一种基于运动模型的水下目标方位预处理方法

马敬广[1]，徐晓男[2]
(1. 海军驻杭州地区军事代表室，杭州 310012；2. 杭州应用声学研究所声纳技术重点实验室，杭州 310012)

摘要：为了改善纯方位目标运动分析方法的性能，提出了一种水下目标方位预处理方法。该方法利用目标运动模型对观测方位序列进行预处理，经仿真验证，与常规的多项式拟合方法相比，能够有效降低水下目标方位观测量的估计误差，提高了目标运动分析的性能，可获得更高的运动参数估计精度。

关键词：水下目标；方位预处理；目标运动分析
中图分类号：TN911 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-3630(2013)-03-0243-05
DOI 编码：10.3969/j.issn1000-3630.2013.03.014

An underwater target azimuth preprocessing method based on motion model

MA Jing-guang[1], XU Xiao-nan[2]
(1. *The Navy Deputation in Residence of Hangzhou*, *Hangzhou* 310012, *China*;
2. *Hangzhou Applied Acoustic Research Institute Science and Technology on sonar Laboratory*, *Hangzhou* 310012, *China*)

Abstract: To improve the performance of bearings-only target motion analysis (TMA), a preprocessing method of underwater target azimuth is proposed. The new method estimates the bearings by using the underwater target motion model, which will reduce the original measurement error efficiently and achieve a better performance of TMA. Simulation result shows the superior performance of the proposed method relative to polynomial approaches.
Key words: underwater target; azimuth preprocessing; target motion analysis

0 引 言

水下目标被动定位由于具有很高的工程实用价值和军事应用背景，一直以来都是水声信号处理的研究热点。但是，目前在所有关于水下目标的参数测量中，方位几乎成为唯一可靠的测量参数，这使得纯方位目标运动分析[1-6](Target Motion Analysis, TMA)技术得到了广泛研究和应用。文献[1]的研究表明，单站纯方位 TMA 必须借助于基阵平台的机动才能实现目标运动参数的观测；为了解决可观测性问题，文献[7,8]研究了单观测站的最佳机动性问题，文献[1,9-11]则研究了联合多观测站的纯方位 TMA 技术。在满足可观测条件下，纯方位 TMA 的性能与多种因素有关，包括单观测站的机动时机、机动方式，多观测站以及目标之间的拓扑结构、滤波方法、方位观测精度等等。

纯方位 TMA 可视为由目标方位到目标位置和运动要素的一个非线性映射系统，对观测方位的测量精度要求较高，在某些条件下即使观测方位中存在少量噪声成分也会导致最终的估计结果产生较大偏差甚至不能收敛，而且这种由于非线性映射引起的偏差往往难以消除。因此，如果能够在定位之前对目标方位的观测值进行预处理以降低观测误差，将会有效提高目标定位的性能。常见的目标方位预处理方法是基于图像处理的方法，即对观测的时间-方位曲线进行二阶或三阶多项式拟合[12]，这种方法在一定程度上降低了观测误差，提高了目标定位的精度。本文提出了一种基于目标运动模型的目标方位观测量预处理方法，并利用仿真数据分析了新方法与传统多项式拟合预处理方法的性能。由于目标运动模型的应用，使得新方法表现出了更优越的性能。

1 基于多项式拟合的预处理方法

将得到的目标方位观测序列按照不同阶多项式拟合是较常见的预处理方法，即假定观测的数据是 $\Theta_0(t_0,\theta_0)$，$\Theta_1(t_1,\theta_1)$，$\Theta_2(t_2,\theta_2)\cdots$，$\Theta_{N-1}(t_{N-1},\theta_{N-1})$，其中 t_i 表示第 i 个时刻，θ_i 表示 t_i 时刻得到的方位观

收稿日期：2013-01-08；**修回日期**：2013-04-23
基金项目：重点实验室预研基金(9140C240213090C2404)资助项目。
作者简介：马敬广(1974－)，男，河北平乡人，博士，研究方向为信号处理、水声系统设计。
通讯作者：马敬广，E-mail: mjg7329@sohu.com

测值。用一个 P 次多项式拟合，使该曲线到各测量点的距离的平方和最小，图 1 给出了利用多项式拟合时间-方位曲线的示意图。

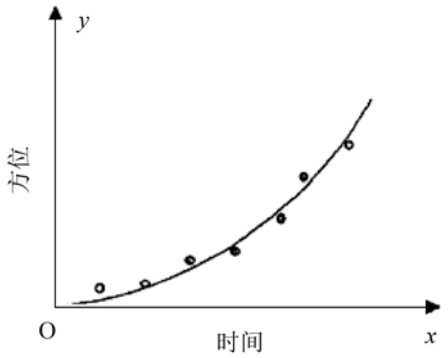


图 1 多项式曲线拟合
Fig.1 Polynomial curve fitting

假定多项式曲线 $L(t_i)$可表示为

$$L(t_i)=a_p t_i^p+a_{p-1}t_i^{p-1}+\cdots+a_1 t_i+a_0 \tag{1}$$

其中，a_k ($k=0,1,2,\cdots P$)表示第 k 阶多项式系数。如果利用最小二乘法对时间-方位曲线拟合，则其误差指标 I 可表示为

$$I=\sum_{i=0}^{N-1}\left(L(t_i)-\Theta_i\right)^2 \tag{2}$$

现在要使 I 最小，则有

$$\frac{\partial I}{\partial a_k}=0,\ \ k=0,1,2,\cdots,P \tag{3}$$

$$\begin{cases}\sum\limits_{i=0}^{N-1}\left(a_p t_i^p+a_{p-1}t_i^{p-1}+\cdots+a_1 t_i+a_0-\theta_i\right)t_i^p=0\\ \sum\limits_{i=0}^{N-1}\left(a_p t_i^p+a_{p-1}t_i^{p-1}+\cdots+a_1 t_i+a_0-\theta_i\right)t_i^{p-1}=0\\ \cdots\\ \sum\limits_{i=0}^{N-1}\left(a_p t_i^p+a_{p-1}t_i^{p-1}+\cdots+a_1 t_i+a_0-\theta_i\right)t_i^0=0\end{cases} \tag{4}$$

解此方程组则可以得到拟合的曲线参数，进而得到拟合的结果。

2 基于目标运动模型的拟合方法

由第 1 节可知，将观测得到的目标方位序列利用多项式拟合可以对观测中的噪声成分进行平滑处理，从而提高目标方位的估计精度。但是，多项式拟合方法实际上是一种基于图像处理的方法，即仅将观测序列作为时间-方位平面中的一条曲线进行处理。这样的好处在于比较直观、方便快捷，而不利之处在于忽视了目标方位变化是由目标与观察站之间的相对运动引起的这一物理现象。事实上由于目标的相对运动引起的目标方位变化在时间-方位平面中的轨迹并不完全符合一条低阶多项式曲线，因此利用多项式进行拟合通常存在较大误差。

本节我们提出一种利用目标运动模型的目标观测方位预处理方法，该方法假定目标在非机动情况下匀速直线航行，并以此为模型对已观测的目标方位进行拟合。在观察站与目标都不作机动的条件下，目标的绝对运动参数和相对运动参数之间存在简单唯一的对应关系，因此，为了简化问题，本文均假定观察站位置固定，对绝对运动参数和相对运动参数不做区分。

假定目标匀速直线运动，其航向为 K_m，速度为 V_m，t_0 时刻的方位真值为 $\overline{\beta(t_0)}$，初始距离为 D_0。选择地理坐标系如图 2 所示，x 轴指向正东，y 轴指向正北，静止的单一观测站位于坐标原点。

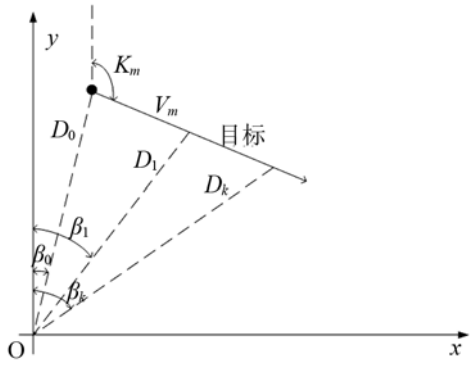


图 2 坐标系示意图
Fig.2 The coordinate frame

因此有

$$\beta(t_j)=\overline{\beta(t_j)}+n(t_j) \tag{5}$$

式中：$\beta(t_j)$表示观测方位($j=0$，1，2，$\cdots$)；$\overline{\beta(t_j)}$为 j 时刻的目标真实方位；$n(t_j)$为 0 均值的随机测量误差，而且有 $E\left(n(t_i)\cdot n(t_j)\right)=\delta_{ij}\sigma_n^2$。

在时刻 t_j，记 $V_{mx}=V_m\sin K_m$，$V_{my}=V_m\cos K_m$，$x_m(t_j)$、$y_m(t_j)$为目标坐标位置，则有

$$\tan\overline{\beta(t_j)}=\frac{x_m(t_j)}{y_m(t_j)}=\frac{D_0\sin\overline{\beta(t_0)}+V_{mx}(t_j-t_0)}{D_0\cos\overline{\beta(t_0)}+V_{my}(t_j-t_0)}=\frac{\sin\overline{\beta(t_j)}}{\cos\overline{\beta(t_j)}} \tag{6}$$

因此有

$$(t_k-t_0)\cos\beta(t_j)\frac{V_{mx}}{D_0}-(t_k-t_0)\sin\beta(t_j)\frac{V_{my}}{D_0}+\varepsilon_j=\xi_j \tag{7}$$

其中

$$\xi_j=\sin\left(\beta(t_j)-\beta(t_0)\right) \tag{8a}$$

$$\varepsilon_j=\frac{r_m(t_j)}{D_0}\tan n(t_j)+\sin(\beta(t_0)-\beta(t_j))(\cos n(t_0)-1)-\cos(\beta(t_0)-\beta(t_j))\sin n(t_0) \tag{8b}$$

式 (8b) 中 $r_m(t_j)=x_m(t_j)\sin\beta(t_j)+y_m(t_j)\cos\beta(t_j)$ 表示目标到观察站的距离。

将 ξ_j 看作新的测量值，ε_j 为等效的测量误差，定义 $\boldsymbol{X}_0=\begin{bmatrix}\frac{V_{mx}}{D_0}\\ \frac{V_{my}}{D_0}\end{bmatrix}$ 为新参数，当 j=0，1，2，…时，可写成如下方程

$$\boldsymbol{z}_k=\boldsymbol{A}_k\boldsymbol{X}_0+\boldsymbol{e}_k \tag{9}$$

其中

$$\boldsymbol{z}_k=\begin{bmatrix}\sin(\beta(t_1)-\beta(t_0))\\ \sin(\beta(t_2)-\beta(t_0))\\ \vdots\\ \sin(\beta(t_k)-\beta(t_0))\end{bmatrix} \tag{10}$$

$$\boldsymbol{A}_k=\begin{bmatrix}(t_1-t_0)\cos\beta(t_1)-(t_1-t_0)\sin\beta(t_1)\\ (t_2-t_0)\cos\beta(t_2)-(t_2-t_0)\sin\beta(t_2)\\ \vdots\\ (t_k-t_0)\cos\beta(t_k)-(t_k-t_0)\sin\beta((t_k))\end{bmatrix} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{e}_k=\begin{bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \vdots\\ \varepsilon_k\end{bmatrix} \tag{12}$$

利用等式(9)可得到

$$\hat{\boldsymbol{X}}_0=(\boldsymbol{A}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}_k)^{-1}\boldsymbol{A}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{z}_k \tag{13}$$

因此可以得到目标观测方位的拟合结果为

$$\hat{\beta}_j=\arg\tan\left(\frac{\sin\beta(t_0)+\hat{\boldsymbol{X}}_0(1)(t_j-t_0)}{\cos\beta(t_0)+\hat{\boldsymbol{X}}_0(2)(t_j-t_0)}\right) \tag{14}$$

其中 $\hat{\boldsymbol{X}}_0(1)$、$\hat{\boldsymbol{X}}_0(2)$ 分别表示 $\hat{\boldsymbol{X}}_0$ 的第一个元素和第二个元素。

3　观测方位预处理仿真分析

本节将利用仿真数据研究不同目标方位预处理方法对目标定位结果的影响。假定目标方位的观测误差为零均值的高斯白噪声，方差为 σ^2，目标方位观测输出间隔为 1 s，整个观测过程的时间长度为 1000 s。在观测时间内，目标作匀速直线航行，航速为 10 m·s^{-1}，航向 80°；间距为 400 m 的双基阵观察站(位置固定)分别测量目标的方位。

图 3 给出了基阵平台与目标的位置关系示意。

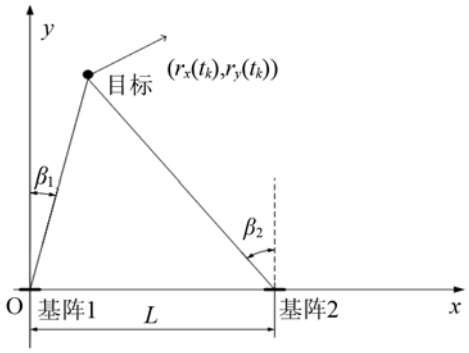


图 3　两基阵平台与目标的相对位置关系示意

Fig.3　Diagrammatic sketch of relative position between arrays and target

定义：

基阵 1 目标方位测量值为

$$\beta_1(k)=\arctan[r_x(t_k)/r_y(t_k)]+w_1(k) \tag{15}$$

基阵 2 目标方位测量值为

$$\beta_2(k)=\arctan[(r_x(t_k)-L)/r_y(t_k)]+w_2(k) \tag{16}$$

其中：$t_k=t_0+k\Delta t$ ($k=0,1,2,\cdots,999$)，$t_0=0$，Δt 为 1s；$w_1(k)$、$w_2(k)$ 分别为两基阵平台的方位测量误差。利用伪线性卡尔曼滤波方法可建立状态方程式(17)和测量方程式(18)：

$$\boldsymbol{X}(t_k)=\boldsymbol{\Phi}(t_k,t_{k-1})\boldsymbol{X}(t_{k-1}) \tag{17}$$

$$\boldsymbol{Z}(t_k)=\boldsymbol{H}_k\cdot\boldsymbol{X}(t_k) \tag{18}$$

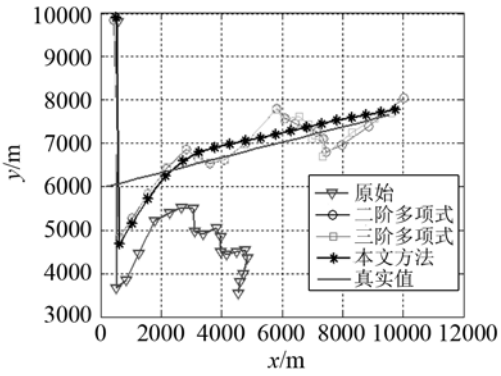
其中，$\boldsymbol{X}(t_k)=\begin{bmatrix}r_x(t_k) & r_y(t_k) & V_{mx} & V_{my}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{\Phi}(t_k,t_{k-1})=\begin{bmatrix}1&0&T&0\\0&1&0&T\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}$；$T$ 为方位序列采样步长，伪观测向量 $\boldsymbol{Z}(t_k)$ 和伪观测矩阵 $\boldsymbol{H}_k$ 分别为式(19)和式(20)：

$$\boldsymbol{Z}(t_k)=\begin{bmatrix}0\\ L\cos(\beta_2(k))\end{bmatrix} \tag{19}$$

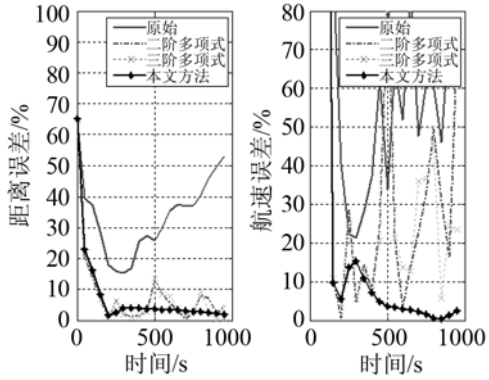
$$\boldsymbol{H}_k=\begin{bmatrix}\cos(\beta_1(k)) & -\sin(\beta_1(k)) & 0 & 0\\ \cos(\beta_2(k)) & -\sin(\beta_2(k)) & 0 & 0\end{bmatrix} \tag{20}$$

由以上给出的状态方程、测量方程和观测矩阵结合卡尔曼滤波即可实现基于双基阵纯方位的目标运动分析。图 4~6 分别给出了在不同观测噪声条件下的处理结果，其中多项式拟合分段长度固定为 250 s。

由图 4~6 可以看出：(1) 由于观测噪声的存在，利用原始的方位观测值进行目标运动分析导致了很大的估计误差而无法收敛，其性能随观测噪声方差的增加而恶化；(2) 利用二阶、三阶多项式拟合预处理，有效降低了定位误差，当观测噪声方差增加时，其估计精度有所降低；(3) 不同噪声条件下，本文方法的预处理使得目标距离和航速的估计精



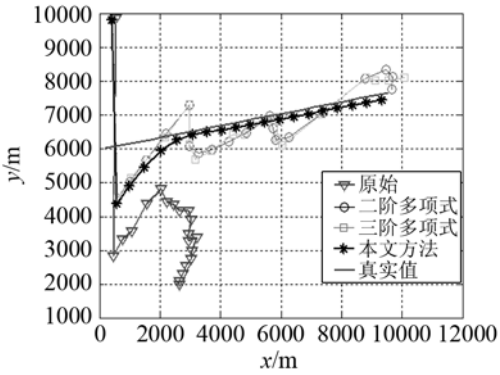
(a) 目标航迹



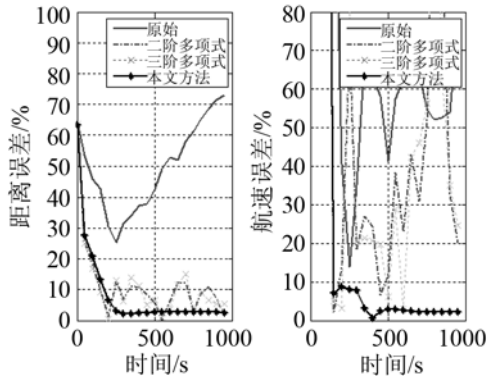
(b) 估计误差

图 4 观测噪声方差为 0.5

Fig.4 Variance of observation noise is 0.5



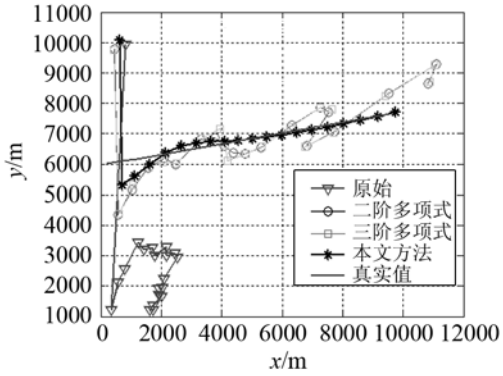
(a) 目标航迹



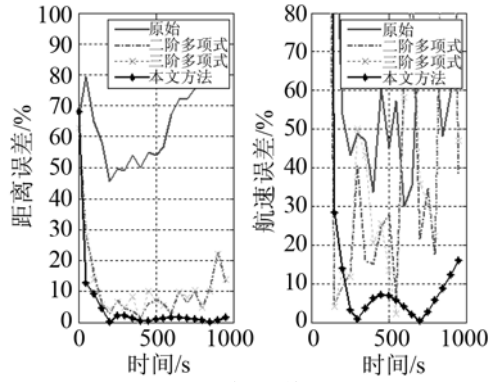
(b) 估计误差

图 5 观测噪声方差为 1.0

Fig.5 Variance of observation noise is 1.0



(a) 目标航迹



(b) 估计误差

图 6 观测噪声方差为 2.0

Fig.6 Variance of observation noise is 2.0

度显著提高，其性能优于二阶、三阶多项式拟合方法，由于利用了目标运动模型而不是基于时间-方位曲线的图像信息，因此本文方法的性能受观测噪声方差的变化影响不大。

4 结 论

本文提出了一种基于水下目标运动模型的观测方位预处理方法，提高了目标方位的估计精度，并有效改善基于观测方位的目标运动分析性能。由于该方法利用了水下目标的运动特性，与常见的基于时间-方位曲线的低阶多项式拟合方法相比，可获得更高精度的定位性能并且对观测噪声的方差变化更为稳健。需要指出的是，由于目标运动分析具有非线性系统的本质特性，观测方位的预处理虽然可有效降低观测误差，但是在某些条件下仍可引起较大的估计偏差，而如何解决这一问题还有待于进一步地深入研究。

参 考 文 献

[1] Lindgren A G, Gong K F. Position and velocity estimation via bearing observations[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1978, AES-**14**: 564-577.

[2] Aidala V J. Kalman filter behavior in bearing-only tracking applications[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1979, AES-**15**: 29-39.

[3] Nardone S C, Lindgren A G, Gong K F. Fundamental properties and performance of conventional bearings-only target motion analysis[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1984, AC-**29**: 775-787.

[4] Karl Spingarn. Passive position location estimation using the extended Kalman filter[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1987, AES-**23**(4): 558-567.

[5] 潘志坚, 阎福旺, 刘孟庵, 等. 纯方位水下目标运动分析方法研究[J]. 声学学报, 1997, **22**(1): 87-92.
PAN Zhijian, YAN Fuwang, LIU Mengan, et al. Method for bearings-only underwater target motion analysis[J]. Acta Acustica, 1997, **22**(1): 87-92.

[6] 胡友峰, 焦秉立. 非机动水下三维情形的纯方位目标运动分析[J]. 系统仿真学报, 2003, **15**(6): 776-779.
HU Youfeng, JIAO Bingli. Passive underwater target motion analysis based upon bearing-elevation measurement in three dimensions[J]. Journal of System Simulation, 2003, **15**(6): 776-779.

[7] Passerieux J M, Cappel D Van. Optimal observer maneuver for bearings-only tracking[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, **34**(3): 777-788.

[8] Fawceft J A. Effect of course maneuvers on bearings-only range estimation[J]. IEEE Transaction on Acoustic speech and signal, 1988, **36**(8): 1193-1199.

[9] Tramois O, Cadre J P Le. Target motion analysis with multiple arrays performance analysis[J] IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1996, **32**(3): 777-788.

[10] 杜选民, 姚蓝. 多基阵联合的无源纯方位目标运动分析研究[J]. 声学学报, 1999, **24**(6): 604-610.
DU Xuanmin, YAO Lan. Passive bearings-only target motion analysis based on association of multiple arrays[J]. Acta Acustica, 1999, **24**(6): 604-610.

[11] 孙伟. V 形阵被动测距测向性能分析[J]. 声学与电子工程, 2011 (1): 24-28.
SUN Wei. Performance analysis of azimuth and range estimation based on V shape arrays[J]. Acoustic and Electronics Engineering, 2011 (1): 24-28.

[12] 陶林伟. 基于被动声纳的目标运动要素求解[D]. 西安: 西北工业大学, 2004.
TAO Linwei. Solution of target motion elements based on passive sonar[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004.