

超短基线基阵基元相移差的测量^{*}

喻 敏[†] 惠俊英 孙大军

(哈尔滨工程大学水声工程学院 哈尔滨 150001)

摘要 本文针对超短基线定位系统定位精度不高的问题, 首先介绍了一种改进阵形的高精度定位算法, 然后介绍了如何测量基阵附加相移的方法, 并在湖试中, 应用了此方法得到的补偿相移值, 取得较好的定位效果。

关键词 超短基线, 附加相移

Measurement of the additional phase shift for an ultra short baseline positioning system

YU Min HUI Jun-Yin SUN Da-Jun

(College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract In order to improve the positioning precision of the USBL, a high-precision positioning algorithm using a improved array is proposed at first. Then, a method is presented to measure the additional phase shift of the USBL. The method is tested in a lake trial with reasonably good effect.

Key words USBL, additional phase shift

1 引言

近年来, 随着人们对海洋资源勘探的日益重视, 海洋作业中的测量设备——水声定位系统也得到了不断的发展。超短基线定位系统是一种常见的水下定位系统, 它具有尺寸小, 易于安装, 成本低等优点, 但由于在其定位计算的过程中, 各种误差的传递致使定位误差在超过几百米后发散得很快, 因此有效定位距离也不

能远, 这就影响了超短基线在深海作业中的应用。由此看来, 要提高超短基线的定位精度, 就应该尽量减少各种误差对定位精度的影响。相位测量误差是超短基线误差的重要来源, 而水听器所产生的附加相移值对基线相位测量精度的影响是很明显的, 因此本文首先介绍了一种通过改进阵形从而高精度测量相位差的方法, 而后提出了一种测量超短基线附加相移的方法, 并将测量结果用于湖试, 取得了好的定

2005-01-18 收稿; 2005-10-14 定稿

^{*} 国家十五“863”(2002AA613010)资助项目

作者简介: 喻敏(1978-), 女, 江西南昌人, 哈尔滨工程大学水声工程学院博士研究生, 研究方向为水声定位技术。

惠俊英(1939-), 男, 教授, 博士生导师, 孙大军(1972-), 男, 教授。

[†] 通讯联系人 Email: dianeyu@sohu.com

位效果。

2 高精度定位原理

传统的超短基线基阵阵形如图 1 所示, 三个阵元排列成等腰直角三角形, 阵元间距为 d 。为抗相位测量模糊, $d \leq \lambda/2$, λ 为波长。如果单独利用这么小尺寸的基阵对远程目标进行定位很难达到较高的定位精度, 因而传统超短基线的定位精度为 3% 左右。从理论上讲, 增加基阵的基线长度, 可以减小定位误差。为在远程达到高的定位精度, 降低系统工作频段, 增大阵元间尺度, 采用多阵元处理技术是提高系统定位精度有效办法。

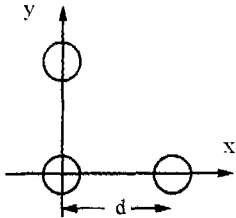


图 1 传统 USBL 基阵示意图

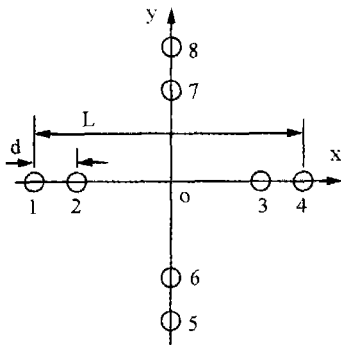


图 2 改进后 USBL 基阵示意图

本文介绍的超短基线定位系统采用的阵形如图 2 所示, 是一个正交的十字阵, 每轴上有四个阵元, 相近的两阵元间距为 d , $d \leq \lambda/2$, 同轴上两阵元间最大间距为 $L = 8d$ 。

当目标位置满足远场条件, 在平面波模型下, 定位解算过程如下:

记图 2 中 2 号水听器 and 1 号水听器所接收声波的相位差为 ϕ_{21} , 5 号水听器和 6 号水听器所接收声波的相位差为 ψ_{56} , 所有阵元组合间的相位差由 ϕ_{ij} 和 ψ_{ij} 表示 (i, j 表示水听器编号), 且分别为 x 和 y 轴上阵元间相位差。由于超短基线的基本定位公式在很多文献中已推导过, 这里就不再赘述, 直接给出定位公式:

$$\begin{aligned} x &= R \cos \alpha = R \cdot \frac{\phi_{21}}{kd} \\ y &= R \cos \beta = R \cdot \frac{\psi_{56}}{kd} \end{aligned} \quad (1)$$

R 为目标到基阵中心 O 的距离。 α 为目标径矢与 x 轴夹角, β 为目标径矢与 y 轴夹角。 k 为波数。

在传统的超短基线定位系统中, 当阵间距 $d > \lambda/2$ 时, 系统常受相位差测量多值模糊的困扰, 因而采用 (1) 式对目标定位时, 均取 $d \approx 0.4\lambda$ 。这样, 相位差的真值保证在单值区间 $[-\pi, \pi]$ 内。本系统中, 每一对子阵均可完成上述目的。在解决相位差测量多值模糊的基础上, 由大阵解决相位测量精度问题。

下面以计算目标的水平坐标 (x 轴) 为例简介改进阵形的高精度定位算法:

利用 1, 2 号水听器, 可得:

$$x_d = \frac{\lambda \phi_{12} R}{2\pi d} \quad (2)$$

利用 1, 4 号水听器, 可得:

$$x_L = \frac{\lambda \phi_{14} R}{2\pi L} \quad (3)$$

因为, $d < \lambda/2$, 使得 1, 2 阵元接收的各个方位信号时延差都有 $\tau_{12} < T/2$ (T 为信号周期), 即时延差信息完全在相位差当中。因此有 $\tau_{12} = \phi_{12}/2\pi f$, $|\phi_{12}| < 180^\circ$, 无模糊。根据阵元间距关系可知, $\phi_{14} = 8\phi_{12}$ 。由于相位测量区间为 $[-\pi, \pi]$, 当 $|\phi_{12}| > \pi/8$ 时, ϕ_{14} 将位于多值区间, 求出的 ϕ_{14} 与真值相差 1 个或几个周期, 因此只要将 ϕ_{14} 加 (ϕ_{12} 为正) 或减 (ϕ_{12} 为负) 2π 的整数倍再与 $8\phi_{12}$ 相比较, 相差不到一个周期 (考虑到随机误差, 一般设小于半个

周期) 时即认为是正确值, 解决了大阵的相位差多值模糊, 再由 (3) 式可得目标在 x 轴上的坐标 x_L 。同理, 测得 ψ_{56} 和 ψ_{58} 即可计算目标在 y 轴上的坐标 y_L 。

计算机仿真证明, 改进后的基阵的定位精度较传统的基线的定位精度有较大的提高, 从而实现了超短基线高精度的定位。

3 附加相移的产生

超短基线系统是一种相位差定位系统, 但其水听器 and 接收机都会产生附加的相移。为了使定位误差尽量小, 首先要努力使附加相移稳定。而温度和电源电压变化均可能导致相移值变化。因此, 一方面应采用合理的设计使相移的温度系数较小, 例如采用 Butterworth 有源 RC 滤波器, 采用低温度系数的滤波器元件; 另一方面要调整各通道相移的一致性, 采用相移微调电路使各通道相移一致。同时在前放中应用跟随器, 以减小水听器电缆产生的附加相移, 从水听器到前放的电缆也应尽可能短些。

采用上述措施后剩下的相移偏差可在信号处理器中予以补偿。为此定位计算中的阵元间相位差真值为:

$$\varphi_{ij} = \varphi_{ij0} - \varphi_{ije1} - \varphi_{ije2} \quad (4)$$

其中 φ_{ij0} 为相位计测得的第 i 号与第 j 号水听器间相位差; φ_{ije2} 为水听器产生的相移; φ_{ije1} 为接收机及其它电路部分产生的相移。 φ_{ije1} 可在实验室内用电信号进行实验测量并予以补偿。

相比之下, 修正水听器的附加相移则要困难一些, 通常测量水听器相移的修正量需要在消声水池或湖上开阔水域中进行。

4 附加相移测量

为了测量基阵的附加相移, 用前面提到的改进基阵在消声水池中进行了测量实验。实验

方法如下: 将超短基线声基阵水平置于水池中, 发射声源置于基阵下方中心垂直轴上, 以使得声源在基阵坐标系的坐标为 $(0, 0, H)$, H 为声源距离基阵平面的距离, 然后通过比较相位计测到的相位差与几何相位差来确定附加相移。

以图 3 所示初始位置作为基准, 以 1 号水听器为参考, 相位计测量各水听器与 1 号水听器间的附加相移值:

$$\Delta\varphi_{1i} = \varphi_{1i} - \varphi'_{1i} \quad (5)$$

φ_{1i} 是相位计测得的第 i 号与第 1 号水听器间相位差, φ'_{1i} 是二者的几何相位差, $\Delta\varphi_{1i}$ 则是二者的附加相移值。

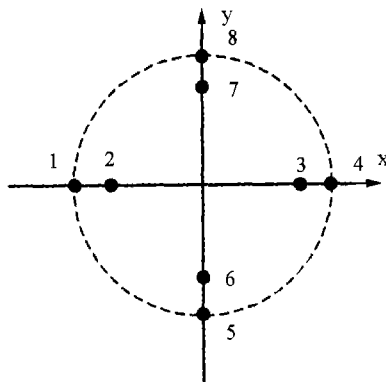


图 3 基阵的初始位置

将如图 3 所示初始位置计算得到的附加相移值, 补偿到基阵分别顺时针旋转 90、180、270 度时测得的相位值中, 并且定位解算得到如图 4 所示的定位图, 图中圆圈半径为 $1.8\%R$, 斜距 $R = 2.3\text{m}$ 。图 4 中, 左图为修正前基阵在四种位置下对声源的定位, 右图则为修正后的定位图, 比较后可明显看出修正后使得基阵在四个方向上的定位精度都在 $1.8\%R$ 内。

可以看到, 上述的方法是简单易懂的, 而且实验结果上看也是较有成效的。但从式 (5) 不难看出, 附加相移值 $\Delta\varphi_{1i}$ 精度依赖于 φ_{1i} 、 φ'_{1i} 的精度。在实验中, 使用自适应相位计测量相位差 [2], 这样即使在低信噪比的情况下也能精确测量相位, 当输入信噪比为 $+10\text{dB}$ 时,

自适应相位计的测量误差仅为 1° 。而本次实验输入信噪比高达 $+40\text{dB}$ ，因此 φ_{1i} 精度是很高的。对于几何相位值 φ'_{1i} ，是在已知声源真实位置的情况下通过几何解算得到的，这样就需要精确测量固定声源的位置。

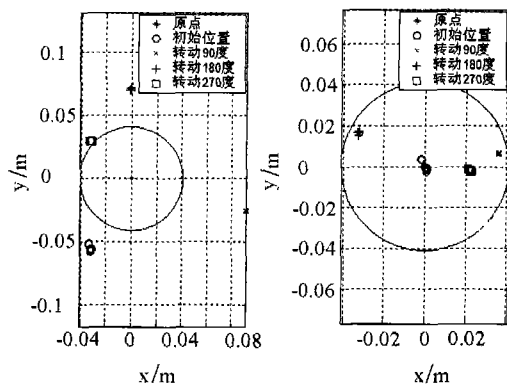


图 4 基阵定位图

但在实验中，在不加精确固定装置的情况下，精确测量声源的位置是较困难的，存在厘米级的偏差，这样就影响了实验数据的精度。因此这种方法原理虽然直观，但是不易得到更高精度的附加相移值。因此，高精度的固定装置是必需的。

下节将看到湖试证明，上述方法对得到的附加相移值进行修正是有效的。

5 湖上实验

2004 年 10 月初，我们在松花湖进行了超短基线系统功能实验，现把有关相位校准部分的实验介绍如下。

5.1 定点实验

将超短基线基阵（声头）刚性固定在实验船的尾部，置于水下 1.2m，将实验船开到湖中比较开阔的区域，而采用绳子吊放的方式以便将声源尽可能布放深一些（深 10m），沿船舷挪动铁杆，绕船舷在 9 个位置停留采集数据，每个点采集 10 组数据。

发射换能器发射多个频率，分别是

12kHz、13kHz、14kHz、15kHz，发射脉宽为 10 个 CW 填充周期，采样率为 100kHz。换能器沿船舷移一圈，在 9 个位置停留并记录数据，这些点将组成船形。

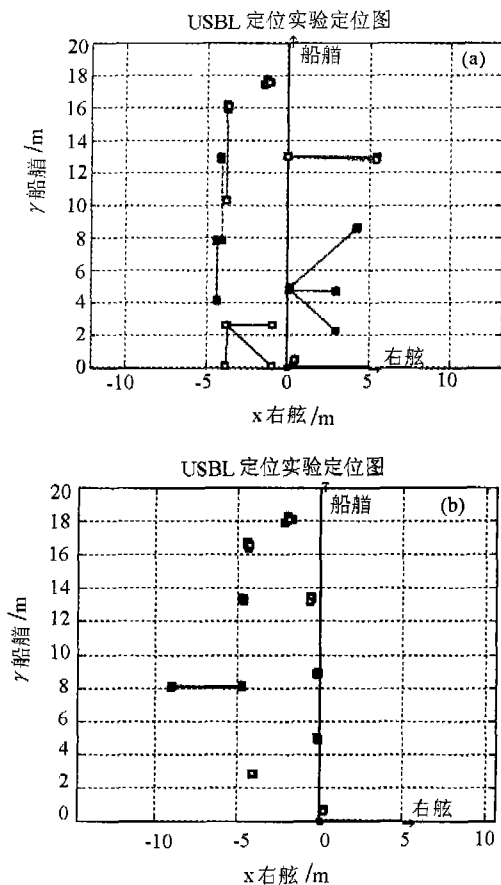


图 5 定点试验定位处理结果

（声源吊放在 10m 的深度）

（a）原始数据定位试验结果

（b）附加相移修正后定位试验结果

图 5 是发射频率为 14kHz 的一组数据定点试验图，由于在同一位置测得的 10 个点的散布范围是用连线表示的，（a）图中连线较多，说明测点比较零乱，而且基本上看不出船形状，而（b）图在除去个别野点的影响外基本上可以判断出是一个船的形状，由于基阵坐标与船系坐标有安装偏差，所以基阵测出的船形

艏向是偏离图中所表示的船艏向的,但仍可以看出附加相移修正是有成效的。

5.2 近距离定位实验

超短基线基阵测量系统放在主船上,仍固定在船尾,距水面 1.2m 深处;将发射换能器固定在另一个试验船上,发射换能器发射 14kHz 的 CW 信号,换能器布放的深度为 10m。该船处于漂泊状态,两艘船相距百米左右。通过 GPS 的秒脉冲信号作为发射与接收的同步时钟,测得声源与声头的斜距。同时,为了说明定位结果,采用 RTK-GPS 的数据作为真值参

考, PTK-GPS 系统和发射换能器安装在同一条实验船上。

图 6 中 (a) 图是没有修正附加相移值的定点试验结果, (b) 图是修正了附加相移值的定点结果。由于船只只是停机,没有抛锚,所以两条船都存在飘动,因此轨迹呈直线状。比较两图可知,修正后的基阵定位精度明显提高,和 GPS 测得的定位曲线相近。其测量的平均偏差: $X = 1.2\text{m}$, $Y = 0.5\text{m}$;而修正前的偏差为: $X = 6.4\text{m}$, $Y = 3.3\text{m}$ 。此结果进一步说明附加相移的修正是很重要的,其修正的结果也是比较理想的。

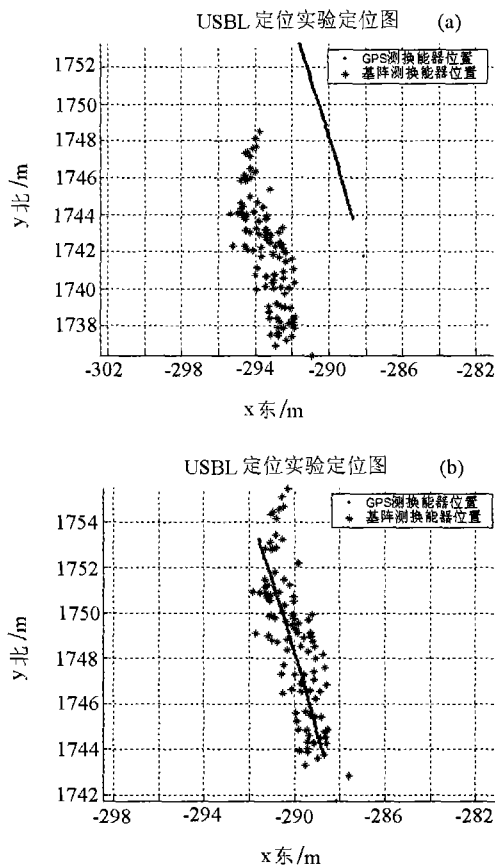


图 6 近距离定位结果

- (a) 未进行相位修正的处理结果
(b) 已进行相位修正的处理结果

6 总结

本文提出了一种提高定位精度的新的超短基线阵,它既能提高精度又能避免定位模糊。从本文的实验结果可以看出,各阵元的附加相移对超短基线定位精度的影响是很明显的,因此附加相移补偿是十分必要的。本文又提出了一种附加相移的测量方法,实验证明它是有效性的。当然声基阵水听器相位校准方法应该还有很多,比如考虑在远场条件下进行声基阵水听器相位校准。总的来说,校准实验对实验布局和操作有较高的要求,因此应该把实验操作所带来的误差控制在小的范围内,这样才能得到较好的校准实验数据,解算出来的附加相移值才比较真实可靠。

参 考 文 献

- 1 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. 应用声学, 1993, 12(2):19~23.
- 2 惠俊英,蔡平,马晓民. 自适应陷波器应用研究. 声学学报, 1991, 16(1):19~24.
- 3 R.J. 尤立克著. 洪申译. 水声原理, 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1990, 33~40.
- 4 田坦,刘国枝,孙大军. 声呐技术. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2000, 256~263.