

## 多站无源跟踪系统容错算法

郭磊<sup>1,2,3</sup>, 唐斌<sup>2</sup>, 刘刚<sup>3</sup>

(1.电子科技大学物理电子学院 成都 610054; 2.电子科技大学电子工程学院 成都 610054;

3. 中国电子科技集团第二十九研究所电子对抗国防科技重点实验室 成都 610036)

**【摘要】**针对多个雷达侦察站组成的无源跟踪系统,在用时间差法对目标进行跟踪时,各站点之间通信或信号测量被干扰,造成系统无法工作。该文提出基于单站多站、时差和角度测量组合的容错跟踪算法。该算法假定系统被干扰工作时使用基于时差测量的跟踪方法,而多站角度和单站角度跟踪方法作为备用,通过对每个周期目标状态变量的检测,判定是否需要切换为备用跟踪方法。该算法使跟踪系统有更强的适应性,而精度并没有下降。仿真实验验证了该算法的有效性。

**关键词** 角度跟踪; 被动雷达; 无源跟踪; 时间差跟踪

**中图分类号** TN958.93

**文献标识码** A

## Fault-Tolerant Algorithm of Passive Tracking System on Multi-Stations

GUO Lei<sup>1,2,3</sup>, TANG Bin<sup>2</sup>, and LIU Gang<sup>3</sup>

(1.School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

2.School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

3. National Key Laboratory of Information Integrated Control, 29 Research Institute of China Electronic Technology Group Corporation Chengdu 610036)

**Abstract** A passive tracking system consisting of multi-radar reconnaissance stations usually uses the time difference of arrival (TDOA) tracking measurement method, which can achieve high tracking precision. However, when the communication among these stations is interfered, the measurement error of the TDOA method will increase and thus the tracking precision of the system will deteriorate. In this paper, a new fault-tolerant tracking algorithm is proposed, in which both the TDOA method and the directions of arrival (DOA) method are used. In each period, the state variables of targets will be detected with  $\chi^2$  to determine whether the switchover from the TDOA method to the DOA method should be made. The analysis shows that the proposed algorithm is characterized by high anti-interference while its tracking precision does not deteriorate. Some simulation experiments are used to verify the validity of the new algorithm.

**Key words** DOA tracking; passive radar; passive tracking; TDOA tracking

无源跟踪已经成为电子对抗的一个重要的不可或缺的技术<sup>[1]</sup>。从侦察站使用的数量上看,无源跟踪系统可分为多站系统和单站系统。多站系统具有定位速度快、精度高的特点,单站系统具有使用方便灵活的特点。从使用的测量参数手段看,主要有利用角度、时间差、多普勒频率差或混合测量方法进行定位或跟踪<sup>[2]</sup>。

由于时间差方法具有跟踪精度高、抗干扰能力强,因而在多站无源跟踪系统中一般作为首选方法。但时间差方法与角度方法相比,在定位站数量、信号处理、同步等方面都要求较高。具体地说,在二维平面上对目标跟踪,时间差使用的定位站数量至

少是3个,而角度方法使用2个就可完成任务。为了获得较高的时间差精度,一般采用相关方法计算时间差,这就要求对接收信号有很强的处理能力,角度方法则不需要对信号特征有比较多的先验知识。时间差方法往往要求多个定位站同时接收到同一个信号(不包括形成时间差的那份区别)进行处理,得到正确的时间差,而角度方法对此没有严格的要求。

在电子对抗中,辐射源目标是非协同的,在使用时间差方法跟踪过程中,各侦察站对信号的截获可能无法达到要求。若单纯使用时间差这一种测量方法对目标进行跟踪,其精度是无法得到保证的,同时可靠性也很低,而目前有关时间差的研究<sup>[3-6]</sup>

收稿日期: 2007-04-13; 修回日期: 2007-10-20

基金项目: 部级基金

作者简介: 郭磊(1971-),男,博士生,主要从事电子对抗方面的研究。

较少。

在导航系统中,使用惯性、天文、GPS组合导航<sup>[7]</sup>。借鉴导航系统中的方法,考虑时间差、角度测量和单站多站的各自特点,本文提出一种多站无源跟踪系统容错算法,并行使用多组卡尔曼滤波器,以时间差测量的滤波器为主要跟踪方法,当检测到无法使用时间差方法时,则使用其他方法进行跟踪。同时,继续检测时间差方法是否可用,若可用,切换回时间差方法跟踪。该算法提高了跟踪可靠性,也保证了跟踪精度。

## 1 无源跟踪基本方法

### 1.1 机动目标状态与测量模型

机动目标运动状态描述为:

$$\mathbf{s}(k+1) = \mathbf{F}(k)\mathbf{s}(k) + \mathbf{\Gamma}(k)\mathbf{w}(k) \quad (1)$$

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{h}(\mathbf{s}(k)) + \mathbf{v}(k) \quad (2)$$

式中  $k$  为时间指标;  $\mathbf{s}(k)$  为系统状态,  $\mathbf{s}(k) = [x(k), y(k), \dot{x}(k), \dot{y}(k)]$ ;  $x, y$  为目标在直角坐标中的位置;  $\dot{x}, \dot{y}$  为目标运动速度;  $\mathbf{F}(k)$  为系统状态转移矩阵;  $\mathbf{\Gamma}(k)$  为噪声矩阵;  $\mathbf{w}(k)$  为过程噪声;  $\mathbf{z}(k)$  为测量向量;  $\mathbf{h}()$  为测量转换函数;  $\mathbf{v}(k)$  为测量噪声。

假定在二维平面内有  $M(M > 2)$  个定位站,各定位站的坐标位置已知,并设一个定位站位于坐标原点,称为主站;其余  $M-1$  个站点为辅站。在基于时间差跟踪的方法中,测量值  $\mathbf{z}_1 = [\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_i, \dots, \Delta t_{m-1}]$ ,  $\Delta t_i$  表示主站与第  $i$  个辅站的到达时间差。在基于多站角度跟踪的方法中,测量值  $\mathbf{z}_2 = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i, \dots, \theta_n]$ ,  $\theta_i$  表示第  $i$  个站点对目标角度的测量。在基于单站角度跟踪的方法中,测量值  $\mathbf{z}_3 = [\theta_i, \theta_i + \Delta\theta_i]$  表示单站  $i$  对移动目标的两次测量。

### 1.2 不同测量值下的扩展卡尔曼滤波方程

扩展卡尔曼滤波方程由一组方程组成,由于本文算法中使用相同的状态变量,所以除测量方程外其余各方程相似。

在时间差跟踪方法中,观测方程为:

$$\mathbf{z}_1 = \mathbf{h}_1(\mathbf{s}(k)) + \mathbf{v}_1(k) \quad (3)$$

式中  $\mathbf{h}_1(\mathbf{s}(k)) = \begin{bmatrix} r_i - r_1 \\ \vdots \\ r_i - r_{m-1} \end{bmatrix}$ ;  $r_i$  表示目标与主站的距离;  $r_i$  表示目标与第  $i$  个站点的距离。由于是非线性的,在卡尔曼滤波方程要求观测矩阵为线性,对时间差观测方程求导,得到雅克比矩阵:

$$\mathbf{H}_1 = \frac{\delta \mathbf{h}_1}{\delta \mathbf{s}} = \begin{bmatrix} \frac{\delta h_1^1}{\delta x} & \frac{\delta h_1^1}{\delta y} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\delta h_1^{m-1}}{\delta x} & \frac{\delta h_1^{m-1}}{\delta y} & 0 & 0 \end{bmatrix}_{m-1 \times 4} \quad (5)$$

$$\text{式中 } \frac{\delta h_1^i}{\delta x} = \frac{x_t - x_i}{r_i} - \frac{x_t - x_0}{r_i}; \quad \frac{\delta h_1^i}{\delta y} = \frac{y_t - y_i}{r_i} - \frac{y_t - y_0}{r_i}。$$

多站角度跟踪方法观测方程为:

$$\mathbf{z}_2 = \mathbf{h}_2(\mathbf{s}(k)) + \mathbf{v}_2(k) \quad (6)$$

$$\text{式中 } \mathbf{h}_2(\mathbf{s}(k)) = \begin{bmatrix} \arctan \frac{y_t - y_0}{x_t - x_0} \\ \vdots \\ \arctan \frac{y_t - y_{m-1}}{x_t - x_{m-1}} \end{bmatrix}; \quad \arctan \frac{y_t - y_i}{x_t - x_i} \text{ 表}$$

示目标与第  $i$  个站点的角度。

与时间差方法类似,对角度观测方程求导,得到雅克比矩阵:

$$\mathbf{H}_2 = \frac{\delta \mathbf{h}_2}{\delta \mathbf{s}} = \begin{bmatrix} \frac{\delta h_2^0}{\delta x} & \frac{\delta h_2^0}{\delta y} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\delta h_2^{m-1}}{\delta x} & \frac{\delta h_2^{m-1}}{\delta y} & 0 & 0 \end{bmatrix}_{m \times 4} \quad (7)$$

$$\text{式中 } \frac{\delta h_2^i}{\delta x} = \frac{-(y_t - y_i)}{r_i^2}; \quad \frac{\delta h_2^i}{\delta y} = \frac{x_t - x_i}{r_i^2}。$$

单站角度跟踪方法的基本思想是首先利用测量到的目标方位角、方位角变化率和速度(可用多普勒频率),使用正定理的到距离目标  $R = \frac{v \sin \theta}{\sin \theta / dt} \approx \frac{v \sin \theta}{d\theta / dt}$ , 然后使用距离和角度可对目标跟踪<sup>[8]</sup>。

## 2 多站无源跟踪系统容错算法

在容错算法中,根据不同的测量值设置3类滤波器:(1)以时间差为测量值的滤波器。(2)主站与另一些辅站结合,以角度为测量值的滤波器。(3)主站以测量角度和角度变化率的滤波器。但这3类滤波器输出的航迹结果如何实现最优融合,是本文算法成功的关键。

本文的算法使用了  $\chi^2$  检验法对各滤波器输出结果进行判定。 $\chi^2$  检测法利用  $\hat{x}_i$  和  $\hat{x}_0$  两个估计量判定各滤波器输出目标状态是否符合要求,  $\hat{x}_i$  表示通过测量时间差或多站测量角度估计的目标状态结

果,  $\hat{x}_0$  表示由主站通过多次角度测量估计结果。

假设估计误差  $e_i$ 、 $e_0$  为:

$$\begin{cases} e_i = \hat{s}_i(k) - s(k) \\ e_0 = \hat{s}_0(k) - s(k) \end{cases} \quad (8)$$

式中  $e_i$  表示目标真实状态与通过测量时间差或多站测量角度估计的目标状态结果的误差;  $e_0$  表示目标真实状态与由主站通过多次角度测量的估计结果。定义如下:

$$\beta(k) = e_i - e_0 = \hat{s}_i(k) - \hat{s}_0(k) \quad (9)$$

由于是线性滤波<sup>[9]</sup>, 故  $\hat{s}_i(k)$  和  $\hat{s}_0(k)$  是无偏的, 则  $\beta(k)$  的均值与方差分别为:

$$E\{\beta(k)\} = E\{e_0(k) - e_i(k)\} = 0 \quad (10)$$

$$W(k) = E\{\beta(k)\beta'(k)\} \quad (11)$$

由于  $\beta(k)$  是高斯随机向量  $e_i$  和  $e_0$  的线性组合, 故它也是高斯随机向量, 且其均值为零方差  $W(k)$ 。当某个辅站发生故障后,  $\hat{s}_i$  受故障影响变为有偏估计, 即  $E\{e_i(k)\} \neq 0$ 。由于  $e_0(k)$  仅利用主站的测量数据, 故仍是无偏估计。因此, 通过对  $\beta(k)$  的均值检验辅站估计是否有偏, 可确定辅站是否发生故障。

对  $\beta(k)$  作二元假设, 即:

(1) 当  $H_0$  无故障时, 有:

$$E\{\beta(k)\} = 0, \text{Var}\{\beta(k)\} = W(k) \quad (11)$$

(2)  $H_1$  故障时, 有:

$$E\{\beta(k)\} = \mu, \text{Var}\{\beta(k)\} = W(k) \quad (12)$$

通过构造对数似然比得到故障检验函数, 即:

$$\lambda(k) = 0.5\{\beta'(k)W(k)\beta(k) - [\beta(k) - \mu]' \times W^{-1}(k)[\beta(k) - \mu]\} \quad (13)$$

采用式(13)来对假设做出判定。在实际中  $\mu$  是未知, 故用其极大似然估计  $\hat{\mu}$  代替它。求  $\hat{\mu}$  使  $L(k)$  达到极大, 得  $\hat{\mu} = \beta(k)$ 。式(13)可简化为:

$$\lambda(k) = 0.5\beta'(k)W^{-1}(k)\beta(k) \quad (14)$$

由于  $\beta(k)$  是高斯向量, 故  $\lambda(k)$  服从  $n$  个自由度的  $\chi^2$  分布。故障判断准则为: 当  $\lambda(k) \geq T_D$  时表示有故障; 当  $\lambda(k) < T_D$  时表示无故障。  $T_D$  是设置门限值, 可根据具体情况设置虚警率, 由NP(Neyman-Pearson)准则得到。

下面以3个站点为例, 详细说明算法过程:

(1) 初始化。对目标初始位置进行定位。启动4个滤波器: 以时间差为测量值的滤波器EKF1, 使用全部点; 主站分别与另2个辅站结合, 以角度为测量值的滤波器EKF2、EKF3; 主站以测量角度和角度变化率的滤波器EKF0。

(2) 各滤波器EKF*i*分别输出  $\hat{s}_i$ 、 $\hat{P}_i$  到主站,  $\hat{s}_i$  表示各滤波器输出的目标状态,  $\hat{P}_i$  表示各滤波器输出

的协方差。

(3) 使用  $\chi^2$  检验方法对各滤波器输出判定是否有效, 对有效目标状态输出。

(4) 判断是否有测量数据, 若有则转到步骤(2); 否则, 跟踪结束。

如果有更多的站点, 可以使用类似方法进行分组融合。

### 3 仿真结果与分析

本文对算法进行了计算机仿真。仿真使用3个定位站, 主站坐标位置  $S_0 = (0, 0)$ , 辅站位置  $S_1 = (0, 50 \text{ km})$ ,  $S_2 = (50 \text{ km}, 0)$ 。在二维直角坐标系下, 目标系统状态使用位置和速度。测量采样时间1 s, 测量到达时间方差为20 ns, 测量到达角度方差为0.01 rad。假设目标是匀速运动, 过程处理噪声为0.2 m/s<sup>2</sup>。假设目标为飞机, 目标实际起始位置是(10 km, 5 km), 速度为(200 m/s, 0 km/s), 飞行200 s。对目标开始跟踪时的起始位置(8 km, 8 km)。设置故障判断虚警率为0.05, 故障检验函数的门限  $T_D = 0.711$ 。

图1给出使用时间差与角度测量方式, 在接收数据时无误差条件下, 对目标跟踪的均方差。从图中对比可发现, 时间差方法无论初试化时收敛速度和保持跟踪时的跟踪精度都优于角度方法。

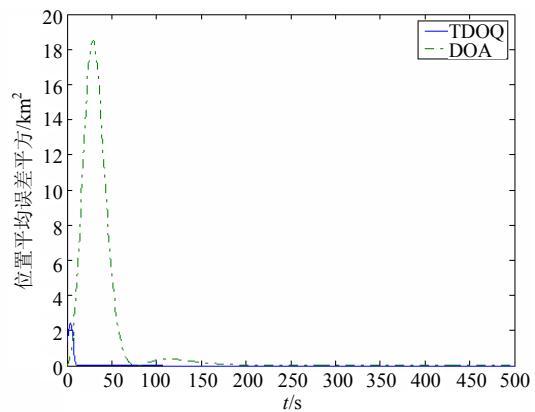


图1 在正常工作条件下跟踪均方误差 (时间差与角度方式)

图2给出了在跟踪目标251~350 s期间, 对  $S_2$  辅站测量的数据加入约5%的噪声进行干扰, 对跟踪的精度影响情况。对比图1正常情况可发现其均方差最高约为18 km<sup>2</sup>; 而使用了容错算法(fault tolerant approach, FAT)后, 跟踪误差得到有效的改善。

由于时间差和角度跟踪方法在跟踪初始化时均方误差较大, 需要一段时间收敛。正常条件下, 从100~500 s在故障检验函数的  $\chi^2$  分布的百分率如图

3a所示。由图3a可发现其最高值为0.5,未达到故障检验函数的门限值。在251~350 s进行干扰情况下,故障检验函数的 $\chi^2$ 分布的百分率如图3b所示。由图3b可发现出现干扰后,经过约5 s后超过了故障检验函数的门限值,证明使用 $\chi^2$ 检验方法对各滤波器输出判定非常有效。

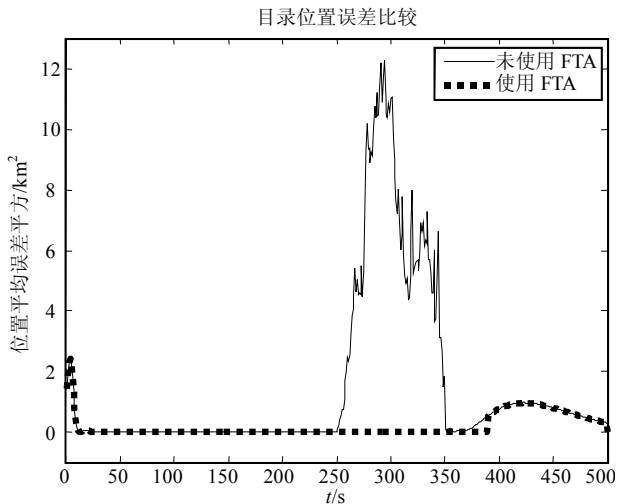


图2 S2站点干扰条件下跟踪均方误差对比

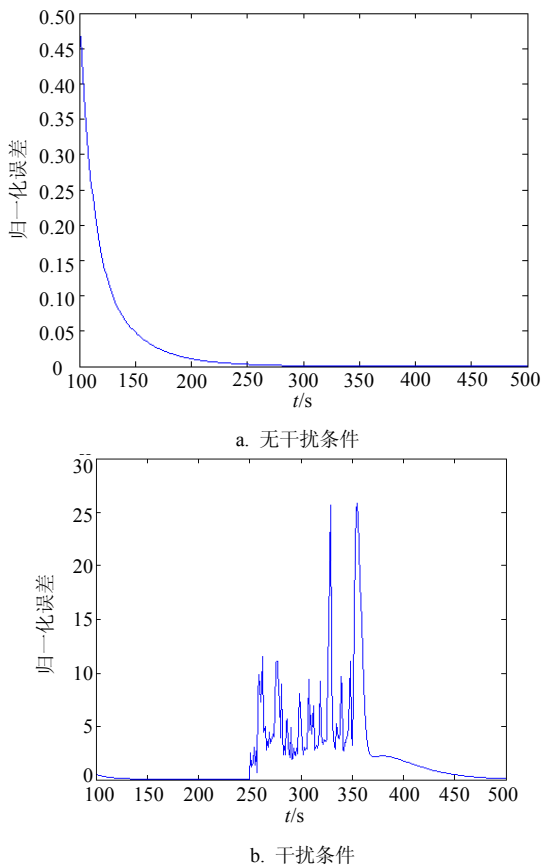


图3  $\chi^2$ 分布的百分率

## 4 结论

时间差定位跟踪具有精度高、定位快和“四抗”能力强等优点,但由于受系统自身一些特性的限制和外界环境的干扰,时间差系统对目标信号的截获可能无法达到对目标跟踪要求。本文采用将单站多站、时间差方位角定位跟踪技术结合起来对目标进行跟踪定位的新方法。通过仿真分析可以看出,利用本文的容错算法可对目标进行更有效的跟踪。

为了进一步提高可靠性,可使用2种方法进行改进:(1) 设置备用主站,以避免主站无法工作时,整个系统都无法工作。(2) 增加辅站个数,使多站角度跟踪的组数增加。当然,本文提出的算法也要做适当修改,以适应新的体系结构。

## 参考文献

- [1] 胡来招. 无源定位[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.  
HU Lai-zhao. Passive locating[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004.
- [2] TORRIERI D J. Statistical theory of passive location system[J]. IEEE Trans AES, 1984, 4(2): 183-198.
- [3] HMAM H. Scan-based emitter passive localization[J]. IEEE Trans AES, 2007, 43(1): 36-54.
- [4] BREHARD T, LE CADRE J P. Closed-form posterior cramer-rao bounds for bearings-only tracking[J]. IEEE Trans AES, 2006, 42(4): 1198-1223.
- [5] HUANG Z T, ZHOU Y Y. Multi-cycle estimator for time-difference-of-arrival (TDOA) and its performance[J]. IEE Proc Radar, Sonar and Navigation, 2006, 53(5): 381-388.
- [6] DRAGANA C. Automatic estimation of multiple target positions and velocities using passive TDOA measurements of transients[J]. IEEE Trans S P, 2007, 55(2): 424-436.
- [7] LIN X R, KIRUBARAJAN T. Exact multisensor dynamic bias estimation with local tracks[J]. IEEE Trans AES, 2004, 40(2): 576-590.
- [8] 申功勋, 孙建峰. 信息融合理论在惯性/天文/GPS组合导航系统中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.  
SHENG Gong-xun, SUN Jian-feng. The Application of information fusion theory in INS/CNS/GPS integrated navigation system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998.
- [9] 李宗华, 冯道旺, 周一宇. 估计目标运动速度矢量对运动辐射源的固定单站无源定位算法[J]. 电子学报, 2004, 32(6): 953-956.  
LI Zong-hua, FENG Dao-wang, ZHOU Yi-yu. Passive location algorithm for moving emitter by estimating its velocity vector based on single non-moving observer[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(6): 953-956.