

固定单基地被动声纳目标航向估计方法研究

陈 喆,戴卫国,王易川

(海军潜艇学院水声中心 青岛 266100)

摘要:针对匀速直线运动的目标,依据相对运动三角形,利用任意不同时刻的3个方位值计算得到目标初始舷角,进而求得目标航向;基于一元线性回归分析理论,充分利用所测目标时间方位序列,构造系统函数,依此提出一种精度较高的目标航向估计算法;分析了不同运动态势下,观测数据的时间长度和方位精度对估计结果的影响。仿真结果表明,提出的算法精度较高,在观测方位误差相对较大时也同样适用,且随着观测数据时长增加、方位变化率增大以及观测方位精度增高,目标航向的估计结果越稳定。

关键词:固定单基地;被动声纳;纯方位;航向;一元线性回归;影响因素

中图分类号: TH73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Target course estimation for fixed monostatic passive sonar system

Chen Zhe, Dai Weiguo, Wang Yichuan

(Acoustic Center of Navy Submarine Academy, Qingdao 266100, China)

Abstract: Aiming at targets performing uniform linear motion, the target course is obtained with initial target course angle calculated by using three azimuths at any different time, according to the relative motion model in torpedo attacking theory. Based on the simple linear regression and bearing sequence, an accurate estimation algorithm of target course is proposed. The influences of the time period of observed data and course accuracy on estimation results are analyzed. The simulation results show that the proposed algorithm is of high accuracy, which is also practicable while the measuring error is relatively large. Moreover, the target course estimation result has the advantage of high accuracy and stability with the increasing of observed data length, the change rate of azimuth, and the precision of azimuth.

Keywords: fixed monostatic; passive radar; bearing-only; course; simple linear regression; influencing factor

1 引 言

纯方位目标运动分析 (bearings-only target motion analysis, BOTMA) 是指仅利用观测站获取的目标方位信息估计目标运动参数的方法,具有隐蔽性好、作用距离远、抗干扰能力强等特点,近年来已成为我国跟踪预警系统中的重要组成部分^[1-2]。

对于单个声纳平台而言,要求其必须进行有效机动才能求解目标运动参数,若平台固定,则不能同时解出目标航向、航速、距离等信息,即是一个不完全可测系

统^[3-5]。但当目标进行匀速直线运动时,其部分状态参数是可观测的,这在观测目标较多的情况下可以有效指导系统排除干扰目标,进而提高系统的监测效率。

目前,国内外关于利用单站求解 BOTMA 问题的研究大多集中于系统可观测性分析^[6-7]和观测器最优机动轨迹^[8]以及目标定位跟踪算法^[9-10],而对固定单站 BOTMA 方法研究相对较少。文献[11]基于角度、角速度、多普勒频率和多普勒频率变化率4个观测量建立固定单站无源定位模型,通过单次观测即可解算出目标的全部状态量,但其需要预先获得目标载波频率以及多普勒频率变化率等信息;文献[12]从目标运动的几何模型出发求解航向,实现更为简单,但该方法是利用等时间间

隔的3个方位角建立模型,具有一定的局限性,且其对方位测量精度要求较高,仅适用于方位测量误差较小情况;而声纳测量误差较大,该方法不适用;文献[13]假定静止单站能够等间距的连续3次获取目标的方位,进而求出目标航向角的解析表示式。但其误差分析也证实,在测向角误差均方根值为1°时,仅基于纯方位测量所获得的解的精度较低。

本文主要针对匀速直线运动目标,提出一种精度较高的目标航向估计算法,该方法可根据任意时刻方位序列进行求解,且在观测方位误差相对较大时也同样适用,并分析了不同运动态势下,可能影响结果估计精度的因素。

2 问题的数学描述

固定单观测站纯方位被动目标运动分析态势如图1所示。只考虑其运动平面的二维情形,以观测站为坐标原点 O ,以正北方向为 y 轴,正东方向为 x 轴建立坐标系。

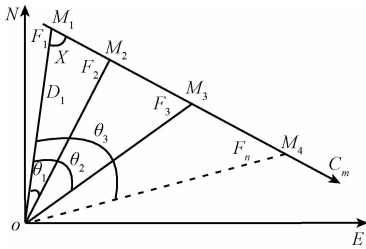


图1 目标运动几何态势

Fig. 1 The geometric state of moving target

假定目标作匀速直线运动,观测站于 t_1 时刻测得目标方位 F_1 ,此时目标位于 M_1 点。经过任意间隔时间,于 t_2 时刻测得目标方位 F_2 ,此时目标位于 M_2 点,又经过任意间隔时间,于 t_3 时刻测得目标方位 F_3 ,此时目标位于 M_3 点。依此类推,可测得目标方位 F_n ,本文的任务就是根据观测到的方位序列 $\{F_n\}$ 估计目标的航向 C_m 。

3 系统模型

基于上述几何态势,选取任意3个不同时刻的方位值求解目标初始舷角 X 。由于目标方位的任意性,这里不妨选取 F_1, F_2, F_3 ,令 $t_{12} = t_2 - t_1, t_{13} = t_3 - t_1, \theta_1 = F_2 - F_1, \theta_2 = F_3 - F_1$ 。根据三角形正弦定理,在 $\triangle OM_1M_2$ 和 $\triangle OM_1M_3$ 中,分别有:

$$\frac{V_m \cdot t_{12}}{\sin\theta_1} = \frac{D_1}{\sin(X + \theta_1)} \quad (1)$$

$$\frac{V_m \cdot t_{13}}{\sin\theta_2} = \frac{D_1}{\sin(X + \theta_2)} \quad (2)$$

式中: V_m 为目标速度, D_1 为 t_1 时刻观测站与目标之间的距离, X 为目标初始舷角,取值 $X \in (0, \pi)$ 。当目标初始舷角为0或 π 时,此时目标航向与目标方位线平行,观测值所接收的方位值始终保持不变,无法求取目标航向,这里不作考虑。

联合式(1)、(2),消去参数 V_m 和 D_1 得:

$$\frac{t_{13} \cdot \sin\theta_1}{t_{12} \cdot \sin\theta_2} = \frac{\sin(X + \theta_1)}{\sin(X + \theta_2)} \quad (3)$$

将式(3)展开并化简:

$$\frac{t_{13} \cdot \sin\theta_1}{t_{12} \cdot \sin\theta_2} = \frac{\cos\theta_1 + \cot X \cdot \sin\theta_1}{\cos\theta_2 + \cot X \cdot \sin\theta_2} \quad (4)$$

即可求得目标初始舷角的余切值:

$$\cot X = \frac{t_{12} \cdot \cot\theta_1 - t_{13} \cdot \cot\theta_2}{t_{13} - t_{12}} \quad (5)$$

由式(5)可知,目标初始舷角仅与不同时刻方位之间的夹角有关,即通过任意间隔时间的任意3个方位值即可求出目标初始舷角。

$$X = \text{acot}\left(\frac{t_{13} \cdot \cot\theta_2 - t_{12} \cdot \cot\theta_1}{t_{12} - t_{13}}\right) \quad (6)$$

再将其与目标方位相结合,即可直接求出目标航向 C_m 。需要注意的是,目标初始舷角范围 $X \in (0, \pi)$,与反余切函数的值域相同,因此采用式(6)给出的模型求得结果;若采用反正切函数,当 $X = \pi/2$ 时,存在无意义情况,影响系统模型的适用性。

4 一元线性回归分析

一元线性回归分析可以用来研究因变量 y 与自变量 x 之间是否具有线性相关关系,以及线性相关的程度,并可通过相关系数给出对应关系式^[14]。

4.1 一元线性回归模型

一元线性回归的数学模型为:

$$y = a + bx + \varepsilon \quad (7)$$

式中: a, b 为常数,称为待定回归系数; ε 为随机误差。对任意观测值可以记为:

$$y_i = a + bx_i + \varepsilon_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

式中: y_i 表示 y 的第 i 个观测值, x_i 表示 x 的第 i 个观测值, ε_i 表示第 i 次观测的随机误差。

回归分析的主要目的就是基于样本观测值 $\{(x_n, y_n)\}$,找到一条能最好拟合自变量与因变量之间关系的直线,并确定待定回归系数 a, b 的估计值 \hat{a}, \hat{b} 。

由式(5)可以看出,由于目标的初始舷角为一固定值,则有 $\cot X$ 为一定值。依据回归模型式(8)和系统模型式(5)构造系统函数,令:

$$\begin{cases} x_i = t_{i+2} - t_2 \\ y_i = (t_2 \cdot \cot\theta_i - t_{i+2} \cdot \cot\theta_{i+1}) \\ K = \cot X \end{cases} \quad (9)$$

则:

$$y_i = K \cdot x_i \quad (10)$$

可以看出,理论上 (x_i, y_i) 应呈现严格的线性关系,因此可以用回归分析方法求取目标初始舷角。

4.2 最小二乘估计算法

对一元回归分析模型式(7)而言,存在多种确定估计值 \hat{a} 、 \hat{b} 的方法,其中最常用的是最小二乘法。可以证明,在一元线性回归模型中,最小二乘估计量 \hat{a} 、 \hat{b} 是回归系数 a 、 b 的最优线性无偏估计。

针对式(10),采用最小二乘估计算法,根据不同样本点 (x_i, y_i) 求参数 K 的估计值 K_0 。为了方便,引入常用记号:

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i & \bar{y} = \frac{1}{n} \sum y_i \\ l_{xx} = \sum (x_i - \bar{x})^2 = \sum (x_i - \bar{x})x_i \\ l_{yy} = \sum (y_i - \bar{y})^2 = \sum (y_i - \bar{y})y_i \\ l_{xy} = \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \sum (x_i - \bar{x})y_i \end{cases} \quad (11)$$

则回归系数为:

$$\hat{K} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{l_{xy}}{l_{xx}} \quad (12)$$

由此,便可求解出目标初始舷角为:

$$X = \arccot(\hat{K}) \quad (13)$$

此时,再根据目标与观测值的相对位置即可得到目标航向。可以看出,采用此种方法无需再考虑不满足定义的问题。

4.3 线性回归效果显著性检验

根据式(10)给出的计算模型,分子、分母应该呈现严格的线性关系,然而在实际应用过程中,由于方位误差等影响,使得计算模型不再满足严格的线性关系。若采用最小二乘法求回归系数,即使样本观测值不具备线性相关性,也可以给出相应的估计结果,显然,这种情况是没有意义的。因此,在求解之前需要先检验样本点 (x_i, y_i) 是否满足一定的线性相关性。

常用的显著性检验方法有 F 检验法、 t 检验法和 r 检验法,本文采用 r 检验法对所建立模型进行检验。

构造如下统计量:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{l_{xy}}{\sqrt{l_{xx} \cdot l_{yy}}} \quad (14)$$

称其为样本相关系数,是总体相关系数的估计值,取值范围 $|r| \in [0, 1]$,且当 $|r| = 1$ 时,表示所有样本点 (x_i, y_i) 都落在一条直线上,此时 x_i 与 y_i 之间存在着确定

的线性关系;当 $r = 0$ 时,表示 x_i 与 y_i 之间不存在线性相关关系; $0 < |r| < 1$ 为绝大多数情形,此时 x_i 与 y_i 存在着一定的线性相关关系,且 $|r|$ 越接近1表示二者线性相关程度越密切。

因此, $|r|$ 的大小反映了两个变量之间线性关系的好坏程度,可以用来检验模型是否适用于回归分析。

5 数值模拟与分析

为了验证本文提出算法的有效性,运用MATLAB软件对其进行仿真分析。

5.1 系统模型验证

参考图1所示的目标运动几何态势,假设目标匀速直航,设定目标航向 $C_m = 150^\circ$,航速 $V_m = 12$ 海里/h,观测站距离目标初始距离 $D_1 = 15$ km,目标初始方位 $F_1 = 15^\circ$ 。观测时间间隔 $\Delta t = 5$ s,总时间长度15 min,由此便可得出假定目标的时间方位序列 $\{F_n\}$ 。在实际应用中,由于方位测量存在误差,这里加入标准差为 0.3° 的随机误差,此时最大误差 1° ,仿真结果如图2所示。

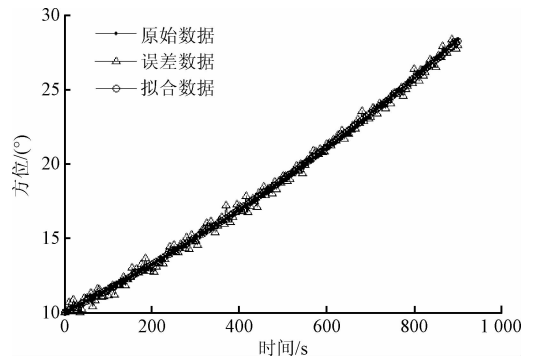


图2 方位观测数据

Fig. 2 Azimuth observation data

首先验证系统模型,即根据任意3个不同时刻的方位值求解目标航向 C_m 。分别取50、110和220 s 3个时刻的不含误差的方位值 $F_1 = 15.8^\circ$ 、 $F_2 = 16.9^\circ$ 、 $F_3 = 18.9^\circ$,将其代入式(6)计算目标初始舷角 $X = 45.8^\circ$,进而可以求得目标航向 $C_m = 150^\circ$,到此即验证了系统模型的正确性。

5.2 观测数据预处理

当考虑含误差数据时,直接使用式(6)给出的计算模型无法得到准确的结果,此时需要充分利用目标的方位数据 $\{F_n\}$,并结合回归分析模型求解。为了减小测量方位误差对最终结果带来的影响,在应用 $\{F_n\}$ 之前,通常需要对其进行滤波处理。常用的滤波方法是多项式拟合的^[15],一般采用2阶或3阶即可达到目的。本文采用2阶多项式拟合对含有误差的方位序列进行拟合,结果如图2所示。

5.3 回归分析

由式(5)可知,任意3个不同时刻的方位值均可以求得目标的初始舷角。因此,将拟合后的方位序列 $\{F_n\}$ 代入式(5),并结合式(9),可以计算出一系列样本点 (x_i, y_i) 所构成的集合 $\{(x_i, y_i)\}$,将其以二维平面坐标系绘图表示如图3所示。

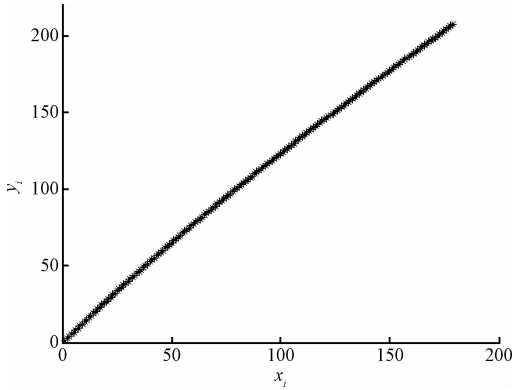


图3 构造样本二维平面图

Fig.3 2-D figure of composite sample

由图3可以看出,各样本点基本呈线性关系,可能由于方位误差影响,稍微有些弯曲。为了检验能否采用式(13)估计目标舷角,下面基于样本点集 $\{(x_i, y_i)\}$ 进行显著性检验。

将 $\{(x_i, y_i)\}$ 代入式(14)计算相关系数,可得 $r = 0.9995$,非常接近于1,即二者线性相关程度非常密切,因此可采用式(13)估计目标舷角。

将 $\{(x_i, y_i)\}$ 代入式(12),可得 $K = 1.048$,再由式(13),可得目标舷角为 43.6565° ,最终求得目标航向 $C_m = 151.3^\circ$,与真实值相差 1.3° ,结果较为准确。

由于误差的随机性,即使其他初始参数值都不变,只是方位序列 $\{F_n\}$ 中所含误差不同,每次求得结果 K 和相关系数 r 也不同,最终目标航向也会稍有不同。为了验证算法的稳定性,对其进行50次 Monte-Carlo 实验,记录每次计算结果后取均值,可以得到 $\bar{r} = 0.9995$, $\bar{K} = 1.0451$, $\bar{C}_m = 151.2^\circ$ 。即目标航向的均值与原真实值相差 1.2° ,结果较为准确。

为了进一步验证本文提出的算法,取不同的航向、速度和初始方位,建立目标运动态势,分别对不同态势下测得含误差的方位序列 $\{F_n\}$ 进行50次 Monte-Carlo 实验,估计目标航向均值 μ 和标准差 σ ,结果如表1所示。

均值 μ 越接近真实航向,表明所求结果越准确,而标准差 σ 越小,表明求得结果波动越小,结果越稳定。

因此,多次 Monte-Carlo 实验所得出的 μ 和 σ 表明,每一次计算结果与真值间误差较小,可信度较高,因此在实际应用过程中可直接求解。

表1 不同态势下目标航向估计结果

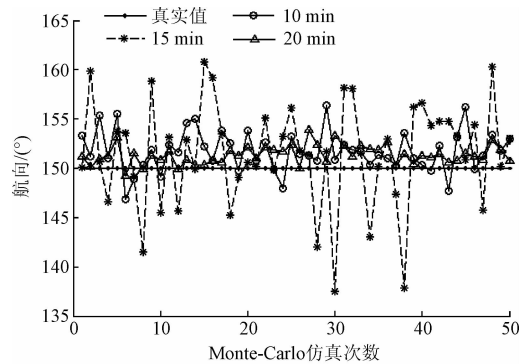
Table 1 Estimation results of different states

态势	$C_m / (^\circ)$	$V_m / (\text{海里} \cdot \text{h}^{-1})$	$F_1 / (^\circ)$	D_1 / km	$\mu / (^\circ)$	$\sigma / (^\circ)$
1	150	12	15	15	151.2	2.0
2	240	12	15	15	238.4	2.0
3	150	16	15	15	151.2	1.2
4	150	12	80	15	149.0	2.0
5	150	12	15	25	149.4	5.6

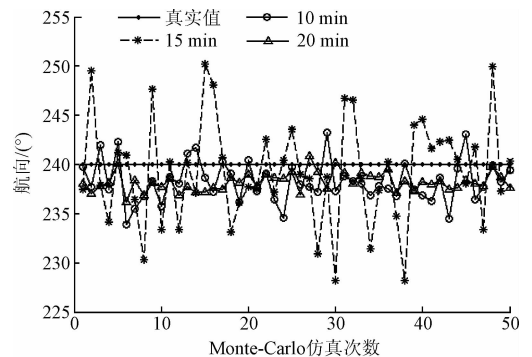
5.4 影响因素分析

5.4.1 观测数据时间长度对估计结果的影响

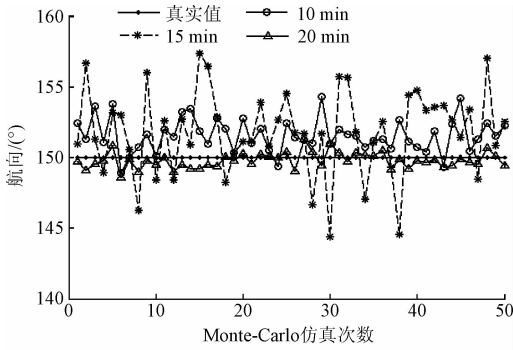
上述分析采用数据总长度为15 min,基于表1给出的态势,考虑不同时间长度,再用本文提出方法进行分析,结果如图4所示。图4(a)~(e)分别为态势1~5在不同时间长度下仿真结果,统计结果如表2所示。



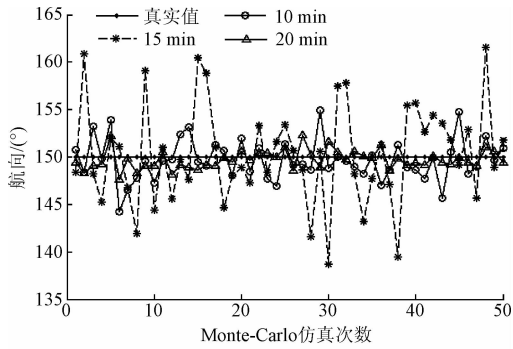
(a) 态势1
(a) State 1



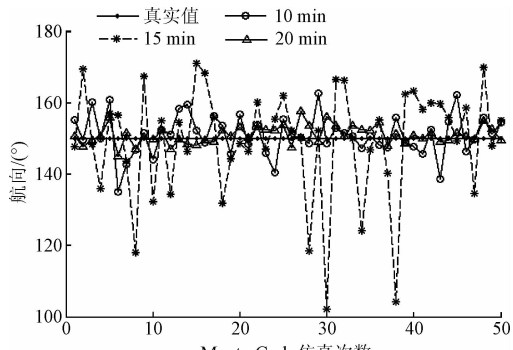
(b) 态势2
(b) State 2



(c) 态势3
(c) State 3



(d) 态势4
(d) State 4



(e) 态势5
(e) State 5

图4 不同时长仿真结果

Fig. 4 Simulation results of different length

表2 不同态势、不同时长航向估计结果

Table 2 Estimation results of different state and lenth (°)

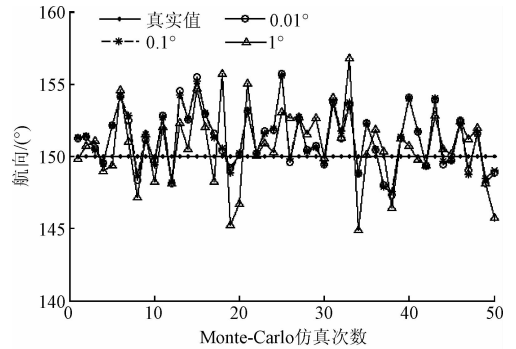
态势	10 min		15 min		20 min	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
1	151.4	5.4	151.2	2.0	151.6	0.9
2	239.2	5.4	238.3	2.1	238.3	1.0
3	151.8	3.0	151.2	1.2	149.9	0.5
4	150.3	5.3	149.7	2.2	149.7	1.0
5	149.2	15.8	149.4	5.6	151.5	2.3

将表2 横向比较可以看出,不同时间长度航向均值相差不多,但标准差逐渐减小,表明结果的波动逐渐变小,说明方位测量数据时间越长,采用本文方法的估计结果越稳定;数据较短时,标准差较大,求得结果波动相对较大,但从估计均值可以看出,采用多次测量取平均值方式求解仍较准确。

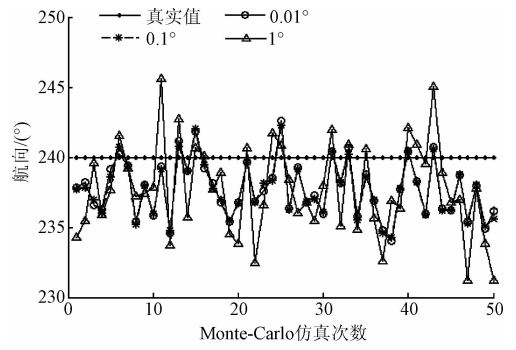
纵向比较直观可以看出,目标运动速度越大,距离越近,则方差越小,估计结果越稳定;原因为当目标速度较大、距离较近时,相同时间内目标的方位变化角度较大,即方位变化较快,此时求得估计结果更加准确。

5.4.2 观测数据方位精度对估计结果的影响

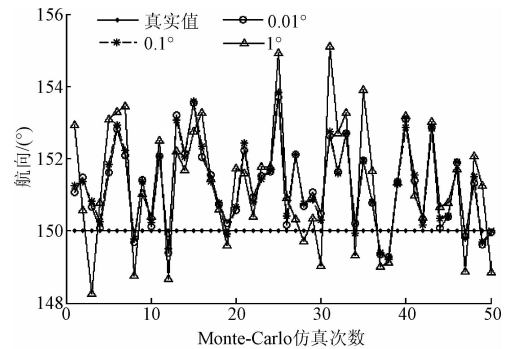
在实际应用过程中,由于水下复杂的环境和波束形成等原因,所获取目标的方位值往往存在较大误差,精度甚至大于1°,因此需要分析不同精度对此算法估计结果产生的影响。



(a) 态势1
(a) State 1



(b) 态势2
(b) State 2



(c) 态势3
(c) State 3

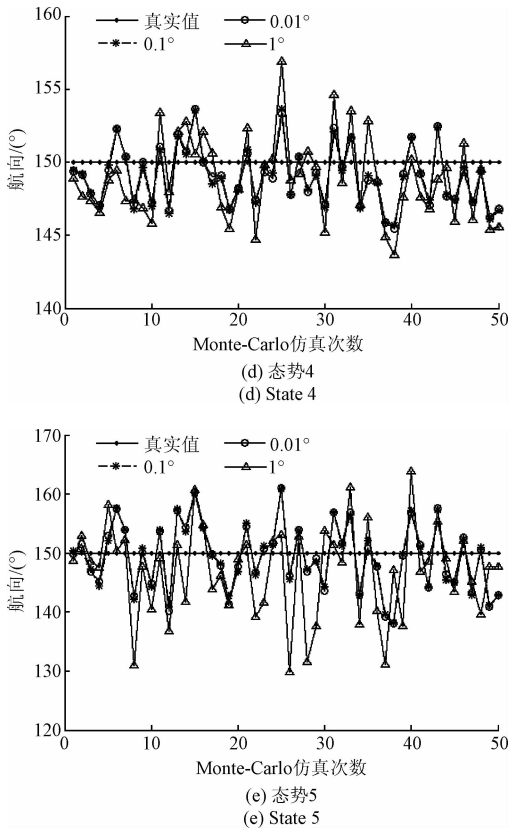


图5 不同精度仿真结果

Fig. 5 Simulation results of different precision

图5中(a)~(e)分别为态势1~5在不同方位精度下仿真结果,统计结果如表3所示。

表3 不同态势、不同方位测量精度航向估计结果

Table 3 Estimation results of different state and precision

态势	precision (°)					
	0.01°		0.1°		1°	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
1	151.2	2.0	151.2	2.0	150.7	2.6
2	237.7	2.0	237.7	2.0	237.7	3.3
3	151.3	1.2	151.2	1.1	151.3	1.7
4	149.0	2.0	149.0	2.0	148.8	2.8
5	149.4	5.6	149.4	5.7	146.9	7.9

表3中不同方位精度下的均值表明,采用本文方法所求结果较准确,只是精度较低时,标准差相对较大,表明求解波动较大,结果不稳定。而从估计均值可以看出,采用多次测量取平均值方式求解,仍可得到准确结果。

5.5 算法性能验证

为了验证本文提出算法的性能,考虑观测数据时间

长度15 min,噪声方差为分别为0.001°和0.01°,并与递推最小二乘法和扩展卡尔曼滤波方法^[16-17]进行比较,结果如图6所示。

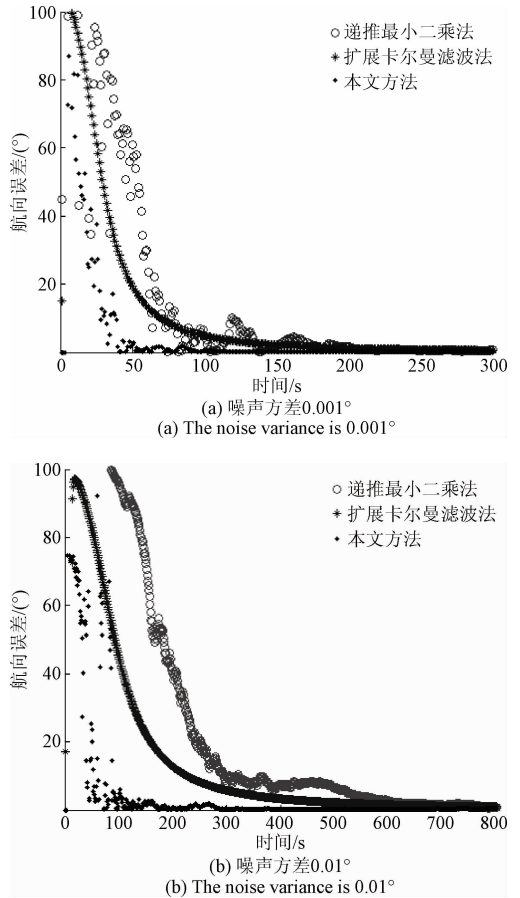


图6 不同方法航向估计误差

Fig. 6 Estimation errors of different methods

图6中航向误差为各算法求取结果与真值之差的绝对值,可以看出,当噪声方差为0.001°时,3种方法的收敛速度较快,本文方法效果最好,而递推最小二乘法的波动最大。当噪声方差变为0.01°时,本文提出的算法恶化程度较小,性能明显好于其他两种方法。

6 海试试验数据分析

为了验证算法对实际数据的处理能力,对海上试验数据进行分析。试验数据为16阵元均匀二维矢量阵输出数据,数据总时间长度1200 s。图7所示为试验数据处理得到的时间方位历程,试验海区商船、渔船较多,可在历程图中看到其他干扰目标。试验目标舰船航向0°,方位由210°变化到238°,方位测量精度1°。

根据本文提出的算法,采用不同时段、不同长度数据求取目标航向,结果如表4所示。

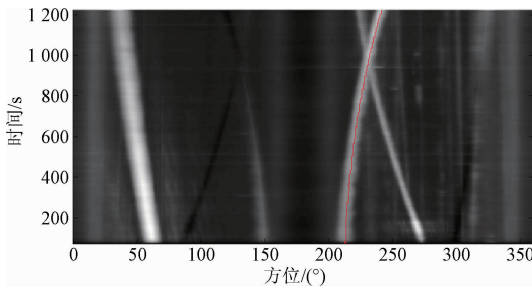


图7 海上试验数据时间方位历程

Fig.7 Time-bearing curve of the sea trial data

表4 试验数据处理结果

Table 4 Experimental results of trial data

序号	时段/s	数据长度/s	方位变化/(°)	相关系数	估计航向/(°)
1	0~900	900	18	0.985 3	3.6
2	0~1 200	1 200	31	0.997 3	1.0
3	300~900	600	15	0.999 9	1.6
4	300~1 200	900	28	0.999 9	359.8

表4海试数据结果表明,本文提出的方法估计精度较高,只有0~900 s数据的估计结果相对较差,而对比1、3号数据可以看出,虽然后者数据长度较小,但其航向估计结果比前者准确,分析其原因可能是由于前300 s数据方位变化很小(只有1°),进而影响整段数据的估计结果,因此,可采用加大数据长度或去掉方位变化较小数据段解决这一问题。对比1、4号数据可以看出,同样时间长度的数据,后者方位变化相对较大,计算结果更准确,符合前文所述相应理论。

7 结 论

本文主要针对匀速直线运动目标,基于相对运动三角形和一元线性回归分析理论,提出一种适用于固定单基地被动声纳的高精度目标航向估计算法,并分析不同运动态势下,观测数据时间长度和方位精度对估计结果的影响;最后通过仿真分析和海试试验数据验证了算法的有效性。试验结果表明:本文算法可根据任意时刻方位序列进行求解,且在观测方位误差较大时也同样适用,有效克服了以往算法对方位测量精度有较高要求的限制,能够更加准确地获取目标运动状态信息。

参考文献

[1] NORTHARDT E T, BILIK I, ABRAMOVICH Y. Bearings-only constant velocity target maneuver detection via expected likelihood [J]. IEEE Transactions on

Aerospace and Electronic Systems, 2014, 50(4): 2974-2988.

- [2] 蔚婧,文珺,李彩彩,等. 辅助变量纯方位目标跟踪算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2016, 43(1): 167-172.
YU J, WEN J, LI C C, et al. Modified instrumental variable method for bearings-only target tracking [J]. Journal of Xidian University, 2016, 43(1):167-172.
- [3] 李峥,李宇,黄勇,等. 水下目标自主连续跟踪与定位算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(3): 520-527.
LI ZH, LI Y, HUANG Y, et al. Study of automatic continuous tracking and location algorithm for underwater target [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(3): 520-527.
- [4] 黄友澎,曹万华,李琳,等. 一种红外传感器与被动雷达航迹稳健相关算法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(11): 2629-2634.
HUANG Y Y, CAO W H, LI L, et al. Infrared sensor and passive radar track robustness correlation algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(11): 2629-2634.
- [5] 刘瑞兰,陈小惠. 基于模糊交互多模型的机动目标被动跟踪算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(10): 846-850.
LIU R L, CHEN X H. Maneuvering target tracking algorithm based on fuzzy interacting multiple model[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2012, 26(10): 846-850.
- [6] 杨婧,李银伢,戚国庆,等. 纯方位目标运动分析可观测性研究[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(12): 1-8.
YANG J, LI Y Y, QI G Q, et al. Overview of observability of bearing-only target motion analysis[J]. Fire Control & Command Control, 2015, 40(12): 1-8.
- [7] FANF X, YAN W, WANG Y, et al. Observability analysis of underwater localization based on fisher information matrix [C]. 32nd Chinese Control Conference, 2013: 4866-4869.
- [8] GHASSEMI F, KRISHNAMURTHY V. A stochastic search approach for UAV trajectory planning in localization problems[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2006: 1196-1199.
- [9] 方锋,郭徽东. 基于到达时间和方位角的固定单站无源定位仿真分析[J]. 舰船电子对抗, 2016, 39(2): 10-13.
FANG F, GUO H D. Simulation analysis of single fixed-station passive location based on TOA and DOA [J].

- Shipboard Electronic Countermeasure, 2016, 39 (2): 10-13.
- [10] HO K C, CHAN Y T. An asymptotically unbiased estimator for bearings-only and doppler-bearing target motion analysis [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(3): 809-822.
- [11] FARDAD M, GHORASHI S A, SHAHBAZIAN R. A novel maximum likelihood based estimator for bearing-only target localization[C]. 22nd Iranian Conference on Electrical Engineering, 2014: 1522-1527.
- [12] 张晓勇, 罗来源. 单静止站纯方位目标航向估计[J]. 声学技术, 2012, 31(6): 566-569.
- ZHANG X Y, LUO L Y. Target course estimation for single stationary bearing-only observation system [J]. Technical Acoustics, 2012, 31(6): 566-569.
- [13] 郁涛. 基于等距测量对匀速直线目标航向的纯方位估计[J]. 现代导航, 2014(6): 446-449.
- YU T. Bearing-only estimation for target heading uniform linear motion conditions based on equispaced measurement [J]. Modern Navigation, 2014 (6): 446-449.
- [14] 韩江洪, 王景华, 徐娟, 等. 具有误差处理功能的动平衡标定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(7): 1455-1461.
- HAN J H, WANG J H, XU J, et al. Research on new dynamic balance calibration method with measurement error processing function [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(7): 1455-1461.
- [15] 杨继森, 陈自然, 张天恒, 等. 时栅传感器直驱式误差自动标定与修正系统[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(5): 968-975.
- YANG J S, CHEN Z R, ZHANG T H, et al. Automatic error calibration and correction system for time grating angular displacement sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(5): 968-975.
- [16] 何波, 李荣冰, 刘建业, 等. 基于扩展卡尔曼滤波的风速估计算法研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(6): 34-37.

HE B, LI R B, LIU J Y, et al. Estimation algorithm for airborne wind based on extended kalman filter [J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37 (6): 34-37.

- [17] 刘洪剑, 王耀南, 谭建豪, 等. 基于加速度变噪声 EKF 的无人机姿态融合算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(3): 333-341.
- LIU H J, WANG Y N, TAN J H, et al. Attitude fusion algorithm of UAV based on acceleration varying-noise EKF [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(3): 333-341.

作者简介



陈喆 (通讯作者), 2010 年于中国海洋大学获得学士学位, 2013 年于海军潜艇学院获得硕士学位, 现为海军潜艇学院博士研究生, 主要研究方向为水声目标识别、水声信号处理。

E-mail: qtxy_cz@163.com

Chen Zhe (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2010 from Ocean University of China, and M. Sc. degree in 2013 from Navy Submarine Academy. Currently, he is a Ph. D candidate in Navy Submarine Academy. His main research interests include underwater acoustic target recognition and underwater acoustic signal processing.



戴卫国, 1991 年于解放军通信工程学院获得学士学位, 分别在 2003 年和 2012 年于海军潜艇学院获得硕士学位和博士学位, 现为海军潜艇学院教授, 主要研究方向为水声目标识别、水声信号处理。

E-mail: dwg1968@163.com

Dai Weiguo received his B. Sc. degree in 1991 from Institute of PLA Communications Engineering, and received his M. Sc. degree in 2003 from Navy Submarine Academy, and received his Ph. D. degree in 2012 from Navy Submarine Academy. He is currently a professor in Navy Submarine Academy. His main research interests include underwater acoustic target recognition and underwater acoustic signal processing.