

运动红外单站跟踪空中目标的方向估计方法

刘进忙, 吴中林, 王 君

(空军工程大学导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘要: 红外探测器只能测量运动目标的方位角和俯仰角, 难以获取目标的距离信息。运动红外探测器所测量的运动目标不完全信息, 无法在直角坐标系下有效对三维运动目标进行滤波与跟踪。针对这一问题, 提出了运动红外单站跟踪运动目标的参数航迹滤波方法: 该方法利用传感器测量到的目标方位角和俯仰角信息, 根据假设的目标运动模型, 直接对目标航迹方向进行估计, 从而较好地解决了运动红外单站的目标跟踪问题。仿真结果表明, 该模型不但能很好的对目标的航向进行估计, 而且可以估计导弹到目标的方向, 具有较高的理论和应用价值。

关键词: 参数航迹滤波; 目标跟踪; 运动单站

中图分类号: TN953 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2011.10.023

Method to estimate the trajectory of space target with infrared mono-station

LIU Jin-mang, WU Zhong-lin, WANG Jun

(Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, China)

Abstract: Infrared detector can only obtain the azimuth angle and elevation angle of the target which is hard to get the information of distance. Especially for the incomplete information measured by motional infrared detector, it is impossible to track three dimensional objects in rectangular coordinates. Aiming at this issue, a new approach, the algorithm of filtering and smoothing with parameters based on motional infrared mono-station, is proposed to estimate the direction of flight path, with the utilization of the information of azimuth angle and elevation angle measured by the sensors, and then the problem of target tracking by motional infrared mono-station is well solved. As is shown in the simulation, the model has a good estimation of the course of the target as well as the direction from the missile to targets. The algorithm has high value of theory and application.

Key words: flight path filtering with parameter; target tracking; infrared mono-station

1 引言

在无源定位系统中, 许多被动式红外探测器只能测量目标的方位角和俯仰角信息, 距离信息的获取较困难, 难以在直角坐标系下对三维目标实施有效跟踪^[1-3]。传统的方法一般通过多个红外被动基站进行交叉定位, 估计出目标在直角坐标系中的位置, 再进行滤波处理, 但是, 角度到位置的转换过程具有较强的非线性, 交叉定位的同时增加了位置估计的误差, 会对后续的滤波处理带来不良影响, 特别是对运动的红外传感器条件下, 目标不完全信息的

处理更加复杂。针对这一问题, 充分利用传感器测量到的方位角和俯仰角信息, 在目标运动模型的假设下, 依据带参量的加权最小二乘法构造目标函数, 通过最小化目标函数估计出目标运动的航迹方向, 较好地解决了运动红外单站的目标跟踪问题。如无人机或空空导弹攻击敌方空中目标时, 利用目标的

基金项目: 航空科学基金项目 (No. 20090196002); 陕西省自然科学基金项目 (No. 2010JM8013) 资助。

作者简介: 刘进忙 (1958 -), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事信号与信息处理研究。

收稿日期: 2011-03-07; **修订日期:** 2011-05-26

方位和仰角信息对运动目标进行参数航迹滤波与跟踪,为防空作战必要的信息准备。这对于运动平台的红外目标跟踪与作战有重要的作用和意义。

2 模型的建立

当导弹与目标的距离较近时,导弹上的主动雷达就会打开,其制导方式不同与远距离的情况。在远距离条件下,导弹利用被动传感器(红外)对目标方向测量,且测量的速率较高(一般可达每秒数十次),可近似认为目标机动的可能性不是很大,目标做匀速直线运动。

如图1所示, O 为坐标原点,设导弹初始位置为 $P(x_0, y_0, z_0)$,空间目标在参考时刻 t_0 的位置为 $P_0(x_0, y_0, z_0)$,目标以速度 V 作匀速直线运动,运动方向的单位向量为 $L = (l, m, n)^T$,其中, $l = \cos\varepsilon\sin\beta, m = \cos\varepsilon\cos\beta, n = \sin\varepsilon, \varepsilon$ 表示目标航迹方向的俯仰角, β 表示目标的航迹方向的方位角。在 $t_i(i=1, 2, \dots, N)$ 时刻目标的位置为 $P_i(x_e^i, y_e^i, z_e^i)$,弹头红外装置测量到的目标方向的单位向量为 $L_i = (l_i, m_i, n_i)$,设目标与弹头的距离为 R_i ,则有目标运动模型如式(1)所示:

$$\begin{cases} x_e^i = x_0 + Vl(t_i - t_0) \\ y_e^i = y_0 + Vm(t_i - t_0) \\ z_e^i = z_0 + Vn(t_i - t_0) \end{cases} \quad (1)$$

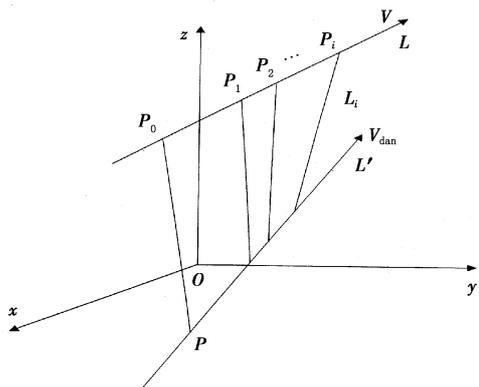


图1 目标与导弹飞行示意图

实际上,导弹在空中飞行变为变速飞行,除起始阶段外,在远距离奔袭的中间平稳阶段及相对短的时间内可近似看作匀速直线运动。设导弹的运动速度为 V_{dan} ,运动方向的单位向量为 $L' = (l', m', n')$ 。

运动导弹测量目标位置模型:

$$\begin{cases} x_e(t_i) = x_0 + V_{dan}l'(t_i - t_0) + l_iR_i + n_x \\ y_e(t_i) = y_0 + V_{dan}m'(t_i - t_0) + m_iR_i + n_y \\ z_e(t_i) = z_0 + V_{dan}n'(t_i - t_0) + n_iR_i + n_z \end{cases} \quad (2)$$

$i = 1, 2, \dots, N$

其中,目标的测量方向: $l_i = \cos\varepsilon_i\sin\beta_i, m_i =$

$\cos\varepsilon_i\cos\beta_i, n_i = \sin\varepsilon_i, \varepsilon_i, \beta_i$ 分别表示导弹测量目标的仰角和方位角; n_x, n_y, n_z 为测量噪声,均值为零,方差为 $\sigma_x^2 = \sigma_y^2 = \sigma_z^2 = \sigma^2$ 并假设各通道互不相关。

3 参量滤波平滑算法

红外被动探测系统进行目标跟踪时,通常需要先进行交叉定位,将角度信息转化为直角坐标系下的位置信息^[4-6],然而由于受到观测噪声的影响,转换过程往往会带来较大偏差。针对该问题,本文在第2节的模型基础上,提出了一种参量滤波平滑算法,直接利用角度信息估计目标运动航迹方向,从而避免了非线性转换带来的问题。

3.1 目标测量航迹方向估计

在匀速运动模型的假设下,由目标的一组测量估计目标的运动方向参数,构造参量加权最小二乘目标函数为:

$$Q = \sum_{i=1}^N \left[\frac{(x_e^i - x_e(t_i))^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y_e^i - y_e(t_i))^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z_e^i - z_e(t_i))^2}{\sigma_z^2} \right] \quad (3)$$

使式(3)最小的航迹方向即为估计方向。

式(3)分别对 x_0, y_0, z_0 求偏导数后令其偏导为0,整理可得:

$$\begin{bmatrix} x_0 - x_0 \\ y_0 - y_0 \\ z_0 - z_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{N} \begin{pmatrix} l_1 & l_2 & \dots & l_N \\ m_1 & m_2 & \dots & m_N \\ n_1 & n_2 & \dots & n_N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_N \end{pmatrix} + V(t_0 - \bar{t})L + V_{dan}(\bar{t} - t_0)L' \quad (4)$$

其中, $\bar{t} = \frac{1}{N} \sum t_i$ 。

式(3)分别对 R_i 求偏导数后令其为0,设对角阵 $T = \text{diag}(t_1 - t_0, \dots, t_N - t_0)$,整理可得:

$$\begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_N \end{pmatrix} = S \begin{pmatrix} x_0 - x_0 \\ y_0 - y_0 \\ z_0 - z_0 \end{pmatrix} + VTSL - V_{dan}TSL' \quad (5)$$

其中, $S^T = \begin{pmatrix} l_1 & l_2 & \dots & l_N \\ m_1 & m_2 & \dots & m_N \\ n_1 & n_2 & \dots & n_N \end{pmatrix}$ 。

式(3)对 (l, m, n) 求偏导数后令其为0,整理可得:

$$L = \frac{\sum_{i=1}^N (t_i - t_0)}{V \sum_{i=1}^N (t_i - t_0)^2} \begin{pmatrix} x_0 - x_0 \\ y_0 - y_0 \\ z_0 - z_0 \end{pmatrix} +$$

$$\frac{S^T}{V \sum_{i=1}^N (t_i - t_0)^2} \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_N \end{pmatrix} + \frac{V_{\text{dan}} L' \sum_{i=1}^N (t_i - t_0)^2}{V \sum_{i=1}^N (t_i - t_0)^2} \quad (6)$$

整理式(4)~式(6),可得:

$$\begin{aligned} & [\sum_{i=1}^N (t_i - t_0)^2 I - S^T T^2 S] L \\ &= -\frac{R_0}{V} [\sum_{i=1}^N (t_i - t_0) I - S^T T S] L_0 + \\ & \frac{V_{\text{dan}} [\sum_{i=1}^N (t_i - t_0)^2 I - S^T T^2 S] L'}{V} \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $\begin{pmatrix} x_0 - x_0 \\ y_0 - y_0 \\ z_0 - z_0 \end{pmatrix} = R_0 L_0$, I 为单位矩阵; R_0 为 t_0 时刻

目标与弹头红外测量装置的参考距离,假设测量开始时为已知。

设 $K_q = \sum_{i=1}^N (t_i - t_0)^q I - S^T T^q S, q = 1, 2$ 。可得:

$$K_2 L = -\frac{R_0}{V} K_1 L_0 + K_2 \frac{V_{\text{dan}} L'}{V} \quad (8)$$

进而得:

$$L = -\frac{R_0}{V} K_2^{-1} K_1 L_0 + \frac{V_{\text{dan}} L'}{V} \quad (9)$$

式(9)右端目标的飞行速度 V 为未知常数,这是一个中间过程,不妨设 R_0, V_{dan} 已知。导弹的速度 V_{dan} 可由导弹自身携带的设备(如速压传感器)测定, R_0 可有多种信息支援渠道(若有条件,可通过激光测距、多弹交叉测距等)提供。在后续处理中这几个值将全部被约去。

在经滤波后可认为噪声较小的条件下,整理式(1)、式(2)可得:

$$R_i \hat{L}_i = R_0 L_0 + V(t - t_0) L - V_{\text{dan}}(t - t_0) L' \quad (10)$$

其中, R_i 为任意 t 时刻目标与导弹的距离; \hat{L}_i 为 t 时刻导弹到目标的单位方向的估计。代入式(9),经整理可得:

$$R_i \hat{L}_i = R_0 [I - (t - t_0) K_2^{-1} K_1] L_0 \quad (11)$$

考虑到 R_i 未知,可通过式(11)两边取模可得:

$$R_i = \frac{R_0 \sqrt{L_0^T [I - (t - t_0) K_2^{-1} K_1]^T [I - (t - t_0)] K_2^{-1} K_1 L_0}}{\quad} \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)并约去 R_0 ,得任意 t 时刻估计导弹与目标的单位向量为:

$$\hat{L}_i = \frac{I - (t - t_0) K_2^{-1} K_1}{\sqrt{L_0^T [I - (t - t_0) K_2^{-1} K_1]^T [I - (t - t_0) K_2^{-1} K_1] L_0}} L_0 \quad (13)$$

式(13)中所有的计算都是运动目标与导弹的单位方向的测量序列,没有其他任何未知参量。由于 t 时刻不同,式(13)可看成目标方向序列的插值、滤波、预测。由此可见,通过各个时刻的观测值可以计算得出导弹到目标任意时刻的方向估计。可以设计导弹在飞行一段过程后,根据计算出导弹到目标的预测方向,配合导弹制导原理,再调整导弹的飞行方向。

整理式(3)并代入式(9)可得:

$$\begin{aligned} Q_{\min} &= \sum_{i=1}^N \| R_i L_i - R_0 [I - (t_i - t_0) K_2^{-1} K_1] L_0 \|^2 \\ &= R_0^2 \sum_{i=1}^N d_i^2 \| L_i - \hat{L}_i \|^2 \\ &= 4R_0^2 \sum_{i=1}^N d_i^2 (1 - \cos^2 \theta_{L_i, \hat{L}_i}) \end{aligned} \quad (14)$$

其中, $d_i \triangleq \sqrt{L_0^T [I - (t_i - t_0) K_2^{-1} K_1]^T [I - (t_i - t_0) K_2^{-1} K_1] L_0}$,

$\cos \theta_{L_i, \hat{L}_i} \triangleq L_i^T \hat{L}_i$, L_i, \hat{L}_i 分别为 t_i 时刻的测量、估计的导弹到目标单位方向。

上式可计算出逼近精度 $\frac{Q_{\min}}{4R_0^2}$,反映了方向测量

与方向估计之间的加权总误差。如该值在某两段间变化较大时,可认为目标发生了变线机动。若目标作变线机动运动,由于导弹测量目标单位方向速率较高,适当减少 N 值,可有效地预测目标的单位方向,实现目标的跟踪。但这是以降低滤波精度为代价。另外,还可通过提高目标运动模型的阶数以适应目标的变线机动运动。

3.2 算法仿真

设导弹在初始位置 $(100, 100, 100) m$ 处沿 $(0.57735, 0.57735, 0.57735)$ 方向以 $200 m/s$ 做匀速直线运动,目标在初始位置 $(600, 600, 600) m$ 处沿 $(0.3, 0.4, 0.866)$ 方向以 $100 m/s$ 做匀速直线运动,目标的航向仰角为 $1.0471 rad$,方位角为 $0.6436 rad$ 。采样周期 $T = 0.05 s$,采样次数为 100 次,初始时刻设为 0 。

(1) 设仰角为 ε ,方位角为 β ,随机产生一系列正态分布序列,其均值为 0 ,标准差 $\sigma_\varepsilon = \sigma_\beta = \sigma = 0.003$ 时,测量次数 $N \in [10, 109]$,间隔为 1 取 100 个点,模型对目标航向方位与仰角的估计如图2、图3所示。当测量次数较少的时候,估计值与真实值

偏差较大,随着测量次数的增多,方位和仰角的估计值逐渐趋向于真实值。

噪声标准差为 0.003 rad 目标航向方位随采样次数的变化

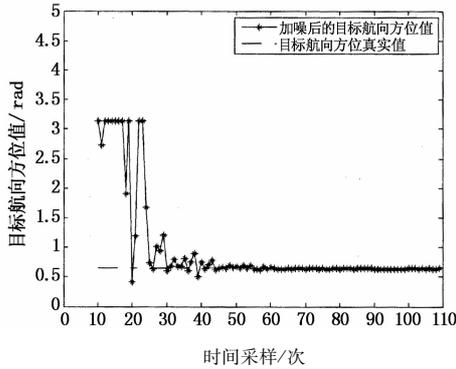


图2 目标方位值与航向方位角估计精度的关系

噪声标准差为 0.003 rad 目标航向仰角随采样次数的变化

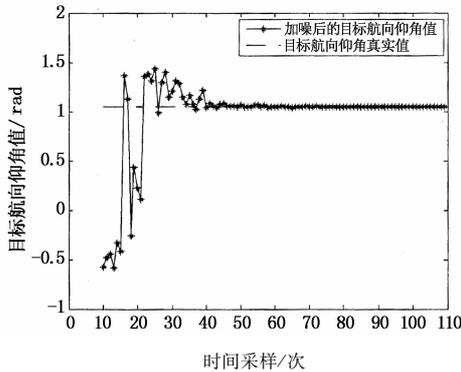


图3 目标仰角值与航向仰角估计精度的关系

(2) 采样次数为 100 次,初始时刻设为 0。随机产生一系列正态分布序列,其均值为 0,方差 $\sigma_\epsilon^2 = \sigma_\beta^2 = \sigma^2$,其标准差 $\sigma_\epsilon = \sigma_\beta = \sigma \in (0.001, 0.1)$,将此区间等间隔地取分成 100 等分,得到不同噪声标准差所对应的目标航向仰角和方位值。仿真结果如图 4、图 5 所示。横坐标表示噪声由 0.001 变化到 0.1,目标航向仰角和方位角随噪声标准差的减小而逐渐趋近于真实值。收敛效果较好。在空中运动单站中每个观测站利用纯角度信息都可以得到目标航向方位和仰角值,若该值不同则可判定不是同一批目标;

目标航向方位随噪声标准差的变化

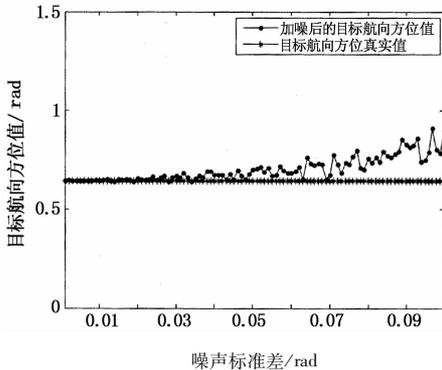


图4 目标方位值的测量标准差与方位值的关系

若相同,则可判定是平行飞行目标,若可得到距离信息,则可进一步确定是否为同一批目标。

目标航向仰角随噪声标准差的变化

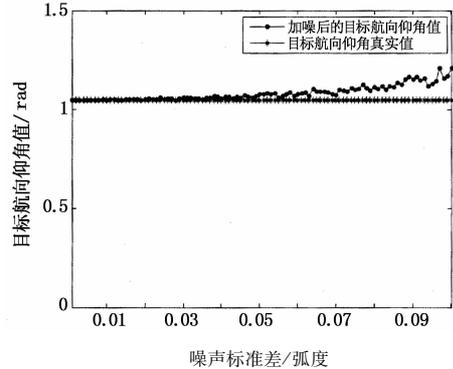


图5 目标仰角值的测量标准差与仰角值的关系

(3) 采样次数仍然为 100 次,标准差 $\sigma_\epsilon = \sigma_\beta = \sigma = 0.003$,导弹到目标的方向估计如图 6、图 7 所示。可以看出,根据式 (13) 得到的导弹到目标方向的仰角、方位角估计值与真实值曲线基本重合,而且起到了很好的降噪效果。

导弹到目标方向仰角值随采样时间变化

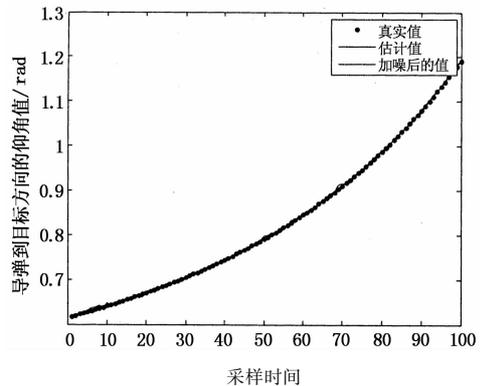


图6 导弹到目标方向仰角值随采样时间的变化

导弹到目标方向方位角值随采样时间变化

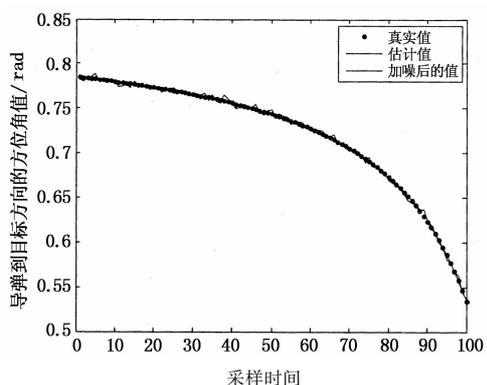


图7 导弹到目标方向方位角值随采样时间的变化

4 结论

本文提出的一种基于运动红外单站的参量航迹滤波方法,在只有方位角和俯仰角信息的红外被动单站传感器系统中,通过对目标航向与导弹到目标

的方向进行估计,较好地解决了目标跟踪问题。仿真验证表明,该算法在加入噪声后,通过最小二乘批处理滤波算法得到了相对稳定的目标飞行仰角和方位角。从目标模型来看,方位角和俯仰角信息能够提供目标航迹的航向参数,而距离信息可以进一步确定目标航迹的远近,如何对多个站独立跟踪所得的目标航向参数进行有效融合,是今后的一个研究方向。该算法丰富了无源跟踪理论,具有重要的理论和实践意义。

参考文献:

- [1] Adrian N Bishop, Brian D O Anderson, Baris Fidan, et al. Bearing-only localization using geometrically constrained optimization[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic System, 2009, 45(1): 308 - 320.
- [2] Liu Jingmang. Trajectory invariable-information target tracking algorithm with bearing-only measurement [J]. Journal of Xidian University, 2008, 35(1): 49 - 53. (in Chinese)
刘进忙. 纯方位观测的航迹不变量目标跟踪算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2008, 35(1): 49 - 53.
- [3] Zhang Tao. Bearing-only tracking based on double band information fusion [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(4): 454 - 458. (in Chinese)
张涛. 基于双波段方位信息融合的单站纯方位跟踪 [J]. 激光与红外, 2009, 39(4): 454 - 458.
- [4] Kutluyil Dogan ay Bias. Compensation for the bearings-only pseudo linear target track estimator [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2006, 54(1): 59 - 67.
- [5] K Dogancay, G Ibal. Instrumental variable estimator for 3D bearing-only emitter localization [C]//ISSNIP, Melbourne, Australia, 2005: 63 - 68.
- [6] A N Bishop, P N Pathirana. Localization of emitters via the intersection of bearing lines: A ghost elimination approach [J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, To Appear, 2007.
- [7] Guo Fucheng. A new method of bearing-only target location based on parameter transformation [J]. International Conference on Information and Automation, 2008: 1406 - 1410.
- [8] Li Fudong. Status and development of airborneIRST systems [J]. Laser & Infrared, 2008, 38(5): 409 - 412. (in Chinese)
李富栋. 机载红外搜索与跟踪系统的现状与发展 [J]. 激光与红外, 2008, 38(5): 409 - 412.