不同布阵方式下球面交汇定位系统性能分析

李 嶷, 孙长瑜

(中国科学院声学研究所,北京 100190)

摘要: 长基线阵球面交汇定位系统中,布阵方式将影响水下目标的定位精度。首先从理论上对定位原理进行了讨论; 然后通过仿真定量分析了不同布阵方式下的定位误差。分析结果表明,水平阵无法实现三维定位,通常只能实现二维 平面定位,定深则需由深度传感器完成。另外,当测量阵的孔径较大且水下目标位于水平测量阵的正下方时,定位误差 最小。

关键词: 球面交汇;定位误差;阵列

中图法分类号: TB556 文献标识码: A 文章编号: 1000-3630(2008)-05-0649-05

Performance analysis of spherical intersecting locating system for different array shapes

LI Yi, SUN Chang-yu

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The position of the sensors plays a very important role in long baseline positioning system. If the position is designed inappropriately, there will be a great error on source location. Based on the positioning theory, a quantitative analysis of positioning error is discussed by simulation. The simulation results show that the array in a plane would cause large locating error in vertical direction, and such arrays would generally be used for locating the source in 2D space. The depth of the source should be determined by the depth sensors. In addition, the position error is the smallest only when the aperture of the array is large and the source locates directly under the array.

Key words: spherical intersecting; locating error; array

1 引 言

全球定位系统(GPS)给人们在陆地和空中定位 提供了极大方便。但是,由于电磁波在水下衰减太快, GPS定位系统无法应用于水下。因此,必须利用声音 信号来实现水下目标定位。

根据声学定位系统的基线长度不同,水声定位系统可分为长基线定位系统、短基线定位系统和超短基线定位系统。对于长基线定位系统,当有合作目标时, 定位方式分为球面交汇和双曲面交汇。其中,当接收器和发射器工作同步时,为球面交汇定位;当接收器

通讯作者:李嶷, E-mail: liyi_731973@yahoo.com.cn

和发射器工作不同步时,为双曲面交汇定位。

定位系统中,定位精度是评价系统性能的重要指标,也是指导人们进行阵形设计的重要依据。文献[1] 讨论了任意形状三阵元平面声被动目标定位误差。文 献[2]、[3]讨论了采用不同工作方式的超短基线定位 系统的性能。文献[4]讨论了声速不均匀性对长基线 阵定位系统的影响。

本文将着重讨论长基线阵球面交汇情况下不同 布阵方式引起的定位误差,希望为后期阵形设计提供 一定的理论指导。

2 定位原理

2.1 定位原理

当测量阵的孔径在百米以上,且发射器和合作 目标接收器同步工作时,一方面可以利用 GPS 测量

收稿日期:2007-10-17;修回日期:2008-01-21

基金项目:国家自然科学基金项目(60532040)

作者简介:李嶷(1973-),女,四川成都人,硕士,助研,研究方向为水 声信号处理。

术

(3)

出发射器的坐标,另一方面可利用发射、接收信号 的时间差测量出发射器距目标的距离。由此,得到 一个以发射器为圆心的圆。当有多个发射器存在 时,这些圆交汇于一点,此点即是待测的合作目标。 这种工作方式称为长基线阵球面交汇定位方式。

定位原理如图1所示。假设测量船位于海面任 意位置,测量船上的换能器发射信号,水下合作目 标同步接收信号。通过不断调整测量船的位置,同 时测量发射信号与接收信号的时间差,可实现水下 合作目标的定位。



图 1 定位几何模型 Fig.1 Geometric locating model

图 1 中 A、B、C、……表示测量船位于海面的不 同位置。图 1 中 a 表示水下合作目标,它位于海面 以下。

测量船上装载 GPS 定位系统。因此,使用者能 知道不同时刻下,测量船所处位置坐标 (x_A, y_A, z_A) 、 (x_B, y_B, z_B) 、……,并且使用者能够知道测量船发射 信号的时刻 t_A, t_B 、……。其中,A、B、……表示测量船 所处的不同位置点,x表示此位置点对应的经度,y表示此位置点对应的纬度,z表示此位置点对应的 海拔高度。

另外,水下合作目标用同一个 GPS 时钟进行同 步采样,因此使用者可准确知道水下目标检测到信 号的时刻 t_o 令水下目标的位置坐标为(x,y,z),其 中,x 表示水下目标的经度,y 表示它的纬度,z 表示 其海拔高度。

2.2 公式推导

假设水中声速为等声速,声速为 *c*。那么可得到 测量点 *A* 距水下目标的距离公式:

 $(x_A-x)^2+(y_A-y)^2+(z_A-z)^2=[c(t_A-t)]^2$ (1) 其中, $c(t_A-t)$ 是水下目标到测量点的斜距值,可用 r_A 代替。同理,可得到其它测量点距水下目标的距 离公式。从这些公式可以看出,如要求得水下目标 的位置坐标(x,y,z),至少需要四个测量点,建立四 个距离方程。将这四个方程联立求解后得到。

$$\begin{bmatrix} 2(x_B-x_A) & 2(y_B-y_A) & 2(z_B-z_A) \\ 2(x_C-x_B) & 2(y_C-y_B) & 2(z_C-z_B) \\ 2(x_D-x_C) & 2(y_D-y_C) & 2(z_D-z_C) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} (r_A^2-r_B^2) + (x_B^2-x_A^2) + (y_B^2-y_A^2) + (z_B^2-z_A^2) \\ (r_B^2-r_C^2) + (x_C^2-x_B^2) + (y_C^2-y_B^2) + (z_C^2-z_B^2) \\ (r_C^2-r_D^2) + (x_D^2-x_C^2) + (y_D^2-y_C^2) + (z_D^2-z_C^2) \end{bmatrix} (2)$$

$$\Leftrightarrow \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 2(x_B-x_A) & 2(y_B-y_A) & 2(z_B-z_A) \\ 2(x_D-x_C) & 2(y_D-y_C) & 2(z_D-z_C) \\ 2(x_D-x_C) & 2(y_D-y_C) & 2(z_D-z_C) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{x} = [x,y,z]',$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} (r_A^2-r_B^2) + (x_B^2-x_A^2) + (y_B^2-y_A^2) + (z_B^2-z_A^2) \\ (r_B^2-r_C^2) + (x_C^2-x_B^2) + (y_C^2-y_B^2) + (z_C^2-z_B^2) \\ (r_C^2-r_D^2) + (x_D^2-x_C^2) + (y_D^2-y_C^2) + (z_D^2-z_C^2) \end{bmatrix}$$
可推得:

Ax=b

进一步推导后,得到水下目标的位置坐标

(4)

当测量点个数大于四个时,可用最小二乘法求解水 下目标的位置坐标

x=(*A*^{*H*}*A*)⁻¹*A*^{*H*}*b* (5) 为简化分析,本文只针对独立方程个数与未知参数 个数相等的情况进行讨论。

2.3 误差分析

 $x = A^{-1}b$

假设测量得到的各个变量相互独立,那么可从 式(4)得到

 $E\{\boldsymbol{x}\} = E\{\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{b}\}, Var\{\boldsymbol{x}\} = Var\{\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{b}\}$ (6)

从式(6)可看出,水下目标定位同时受A、B、C、 D 四点各自的三个坐标值、声速、测量时间等多个 变量的影响,这些变量相互独立、共同对定位精度 产生作用。如果不对公式(6)进行一定的简化或近 似,将很难定量地分析出这些变量对定位误差的影 响程度。

但是,在实际工作中,人们往往又需要定量地知 道各个变量对定位值的影响,以便更好地进行系统 设计。本文就将利用仿真软件,在不进行简化和近似 的情况下,着重对布阵方式不同引起的定位误差进 行分析和讨论。

3 定位误差仿真分析

3.1 发射器位于海面时的三维定位误差

从公式(2)可知,要使方程有解,则必须保证矩 阵 *A* 的行列式不为零。矩阵 *A* 可视为由三个矢量 **BA**、**CB**、**DC**构成,这三个矢量在三维空间顺序相 连。从几何模型看,要使方程(2)有解,等效于要保 证三个矢量不在同一平面。实际工作中,由于海面 在不断起伏,所以此条件很容易满足。

现假设布设一个边长为*a*的正方形测量阵,阵 的平面坐标位置固定,仅其海拔高度随海面的波动 发生随机变化。海拔高度以海平面为基准,在海平 面的上下正负波动,且波动规律服从–*h*到+*h*之间 的平均分布。设测量阵A、B、C、D四点坐标分别为 $(0,0,h_A)$ 、 $(a,0,h_B)$ 、 (a,a,h_C) 、 $(0,a,h_D)$,待测点坐 标为(a/2,a/2,-H)。其中 h_A 、 h_B 、 h_C 、 h_D 服从–*h*到+*h* 之间的平均分布。由公式(2)得:

$$2\begin{bmatrix} a & 0 & h_B - h_A \\ 0 & a & h_C - h_B \\ -a & 0 & h_D - h_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2H(h_A - h_B) + a^2 \\ 2H(h_B - h_C) + a^2 \\ 2H(h_C - h_D) + a^2 \end{bmatrix}$$
(7)

进一步可求得:

$$\begin{cases} x = a(\frac{1}{2} + \frac{h_A - h_B}{h_B - h_A + h_D - h_C}) \\ y = a(\frac{1}{2} + \frac{h_B - h_C}{h_B - h_A + h_D - h_C}) \\ z = \frac{a^2}{h_B - h_A + h_D - h_C} - H \end{cases}$$
(8)

对位置固定的水下目标进行蒙特卡洛仿真得到 如表1所示结果(2000次统计)。从表1也可看出, 用近似水平的阵对水下目标进行三维定位时,*z*方 向的定位误差非常大,其结果基本不可信。

	表1	正方形平	了面阵的	的定位误差		
Table 1	Locati	ng error	for a	a square	plan	array

——————————————————————————————————————		坐标/m				
加重氚		x	y	z		
A点		0	0	0		
B点		500	0	0		
C点		500	500	0		
D点		0	500	0		
	实际值	250	250	50		
水下目标	测量值	250	250	2.3772		
<i>h</i> =3m	偏差	0.0088038	0.0053612	50.166		
	方差	0.16866	0.094203	67.345		
	实际值	250	250	50		
水下目标	测量值	250	250	2.1841		
h=5m	偏差	0.0082661	0.0066186	48.146		
	方差	0.053168	0.028168	49.566		

5级海况下, 浪高约 3m 左右^[5]。所以, 相对长基 线阵而言, 在 5级海况下 $BA \ CB \ DC =$ 个矢量仍 近似在同一平面, 此时的系数矩阵 A 为病态矩阵, 矩阵 A 一个很小的扰动会引起解向量 x 很大的扰 动。从公式(8)也可看出, 在 $BA \ CB \ DC =$ 个矢量 近似为同一平面的情况下, $h_{B}-h_{A}+h_{D}-h_{C}$ 的值很小, 海平面的微小测量误差会引起 *z* 方向较大的定位误 差。因此,如要解决此问题必须对阵形进行改变,或 考虑采用其它算法。

3.2 平面阵定位误差

从上面的分析看出,用近似平面的阵定位水下 目标的三维坐标时,将会在 *z* 方向产生很大的定位 误差。

实际工作中,水下目标的深度可利用深度传感 器确定,且定位精度也较高。所以,为简化分析,本 文后面着重考虑布设平面阵,且仅对水下目标的2 维坐标定位的情况,由此得到公式:

$$\begin{array}{l}
2(x_{B}-x_{A}) & 2(y_{B}-y_{A}) \\
2(x_{C}-x_{B}) & 2(y_{C}-y_{B})
\end{array} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \\
\begin{bmatrix} (r_{A}^{2}-r_{B}^{2}) + (x_{B}^{2}-x_{A}^{2}) + (y_{B}^{2}-y_{A}^{2}) \\
(r_{B}^{2}-r_{C}^{2}) + (x_{C}^{2}-x_{B}^{2}) + (y_{C}^{2}-y_{B}^{2})
\end{bmatrix}$$
(9)

从式(9)可看出,只需3个测量点就可定位平面 坐标。与三维定位类似,当三个测量点在一条直线 上时,方程(7)无解;当三个测量点近似在一条直线 上时,系数矩阵为病态矩阵,测量点的小波动会引起 较大的定位误差。所以,布阵时应将阵的孔径尽量 增大。

下面通过仿真,详细讨论平面阵下的2维定位 误差。

3.2.1 测量阵大小不同产生的定位误差

以等腰直角三角形测量阵为例。等腰直角三角 形的三顶点坐标分别为(0,0)、(len,0)和(len,len)。

假设测量船的测量坐标在真实值附近波动,且 波动规律满足零均值,方差为5m的正态分布,待测 目标位于水下50m处。下面对等腰直角三角形阵边 长 len 分别为500m和2000m的情况进行蒙特卡洛 仿真,定位误差的等高线图如图2所示。从图2可 看出,这两种边长情况下的误差基本完全一样, 2000m边长的图基本正好是500m边长的图的放 大。这说明对同一个水下目标点,阵的孔径越大则 定位误差越小。同时可从图2看出,当水下目标点 位于阵的覆盖范围内时,定位误差较小;水下目标点 离阵越远,则定位误差越大。

但是,从公式(2)可知,要解算目标的位置还必 须测量接收信号的到达时刻。实际工作中,无论采 用何种方法检测信号到达时刻,都涉及到信号检测 问题。如果接收信号的信噪比太低,检测精度就会 受到影响。信号在水中的传播损失约为^[6]:

TL=20 * lg10(*r*) *r*≤1000m, 且 *r* 单位为 m *TL*=60+15 * lg(*r*) *r*>1000m, 且 *r* 単位为 km







对接收距离为 500m 和 2000m 的情况,如果只考虑 传播损失的影响,则信号强度会相差约 10dB。

因此,在实际工作中,应综合考虑阵的孔径大 小、接收信号信噪比等多种因素后进行布阵设计。 3.2.2 阵形不同产生的定位误差

以三个孔径基本接近的三角形测量阵为例,固 定三角形的 A、B 顶点,移动 C 点,得到如图 3 所示 的等腰直角三角形阵、等腰三角形阵和某个任意三 角形阵。等腰直角三角形阵的 A 点坐标为(0,0),B 点坐标为 $(len,0), C_0$ 点坐标为(len, len)。等腰三角 形阵的 C_1 点坐标为(len/2,len)。某个任意三角形阵 的 C_2 点坐标为(2 * len, len)。其中 len 为 500m。



Fig.3 Sketch of Triangle array

假设测量点的测量坐标在真实值附近波动,且 波动规律满足零均值,方差为5m的正态分布。待测 目标位于水下 50m 处。对三种阵形进行蒙特卡洛仿 真,仿真结果如图4所示。



将图 4 与图 2 比较可得出:第一,无论阵形如 何,在相同的测量范围内,被测目标的横坐标定位误 差基本一样,但是纵坐标定位误差差别较大;第二, 被测目标的横坐标定位误差以 AB 边为对称轴呈对 称关系、且其大小只与 AB 边长度和到 AB 边的距 离有关;第三,被测目标的纵坐标定位误差与 C 点 有密切关系,在如图4所示的测量范围内,等腰三角 形阵的纵坐标定位误差最小;第四,比较三个测量阵 可发现。三个测量点越接近一条直线则被测目标的 纵坐标定位误差越大;第五,综合考虑被测目标的x n_{y} 两个坐标值时,在阵的正下方较大范围内,等 腰三角形阵的定位精度最高。

因此,在实际工作中,如果阵的布设面积基本确 定,那么应避免将测量阵的各点布设在一条直线上 或近似在一条直线上、且应将测量阵布设在目标点 的正上方。

结论 4

通过仿真分析,可对长基线阵球面交汇定位系统 得出如下结论,首先,近似水平的长基线阵球面交汇定 位系统可对水下目标的平面坐标进行较精确定位,但 无法定位与定位系统垂直的深度方向,如果要进行三 维定位、就必须对水平阵进行阵形改变或采用其它更 新颖的算法;其次,当对水下目标进行二维定位时,阵 的孔径越大则定位精度越高,但在声源级一样的情况 下,阵布设得越大则接收信号的信噪比越低,最终会对 时间检测产生影响,所以在实际工作中应综合这两方 面因素后布阵;第三,对水下目标进行2维定位时,最 好先估计一下目标的大概位置后再布阵,尽量将测量 阵布设在目标的正上方,这样会得到较小的定位误差。

本文从布阵设计上对长基线阵球面交汇定位系统的定位精度进行了讨论。但是,在实际工作中,声速和时间检测的准确性同样对定位精度产生很大影响,这都有待后续的进一步深入研究。

参考文献

[1] 张卫平, 王伟策. 任意形状三阵元平面声被动目标定位分析
 [J]. 探测与控制学报, 2003, 25(3): 54-57.

ZHANG Weiping, WANG Weice. The analyze of passive acoustic location in plane by random shape array of three sensor[J]. Journal of Detection & Control, 2003, 25(3): 54-57.

- [2] 蔡平,梁国龙,惠俊英,等.采用自适应相位计的超短基线水 声跟踪系统[J].应用声学,1992,12(2):19-23.
 CAI Ping, LIANG Guolong, HUI Junying, et al. Ultrashort baseline system based on adaptive phase instrument
 [J]. Applied Acoustics, 1992, 12(2): 19-23.
- [3] 郑翠娥,孙大军,张殿伦. 一种基于短基线的高精度多目标水 声定位技术研究[J]. 海军工程大学学报,2007,19(2):12-16.
 ZHENG Cui-e, SUN Da-jun, ZHANG Dian-lu. Research on high precise multi-target positioning technology based on USBL[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2007, 19(2): 12-16.
- [4] 王燕,梁国龙.一种适用于长基线水声定位系统的声线修正方法[J].哈尔滨工程大学学报,2002,23(5):32-34.
 WANG Yan, HANG Guolong. Correction of Sound Velocity in long baseline acoustic positioning system[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2002, 23(5): 32-34.
- [5] 汪德昭,尚尔昌.水声学[M].北京.科学出版社,1981:52.
 WANG Dezhao, SHANG Erchang. Underwater acoustics
 [M]. Beijing. Science Press, 1981: 52.
- [6] 刘伯胜, 雷家煜. 水声学原理[M]. 哈尔滨. 哈尔滨工程大学 出版社, 2002: 69.
 LIUBosheng, LEI Jiayu, Principle of underwater acoustics[M].
 Harbin; Press of Harbin Engineering University, 2002: 69.