

# 仅有角度信息的红外多传感器异步目标跟踪

丁光庆, 冯新喜, 高 丁

(空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

**摘要:**跟踪机动目标, 红外单站有不少缺陷, 多站可以提供比单站多的信息。然而, 多站存在同步的问题。通过对状态更新过程的分析, 发现跟踪可以异步实现。多站采用异步的处理方式极大的灵活了数据的处理, 而且可以通过多站组网扩大跟踪范围。为解决系统方程的非线性, 采用伪线性观测方程。仿真结果表明本方法可以实现对空中目标的稳定跟踪, 且观测站增加可以提高精度。

**关键词:**红外跟踪; 伪线性滤波; kalman 滤波; 目标跟踪

**中图分类号:** V243   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1009 - 3516(2007)01 - 0033 - 04

红外探测器靠接受目标的红外辐射来发现和探测目标, 它不辐射能量, 有很好的角度定位精度, 但是它无法直接测量距离。由于红外探测器无直接距离信息, 距离信息可以靠角度信息提供。仅有角度测量的红外单站跟踪, 从红外传感器中提取出距离信息和进行跟踪, 有不少人进行了研究, 还存在不少缺陷。这主要是因为: 一方面, 它存在严重的可观测性问题; 另一方面, 角度信息扩展到直角坐标系存在非线性, 这对于基于线性关系的各种滤波预测方法是一个障碍。目标的可观测性问题不少文献中都有分析, 在文献[1]中又有详细的论证。对于角度信息, 在各种极坐标及其改进的坐标系<sup>[2,3]</sup>中处理有很多优势, 它虽然解决了角度信息的线性化, 却使状态更新不够方便, 因为含有角度观测信息, 系统方程要么状态方程非线性, 要么观测方程非线性。它们还有一个无法克服的弱点, 那就是在当目标对传感器无角速度时, 单站仍将无能为力, 这是单站可观测性问题中无法克服的。而红外多站又面临多传感器数据融合固有的技术难点, 如同步、误差配准、坐标变换等。但是多站可以提供比单站多的信息。从平稳过程的特征和系统状态方程离散化后的状态转移矩阵可以看出, 对多站的同步不必要求那么严格。

为解决系统方程的非线性, 本文采用伪线性观测方程<sup>[4]</sup>。多站对目标的数据采样异步进行, 所有观测站采用的状态变量相同, 观测数据在融合中心进行处理。

## 1 可观测性分析

文献[1]中详细分析了目标可观测的条件, 并给出了如下定理:

**定理 1:** 对于具有如下状态方程和观测方程的系统:

$$\dot{X}(t) = A(t)X(t) + B(t)U(t) \quad (1) \quad Z(t) = C(t)X(t) \quad (2)$$

在时间段  $t \in [t_0, t_1]$  可观测的条件是, 当且仅当在这一时间内某一时刻存在非零向量  $Y$ , 下式成立:

$$C(t)\Phi(t, t_0)Y \neq 0 \quad (3) \quad \Phi(t, t_0) = e^{(t-t_0)A(t_0)} \quad (4)$$

由上面的定理可以得出结论: 对于固定单站, 仅靠角度信息, 目标不可观测。

下面分析固定多站观测仅有角度信息(方位角和俯仰角)时的可观测性。

由于多站观测同一目标, 所以采用统一的状态向量, 设为

收稿日期: 2006 - 07 - 17

作者简介: 丁光庆(1979 - ), 男, 湖北天门人, 硕士生, 主要从事红外目标跟踪技术研究;

冯新喜(1962 - ), 男, 陕西西安人, 教授, 博士生导师, 主要从事目标跟踪、目标识别、数据融合等技术研究。

$$\mathbf{X}(t) = [x(t), y(t), z(t), \dot{x}(t), \dot{y}(t), \dot{z}(t), \ddot{x}(t), \ddot{y}(t), \ddot{z}(t)]^T \quad (5)$$

观测站不运动,所以输入控制为零,各站的状态方程相同,即状态方程表达式均为:

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{X}(t) \quad (6) \quad \mathbf{A}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{6 \times 3} & \mathbf{I}_{6 \times 6} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 6} \end{bmatrix} \quad (7)$$

在红外双站观测空中目标时,设两站坐标分别为 $(x_1, y_1, z_1)$ 、 $(x_2, y_2, z_2)$ ,忽略噪声和测量误差的影响,利用三角函数关系将观测方程伪线性化,各站观测方程表达式同式(2),其中的参数分别为

$$\mathbf{Z}_i(t) = \begin{bmatrix} x_i \sin \theta_i(t) - y_i \cos \theta_i(t) \\ x_i \cos \theta_i(t) \sin \eta_i(t) + y_i \sin \theta_i(t) \sin \eta_i(t) - z_i \cos \eta_i(t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{C}_i(t) = \begin{bmatrix} \sin \theta_i(t) & -\cos \theta_i(t) & 0 \\ \cos \theta_i(t) \sin \eta_i(t) & \sin \theta_i(t) \sin \eta_i(t) & -\cos \eta_i(t) \end{bmatrix} \mathbf{0}_{2 \times 6} \quad (9)$$

$$\theta_i(t) = \arctan[(y(t) - y_i)/(x(t) - x_i)] \quad (10)$$

$$\eta_i(t) = \arctan[(z(t) - z_i)/\sqrt{(x(t) - x_i)^2 + (y(t) - y_i)^2}] \quad (11)$$

两站合并的观测方程为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Z}_1(t) \\ \mathbf{Z}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1(t) \\ \mathbf{C}_2(t) \end{bmatrix} \mathbf{X}(t) \quad (12)$$

由定理1,双站可观测的条件是:存在非零向量,使得 $\begin{bmatrix} \mathbf{C}_1(t) \\ \mathbf{C}_2(t) \end{bmatrix} \Phi(t, t_0) \mathbf{Y} \neq \mathbf{0}$ 成立。即目标在时间 $t \in [t_0, t_1]$ 内不与两站总在一直线上。所以,对固定的多站,在某一段时间只要存在有两站不与目标总在一直线上,在这段时间内目标就可观测。

## 2 多站异步更新

从上面的分析知道,对任一目标,只要存在两站不与它始终在一条直线上,这一目标就是可观测的。设共有 $n$ 个站,目标运动模型采用“当前”统计模型<sup>[5]</sup>。引入噪声,离散化后的各站状态方程和伪线性观测方程分别如下:

$$\mathbf{X}(k) = \Phi(k, k-1)\mathbf{X}(k-1) + \mathbf{U}(k-1)\bar{\mathbf{a}} + \mathbf{W}(k-1) \quad (13)$$

$$\mathbf{Z}_i(k) = \mathbf{H}_i(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{V}_i(k) \quad (14)$$

上式中参数 $\Phi(k, k-1)$ 、 $\mathbf{U}(k-1)$ 、 $\bar{\mathbf{a}}$ 、 $\mathbf{W}(k-1)$ 以及 $\mathbf{W}(k-1)$ 的协方差 $\mathbf{Q}(k-1)$ 为文献[5]中相应的矩阵或向量扩展到三维坐标的值。

$$\mathbf{Z}_i(k) = \begin{bmatrix} x_i \sin \theta_{mi}(k) - y_i \cos \theta_{mi}(k) \\ x_i \cos \theta_{mi}(k) \sin \eta_{mi}(k) + y_i \sin \theta_{mi}(k) \sin \eta_{mi}(k) - z_i \cos \eta_{mi}(k) \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{H}_i(k) = \begin{bmatrix} \sin \theta_{mi}(k) & -\cos \theta_{mi}(k) & 0 \\ \cos \theta_{mi}(k) \sin \eta_{mi}(k) & \sin \theta_{mi}(k) \sin \eta_{mi}(k) & -\cos \eta_{mi}(k) \end{bmatrix} \mathbf{0}_{2 \times 6} \quad (16)$$

$$\mathbf{V}_i(k) = [-r_{hi}(k) \sin \varepsilon_{1i}(k) - r_i(k) \sin \varepsilon_{2i}(k)]^T \quad (17)$$

$$r_{hi}(k) = \sqrt{(x(k) - x_i)^2 + (y(k) - y_i)^2} \quad (18)$$

$$r_i(k) = \sqrt{(x(k) - x_i)^2 + (y(k) - y_i)^2 + (z(k) - z_i)^2} \quad (19)$$

$$\theta_{mi}(k) = \theta_i(k) + \varepsilon_{1i}(k) \quad (20)$$

$$\eta_{mi}(k) = \eta_i(k) + \varepsilon_{2i}(k) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (21)$$

式(15) - (21)中下标 $m$ 代表含有量测误差的实际测量值; $\varepsilon_{1i}(k)$ 和 $\varepsilon_{2i}(k)$ 为各站的两个方向角度测量误差,均值都为零,方差分别为 $\sigma_{1i}^2$ 、 $\sigma_{2i}^2$ ,互不相关。所以有

$$E[\mathbf{V}_i(k)] = [0 \ 0]^T \quad (22)$$

$$\mathbf{R}_i(k) = E[\mathbf{V}_i(k)\mathbf{V}_i^T(k)] = \text{diag}[r_{hi}^2(k)[1 - \exp(-2\sigma_{1i}^2)]r_i^2(k)[1 - \exp(-2\sigma_{2i}^2)]] \quad (23)$$

由于多站具有相同的状态方程,这就使得对各站采样的观测数据可以直接进行目标状态异步更新。而对于平稳系统,状态转移矩阵只取决于所考虑的时间。在离散化的状态方程(11)中, $\Phi(k, k-1)$ 、

$U(k-1)$ 、 $W(k-1)$  的值都只与  $k-1$  到  $k$  步的时间间隔  $T$  有关。

所以,在机动模型中不必固定更新周期的值,可以采用这样的更新策略:多站联网,建立一个信息处理中心处理各观测站送来的实时采样角度数据;处理中心保存着各站的坐标,并能识别数据从哪个站来,同时有一个时钟缓存保存着最后一次被处理的采样数据接受到的时刻;对各站数据的处理设置一个优先级,以便处理同时接受到的数据;忽略通信延迟的影响,在处理下一个到来的数据时,用到来时刻  $t$  与  $t_i$  的差作为更新周期  $T$  的值对状态进行更新。这一策略使得我们不必担心采样数据的丢失,也不必考虑因同步而需要解决的许多问题。观测站联网以后使得观测范围得到延伸,说明可以通过科学组网扩大发现目标的范围。

Kalman 滤波过程公式如下:

$$\hat{X}(k/k) = \hat{X}(k/k-1) + K_i(k) [Z_i(k) - H_i(k) \hat{X}(k/k-1)] \tag{24}$$

$$\hat{X}(k/k-1) = \Phi(k, k-1) \hat{X}(k-1/k-1) + U(k-1) \bar{a}(k-1) \tag{25}$$

$$K_i(k) = P_i(k/k-1) H_i^T(k) [H_i(k) P_i(k/k-1) H_i^T(k) + R_i(k)]^{-1} \tag{26}$$

$$P_i(k/k-1) = \Phi(k, k-1) P_i(k-1/k-1) \Phi^T(k, k-1) + Q(k-1) \tag{27}$$

$$P(k/k) = [I - K_i(k) H_i(k)] P_i(k/k-1) \tag{28}$$

其中  $k$  仅代表更新步骤

由于式(18)、(19)中状态真值无法得到,可用状态一步预测值代替。默认发现目标时目标距离为 30 km,按第一个采样数据计算出目标初始位置,  $P(0/0) = I$ ,其它初始参数为零。

### 3 仿真分析

进行如下仿真条件的设计:

有 3 个固定红外站,在直角坐标系中位置分别为  $S_1(0,0,0)$ 、 $S_2(5 \text{ km},0,0)$ 、 $S_3(0,4 \text{ km},0)$ ;采样周期  $T_1 = 0.09 \text{ s}$ 、 $T_2 = 0.12 \text{ s}$ 、 $T_3 = 0.15 \text{ s}$ ;机动时间常数的倒数  $\alpha = 0.1$ ;三坐标轴方向  $a_{\max} = 20 \text{ m/s}^2$ 、 $a_{-\max} = -20 \text{ m/s}^2$ ;采样角度误差均  $\sigma^2 = 4 \times 10^{-6} \text{ rad}^2$ ;目标初始位置(15 km,3 km,5 km),初始速度(-150 m/s,0,0),30 s 后目标作右转弯运动,转弯速率为  $3''/\text{s}$ ,持续 30 s,然后再作 10 s 的匀速飞行;最后作 30 s 的右转弯运动,转弯速率为  $3''/\text{s}$ 。

在上述条件下进行了 100 次 Monte Carlo 飞行仿真实验。方位角、俯仰角和目标到传感器距离滤波后的误差如图 1 所示,图中对两站和 3 站的滤波精度进行了比较,两站由观测站 1、2 组成。

从图 1 可以看出,滤波很快稳定下来,3 站跟踪精度比两站有很大改进。这是因为站越多数据采样率越高。同时,与同步跟踪一样,观测站增多时噪声可以得到抑制,这一点有待证明。另外,很多文献中提及<sup>[6]</sup>,虽然伪线性滤波存在有偏性,但是它对初始状态不敏感,本文中的初始条件是一种对初始状态一无所知的情况,正验证了这一结论。但是图 1 中滤波后阶段误差有增大的趋势,这是目标逃逸远去的结果,因为仅凭角度信息定位在目标距离增大时误差增加。

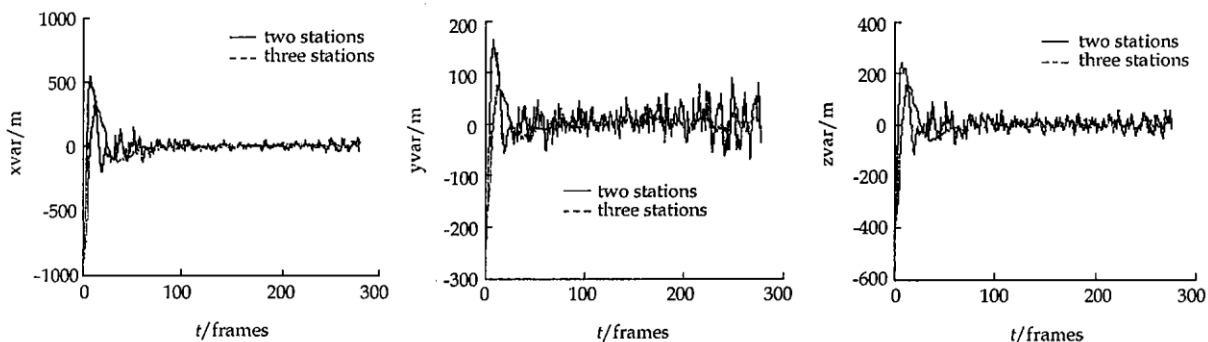


图 1 滤波器误差图

## 4 结束语

本文提出了一种新的多站跟踪方式—异步跟踪。异步的方式大大放宽了对观测站的要求,极大方便了数据的处理。这一方式使得我们可以不必担心数据的丢失,不必考虑因同步而要进行的误差配准,却能极大提高对目标的数据采样率和跟踪的精度,还可以通过组网扩大发现目标的范围。

### 参考文献:

- [1] Jauffret C, Pillon D. Observability in Passive Target Motion Analysis [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32(4): 1290 - 1300.
- [2] Peach N. Bearings - only Tracking Using a Set of Range - Parameterised Extended Kalman Filters [J]. IEE Proc - Control Theory Appl, 1995, 142(1): 73 - 80.
- [3] 翰林频, 吴加望. 纯角度测量跟踪滤波器[J]. 现代防御技术, 1995, (5): 53 - 63.
- [4] 辛云宏, 杨万海. 基于伪线性卡尔曼滤波的多站IRST系统跟踪技术[J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(5): 374 - 377.
- [5] 周宏仁, 敬忠良, 王培德. 机动目标跟踪[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
- [6] Song T L, Speyer J L. A Stochastic Analysis of a Modified Gain Extended Kalman Filter With Applications to Estimation With Bearing Only Measurements [J]. IEEE Trans Autom Control, 1985, 30(10): 940 - 949.

(编辑: 门向生)

## Angle - only Asynchronous Target Tracking with Infrared Stations

DING Guang - qing, FENG Xin - xi, GAO Ding

(The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, Shaanxi, China)

**Abstract:** Tracking maneuvering target with single station has many limitations, but multi - station can offer more information. Then multi - station has a problem of synchronization. By analyzing the course of updating the state, it is found that the tracking can be realized asynchronously and the multi - station dealing with the data in this manner makes the work completely flexible. So, multi - station in a net can increase the tracking range. To solve the non - linearity of the systems, a pseudo - linear observational equation is adopted. The simulation results indicate that this method is stable in tracking aerospace target. Furthermore, the increase in the number of the observation station can improve the precision.

**Key words:** infrared tracking; pseudo - linear filter; Kalman filter; target tracking