点的增多而下降。从图 3 (a) 中可以看出, 各算法的定位精度在 $N=6$ 时较为接近, 特别是 PLSE 和 TSE。随着锚节点数量的继续增多, TLESE 的定位性能的优势逐渐显现, 其位置估计的精度要好于另外三种方法。在图 3 (b) 的环境传播参数估计误差中该优越性亦得到了进一步的说明。

图 4 (a) 和图 4 (b) 表示在 $N=8$, $\sigma_i^2=3$ dB 情况下, 不同吸收因子对目标位置以及环境传播参数的估计误差。从图 4 (a) 可以看出 USR、PLSE 和 TLESE 的估计性能对吸收因子的变化具有较好的鲁棒性, 而 TSE 的位置估计误差随着吸

收因子的增大而增加。在四种方法中,本发明提出的 TLESE 的位置估计性能较优。而在图 4 (b) 中可以看出,USR、PLSE 以及 TSE 对于环境参数的估计误差是随着吸收因子的增大而增加,反观 TLESE,其环境传播参数的估计误差随着吸收因子的增加而减小。因此本发明提出的 TLESE 在不同吸收因子情况下对于环境参数的估计性能亦较好。

尽管本发明的内容已经通过上述优选实施例作了详细介绍,但应当认识到上述的描述不应被认为是对本发明的限制。在本领域技术人员阅读了上述内容后,对于本发明的多种修改和替代都将是显而易见的。因此,本发明的保护范围应由所附的权利要求来限定。

权 利 要 求 书

1. 一种水下无线传感网目标位置和环境传播参数的联合估计方法，其特征在于，包含以下步骤：

S1、根据声信号在水下的分层传播效应，构建基于斯涅尔定律和射线追踪定理的接收信号强度的测距模型；所述斯涅尔定律结合所述射线追踪定理获取第 i 个锚节点到目标节点的距离 d_i^t ：

$$d_i^t = -\left(ax_3^t + b\right) \frac{\theta^x - \theta^i}{a \cos \theta^x} \quad (1)$$

其中， a 表示梯度参数， b 表示声波在水面传播速度， θ^i 和 θ^x 分别表示第 i 个锚节点和目标节点的接收信号角度，它们的取值范围为 $[-\pi/2, \pi/2]$ ；根据所述目标节点的距离 d_i^t 构建接收信号强度的测距模型；

S2、通过多次一阶泰勒级数展开式构造以环境传播参数及目标位置为变量的目标函数；

S3、运用二分法通过对变量进行粗粒度估计；

S4、根据粗粒度估计的值进行线性展开并通过迭代再优化，进一步提升解的精度，得到目标位置的估计值：

$$\mathbf{x}_{k+1}^t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\mathbf{a}_i^t + d_i^t \frac{(\mathbf{x}_k^t - \mathbf{a}_i^t)^T}{\|\mathbf{x}_k^t - \mathbf{a}_i^t\|} \right) \quad (2)$$

其中， $\mathbf{x}_k^t$ 为第 k 次目标位置估计值， $\mathbf{a}_i^t$ 为 t 时刻第 i 个锚节点的位置， d_i^t 为第 i 个锚节点与目标节点间的距离， N 为水下部署的含有位置信息的浮标传感器节点的个数。

2. 如权利要求1所述的一种水下无线传感网目标位置和环境传播参数的联合估计方法，其特征在于，步骤 S1 所述根据声信号在水下的分层传播效应，构建基于斯涅尔定律的接收信号强度的测距模型，具体包含：

S11、若水下部署 N 个含有位置信息的浮标传感器节点，即锚节点以及一个目标节点；假设 t 时刻第 i 个锚节点的位置为 $\mathbf{a}_i^t = [a_{i1}^t, a_{i2}^t, a_{i3}^t]^T$ ，目标节点 t 时刻的

位置为 $\mathbf{x}^t = [x_1^t, x_2^t, x_3^t]^T$ ；假设所有节点都配有压力传感器，能精确知悉其自身的深度信息；根据声信号在水下的传播速度模型，可得：

$$C(z) = az + b \quad (3)$$

其中， a 表示梯度参数； z 表示水深； b 表示声波在水面传播速度； $C(z)$ 表示在水深为 z 时的声信号传播速度求解函数；

S12、根据斯涅尔定律，可得：

$$\frac{\cos \theta}{C(z)} = \frac{\cos \theta^i}{C(a_{i3}^t)} = \frac{\cos \theta^x}{C(x_3^t)} = k \quad (4)$$

其中， θ^i 和 θ^x 分别表示第 i 个锚节点和目标节点的接收信号角度，它们的取值范围为 $[-\pi/2, \pi/2]$ ； k 表示常数；

S13、基于所述公式（1）获取锚节点和目标间的距离信息，通过路径损耗模型得到水下环境中基于信号强度的测距模型，为：

$$P_{ri}^t = P_s^t - PL(d_0) - 10\alpha^t \log_{10} \frac{d_i^t}{d_0} - \alpha^f d_i^t + \gamma_i^t \quad (5)$$

其中， P_{ri}^t 表示第 i 个锚节点在 t 时刻收到的目标节点的功率； P_s^t 表示目标节点在 t 时刻的发射功率； $PL(d_0)$ 表示参考距离为 d_0 时的损失值， d_0 通常为 1 m； α^t 表示信号的环境传播参数； d_i^t 为第 i 个锚节点与目标节点间的距离； γ_i^t 则表示对于第 i 个锚节点在 t 时刻的信号衰减噪声，假设每一时刻的噪声方差相等，若其服从均值为零，方差为 σ_i^2 的高斯分布，则可表示为 $\gamma_i^t \sim G(0, \sigma_i^2)$ ； α^f 表示信号的吸收因子，可根据索普定理根据发射频率 f 获取，即：

$$\alpha^f = 0.11 \frac{f^2}{1 + f^2} + 44 \frac{f^2}{4100 + f^2} + 2.75 \times 10^{-4} f^2 + 0.003 \quad (6)。$$

3. 如权利要求2所述的一种水下无线传感网目标位置和环境传播参数的联合估计方法，其特征在于，步骤 S2 所述通过多次一阶泰勒级数展开式构造以环境传播参数及目标位置为变量的目标函数，具体包含：

S21、假设 $c_{\max} = \alpha^f d_{i_{\max}}^t$ ，其中 $d_{i_{\max}}^t$ 为锚节点和目标最大的距离值，根据欧拉几何定理及信号处理原理，当水下监控区域面积确定时，信号的吸收效应导致的

最大误差 $c_{\max}$ 是可以确定的；

S22、根据 S13 所得表达式 (5) 进行移项变换，并且平方各锚节点与目标节点在 t 时刻的距离可得：

$$\left(d_i^t\right)^2 = d_0^2 10^{\frac{\hat{P}_0^t - P_{ri}^t - c_{\max} + \gamma_i^t}{5\alpha^t}} \quad (7)$$

其中， d_i^t 为第 i 个锚节点与目标节点间的距离， γ_i^t 表示对于第 i 个锚节点在 t 时刻的信号衰减噪声， d_0 为参考距离，通常为 1 m， P_{ri}^t 表示第 i 个锚节点在 t 时刻收到的目标节点的功率， α 表示信号的环境传播参数；

S23、利用指数函数泰勒一阶展开式 $a^x = 1 + x \ln a$ ，对 $10^{\frac{\gamma_i^t}{5\alpha^t}}$ 进行泰勒一阶展开，当参考距离 $d_0 = 1$ m 时，S22 中式 (7) 可表示为：

$$\left(d_i^t\right)^2 \approx 10^{\frac{\hat{P}_0^t - P_{ri}^t - c_{\max}}{5\alpha^t}} \cdot \left(1 + \frac{\ln 10}{5\alpha^t} \gamma_i^t\right) \quad (8)$$

其中， d_i^t 为第 i 个锚节点与目标节点间的距离， γ_i^t 表示对于第 i 个锚节点在 t 时刻的信号衰减噪声， P_{ri}^t 表示第 i 个锚节点在 t 时刻收到的目标节点的功率， α 表示信号的环境传播参数；

S24、引入参数 α_0^t ，使得 $\alpha^t = \alpha_0^t \left(1 + (\alpha^t - \alpha_0^t) / \alpha_0^t\right)$ ，且 $\tilde{\delta} \triangleq (\alpha^t - \alpha_0^t) / \alpha_0^t$ ，其中 $\alpha_0^t \neq 0$ ；当 $\tilde{\delta}$ 较小时， α_0^t 趋近于 α^t ；则 S23 中式 (8) 可转化为：

$$\left(d_i^t\right)^2 \approx 10^{\frac{\hat{P}_0^t - P_{ri}^t - c_{\max}}{5\alpha_0^t(1+\tilde{\delta})}} \cdot \left(1 + \frac{\ln 10}{5\alpha^t} \gamma_i^t\right) \quad (9)$$

其中， d_i^t 为第 i 个锚节点与目标节点间的距离， γ_i^t 表示对于第 i 个锚节点在 t 时刻的信号衰减噪声， P_{ri}^t 表示第 i 个锚节点在 t 时刻收到的目标节点的功率， α 表示信号的环境传播参数；

S25、假设 $|\tilde{\delta}|$ 较小，即 $1/(1+\tilde{\delta}) \approx 1 - \tilde{\delta}$ ，对 $1/(1+\tilde{\delta})$ 进行泰勒一阶展开，则：

$$(d_i^t)^2 \approx \rho_i^{(1-\delta)} \cdot \left(1 + \frac{\ln 10}{5\alpha^t} \gamma_i^t\right) \quad (10)$$

其中, $\rho_i = 10^{\frac{\hat{P}_0^t - P_{ti}^t - c_{\max}}{5\alpha_0^t}}$, d_i^t 为第 i 个锚节点与目标节点间的距离, γ_i^t 表示对于第 i 个锚节点在 t 时刻的信号衰减噪声, α 表示信号的环境传播参数;

S26、然而 S25 中式 (10) 仍是非线性, 且较难求解, 故假设 $|\tilde{\delta} \ln \rho_i|$ 较小, 利用指数函数的泰勒一阶展开式, 对 $\rho_i^{-\delta}$ 进行泰勒一阶展开, 则可进一步转化为:

$$(d_i^t)^2 \approx \rho_i (1 - \tilde{\delta} \ln \rho_i) \cdot \left(1 + \frac{\ln 10}{5\alpha^t} \gamma_i^t\right) \quad (11)$$

其中, d_i^t 为第 i 个锚节点与目标节点间的距离, γ_i^t 表示对于第 i 个锚节点在 t 时刻的信号衰减噪声, α 表示信号的环境传播参数, $\tilde{\delta}$ 如 S24 所示;

S27、在求得距离平方后, 构建基于权值的最小二乘框架:

$$\arg \min_{\mathbf{x}^t} \sum_{i=1}^N \omega_i \left[\|\mathbf{x}^t - \mathbf{a}_i^t\|^2 - (d_i^t)^2 \right]^2 \quad (12)$$

其中, $\omega_i = 1 - d_i^t / \sum_{i=1}^N d_i^t$, $\|\cdot\|$ 为二阶范数, d_i^t 为第 i 个锚节点与目标节点间的距离, $\mathbf{a}_i^t$ 为 t 时刻第 i 个锚节点的位置;

S28、令 $\theta^t = [\chi^t, x_1^t, x_2^t, x_3^t, \tilde{\delta}^t]^T$, 展开 S27 中式 (12), 可得:

$$\begin{aligned} J(\theta^t) &= \min_{\theta^t} \|w(A\theta^t - B)\|^2 \\ s.t. (\theta^t)^T D \theta^t + 2f^T \theta^t &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $w = \text{diag}([\omega_1^2, \dots, \omega_N^2])$,

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -2(\mathbf{a}_1^t)^T & \rho_1 \ln \rho_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & -2(\mathbf{a}_N^t)^T & \rho_N \ln \rho_N \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \rho_1 - \|\mathbf{a}_1^t\|^2 \\ \vdots \\ \rho_N - \|\mathbf{a}_N^t\|^2 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{0}_{1 \times k} & 0 \\ 0 & \mathbf{I}_k & 0 \\ 0 & \mathbf{0}_{1 \times k} & 0 \end{bmatrix}, f = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \\ \mathbf{0}_{(k+1) \times 1} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$\mathbf{I}$ 和 $\mathbf{0}$ 分别表示单位矩阵和零矩阵。

4. 如权利要求3所述的一种水下无线传感网目标位置和环境传播参数的联合估计

方法，其特征在于，步骤 S3 所述运用二分法通过对变量进行粗粒度估计，具体包含：

S31、引入乘子 λ ，在每一时刻根据式 (14) 对其值进行求解，即：

$$\lambda = \left((A^T \omega A + \lambda D)^{-1} (A^T \omega B - \lambda f) \right)^T D \left((A^T \omega A + \lambda D)^{-1} (A^T \omega B - \lambda f) \right) \quad (15) ;$$

S32、根据式 (15) 求解每一时刻中最优的乘子 λ^* ，即：

$$\lambda^* = \max \left[-\text{diag} \left(A^T \omega A \right), \lambda \right] \quad (16) ;$$

S33、根据得到的最优乘子 λ^* ，可算出粗粒度估计的变量值，即：

$$\theta' = (A^T \omega A + \lambda^* D)^{-1} (A^T \omega B - \lambda^* f) \quad (17) ;$$

S34、求得变量 θ' 后，环境传播参数的估计值即为 $\hat{\alpha}' = \alpha'_0 (1 + \theta' |_{5,1})$ ，其中 $\theta' |_{5,1}$ 为待求变量 θ' 的第 5 行第 1 列；为进一步优化路径损耗因子的估计值，利用得出的位置信息，即 $\theta' |_{2,4,1}$ 来求解路径损耗因子的平均值，即：

$$\bar{\alpha}' = \frac{\sum_{i=1}^N \hat{P}_0^t - P_{ri}^t - c_{\max}}{10 \log_{10} \prod_{i=1}^N \hat{d}_i^t} \quad (18)$$

其中， $\hat{d}_i^t$ 为未知节点估计位置信息； $\theta' |_{2,4,1}$ 到锚节点间的估计距离。

5. 如权利要求 4 所述的一种水下无线传感网目标位置和环境传播参数的联合估计方法，其特征在于，步骤 S4 所述根据粗粒度估计的值进行线性展开并通过迭代再优化，进一步提升解的精度，具体包含：

S41、根据 S34 得到的粗粒度目标估计值 $\hat{\mathbf{x}}' = \theta' |_{2,4,1}$ 作为初始值，即 $\hat{\mathbf{x}}'_0$ ；根据泰勒级数一阶展开在第 κ 次对估计值进行线性化处理，可得：

$$S(\mathbf{x}^t | \mathbf{x}_\kappa^t) = \sum_{i=1}^N \left(\|\mathbf{x}^t - \mathbf{a}_i^t\|^2 - 2d_i^t \|\mathbf{x}_\kappa^t - \mathbf{a}_i^t\| \right) - 2 \sum_{i=1}^N d_i^t \frac{(\mathbf{x}_\kappa^t - \mathbf{a}_i^t)^T}{\|\mathbf{x}_\kappa^t - \mathbf{a}_i^t\|} (\mathbf{x}^t - \mathbf{x}_\kappa^t) \quad (19) ;$$

S42、将 S41 式 (19) 对 $\mathbf{x}'$ 进行求导并化简可得第 $\kappa+1$ 次的目标位置估计值为所述的公式 (2)。