采用自适应相位计的超短基线水声跟踪系统

蔡 平 梁国龙 惠俊英 王智元
(哈尔滨船舶工程学院水声所 哈尔滨 150001)
1992 年 1 月 3 日收到

本文介绍了自适应相位差测量技术的基本原理，并应用于超短基线水声跟踪系统中．湖上试验表明采用自适应相位估计器的超短基线水声跟踪定位系统具有满意的精度．

一、引 言

根据测量基阵尺寸的大小，水声跟踪定位系统通常划分成三大类，即长基线系统，短基线系统和超短基线系统，由于超短基线水声跟踪定位系统具有体积小、重量轻，安装方便，造价低廉等优点，在水声导航定位技术领域中占有一席之地．超短基线水声跟踪定位系统的技术关键之一是高精度的相位估计方法．本所将先前发展的自适应技术——自适应相位估计方法应用到超短基线水声跟踪定位系统中，经湖试验证，取得了良好的效果．

二、超短基线跟踪系统的基本原理

超短基线跟踪系统由以下几个部分组成：测量基阵，发射机，接收机，信号处理装置，显示控制计算机和应答器．系统配置如图 1 所示．其中虚线框内为系统的水上部分，通常置于测量船上．

测量基阵由排成等腰直角三角形的三个水听器组成，直角边长为 d，称之为基线长度，通常，取 $d < 0.5\lambda$，λ 为信号波长．测量基阵置于 xoy 平面中，x 轴指向母船的船艏方向，三

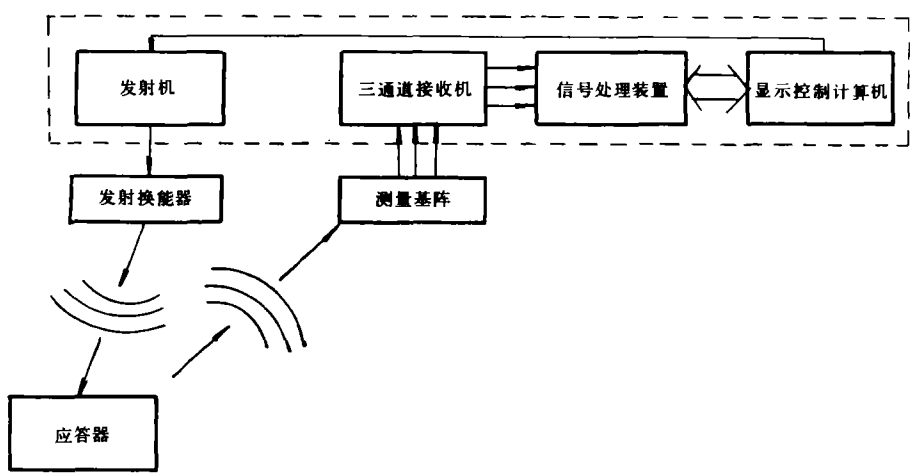

图 1 系统配置示意图

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

个基元在笛卡尔坐标系中的坐标分别为 $A_1(d,0,0)$，$A_2(0,0,0)$，$A_3(0,d,0)$。

超短基线水声跟踪系统依据从目标到达各水听器的声波的相位差来计算目标的俯仰角和方位角；通过测量声波的传播时间，来计算目标的斜距，从而确定目标的位置。定位原理如图 2 所示。

设目标在笛卡尔坐标系中的坐标为 (x,y,z)，在球坐标系中的坐标为 (R,θ,β)。R 为目标的斜距，若采用同步声源工作方式，则有

$$R = ct \tag{1}$$

若采用应答工作方式，则

$$R = \frac{1}{2}ct. \tag{2}$$

c 为水中声速，t 为信号的传播时间；θ 为目标方位角，即目标径矢在 xoy 平面中的投影与 x 轴正向（船艏方向）的夹角；γ 为目标俯仰角，$\beta = \frac{\pi}{2} - \gamma$。记 2 号水听器和 1 号水听器所接收声波的相位差为 ϕ_{21}，2 号水听器和 3 号水听器所接收声波的相位差为 ϕ_{23}，当目标在远距离处，在平面波模型下，根据空间几何关系不难得出[1]：

$$\phi_{21} = kd\cos\theta\cos\gamma \tag{3}$$

$$\phi_{23} = kd\sin\theta\cos\gamma \tag{4}$$

上式中 k 为波数，d 为基线长度 $(d \ll R)$，θ 为

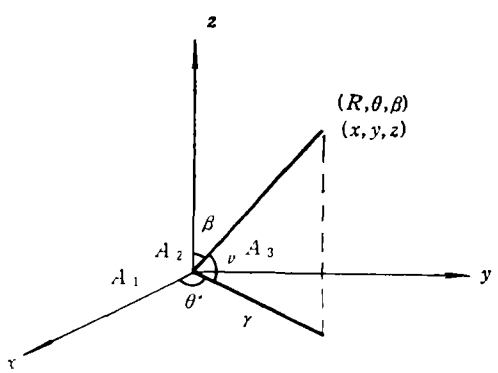

图 2 定位几何图

目标方位角，γ 为目标俯仰角。由(3)式和(4)式可知：

$$\theta = \mathrm{tg}^{-1}(\phi_{23}/\phi_{21}) \tag{5}$$

$$\gamma = \cos^{-1}(\sqrt{\phi_{21}^2 + \phi_{23}^2}/kd) \tag{6}$$

由(5)、(6)、(1)式(同步方式)或(5)、(6)、(2)式(应答方式)可分别计算出目标的方位角，俯仰角和斜距，从而可以确定目标的位置。

上述原理是建立在平面波模型基础上的，若存在反射声，上述超短基线系统的定位计算公式仍然可用，不过，当反射声与直达声相混叠时，应用合成声的相位差 ϕ_{21} 和 ϕ_{23} 代替(5)式、(6)式中的 ϕ_{21} 和 ϕ_{23}。

若目标的深度 z 可以现场装订，采用下列诸式进行定位计算将使系统具有更高的定位精度：

$$r = \sqrt{R^2 - (z-h)^2} \tag{7}$$

$$x = r\cos\theta = r \cdot \frac{\phi_{21}}{\sqrt{\phi_{21}^2 + \phi_{23}^2}} \tag{8}$$

$$y = r\sin\theta = r \cdot \frac{\phi_{23}}{\sqrt{\phi_{21}^2 + \phi_{23}^2}} \tag{9}$$

式中 r 为目标的水平距离，h 为测量基阵的安装深度。

三、自适应相位差测量原理[2]

从定位计算公式不难看出，对于超短基线跟踪定位系统来说，只有精密地测量相位差才能保证系统具有较高的定位精度。先进的相位差测量方法——自适应相位估计技术的应用，将使系统的性能得到明显的改善。我们采用高速的 DSP(数字信号处理器)器件 TMS320C25 构成自适应滤波器和相位计，并且同时进行定位解算，其原理如图 3 所示。

设 1 号和 2 号水听器输出的信号和干扰分别为：

$$d_1(t) = s_1(t) + n_1(t) \tag{10}$$

$$d_2(t) = s_2(t) + n_2(t) \tag{11}$$

其中 $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 分别为：

$$s_1(t) = B_1\sin(\omega t + \phi_1) \tag{12}$$

$$s_2(t) = B_2\sin(\omega t + \phi_2) \tag{13}$$

则自适应平衡时，权值 $W_{11}, W_{12}, W_{21}, W_{22}$ 分别为：

$$W_{11} = B_1\cos\phi_1/A \tag{14}$$

$$W_{12} = B_1\sin\phi_1/A \tag{15}$$

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

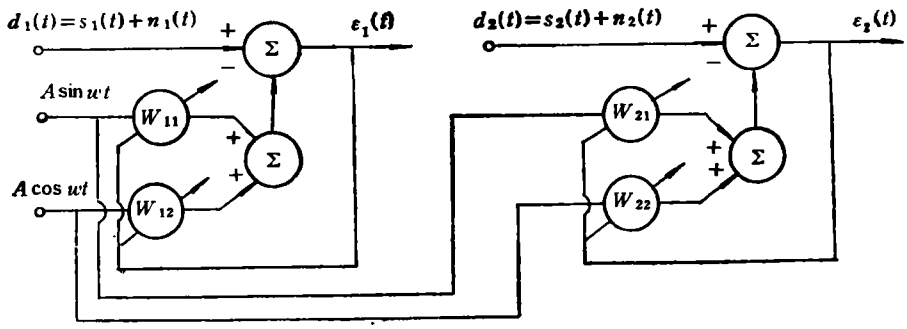

图 3　自适应相位计原理示意图

$$W_{21} = B_2\cos\phi_2/A \tag{16}$$

$$W_{22} = B_2\sin\phi_2/A \tag{17}$$

式中 A 为自适应 Notch 滤波器中参考信号的振幅。故

$$\mathrm{tg}\,\phi_1 = W_{12}/W_{11} \tag{18}$$

$$\mathrm{tg}\,\phi_2 = W_{22}/W_{21} \tag{19}$$

因

$$\phi_{21} = \phi_2 - \phi \tag{20}$$

所以

$$\mathrm{tg}\,\phi_{21} = \frac{\mathrm{tg}\,\phi_2 - \mathrm{tg}\,\phi_1}{1 + \mathrm{tg}\,\phi_1\mathrm{tg}\,\phi_2} \tag{21}$$

$$\phi_{21} = \mathrm{tg}^{-1}\frac{(W_{22}/W_{21}) - (W_{12}/W_{11})}{1 + (W_{12}/W_{11})\cdot(W_{22}/W_{21})} = \mathrm{tg}^{-1}\left(\frac{W_{11}W_{22} - W_{21}W_{12}}{W_{11}W_{21} + W_{12}W_{22}}\right) \tag{22}$$

同理可以求得 ϕ_{23}。

$$\phi_{23} = \mathrm{tg}^{-1}\left(\frac{W_{31}W_{22} - W_{21}W_{32}}{W_{31}W_{21} - W_{32}W_{22}}\right) \tag{23}$$

TMS320C25 进行自适应运算并按(22)和(23)式计算相位差，并按(5)式、(6)式计算出目标的方位角 θ 和俯仰角 γ。信号的传播时间 t 可由自适应滤波器输出过门限测得，因此所有的定位计算都可在 TMS320C25 的片内完成。

由于自适应相位计本身就是一个自适应滤波器，具有对噪声的滤波能力，可以证明它是最佳的相位估计器（最大似然比估计器）。[2]利用自适应相位计进行相位差测量，其优点是抗干扰能力强，可以在低信噪比的情况下精确地测量相位。当输入信杂比为+10dB 时，相位测量误差仅为 1°。它的显著特点是分辨率高和精度高，并且专用硬件紧凑。

四、精度分析

1. 测距误差

利用响应器测距或应答器测距公式分别为(1)式和(2)式，微分后得到相同的相对误差表达式：

$$\Delta R/R = \Delta C/C + \Delta T/T \tag{24}$$

采用精密声速度计时，声速测量精度可达 0.1%；利用自适应滤波器的输出对接收信号进行门限检测和时延估计，测时误差可小于 1ms，因而相应的测距误差不大于 0.75m。因此，对于斜距大于 100m 的目标，测距误差不会超过 1%；对于斜距小于 100m 的目标，测距误差也不会大于 1m。

2. 方位测量误差

为了估计目标的方位测量误差，将(5)式改写为：

$$\mathrm{tg}\,\theta = \phi_{23}/\phi_{21} \tag{25}$$

对(25)式微分，得到：

$$\Delta\theta = \cos^2\theta\cdot\frac{\phi_{21}\cdot\Delta\phi_{23} - \phi_{23}\cdot\Delta\phi_{21}}{\phi_{21}^2} \tag{26}$$

假定 $\Delta\phi_{21}$ 和 $\Delta\phi_{23}$ 是相互独立的，且 $\sqrt{\overline{\Delta\phi_{21}^2}} = \sqrt{\overline{\Delta\phi_{23}^2}} = \sqrt{\overline{\Delta\phi^2}}$，则：

$$\sqrt{\overline{\Delta\theta^2}} \cong \cos^2\theta\cdot\frac{\sqrt{\phi_{21}^2 + \phi_{23}^2}}{\phi_{21}^2}\cdot\sqrt{\overline{\Delta\phi^2}} \tag{27}$$

将(3)式、(6)式代入(27)式，整理得：

$$\sqrt{\overline{\Delta\theta^2}} \cong \frac{\lambda R}{2\pi d r}\cdot\sqrt{\overline{\Delta\phi^2}} = \frac{\sqrt{\overline{\Delta\phi^2}}}{kd\cos\gamma} \tag{28}$$

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由上式可知，当目标在基阵正下方邻域内时，目标方位测量误差很大，在远距离上，γ 较小，$R \approx r$，则目标方位测量误差约为：

$$\sqrt{\overline{\Delta\theta^2}} = \frac{\sqrt{\overline{\Delta\phi^2}}}{kd} = \frac{\lambda}{2\pi d} \cdot \sqrt{\overline{\Delta\phi^2}} \quad (29)$$

采用自适应相位计作为相位差估计器，当输入信杂比为+10 dB 时，相位差测量误差约为±1°，即 $\sqrt{\overline{\Delta\phi^2}} = 1° = \frac{\pi}{180}$ (rad)，取基线长度 $d = 0.42\lambda$，则 $\sqrt{\overline{\Delta\theta^2}} \approx \frac{1}{2\pi \times 0.42} \cdot \frac{\pi}{180} = 0.0066(\text{rad}) \approx 0.4°$，对于近距离目标，根据(28)式，上式的 $\sqrt{\overline{\Delta\theta^2}}$ 显然还应除以 $\cos\gamma$，如 $\gamma = 60°$，$\cos\gamma = 0.5$，则 $\sqrt{\overline{\Delta\theta^2}} = 0.8°$。

3. 定位误差

分别对(7)、(8)、(9)式进行微分，得：

$$\Delta r = \frac{R\Delta R - (z-h)(\Delta z - \Delta h)}{r}$$

$$= \sec\gamma \Delta R + \operatorname{tg}\gamma \cdot (\Delta z - \Delta h) \quad (30)$$

$$\Delta x = \Delta r \cdot \cos\theta - r\sin\theta \cdot \Delta\theta \quad (31)$$

$$\Delta y = \Delta r \sin\theta + r\cos\theta \cdot \Delta\theta \quad (32)$$

假定各误差项是互相独立的，则有：

$$\overline{\Delta x^2} = \cos^2\theta \cdot \sec^2\gamma \cdot \overline{\Delta R^2} + \cos^2\theta \operatorname{tg}^2\gamma(\Delta z^2 + \Delta h^2) + r^2 \cdot \sin^2\theta \cdot \overline{\Delta\phi^2}/k^2d^2\cos^2\gamma \quad (33)$$

$$\overline{\Delta y^2} = \sin^2\theta \cdot \sec^2\gamma \cdot \overline{\Delta R^2} + \sin^2\theta \cdot \operatorname{tg}^2\gamma(\overline{\Delta z^2} + \overline{\Delta h^2}) + r^2\cos^2\theta \cdot \overline{\Delta\phi^2}/K^2d^2\cos^2\gamma \quad (34)$$

由上述诸式可见，当 γ 接近 90°时，即目标位于基阵正下方邻域内时定位误差很大．对于远距离目标，$\gamma \approx 0$，亦即 $\cos\gamma \approx 1$，$\operatorname{tg}\gamma \approx 0$．此时，(33)和(34)式可分别简化为：

$$\overline{\Delta x^2} \approx \cos^2\theta \cdot \overline{\Delta R^2} + r^2\sin^2\theta \cdot \overline{\Delta\phi^2}/k^2d^2 \quad (35)$$

$$\overline{\Delta y^2} \approx \sin^2\theta \cdot \overline{\Delta R^2} + r^2\cos^2\theta \cdot \overline{\Delta\phi^2}/k^2d^2 \quad (36)$$

由上面两式可得定位误差为：

$$\sqrt{\overline{\Delta x^2} + \overline{\Delta y^2}} = \sqrt{\overline{\Delta R^2} + r^2 \cdot \overline{\Delta\phi^2}}/k^2d^2 \quad (37)$$

由测距误差所带来的定位误差约 0.75m，当 $d = 0.42\lambda$，$\sqrt{\overline{\Delta\phi^2}} = 1°$时，相应的定位误差不超过 1%．

五、系统误差控制及修正

相位差测量误差是本系统最主要的误差源，其系统误差可以修正。

水听器和接收机都会产生附加的相移．为了使系统误差尽量小，首先要努力使附加相移稳定．温度和电源电压变化均可能导致相移值变化．一方面应尽可能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；另一方面要保持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．采用前放及跟随器，以减小水听器电缆产生的附加相移。

采用上述措施后剩下的相移余差可在信号处理器中予以补偿．为此定位计算公式(5)、(6)中的 ϕ_{21} 和 ϕ_{23} 应修改为：

$$\phi_{21} = \phi_{210} - \phi_{21e1} - \phi_{21e2} \quad (38)$$

$$\phi_{23} = \phi_{230} - \phi_{23e1} - \phi_{23e2} \quad (39)$$

其中 ϕ_{210} 和 ϕ_{230} 为自适应相位计测得的相位差值(即按(22)、(23)式求得的 ϕ_{21} 和 ϕ_{23})；ϕ_{21e1} 和 ϕ_{23e1} 为水听器所产生的相移差；ϕ_{21e2} 和 ϕ_{23e2} 为接收机及其它电路部分产生的相移差．ϕ_{21e2} 和 ϕ_{23e2} 可在实验室内进行实验测量并予以补偿。

相比之下，测量水听器的附加相移则要困难一些。在水池中由于存在多次反射因而不适合测量相位差，所以测量水听器相移差的修正量需在消声水池或湖上开阔水域中进行．我们在松花湖的无缝湾进行．具体方法如下：

将超短基线声基阵水平置于湖中，应答器也置于水下合适的位置，以保证反射声与直达声不致于叠加在一起。转动基阵使基元 2 和 3 对准声信标，即令 $\phi_{210} = 0$，则此时有：

$$\phi_{210} = kd\cos\theta\cos\gamma + \phi_{21e1} = 0 \quad (40)$$

$$\phi_{230} = kd\sin\theta\cos\gamma + \phi_{23e1} \quad (41)$$

将基阵转动 180°，仍令 $\phi_{210} = 0$，此时

$$\phi^1_{230} = -kd\sin\theta\cos\gamma + \phi_{23e1} \quad (42)$$

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

由(43)式和(44)式求得:

$$\phi_{23e1} = (\phi_{230} + \phi'_{230})/2 \qquad (43)$$

同理,将基阵基元 2 和 1 对准目标,即令 $\phi_{230}=0$,记下 ϕ_{210} 值,将基阵转动 180°,记下 ϕ'_{210} 值,可以求得:

$$\phi_{21e1}(\phi_{210} + \phi'_{210})/2 \qquad (44)$$

松花湖试验证明,上述方法是可行的。

六、湖 上 试 验

为检验本系统的工作性能和定位精度,我们于 1991 年 10 月下旬在松花湖进行了系统的功能实验。工作参数为: $f = 17241$Hz, $d = 0.35\lambda$。

实验内容包括:

1. 水听器附加相移修正

具体方法前面已经介绍,这里不再重复。

2. 定点实验

超短基线基阵置于水下 5m 深处,应答器置于水下 8m,应答器与基阵的水平距离为 14 m。均匀旋转测量基阵的迴转装置使基阵均匀旋转 360°,则目标相对于基阵坐标系的"运动"轨迹为一圆周,如图 4 所示。

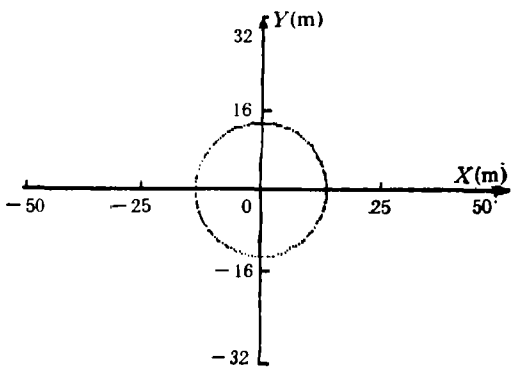

图 4 近距离定点试验结果

3. 近距离拉距试验

超短基线的测量系统放在主船上,基阵固定在主船旁的双体小船上,水下 5m 深处;应答器固定在一个舢舨上,由人划舢舨带着应答器在水下运动。类似试验共作了两次,应答器布放深度分别为 8 m 和 15 m,测得目标的运动轨迹分别如图 5、图 6 所示。

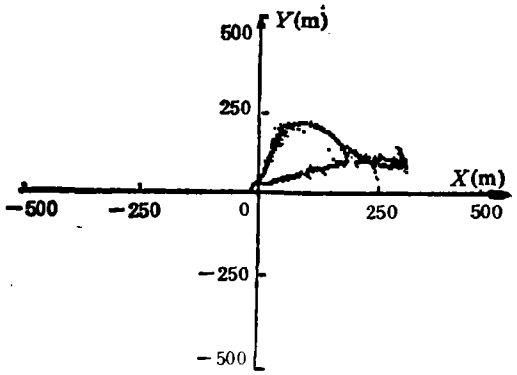

图 5 运动目标轨迹实验结果(一)

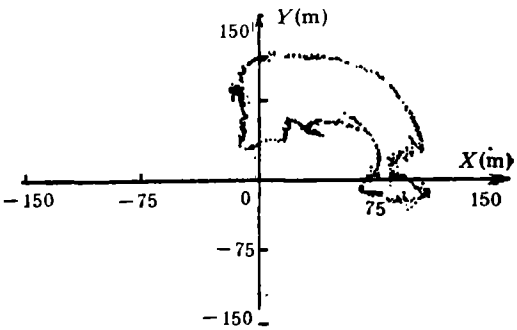

图 6 运动目标轨迹实验结果(二)

4. 远距离拉距试验

超短基线定位系统置于甲船上,基阵固定在甲船船艉水下 5 m 深处,随甲船航行或漂

(下转第 18 页)

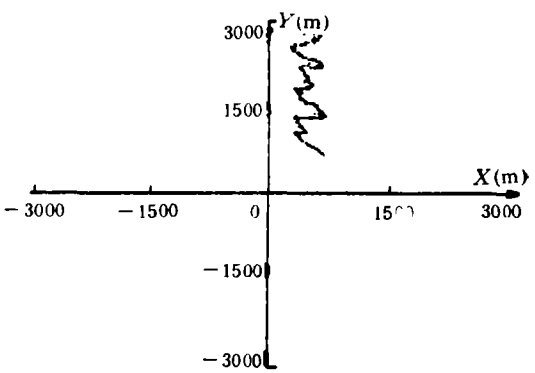

图 7 运动目标轨迹的实验结果(三)

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

量一次距离和方位．从下面给出的部分测量结果可以看出本系统完全符合在大角度下误差不超过10%，小角度误差不超过3%的要求．部分测量结果如表1．

海上录音回放是通过录音机把海上实际录下的三路信号放出，潜艇两子阵间的距离是22m，由本文提及的声呐系统进行测距和测向验证．由于海上录音回放的情况比模拟器的情况复杂得多，我们对距离解算进行了修正．主要是加上反馈跟踪、累加和剔除飞点．实际测量结果表明运用自适应滤波技术的被动声呐站能很好地完成对实际目标的测距和测向，其精度高于在同样条件下的引进设备（八十年代我国从法国引进的飞尼龙声呐）．实际测量结果如表2和图6所示．

表 2　实际测量结果

实测	5.1	5.0	5.0	5.0	4.9	5.0	5.2	5.1	5.0	5.2	5.2	5.1	5.1
标准	4.26			4.37			4.93						
实测	5.3	5.3	5.4	5.4	5.7	5.8	5.9	6.3	6.2	6.7	6.7	6.4	6.6
标准	4.8			4.96			5.23				5.39		
实测	6.5	6.3	5.6	5.7	6.9	7.6	7.4	7.0	6.7	6.8	6.7	6.6	7.1
标准	4.8			5.71						6.09			6.25
实测	7.7	7.4	8.3	8.6	8.6	8.3	8.1	7.8	8.0	8.0	7.9	7.8	8.0
标准	4.8				6.63							7.02	
实测	8.4	9.0	9.0	8.9	9.7	9.2	9.6	9.2	8.9	9.3	9.5	9.3	9.5
标准	7.18			7.35			7.63						8.03
实测	9.5	9.2	10.2	10.6	10.2	10.6	11.0	10.6	10.3	10.4	10.6	10.4	10.6
标准			8.13			8.23		8.37			8.39		8.74

注：实测和标准的单位是 km．

七、总　结

从上面的实验结果可以认为把自适应滤波器技术应用到被动声呐系统中是十分成功的，这在我国是首创，同时也达到世界的当今水平．在研制的过程中也遇到自适应 LMS 定点算法的截断误差的问题，我们也对此进行过研究，解决此问题的根本办法就是采用浮点算法．我们正在运用 TMS320C30 全浮点 DSP 芯片进行这方面的研究．

参 考 文 献

[1] Hinich M. J. and Bloom M. C., *J. Acoust. Soc. Am.*, **9**(1981), 738—743.

[2] Gerkin L., ASW Versus Submarine Technology, Amer. Sci. Corp. 1986 USA.

[3] Burdic W.S., Underwater Acoustics System Analysis, Beemtice-Hall, 1984, USA.

[4] Widrow B. and Steams S. D., Adaptive Signal Processing, Prentice-Hall, Inc. 1985, USA.

（上接第23页）

泊．应答器投放在水下25 m深处，测量应答器在基阵阵元坐标系中的位置．应答器距甲船的距离最远时接近 3km．测得的轨迹示于图7．

试验结果表明，系统工作性能可靠，而且具有满意的定位精度．

参 考 文 献

[1] 孙仲康、陈辉煌，导航、定位与制导，国防工业出版社，1987，92—98．

[2] 惠俊英、蔡平、马晓民，声学学报，**16**-1(1991)，19．

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net