

文章编号: 1002-0446(2003)01-0022-05

AUV 波阵面水声精确定位*

卢 峰 陈孝楨

(南京大学声学研究所, 近代声学国家重点实验室 南京 210093)

摘 要: 本文提出在长基线自治水下机器人导航定位系统中用波阵面进行定位的方法, 即用射线理论求出波阵面, 用波阵面相交求出目标位置. 模拟计算表明, 对于深海导航定位, 利用这种方法可以较大地提高定位精度.

关键词: AUV; 导航; 定位

中图分类号: TP24 文献标识码: B

ACCURATE AUV UNDERWATER POSITIONING BY WAVE FRONT INTERSECTION

LU Feng CHEN Xiao-zhen

(Institute of Acoustics, Nanjing University, Modern Acoustic State Key Laboratory, Nanjing 210093)

Abstract: A wave front intersection positioning method used for long-base line AUV navigation system is presented. The principles, numerical algorithm, solving equation are analyzed. The simulation results show by this method the accuracy of long range positioning can be improved greatly.

Keywords: autonomous underwater vehicle, navigation, positioning

1 引言(Introduction)

自治水下机器人(Autonomous Underwater Vehicles, 简称 AUV)在工作期间, 需要实时、精确给出它的位置及航迹, 并在必要时应用遥控指令对它的航行和作业进行人工干预, 以确保其航行安全和顺利完成预定作业. 这就需要利用水下导航定位系统, 其中远程深海导航定位通常是在长基线定位系统的基础上构成的. AUV 导航定位系统的声学部分由与母船相连的拖体、AUV 上的询问发射器(Transducer)和固定在海底的三个或三个以上应答器(Transponder)组成^[1]. 如图 1. 母船拖体询问发射器向各海底应答器发出询问信号, 海底应答器向拖体发回应答信号, 可测得拖体和海底应答器之间的信号传播时间 t_a, t_b, t_c . 一段时间后, AUV 询问发射器向各海底应答器发射询问信号, 各海底应答器再向拖体发回应答信号, 询问应答的路径为 AUV—海底应答器—拖体, 这之间的传播时间分别为 t'_a, t'_b, t'_c . 假设拖体位置不变, 由图 1 可见

$$t'_a = t_a + t_{as}$$

$$t'_b = t_b + t_{bs} \quad (1)$$

$$t'_c = t_c + t_{cs}$$

由于 $t'_a, t'_b, t'_c, t_a, t_b, t_c$ 这六个量是母船导航定位系统测量的传播时间, 带入式中就可确定 AUV 和海底应答器之间声信号的传播时间 t_{as}, t_{bs}, t_{cs} , 由于应答器的位置已经预先测量, 它们的经纬坐标已知, 由此可实时定出 AUV 在大地经纬坐标上的位置.

目前的长基线水声定位系统往往假设声音沿直线传播, 应用球面或双曲面交会法确定目标位置. 以球面交会法为例, 若水中声速为 c , 则认为 AUV 和海底应答器之间的距离分别为 $ct_{as}, ct_{bs}, ct_{cs}$, 设机器人的位置为 (X, Y, Z) , 海底应答器的位置分别为 $(x_i, y_i, z_i), i = a, b, c$ 若忽略拖体的运动, 定位方程为

$$(X - x_i)^2 + (Y - y_i)^2 + (Z - z_i)^2 = r_i^2 = (ct_{is})^2 \quad (2)$$
$$i = a, b, c$$

上面的方程组中每一个方程决定一个球面, 三个球面的交会点即 AUV 的位置.

可见传统长基线系统定位的基础就是声音沿直

* 收稿日期: 2002-08-13

线传播, 声速是常数, 但实际上由于水中声速随空间变化, 声音水下传播路径是弯曲的, 所以对结果需要进行修正. 对此提出了许多方法: 文献[2]中介绍了一种用于声线修正的迭代法, 文献[3]论述了平均声速法、多项式近似法和迭代逼近法, 等等. 但这些修正的基础还是球面或双曲面交会法, 只是等效的直线传播声速的表示更精确. 本文提出的方法是利用射线理论求出波阵面, 直接利用波阵面相交求出目标位置.

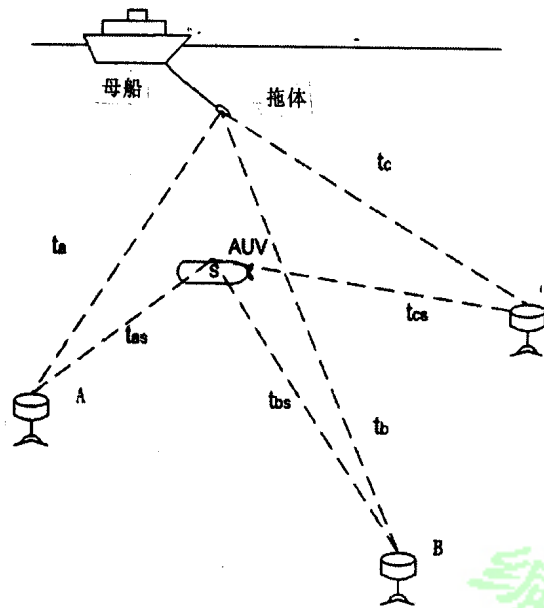


图 1 AUV 导航定位系统示意图

Fig. 1 Illustration of AUV navigation

2 关键技术研究(Key technology research)

2.1 波阵面定位的原理

由射线方程所决定的波场为: $\psi = A(x, y, z)e^{ik_0 W(x, y, z) - i\omega t}$, 其中 A 表示波场幅值, $W = k_0 W(x, y, z) - \omega t$ 表示相位. 任意时刻 t_0 , 具有相同相位 \mathcal{Q} 的质点的轨迹形成一个曲面 $W(x, y, z) = (\omega t_0 - \mathcal{Q})/k_0$, $W(x, y, z)$, 表示等相面, 射线的方向与等相面相垂直. 假设声源起始振动相位为 \mathcal{Q} , 起始时刻 $t = 0$, 计算经过相同时间 t_0 不同出射角度的声线到达的位置, 由这些位置组成的包络即表示 t_0 时刻的波阵面, 又称为波前.

对于长基线定位问题, 如果三个应答器 S_1, S_2 和 S_3 的坐标已知, AUV 发出的信号分别经过 t_1, t_2 和 t_3 时间到达应答器, 由费马原理和互易原理, 从 AUV 发射的声信号传播到应答器的时间和应答器发射的声信号传播到 AUV 的时间是相等的, 计算各应答器发射声波 t_1, t_2 和 t_3 时间后相应的波阵面 W_1, W_2 和

W_3, W_1 和 W_2 交于曲线 l_{12}, W_2 和 W_3 交于曲线 l_{13}, l_{12} 和 l_{13} 的交点 D 就是 AUV 的位置(见图 2).

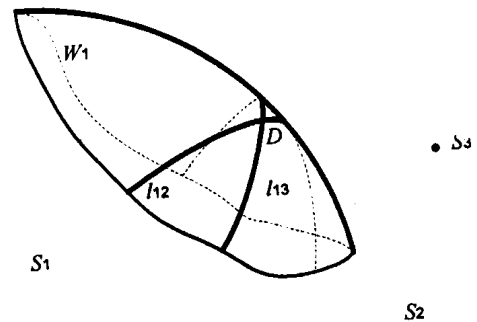


图 2 三维空间定位的示意图

Fig. 2 Illustration of 3-D space positioning

用同样的方法也可以定出拖体的位置.

本文计算波阵面采用递归射线算法(RRA: Recursive Ray Algorithm)^[5,6], 这个算法比起常用的常微分方程射线算法较为简单、快速, 精度相当.

2.2 波阵面定位的算法

在水声定位中, 通常可以假设声速只和深度 z 有关, 则波阵面绕经声源的垂直线成柱面对称, 只要计算波阵面母线, 绕垂直线旋转即可得到完整的三维波阵面.

假设定位系统由三个应答器阵元组成, 如图 3 所示, 以海面为 z 轴坐标零点, 向下为正方向, $x-y$ 平面为水平面, 阵元的坐标分别为 $S_1(0, 0, z_1), S_2(x_2, 0, z_2)$ 和 $S_3(x_3, y_3, z_3)$. 若已知声信号从阵元传播到 AUV 的时间分别是 t_1, t_2 和 t_3 , 分别计算波阵面母线 $(R_{j_i}, z_{j_i}), j_i$ 表示 S_i 在时间 t_i 时波阵面母线上的第 j 个点, R_{j_i} 是母线到应答器所在垂直线的水平距离, 波阵面 z_{j_i} 和平面的交线是以 R_{j_i} 为半径的圆. 由于各母线的 z_{j_i} 是相互独立的, 取 z_{j_i} 相互重叠的部分, 平均分为 M 份, 并利用新的 z_j 对原母线进行插值得到新的 R_{j_i} , 这时每一个 z_j 对应三个 R_{j_i} 值, 由此可求出波阵面在 z_j 深度的交点. 由于不同深度声传播的水平距离不同, 可能在某些深度波阵面没有交点, 所以要预先删除这些深度 z_j , 这可利用三角形成立的条件来判断, 如图 3 所示.

若 $R_1 + R_2 < x_2$ 或 $|R_1 - R_2| > x_2$ 则相应的波阵面不会相交. 之后可利用两个方程组

$$\begin{cases} x_{12j}^2 + y_{12j}^2 = R_{j_1}^2 \\ (x_{12j} - x_2) + y_{12j}^2 = R_{j_2}^2 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} x_{13j}^2 + y_{13j}^2 = R_{j_1}^2 \\ (x_{13j} - x_3) + (y_{13j} - y_3)^2 = R_{j_3}^2 \end{cases} \quad (4)$$

计算波阵面 W_1 和 W_2 在 z_j 深度的交点 $(x_{12j}, y_{12j})_{1,2}$, W_2 和 W_3 的交点 $(x_{13j}, y_{13j})_{1,2}$ (如图 4), 各有两组解.

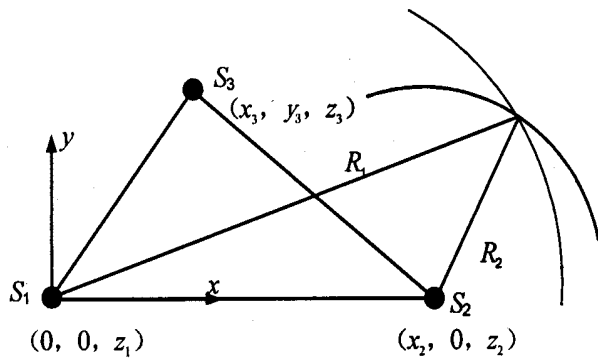


图 3 阵元示意图

Fig. 3 Illustration of the transponders configure

这些交点在 x - y 平面上的投影如图 5(a) 所示, 它们组成了四段曲线, 分别相对于直线 S_1S_2 和 S_1S_3 对称, 为了删除多余的两条曲线, 可用图 5(b) 所示的条件判断曲线所属的区域, 相交的曲线必属于同一区域. 对于确定相交的曲线 $l_{12}(x_{12j}, y_{12j}; z_j)$ 和 $l_{13}(x_{13j}, y_{13j}, z_j)$, 利用插值和拟合的方法可求出交点 D , 即定

位点.

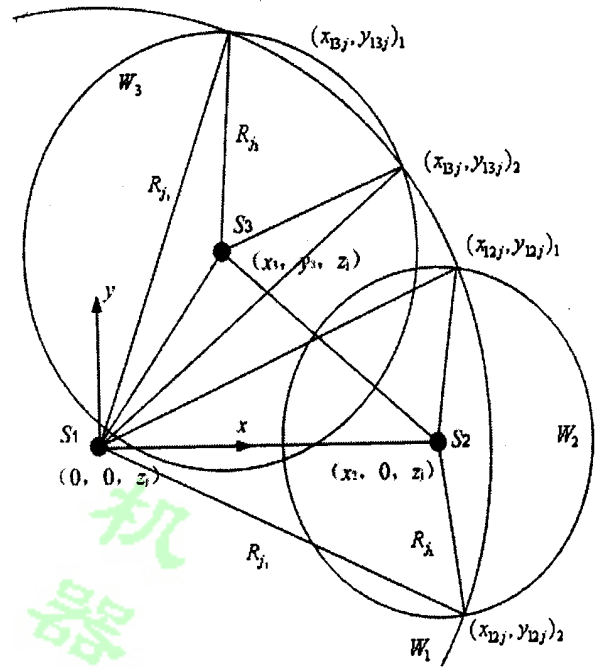


图 4 用母线求解波阵面的交点(顶视图)

Fig. 4 Method of finding the crosspoint by the generatrix, top view

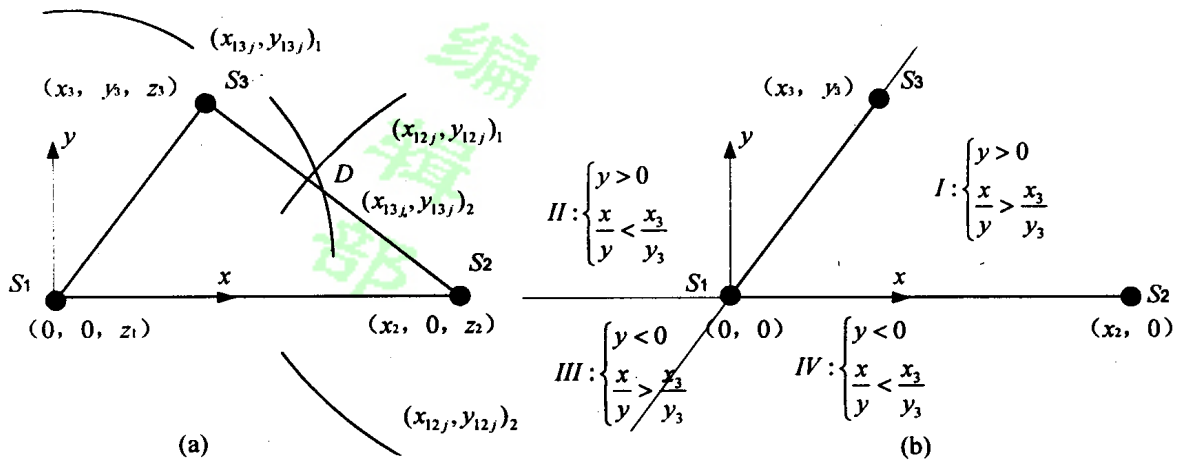


图 5 交点的求解

Fig. 5 The solution of crosspoint

3 模拟计算结果(simulation result)

以深海 AUV 定位为例, 假定拖体在一个询问周期内没有移动, 进行了模拟计算. 应答器阵元分布如图 3 所示, 坐标为 $S_1(0, 0, 4900)$, $S_2(1200, 0, 4900)$ 和 $S_3(600, 600, 4900)$, AUV 在 5100 米深度活动, 拖体在 1500 米处. 声速分布采用 Munk

提出的典则公式^[4], 声道轴在水下 1300m 处, 声速极小值为 1500m/s, 波导宽度为 1300m, 偏离最小值的量级 ϵ 为 0.0137(如图 6). 给定 AUV 的某一位置, 利用常微分方程的射线算法, 求得阵元到 AUV 之间传播时间 t_1 、 t_2 和 t_3 , 设为实际的传播时间.

为了比较, 利用波阵面定位的方法求出 AUV

位置, 再利用平均声速法求出 AUV 的位置. 从 AUV 在应答器阵三角形之内逐渐到与应答器阵水

平距离较远处, 计算了 11 个点, 结果如表 1, 两种方法水平位置的定位误差曲线如图 7.

表 1 波阵面定位与平均声速法 AUV 定位计算结果的比较

Table 1 Simulation results comparison of wave front method and average sound speed method

情况	AUV 位置(m)			平均声速法结果(m)			波阵面定位法结果(m)			平均声速法误差(m)	波阵面法误差(m)
	x	y	z	x_p	y_p	z_p	x_b	y_b	z_b	$\sqrt{(x_p-x)^2+(y_p-y)^2}$	$\sqrt{(x_b-x)^2+(y_b-y)^2}$
1	600	520	5100	600	519.7	5098.2	600	519.9	5100	0.3	0.1
2	1000	520	5100	999.3	519.7	5098.9	999.6	519.8	5100.5	0.7616	0.4472
3	2000	520	5100	1997.5	519.5	5107.5	1998.3	519.7	5107.1	0.7616	1.7263
4	3000	520	5100	2994.9	519.5	5130.9	2997.4	519.6	5118.3	5.1245	2.631
5	4000	520	5100	3991.8	519.2	5168.0	3995.5	520.2	5116.4	8.2389	4.5044
6	5000	520	5100	4987.5	519.3	5224.3	4995.4	520.7	5097.8	12.52	4.653
7	6000	520	5100	5980.7	519.1	5315.7	5996.7	520.1	5113.4	19.321	3.3015
8	7000	520	5100	6972.8	518.8	5415.6	6997.0	520.5	5154.8	27.226	3.0414
9	8000	520	5100	7961.7	518.0	5546.5	7997.2	519.8	5159.0	38.352	2.8071
10	9000	520	5100	8947.9	517.4	5696.8	8997.4	520.2	5163.8	52.165	2.6173
11	10000	520	5100	9932.8	519.5	5839.8	9996.0	522.8	5142.3	66.202	4.8826

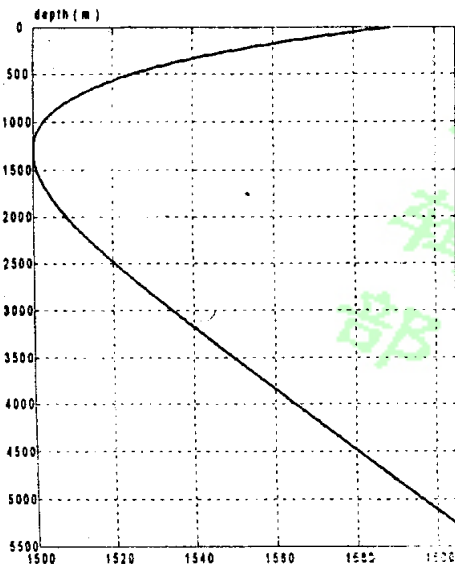


图 6 声速分布

Fig. 6 Sound-speed profile

图 7 的横坐标表示从 AUV 到阵列中心的水平距离. 从计算的结果可以看出, 波阵面定位的精度比平均声速法要高, 当 AUV 距阵列较近时, 两种方法定位精度相差还不大, 当 AUV 距基阵较远时, 平均声速法的定位误差大幅增加, 而波阵面法的定位误差并没有显著增加, 保持在 5 米以内, 利用波阵面定

位可以较大地提高定位精度.

从原理上说, 波阵面定位是没有误差的. 在上述模拟计算中, 波阵面定位的误差来源于算法中插值与拟合计算引入的数值计算误差. 可以估计, 海中实际定位与模拟计算不会相差较大.

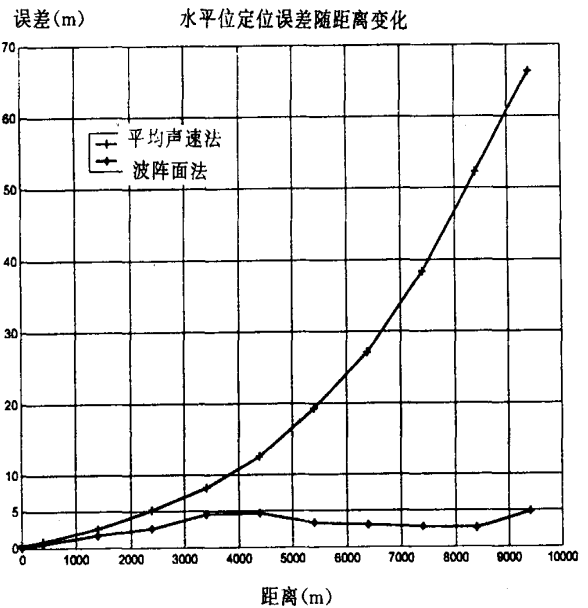


图 7 波阵面定位与平均声速法 AUV 模拟定位误差

Fig. 7 Simulation positioning error of wave front method and average sound speed method