

文章编号: 1001-0920(2005)09-1017-05

双基阵纯方位目标的可观测性研究及跟踪性能改进

徐本连, 王执铨

(南京理工大学 自动化系, 南京 210094)

摘要: 针对双基阵提供的有偏方位角测量信息, 对双基阵纯方位目标可观测性的必要条件及其Cramer-Rao下限进行了理论推导. 在此基础上, 采用一种新的辅助变量方法对双基阵纯方位跟踪性能进行改进, 并在可观测条件下对目标进行了蒙特卡洛仿真实验. 实验结果表明, 新的辅助变量方法可以使参数估计精度大大提高, 并且上述理论对制定实际的跟踪策略或算法具有一定的参考价值.

关键词: 双基阵; 纯方位; 定位; 偏置

中图分类号: TN 953 **文献标识码:** A

On the Observability Problem for Bistatic Bearings-only Target Tracking and Its Performance Improvement

XU Ben-lian, WANG Zhi-quan

(Department of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Correspondent: XU Ben-lian, E-mail: seraph.xu@tom.com)

Abstract: According to the biased angles provided by the bistatic sensors, the necessary condition of observability and Cramer-Rao low bound for the bistatic system are deduced, and new instrumental variable method is presented to improve the bistatic localization performance. Monte-Carlo simulation results, which are obtained in the observable scenario, show that the new instrumental variable method can improve the estimated parameters accuracy drastically, and the theory can provide some reference to practical use.

Key words: Bistatic; Bearings-only; Localization; Bias

1 引言

纯方位目标运动分析(TMA)一直是人们研究的重点和难点,这主要是因为测量方程为非线性的.当利用单基阵纯方位对作匀速直线运动的目标进行定位跟踪时,已艇必须作相应的机动(通常作Z字形),但这只是目标可观测的必要条件.纯方位目标跟踪或定位算法通常有两种方法:递推技术和批处理技术.最小二乘法(LS)是一种批处理技术,它具有算法简单和易实现等特点,但当它应用于纯方位目标参数定位时所得到的估计值是有偏置的,为此可采用修正辅助变量法(MV)减小估计偏差,问题的关键是辅助变量的选取^[1-3].首先将测量方程线

性化,然后再用扩展Kalman滤波器(EKF)进行目标状态估计,它只能达到原非线性系统的一阶近似,若用基于采样变换(UT)的采样滤波器(UKF)在同样的前提下可达到非线性三阶近似^[4].对于系统模型是非线性和噪声是非高斯情形,可用递推的Bayes估计器得到运动参数的概率密度函数,其实现的算法是通过粒子滤波器(PF).当其应用于纯方位跟踪时,其定位精度要优于EKF和UKF,但其定位的实时性受到了一定的限制^[5,6].

双(多)基阵无源定位较单基阵有着明显的优势,在已艇无须机动前提下也可实现目标的定位或跟踪.要实现目标的精确跟踪,其前提是目标具有可观测性,但当方位测量存在有偏时,就会存在目标可

收稿日期: 2004-12-10; 修回日期: 2005-05-16

基金项目: 博士点基金项目(20020288025).

作者简介: 徐本连(1974—),男,江苏句容人,博士生,从事多传感器数据融合的研究;王执铨(1939—),男,武汉人,教授,博士生导师,从事非线性控制理论、信息融合等研究.

观测性问题 目前国外文献对此方面的研究还很少,因此本文基于双基阵提供的辐射源的有偏方位信息,对其可观测性必要条件和Cramer-Rao 下限进行了理论推导,并在此基础上,将上一时刻的目标估计值进行一次Levenberg-Marquardt 迭代而得到的估计值作为辅助变量,进而对目标参数实施加权的最小二乘估计.最后对目标在可观测条件下进行了蒙特卡洛仿真实验,并对实验结果进行了分析

2 双基阵纯方位目标可观测性

本文只考虑笛卡尔坐标系下的二维(平面)纯方位定位.在采样时刻 t , 已艇(基阵)1 测得的目标方位记为 $\beta_{n_1}(t)$ (以正北方向即 y 轴正向为起点,顺时针方向为正), 已艇(基阵)2 测得的目标方位角为 $\beta_{n_2}(t)$. 假定目标作匀速直线运动,不考虑运动噪声的影响,目标状态变量定义为 $X_T(t) = [x_T(t), y_T(t), \dot{x}_T, \dot{y}_T]^T$. 不失一般性,假定基阵1位于坐标原点不动,基阵2的状态变量定义为 $X_{o_2}(t) = [x_{o_2}(t), y_{o_2}(t), \dot{x}_{o_2}(t), \dot{y}_{o_2}(t)]^T$. 现实中传感器和已艇的惯性导航系统常常会引入角度测量偏差,假定基阵1和2方位角偏置分别为常量 ϕ_1, ϕ_2 , 则测量方程可表示为

$$\begin{cases} \beta_{n_1}(t) = \tan^{-1} \left(\frac{x_T(t) - 0}{y_T(t) - 0} \right) + \phi_1 + n_1(t), \\ \beta_{n_2}(t) = \tan^{-1} \left(\frac{x_T(t) - x_{o_2}(t)}{y_T(t) - y_{o_2}(t)} \right) + \phi_2 + n_2(t). \end{cases} \quad (1)$$

其中: n_1, n_2 为零均值的高斯白噪声, σ_1^2, σ_2^2 分别为方差

当不存在方位角偏置时(即 $\phi_1 = \phi_2 = 0$), 目标存在于阴影区域内,如图1所示,因此目标定位是可以实现的.当存在方位偏置时(即 $\phi_1 \neq 0, \phi_2 \neq 0$), 可能出现两基阵对同一目标所测量的方位相等(即测量线相互平行), 因此就会造成目标不可观测,如图2虚线所示

当目标不可观测时,下式成立:

$$\beta_{n_1}(t) = \beta_{n_2}(t). \quad (2)$$

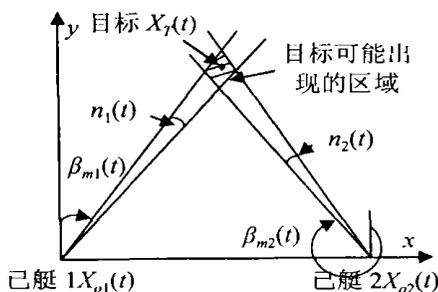


图1 双基阵可观测情形

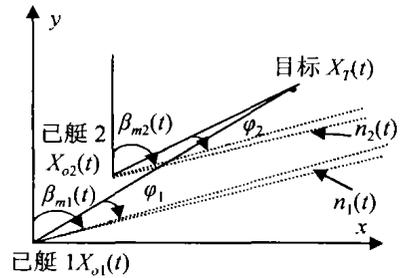


图2 双基阵不可观测情形

不考虑噪声的影响,结合式(1)和(2),运用数学变换得

$$\frac{x_{o_2}(t)y_T(t) - x_T(t)y_{o_2}(t)}{x_T(t)[x_T(t) - x_{o_2}(t)] + y_T(t)[y_T(t) - y_{o_2}(t)]} = \tan(\phi_1 - \phi_2). \quad (3)$$

当 $\phi_1 = \phi_2$ 时,有

$$y_T(t) \cdot x_{o_2}(t) = y_{o_2}(t) \cdot x_T(t). \quad (4)$$

结论1 在两基阵的方位角的偏置相等的前提下,当基阵2位于目标与基阵1连线上时,目标不可观测.这种情形等效于单基阵纯方位定位,基阵不作任何机动,某一时刻只提供目标的一个方位量测,因此目标不可观测

当 $\phi_1 \neq \phi_2$ 时,令 $c = \cot(\phi_1 - \phi_2)$ 对式(3)作适当的数学变换得

$$[cy_T(t) + x_T(t)]x_{o_2}(t) + [y_T(t) - cx_T(t)]y_{o_2}(t) = x_T^2(t) + y_T^2(t). \quad (5)$$

结论2 在两基阵的方位角的偏置不相等的前提下,基阵2航迹满足线性表达式(5)时,目标不可观测,航迹(5)是一条趋向目标的曲线.当目标静止不动时,基阵2的航迹为一个途经目标的直线

同样对于目标作机动情形,当基阵2航迹满足式(4)和(5)时,目标也是不可观测

3 双基阵纯方位跟踪的Cramer-Rao 下限(CRLB)

Cramer-Rao 下限是目标跟踪性能的上限,它与算法无关,因此它可作为衡量各种算法优劣的一个尺度,下面给出了方位角量测存在偏置时双基阵纯方位目标跟踪的CRLB的理论推导

假定待估计的向量定义为 $\theta = [x_T(0), y_T(0), \dot{x}_T, \dot{y}_T, \phi_1, \phi_2]^T$, 假定方位测量周期为 T , 进行 $t+1$ 次方位测量,其构成的向量定义为 $b(t) = [\beta_{n_1}(0), \beta_{n_2}(0), \dots, \beta_{n_1}(t), \beta_{n_2}(t)]^T$, 并假定方位角的偏置 ϕ_1, ϕ_2 为高斯随机变量,其方差为分别 $\sigma_{\phi_1}^2, \sigma_{\phi_2}^2$, 定义 $J = \text{diag}(0, 0, 0, 0, \sigma_{\phi_1}^2, \sigma_{\phi_2}^2)$, $J_1 = \text{diag}(\sigma_{\phi_1}^2, \sigma_{\phi_2}^2)$, 在测量方位角有偏的前提下,双基阵纯方位跟踪的Fisher信息阵表示为

$$\begin{bmatrix} 0 & r_1(0) & 0 \\ 0 & 0 & r_2(0) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -tT \sin \beta_{n1}(t) & r_1(t) & 0 \\ -tT \sin \beta_{n2}(t) & 0 & r_2(t) \end{bmatrix}$$

由式(13)可得待估参数 θ 的最小二乘估计为

$$\hat{\theta} = (A^T(t)A(t))^{-1}A^T(t)Z(t), \quad (14)$$

$\hat{\theta}$ 表示 t 时刻目标状态估计, 由式(13)和(14)可得

$$\hat{\theta} = \theta - (A^T(t)A(t))^{-1}A^T(t)\eta(t). \quad (15)$$

对式(15)取期望, 于是最小二乘估计所得估计偏置为

$$\delta = E(\hat{\theta}) - \theta = E\left[\frac{A^T(t)A(t)}{t}\right]^{-1}E\left[\frac{A^T(t)\eta(t)}{t}\right]. \quad (16)$$

当 t 时, 由于 $A(t)$, $\eta(t)$ 相关, 偏置 δ 不为零. 为此可通过引入加权的辅助变量方法来减小偏置. 将上一时刻 $(t-1)$ 的目标估计值 $\hat{\theta}^{t-1}$ 进行一次 Levenberg-Marquardt 迭代

$$\hat{\theta}^{t-1} = \hat{\theta}^{t-1} + (A^T(t-1)A(t-1) + \mu_k I)^{-1}A^T(t-1)Z(t-1), \quad (17)$$

其中 μ_k 为调节系数, 一般大于零, 用 $\hat{\theta}^{t-1}$ 可计算得

$$\tilde{\beta}_k(t) = \text{atan} \left[\frac{\hat{x}_T(0) + jT\hat{x}_T - x_{ok}(j)}{\hat{y}_T(0) + jT\hat{y}_T - y_{ok}(j)} \right], \quad (18)$$

假定矩阵 $\tilde{A}(t)$ 表示将矩阵 $A(t)$ 中对应的

$\beta_{nk}(j)$ 值用 $\tilde{\beta}_k(j)$ 来代替, $r_k(j)$ 用 $\tilde{r}_k(j)$ 来代替, 它由 $\hat{\theta}^{t-1}$ 计算得出, 即

$$\tilde{r}_k(j) = ((\hat{x}_T(0) + jT\hat{x}_T - x_{ok}(j))^2 + (\hat{y}_T(0) + jT\hat{y}_T - y_{ok}(j))^2)^{\frac{1}{2}},$$

则加权的辅助变量法最终估计为

$$\hat{\theta} = (\tilde{A}^T(t)W^{-1}(t)A(t))^{-1}\tilde{A}^T(t)W^{-1}(t)Z(t), \quad (19)$$

其中

$$W(t) = \text{diag}\{\tilde{r}_1^2(0)\sigma_1^2, \tilde{r}_2^2(0)\sigma_2^2, \dots, \tilde{r}_1^2(t)\sigma_1^2, \tilde{r}_2^2(t)\sigma_2^2\}.$$

5 仿真算例

例 1 目标初始位置为 (1.5 km, 15 km), 目标速度为 10.29 m/s (20 节), 目标航向为 120°. 基阵 1 位置位于坐标原点 $X_{o1}(t) = [0, 0, 0, 0]^T$, 基阵 2 的初始 x 位置为 1 km, 基阵 2 的航迹由式(4)和(5)确定 (即目标不可观测). 利用式(5)时, 假定两基阵有偏方位角差为 5°. 方位采样周期 $T = 1$ s

如图 3 所示, 给出了目标在作匀速直线运动时, 基阵 1 在原点静止不动, 基阵 2 以图中 4 条航迹中的任一条航迹运动, 那么目标是不可观测的. 当基阵 2

接近目标时, 不可观测航迹中的两条都趋于与目标相交, 这与结论 1 和结论 2 是一致的. 而当基阵 2 远离目标时, 其中一条航迹途经基阵 1, 这与结论 1 一致, 另一条则与目标形成了更弱的观测条件.

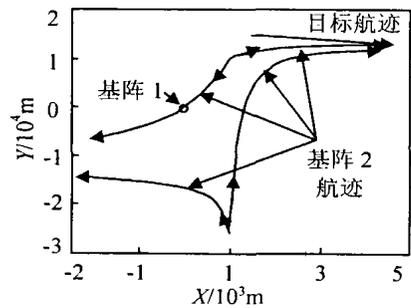


图 3 已艇 2 的航迹 (目标航向 120°)

例 2 基阵 2 初始位置为 (1 km, 0), 其余的仿真环境同上. 基于仿真 1 所得的不可观测情形, 可知当基阵 2 在初始位置静止不动时, 目标可观测. 基阵 1 和基阵 2 的有偏测量方位角分别为 2° 和 7°. 测量噪声均为 1°, $\mu_k = 1$, 方位采样周期 $T = 1$ s

所有仿真都进行 20 次 Monte-Carlo 实验, 结果如图 4~ 图 6 所示

图中, ϕ_1, ϕ_2 为基阵 1 和 2 所提供的方位位置 ϕ, ϕ , improved 为本文辅助变量法得到的结果, Biased 为用式(14)得到的估计结果

图 4 给出了两个基阵所测的有偏方位角均方根误差曲线, 在最后采样时刻, 两个有偏角的估计误差都控制在 15% 左右, 在整个估计过程中估计误差曲线比较平稳, 因此估计精度比较满意. 图 5 表示了目

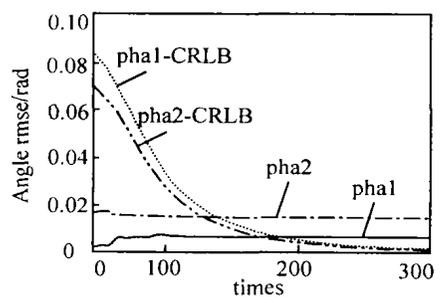


图 4 有偏方位角均方根误差估计曲线

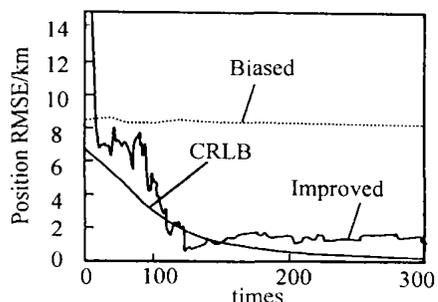


图 5 位置均方根误差曲线

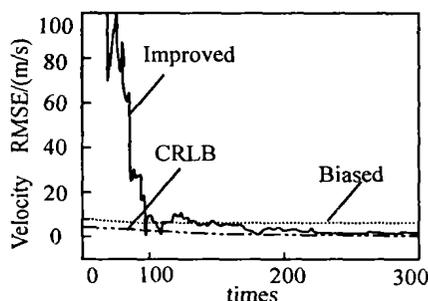


图 6 速度均方根误差曲线

标位置跟踪曲线,可以看出直接用最小二乘估计方法目标跟踪精度很差,而本文的辅助变量法使其跟踪性能得到了大幅度地改进。从图 6 中可看出,虽然速度估计精度不像位置估计精度那样大幅度改进,但其跟踪曲线趋于 CRLB,因此其跟踪性能是可接受的。

由图 5、图 6 可以看出,改进后的算法仍存在比较小的稳态误差,其主要原因是当测量方位有偏差时伪测量矩阵 $A(t)$ 中引入了 $r_k(t)$ 和 $\beta_{nk}(t)$ 变量,虽然文中利用上一次的估计值来计算其值,以减少与 $\eta(t)$ 的相关性,但仍存在弱相关性。目前作者正在研究一种近似无偏的估计算法。

6 结 论

在方位角量测存在偏置的前提下,得到了双基阵纯方位目标不可观测的两个结论:即对应某个目标运动态势,基阵 1 位于原点不动,基阵 2 的运动轨迹不能满足式(4)和(5);给出了 CRLB 的理论表达式,可以用 CRLB 评价各种算法的优劣;将上一时刻的目标估计值进行一次 Levenberg-Marquardt 迭代值作为辅助变量,进而对目标参数实施加权的最小二乘估计,与 CRLB 相比,虽然该算法仍存在小的稳态误差,但大大提高了目标跟踪性能。对于制定实际

的目标跟踪策略,本文的研究具有一定的指导意义。

参考文献 (References)

- [1] 孙仲康,周一宇,何黎星. 单多基地有源无源定位技术 [M]. 北京:国防工业出版社,1996: 234-241.
(Sun Z K, Zhou Y Y, He L X. *A ctive/passive Target Localization Technology with Single/m ultistatic System* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996: 234-241.)
- [2] Kutluyll Dogancay. On the Bias of Linear Least Squares Algorithm for Passive Target Localization [J]. *Signal Processing*, 2004, 84(3): 475-486.
- [3] Kutluyll Dogancay. Passive Emitter Localization Using Weighted Instrumental Variables [J]. *Signal Processing*, 2004, 84(3): 487-497.
- [4] Simon J Julier, Jeffrey K Uhlmann. A New Extension of the Kalman Filter to Nonlinear Systems [A]. *Proc of A erosense: The 11th Int Symp on A erospace/D efence Sensing, Simulation and Controls* [C]. Orlando, 1997.
- [5] Gordon N J, Samond D J, Smith A F M. Novel Approach to Nonlinear/Non-Gaussian Bayesian State Estimation [J]. *IEE Proc on Radar Signal Processing*, 1993, 140(2): 107-113.
- [6] Motti Gavish, Eli Fogel. Effect of Bias on Bearing-only Target Localization [J]. *IEEE Trans on A erospace and Electronic Systems*, 1990, 26(1): 22-26.
- [7] Branko Ristic, Sanjeev Arulampalam M. Tracking a Maneuvering Target Using Angle-only Measurements: Algorithms and Performance [J]. *Signal Processing*, 2003, 83(6): 1223-1238.
- [8] Kaplan Lance M, Li Q, Molnar Peter. Maximum Likelihood Methods for Bearings-only Target Localization [A]. *IEEE Int Conf on A coustics, Speech, and Signal Processing* [C]. Salt Lake City, 2001: 3001-3004.

下 期 要 目

随机博弈框架下的多 agent 强化学习方法综述	宋梅萍, 等
基于动态规划方法优化关联规则发现	陈细谦, 等
基于粒子群优化的自组织特征映射神经网络及应用	吕 强, 俞金寿
基于 ISVM 的软测量建模及其在 PX 生产中的应用研究	张 英, 等
采样系统的频率响应和 L_2 诱导范数	刘彦文, 等
基于连接属性的元规则实例方法	朱恒民, 等
一种快速支持向量机增量学习算法	孔 锐, 张 冰
自适应有限拍感应电机电流控制器设计	程金路, 张承进
B2C 电子商务中配送中心选址优化的模型与算法	蒋忠中, 汪定伟