基于预方位处理的双基阵方位-线谱测距方法

吴培荣，陆佶人
(东南大学无线电工程系，南京 210018)

摘要：通过研究运动目标与观测平台保持匀速直线运动时目标方位随时间的变化规律，得出二者近似满足二次曲线的关系，以此为基础提出了一种基于二次曲线模型的目标观测方位序列的滤波预处理方法，然后将经过滤波预处理后的目标方位序列连同目标的某一特征线谱信息用于双基阵声纳被动测距。计算机仿真计算结果表明，目标方位序列经滤波预处理后的双基阵方位-线谱测距方法较预处理前能够更加精确地估计目标的距离。

关键词：双基阵；方位-线谱测距；方位预处理
中图分类号：TB556 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-3630(2007)-04-0611-04

Study on two arrays bearing-line spectrum ranging based on preprocessing bearings

WU Pei-rong, LU Ji-ren
(Department of Radio Engineering, Southeast University, Nanjing 210018, China)

Abstract: By analyzing the case in which an observer keeps moving with constant course and velocity, it is found that the relationship between the bearings of a target and the time is approximate quadratic. Thus a preprocessing method of filtering the target bearings observed by two arrays is proposed. The preprocessed bearings and the characteristic line spectrum of the target are used for the dual-array passive ranging. Simulation results show that after the preprocessing the range of target can be estimated more precisely.

Key words: two arrays; bearing-line spectrum ranging; bearing preprocessing

1 引 言

水下目标的被动定位一直是水声学研究领域的重点和难点问题之一，长期以来，由于声纳技术条件的限制，目标的方位一直是被动声纳所能够稳定、可靠获取的目标信息，因此，基于单阵声纳方位信息的方法(纯方位目标运动分析)一直是主要的被动定位方法，但是该方法必需声纳基阵所在观测平台作有效的机动，并且估计收敛时间长、估计精度低[1-3]。随着声纳技术的发展，现在的声纳除了能够获取目标的方位信息外还能够检测目标的特征线谱信息，特别是目标线谱多普勒频移包含着目标的运动信息，可以连同观测到的目标方位信息实现定位，研究表明，在单阵声纳方位的基础上引入了目标的某一线谱信息后，可在一定程度上提高估计的精度并且摆脱需要观测平台作有效机动的限制[4]；但是文献[5]指出，当目标对着声纳基阵运动即目标方位相对基阵是一常数时，单阵方位-线谱测距方法是不可观测的，而双阵方位-线谱测距方法却不存在这一限制，同时指出了双阵方位-线谱测距方法在精度和稳健性方面具有更好的性能；文献[4]通过对双阵方位-线谱测距方法的仿真分析得出，影响该测距方法性能的主要因素是双基阵声纳所获取目标方位精度，由此可见，减小声纳基阵获取的目标的方位误差是

收稿日期：2006-12-10；修回日期：2007-03-23
作者简介：吴培荣(1964-)，男，浙江人，博士研究生，研究方向为水声信号处理。
通信作者：吴培荣，E-mail, pprrwu@sina.com

改善双基阵方位-线谱测距方法性能的有效途径。

本文根据目标-观测平台保持匀速直线运动时目标方位随时间变化的规律，研究了一种基于二次曲线模型的目标观测方位预处理方法，然后将预处理后的目标方位用于双基阵方位-线谱测距模型。计算机仿真结果表明，方位序列经预处理后的双基阵方位-线谱测距精度较未处理前有了明显的改善。

2 原理及算法模型

2.1 双基阵方位-线谱测距方法模型

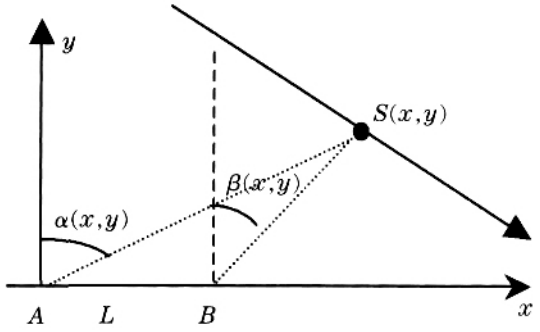

图1 双基阵与目标S之间的几何关系

Fig.1 The geometrical position of the target and the observer

假定一声源目标S和探测器在同一个平面内，目标以匀速直线运动，状态平稳。目标向外辐射频率为f_0的信号。两声纳基阵随观测器运动，声纳基阵A、B测得目标方位角分别为$\alpha(k)$、$\beta(k)$，两基阵间距为L。定义目标运动状态向量为：$X_T=[x_T, y_T, v_{Tx}, v_{Ty}]^T$，其中$x_T$, y_T和v_{Tx}, v_{Ty}分别为目标相对坐标原点的距离和沿坐标轴x与y方向的绝对速度。定义观测器的运动状态向量为：$X_O=[x_o, y_o, v_{ox}, y_{oy}]^T$，其中$x_o$, y_o和v_{ox}, y_{oy}分别为观测器相对原点的距离和沿坐标轴x与y方向的绝对速度。则目标与观测器的相对状态向量可为：$X=X_T-X_O=[r_x, r_y, v_x, v_y]^T$其中$r_x$, r_y和v_x, v_y分别为目标与观测器的相对距离和相对速度。以基阵A为参考，状态方程可表示为[7]：

$$X(t_{k+1})=\boldsymbol{\Phi}_k X(t_k)=\begin{bmatrix}1&0&\Delta t&0\\0&1&0&\Delta t\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}X(t_k) \tag{1}$$

其中$\Delta t=t_{k+1}-t_k$，则两基阵对目标的方位分别为[7]：

$$\alpha_m(t_k)=\alpha(t_k)+\omega_\alpha=\tan^{-1}\left(\frac{r_x}{r_y}\right)+\omega_\alpha \tag{2}$$

$$\beta_m(t_k)=\beta(t_k)+\omega_\beta=\tan^{-1}\left(\frac{r_x-L}{r_y}\right)+\omega_\beta \tag{3}$$

声纳基阵B对目标频率的测量为[8]：

$$f_m(t_k)=f_0\cdot\left(1-\frac{v_x\sin\beta(t_x)+v_y\cos\beta(t_x)}{c}\right)+\omega_f \tag{4}$$

ω_α、ω_β、ω_f分别表示基阵A和基阵B测量目标方位角和线谱频率的量测噪声，假定它们都是均值为零的高斯白噪声。因此，含噪声的观测方程为[9]：

$$Z(t_x)=\begin{bmatrix}\alpha_m(t_k)\\\beta_m(t_k)\\f_m(t_k)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\tan^{-1}(r_x/r_y)\\\tan^{-1}\left(\frac{r_x-L}{r_y}\right)\\f_0\cdot\left(1-\frac{v_x\sin\beta(t_x)+v_y\cos\beta(t_x)}{c}\right)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\omega_\alpha\\\omega_\beta\\\omega_f\end{bmatrix} \tag{5}$$

由状态方程和观测方程可知本估计问题为一非线性问题，在此对式(2)、(3)、(4)进行伪线性处理(具体方法请参见文献[9])得到：

$$Z'(t_x)=H'(t_x)X(t_x)+e(t_x) \tag{6}$$

经过伪线性处理后将原来的非线性问题转化为一线性问题，从而可直接采用最小二乘法或者Kalman滤波进行估计。但是，伪线性处理所带来的问题是估计的结果是偏倚的，且偏倚的大小与系统输入误差大小有关(在此为方位和线谱观测精度)。有分析表明，方位误差对系统估计的影响更为明显。因此，在进行系统滤波估计之前先对获取的方位信息进行滤波预处理以减小误差就可以减小系统估计所产生的偏倚，从而提高整个系统估计的精度，这也是本文进行方位滤波预处理的根本用意。

2.2 目标观测方位预处理方法

当目标-观测平台保持匀速直线运动时，目标方位随时间呈非线性变化，这就使得对目标方位的滤波和估计显得比较复杂。此处，根据目标方位随时间的变化规律建立适当的数学模型，研究一种基于模型的目标方位滤波、预测方法。

将式(2)在$t_k=0$处进行泰勒展开得到：

$$\alpha(t_k)=\alpha(0)+\alpha'(0)t_k+\frac{\alpha''(0)t_k^2}{2}+\cdots+\frac{\alpha^{(n)}(0)t_k^n}{n!}+\omega_\alpha \tag{7}$$

其中$\alpha^{(n)}(0)=C/D_0^{2n}$, $D_0=\sqrt{r_k^2+r_y^2}$(即目标相对观测器的初始距离)，且C满足关系$\lim_{n\to\infty}\alpha^{(n)}(0)=0$，因此，式(7)的高次项是可以忽略的小量，取前三项得到目标方位随时间的关系近似满足：

$$\alpha(t_k)=c+bt_k+at_k^2 \tag{8}$$

从而建立起目标方位随时间变化的简单数学模型，这样就可以根据此模型对目标方位进行滤波和预测。设目标方位观测向量为：

$$Z_\alpha=[\alpha(t_1),\alpha(t_2)\cdots\alpha(t_n)]^T \tag{9}$$

观测矩阵为：$H_\alpha=[1,t_k,t_k^2]$，待估计量为：$X_\alpha=[c,b,a]^T$，由最小二乘法得到：

$$\hat{X}_\alpha=(H_\alpha^TH_\alpha)H_\alpha^TZ_\alpha \tag{10}$$

在估计出参数 a、b、c 后，就可以对任意时刻目标的方位利用式(10)进行预测。同理，将式(3)进行泰勒展开得到类似的结果。

3　仿真分析

本节通过仿真来分析上述的滤波方法，并比较滤波预处理前后的差异，仿真条件为：基阵 A、B 方位测量误差服从零均值且方差分别为 0.3°、1.0°的高斯分布(注：本文的仿真都是假设误差为零均值)，两基阵间隔 1000m，目标航向 150°，速度 8m/s，目标初始距离为 20km，观测平台航向 90°速度 3m/s，目标的某一特征线谱频率为 400Hz，且频率测量误差为 0.1Hz。得到结果如图 2、图 3 所示，图 2 为基阵 B 的观测方位预处理前后的差异，图 3 为方位预处理前后测距模型性能的差异。(注：图中距离差为目标真实距离与估计距离之差。)

真结果表明，经方位预处理后，目标观测方位的随机误差明显减小，如图 2 所示；用经过滤波预处理后的方位连同目标的某一线谱信息估计目标的距离时，测距精度有了明显提高，如图 3 所示，在未经预处理前测距相对误差为 19%，而经过方位预处理后，测距精度提高到 4%左右。

前面分析已经指出，本文的方位滤波预处理的目的是在进行系统滤波估计之前对获取的方位信息进行滤波预处理，以减小误差，从而减小伪线性估计时所产生的偏倚。下面仿真分析大方位测量误差情况下方位预处理方法的性能。假设基阵 A、B 方位测

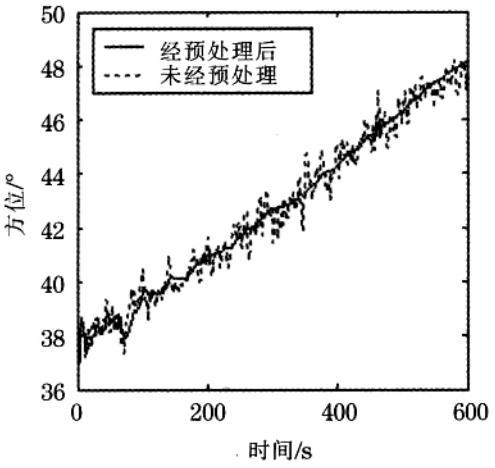

图 2　基阵 B 观测方位预处理前后比较

Fig.2　The comparison of the bearings observed and after preprocessing

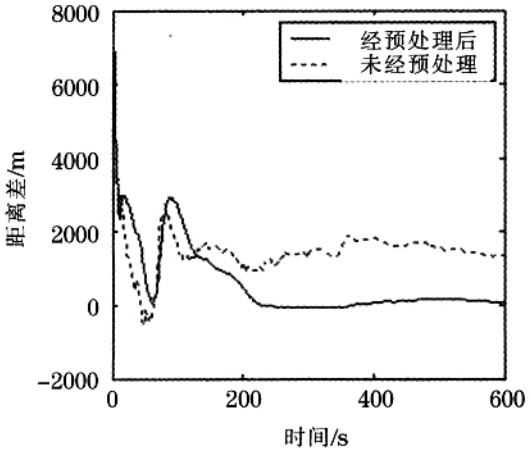

图 3　方位预处理前后测距模型性能比较

Fig.3　The comparison of the ranging performance before and after preprocessing

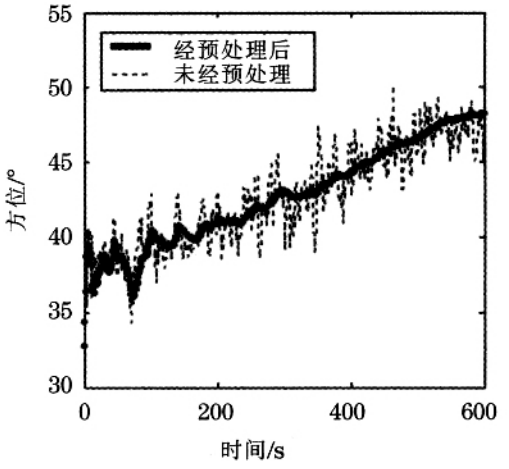

图 4　基阵 B 观测方位预处理前后比较

Fig.4　The comparison of the bearings observed and after preprocessing

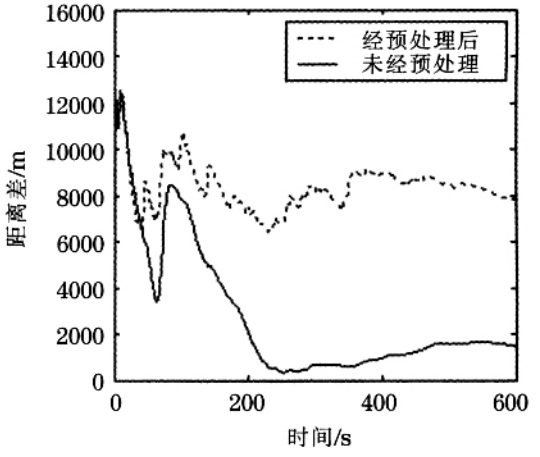

图 5　方位预处理前后测距模型性能对比

Fig.5　The comparison of the ranging performance before and after preprocessing

量误差服从零均值且方差分别为1.0°、3.0°的高斯分布，其它条件与前面一致，仿真结果图4、图5所示，由仿真结果图可以看出，当两声纳基阵的方位观测误差较大时，若不进行滤波预处理则系统估计偏倚明显增大，测距相对误差高达60%左右；而经过方位预处理后系统估计的偏倚明显减小，测距相对误差仅为15%左右。

4 结 论

本文根据当目标-观测平台保持匀速直线运动时目标方位随时间的变化规律，研究了一种基于二次曲线模型的目标方位滤波预处理方法，然后将经过滤波预处理后的目标方位序列用于双基阵方位-线谱测距模型。计算机仿真计算结果表明，双基阵声纳观测到的目标方位经预处理后，双阵方位-线谱测距模型的测距精度比预处理前得到明显改善。

参 考 文 献

[1] TAO X J. Passive target tracking using maximum likelihood estimation[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32(4): 1348.

[2] Tremois Oliver. Bearing-only tracking for maneuvering source[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(1): 179.

[3] Asserieux J M P. Optimal observer maneuver for bearings-only tracking[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(3): 777.

[4] 赵申东, 宋志杰. 基于方位和线谱频移的TMA方法[J]. 火力与指挥控制, 2004, 29(3): 67-71.
ZHAO Shendong, SONG Zhijie. Fire control and command control, 2004, 29(3): 67-71.

[5] 陈伏虎, 胡青. 多阵方位-频率目标运动分析算法研究[A]. 声纳技术研讨会[C]. 杭州, 2000, 38-44.
CHEN Fuhu, HU Qing. Target motion analysis based on the dual array bearing and frequency[A]. Sonar technology pro-seminar[C]. Hangzhou, 2000, 38-44.

[6] 胡友峰, 李迎春. 双基阵的被动TMA及其性能研究[J]. 兵工学报, 2003, 24(1): 45-48.
HU Youfeng, LI Yinchun. Passive target motion analysis and its performance based on two arrays[J]. ACTA ARMAMENTARII, 2003, 24(1): 45-48.

[7] 关欣, 何友, 衣晓. 双基阵纯方位水下被动目标跟踪性能仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2003, 947-949.
GUAN Xin, HE You, YI Xiao. Emulational analysis on the performance of underwater bearing-only passive target tr-acking[J]. Journal of System Simulation, 2003, 24(1): 45-48.

[8] 胡友峰. 詹艳梅. 基于状态矢量融合的多基地无源目标运动分析[J]. 声学学报, 2002, 27: 316-320.
HU Youfeng, ZHAN Yanmei. Dual array passive target motion analysis based on state vector fusion[J]. Acta Acustica, 2002, 27: 316-320.

[9] 胡友峰. 孙进才. 基于方位频率测量的水下被动目标运动分析及其特性研究[J]. 西北工业大学学报, 2001, 19: 537-542.
HU Youfeng, SUN Jincai. Underwater target motion analysis based on the bearing and frequency measuring and its performance analysis[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2001, 19: 537-542.