第17卷 第5期
1992 年 9 月

声 学 学 报
ACTA ACUSTICA

Vol. 17, No. 5
Sept., 1992

短基线平面阵形双曲面定位系统的声线修正

李迎春　　吴德明
(北京大学无线电系,北京 100871)
1991年3月11日收到

摘要　本文提出了一种适用于短基线平面阵形双曲面定位系统的声线修正方法,即用差分方程求迭代量(修正量)的一种迭代方法. 用此方法所作的模拟计算表明,在相同的水文条件和阵形情况下,修正后的定位误差可由未经修正时的数米到数十米降至0.5米以下. 此法原则上可用于其它各种阵形.

Correction of located points in a hyperbolical locating system with a small plane array

LI Yingchun and WU Deming
(Department of Radioelectronics, Peking University)
Received March 11, 1991

Abstract In this paper a method used for correcting the coordinates of an underwater moving target obtained by a hyperbolic locating system with a small plane array when the sound velocity varies with depth is reported. This is an iteration method useing a series of differential difference equations to determine iterative values. The results calculated by this method show that under the same condition, the location error is about several meters or tens of meters without the correction and less than 0.5m with the correction. The method can apply to various types of arrays

一、引　言

水下定位系统中由于水下垂直方向存在声速梯度，使声线发生弯曲，造成很大的定位误差. 在某些水下活动目标跟踪定位系统中[1,2],由于定位精度要求高,因此,必须对测量结果进行声线修正,以提高系统的定位精度. 一些单位在这方面做了一些工作,他们常用一个近似函数来逼近声速分布或声线形状. 这种近似在水下声速分布不太复杂时有一定效果，但在复杂水文条件下精度受到限制.

过去我们对长基线直角坐标阵形双曲面定位系统曾作过声线修正[3]. 其基本思想是将水下声速分布近似为分层等梯度分布，并由此用一种迭代方法求出合理的声线和定位点. 此种方法可以大大提高定位精度,在复杂的水文条件下仍可有较高的计算速度.但将此法应用到短基线平面阵型时遇到一些困难,为了解决这些困难，我们采用了几种内插法求出合理的声线，

并采用差分方程的方法求解迭代的修正量，得到了较理想的结果，能够满足定位系统的精度要求.

二、双曲面定位系统的基本原理[1]

设某定位系统由四个阵元组成，其阵形如图所示. 四个阵元的坐标分别为：O 点 (x_0, y_0, z_0)；A 点 (x_1, y_1, z_1)；B 点 (x_2, y_2, z_2)；C 点 (x_3, y_3, z_3).

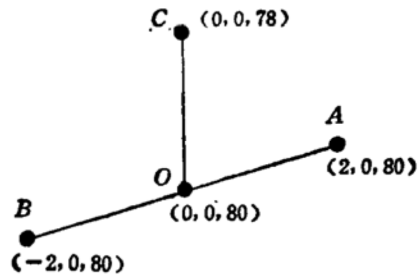

图 1　定位系统阵形图

若水下声速为常量 C，设声波从目标声源到阵元 O、A、B、C 的传播时间分别为 t_0、t_1、t_2 和 t_3，时间差为 $t_{10} = t_1 - t_0$，$t_{20} = t_2 - t_0$，$t_{30} = t_3 - t_0$. 则目标坐标 (x, y, z) 应满足的方程为：

$$\begin{cases} \sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2+(z-z_1)^2} - \sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2} = ct_{10} \\ \sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2+(z-z_2)^2} \ \sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2} = ct_{20} \\ \sqrt{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2+(z-z_3)^2} - \sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2} = ct_{30} \end{cases} \tag{1}$$

由此联立方程可解出目标坐标(x, y, z). 因此，如果阵元坐标、声速和三个时差能够测出，即可实现目标定位.

三、双曲面定位系统的声线修正方法

1. 修正原理

上述定位原理即方程(1)是将水下声速看成均匀分布，即认为声波是直线传播时得到的. 而实际上水下声速分布常常是不均匀的，因而使声线发生弯曲，采用分层介质模型模拟水下声速分布比较接近实际情况，因而可有较高的精度. 将声速分布近似成 n 层等声速梯度分布，每层声速为：

$$C = C_i - g_i(z - z_i) \tag{2}$$

其中 z_i 为每层上界面的垂直坐标；

C_i 为 z_i 处的声速；

g_i 为该层的声速梯度(常量).

在声速分布不均匀的条件下，方程(1)不成立. 设目标声源坐标为 (x, y, z)，在声速分布和阵元坐标已知的条件下，由射线声学理论可以求出声波由声源到达每个阵元的传播时间 t'_0，

t'_1, t'_2 和 t'_3 及时间差 t'_{10}, t'_{20} 和 t'_{30}, 其中

$$\begin{cases} t'_{10} = t'_1 - t'_0 \\ t'_{20} = t'_2 - t'_0 \\ t'_{30} = t'_3 - t'_0 \end{cases} \tag{3}$$

将系统测出的三个时间差 t_{10}、t_{20}、t_{30} 代入(3)式左端则可得到声源坐标所满足的方程. 并由此方程(即(3)式)可解出声源坐标,从而实现了对目标的定位.

但由于(3)式较繁,很难求出它的解析解. 因此,为了便于计算,本文介绍了一种逐步逼近法在计算机上作数值计算. 这种方法基于上述原理,但简便易行,计算速度快,且有较高精度.

2. 数值解法

这里用的数值方法是在计算机上用一种迭代法求解,其具体步骤如下:

(1) 首先把水下声速分布近似成垂直多层等梯度分布;

(2) 在声源方位坐标的先验数值(声源大致方位应为已知)基础上, 在其附近任意给定声源坐标初值 (x^0, y^0, z^0), 用迭代法(或内插法)求出声线的初始出射角 θ_i, 再由水声原理求出此声线的传播路径;

(3) 由上面求出的传播路径分别求出声波由声源到各阵元的传播时间及时间差 t'_{10}, t'_{20}, t'_{30};

(4) 将计算的时间差与定位系统实测的时间差 t_{10}、t_{20}、t_{30} 进行比较,若达到误差要求, 则设定值 (x^0, y^0, z^0) 即为声源坐标.

(5) 如不满足误差要求,则根据计算的时间差与实测的时间差之差值 Δt_{10}, Δt_{20}, Δt_{30} 对设定初值进行修正. 其中

$$\begin{cases} \Delta t_{10} = t_{10} - t'_{10} \\ \Delta t_{20} = t_{20} - t'_{20} \\ \Delta t_{30} = t_{30} - t'_{30} \end{cases} \tag{4}$$

(6) 求解修正量 Δx^0、Δy^0、Δz^0

当利用计算和实测时间差的差对初始设定坐标进行修正时,修正量 Δx^0、Δy^0、Δz^0 可用各种方法求出. 对于短基线平面阵形的定位系统, 长基线定位系统的简单修正方法[3] 不能给出恰当的修正量. 因此我们采用下列差分方程来求解修正量:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial t'_{10}}{\partial x}\Delta x + \dfrac{\partial t'_{10}}{\partial y}\Delta y + \dfrac{\partial t'_{10}}{\partial z}\Delta z = \Delta t_{10} \\ \dfrac{\partial t'_{20}}{\partial x}\Delta x + \dfrac{\partial t'_{20}}{\partial y}\Delta y + \dfrac{\partial t'_{20}}{\partial z}\Delta z = \Delta t_{20} \\ \dfrac{\partial t'_{30}}{\partial x}\Delta x + \dfrac{\partial t'_{30}}{\partial y}\Delta y + \dfrac{\partial t'_{30}}{\partial z}\Delta z = \Delta t_{30} \end{cases} \tag{5}$$

由(5)式解出的 Δx、Δy、Δz 作为修正量对初始设定声源坐标进行修正, 使修正后的声源坐标新的设定值为:

$$\begin{cases} x' = x^0 + \Delta x^0 \\ y' = y^0 + \Delta y^0 \\ z' = z^0 + \Delta z^0 \end{cases} \tag{6}$$

其中 Δx^0、Δy^0、Δz^0 三个修正量分别由 Δx、Δy、Δz 代替．

求出新的设定值以后，重复步骤(2)—(6)，直到 Δt_{10}，Δt_{20}，Δt_{30} 达到给定的误差要求，则最后设定的坐标值 $x^{(n)}$，$y^{(n)}$，$z^{(n)}$ 即为所求目标的坐标．

四、模拟计算结果及分析

由上面介绍的计算方法对某一定位系统作了模拟计算．该定位系统的阵元分布如图 1 所示．首先给定目标声源坐标为 x_r，y_r，z_r，并认为它们是目标的真实坐标，在一定的声速分布条件下求出声波从该位置到各阵元的传播时间 t_0，t_1，t_2，t_3 及时间差：

$$\begin{cases} t_{10} = t_1 - t_0 \\ t_{20} = t_2 - t_0 \\ t_{30} = t_3 - t_0 \end{cases} \tag{7}$$

假定该时间差即为定位系统实测的时间差，并用上述数值解法反过来推算出目标的位置．如果计算没有误差，则推算出的目标位置应与给定的坐标值相同．由于有计算误差，推算出的目标坐标可能成为 x_c，y_c，z_c． 它们是经过声线修正后定位系统定出的目标位置．然后仍用 t_{10}，t_{20}，t_{30} 作为实测时间差，但不考虑声线修正(即认为水下声速为均匀分布，声波直线传播)，再

表 1 修正和未修正时目标定位结果的比较

	目标位置的真实坐标(m)			经修正后的坐标(m)			未经修正的定位坐标(m)			修正后定位误差 σ_c(m)	未修正的定位误差 σ_{Nc}(m)
	x_r	y_r	z_r	x_c	y_c	z_c	x_n	y_n	z_n		
I	100	100	70	100.07	100.01	70	101.11	101.11	66.68	.07	3.672
	120	120	70	119.99	120.02	69.99	121.38	121.38	65.1	.024	6.274
	200	120	65	199.91	120.04	64.99	207.92	124.72	55.2	.098	13.455
II	0	250	65	0	249.98	64.99	0	250.62	56.63	.022	8.392
	20	240	65	20.01	240.08	65	20	239.99	57.2	.08	7.8
	50	230	65	50.01	229.98	64.99	50.04	230.19	57.48	.037	7.522
	70	220	65	70.04	219.98	64.99	70.12	220.38	57.76	.045	7.25
	100	220	65	100.04	219.99	64.99	99.26	218.32	57.31	.042	7.906
	100	240	65	100.06	240	64.99	100.29	240.71	55.81	.06	9.221
	130	240	65	130.02	240.02	65	127.45	235.28	55.46	.028	10.944
	200	100	65	200.02	100.11	64.99	212.81	106.36	56.97	.112	16.402
	210	90	65	210.07	89.93	65	228.28	97.76	56.11	.098	21.757
	210	100	65	210.4	100.24	65	224.89	107.04	56.17	.466	18.688
	210	60	65	209.95	60.05	65	249.74	71.18	54.73	.07	42.54
	100	100	65	100.03	100.03	64.99	101.46	101.46	62.06	.043	3.592
*	100	100	65	100.03	100.03	64.99	99.96	99.97	65.62	.043	.622

注：1．情况 I：声速梯度 $G_{max} = 0.496$(m/s)/m；情况 II：$G_{max} = 0.40$(m/s)/m．

2．情况＊：σ_c 是 $G = 0.40$(m/s)/m 时修正后的误差；σ_n 是测量梯度误差为 0.01(m/s)/m 时修正后的定位误差．

3．计算条件：阵元坐标，0(0，0，80)，1(2，0，80)，3(−2，0，80)，4(0，0，78)，声速 $c = 1480$m/s．

反推出目标的坐标，设为 x_n，y_n，z_n。计算的部分结果如表 1 所示。表中的定位误差分别定义为：

修正后的定位误差：

$$\sigma_c = \sqrt{(x_c - x_r)^2 + (y_c - y_r)^2 + (z_c - z_r)^2} \tag{8}$$

未作修正的定位误差：

$$\sigma_{NC} = \sqrt{(x_n - x_r)^2 + (y_n - y_r)^2 + (z_n - z_r)^2} \tag{9}$$

由表中数据可以看出，在同样条件下，经修正后计算结果的均方根误差 σ_c 均小于 0.5m，绝大多数小于 0.1m，而不经声线修正计算结果的均方根误差 σ_{NC} 均在数米以上，甚至达数十米.（此结果未考虑各参量测试误差引起的定位误差）[4]. 由此可知，非均匀声速分布条件下的水下定位系统必须进行声线修正，以提高定位精度. 计算结果也表明，此修正方法精度高，适用范围广，计算速度也较快，可以用于各种水下定位系统.

参 考 文 献

[1] "圣克洛伊克司三度空间水下跟踪靶场", AD611070, Dec, 12, (1964).

[2] D. T. Barry and J. M. Formwalt, "Survey of underwater Missile Tracking Instrumentation", *Proc of IRE*, **47**(1959), 970.

[3] 吴德明,"一种用于声线修正的迭代法",声学学报, **17**(1992), No. 2, 104—110.

[4] 王仁乾,"双曲面定位系统的误分析",声学学报,待发表.