

目标飞行不变量和方位支援的仰角参数估计方法

刘进忙, 吴中林, 李延磊

(空军工程大学导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘要 针对单站观测系统的目标角度跟踪问题, 提出了一种基于单站目标飞行平面的二面角不变量和方位序列支援的仰角参数估计方法。根据推导出的二面角关系, 利用纯方位序列计算出目标在平面上投影的航向角, 可方便地解出目标运动平面的水平补角和二面角, 最后给出目标仰角序列的预测公式并分析了方位噪声对仰角误差的影响。该方法较好地解决了单站纯角度观测的非线性问题。仿真实验表明: 估计的目标运动的不变参数效果好, 仰角预测序列精度高。

关键词 不变量; 纯角度; 最小二乘估计; 水平补角

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.06.006

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)06-0026-06

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^[1-2]。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, 但角度到位置的转换过程具有较强的非线性^[3-5], 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^[6-9]。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, 依据目标飞行方向与观测站形成的平面与水平面之间的二面角的不变量建立最小二乘模型, 可以通过归一化求出水平补角及二面角参数。文献[10]由纯方位序列得出了目标的飞行参数, 并给出了方位角的递推形式。本文中, 在纯方位飞行参数的支援下, 进一步给出仰角的预测滤波关系式, 可以由方位角来估计目标飞行的仰角信息。

1 二面角关系模型及不变量求解方法

见图1, 观测站位置为 $O(x_o, y_o, z_o)$, 目标初始位置为 $P(x_0, y_0, z_0)$, 目标以速度 V 进行匀速直线运动, 运动方向为 $L = (l, m, n)^T$, t 时刻观测站观测目标的仰角为 ε_t , 方位角为 β_t , P 点为目标在 t 时刻的空间位置, M 为目标航迹与水平面交点, 直线 ME 为目标航迹 MP 在水平面上的垂直投影直线, E 为 P 点的投影, φ 为目标运动平面 POM 与水平面 MOE 的夹角(二面角), EA 与 OM 垂直, ε_0 为目标的航向仰角。为方便起见, θ 为新定义的目标航向的水平补角。

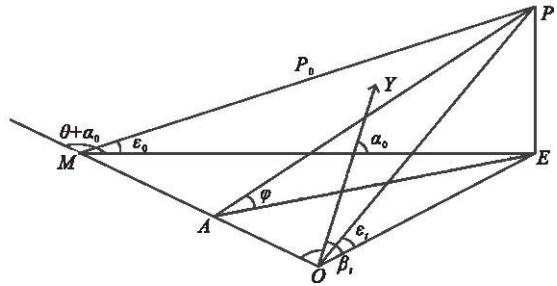


图1 目标匀速运动平面示意图
Fig. 1 Planar diagram of uniform rectilinear motion of target

根据空间位置和几何关系有: $AE = ME \sin(\pi - \theta - \alpha_0) = ME \sin(\theta + \alpha_0) = PE \cot \varepsilon_0 \sin(\theta + \alpha_0)$, $\cot \varphi = AE / PE = \sin(\theta + \alpha_0) \cot \varepsilon_0$, 同理, $\cot \varphi = \sin(\theta + \beta_t) \cot \varepsilon_t$, 则易得到二面角关系:

* 收稿日期: 2011-06-16
基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2010JM8013)
作者简介: 刘进忙(1958-), 男, 陕西渭南人, 教授, 博士生导师, 主要从事智能信息处理研究。
E-mail: liujinmang1@163.com

$$\cot\varphi = \sin(\theta + \beta_i) \cot\varepsilon_i = \sin(\theta + \alpha_0) \cot\varepsilon_0 \quad (1)$$

由于目标沿 MP_i 直线飞行, O 点为观测站是静止不动的, 故二面角 φ 和目标航向的水平补角 θ 是不随时间变化, 均为常量。二面角关系式在单站、多站目标航迹解算和点迹相关方面有重要的作用。

式(1)可整理成:

$$[\sin\theta\cos\beta_i + \cos\theta\sin\beta_i] \cos\varepsilon_i = \cot\varphi\sin\varepsilon_i \quad (2)$$

对目标进行 n 次观测可得到方位、仰角序列, 根据式(2)关系, 可表示成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \cos\varepsilon_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \cos\varepsilon_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta_1 & \sin\beta_1 \\ \dots & \dots \\ \cos\beta_n & \sin\beta_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin\theta \\ \cos\theta \end{bmatrix} = \cot\varphi \begin{bmatrix} \sin\varepsilon_1 \\ \dots \\ \sin\varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

解式(3)可得:

$$\begin{bmatrix} \sin\theta \\ \cos\theta \end{bmatrix} = \cot\varphi [ABA^T]^{-1} A \begin{bmatrix} \sin\varepsilon_1 \\ \dots \\ \sin\varepsilon_n \end{bmatrix} \triangleq \frac{\cot\varphi}{c} Cd \quad (4)$$

$$\text{式中: } A = \begin{bmatrix} \cos\beta_1 & \dots & \cos\beta_n \\ \sin\beta_1 & \dots & \sin\beta_n \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} \cos\varepsilon_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \cos\varepsilon_n \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \cos\varepsilon_i \sin^2\beta_i & - \sum_{i=1}^n \cos\varepsilon_i \cos\beta_i \sin\beta_i \\ - \sum_{i=1}^n \cos\varepsilon_i \cos\beta_i \sin\beta_i & \sum_{i=1}^n \cos\varepsilon_i \cos^2\beta_i \end{bmatrix};$$

$$d = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \sin\varepsilon_i \cos\beta_i \\ \sum_{i=1}^n \sin\varepsilon_i \sin\beta_i \end{bmatrix}; c = \left(\sum_{i=1}^n \cos\varepsilon_i \cos^2\beta_i \right) \left(\sum_{i=1}^n \cos\varepsilon_i \sin^2\beta_i \right) - \left(\sum_{i=1}^n \cos\varepsilon_i \cos\beta_i \sin\beta_i \right)^2。$$

式(4)左边是归一化向量, 右端的向量模应该为单位值, 除 $\cot\varphi$ 之外, 其余所求的向量模为 $\tan\varphi$, 可求出 θ 与 φ 值。进而求出目标航迹的航向仰角 ε_0 :

$$\cot\varepsilon_0 = \cot\varphi / \sin(\theta + \alpha_0) \quad (5)$$

式中 α_0 未知, 可以采用纯方位序列的 3 参数求取方法^[10]。在纯方位序列观测条件下, 单站可求解得到的目标参数航迹值: $\cot\alpha_0, V/h_{\perp}, t_{\perp}$ 。由文献[10]可得纯方位预测公式为:

$$\begin{bmatrix} \cos\beta_{n+1} \\ \sin\beta_{n+1} \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} V/h_{\perp}(t_{n+1} - t_{\perp}) & 1 \\ 1 & V/h_{\perp}(t_{n+1} - t_{\perp}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\alpha_0 \\ \sin\alpha_0 \end{bmatrix}}{\sqrt{1 + (V/h_{\perp})^2 (t_{n+1} - t_{\perp})^2}} \quad (6)$$

式中: h_{\perp} 表示二维观测站到目标航线的垂直距离; t_{\perp} 表示目标飞临垂直点的时刻。

当给出 α_0 , 解出 ε_0 时, 可确定目标航迹方向为 $[\cos\varepsilon_0 \sin\alpha_0 \quad \cos\varepsilon_0 \cos\alpha_0 \quad \sin\varepsilon_0]^T$ 。

2 仰角外推模型

2.1 外推模型

由式(1)可得到:

$$\tan\varepsilon_i = \tan\varphi \sin(\theta + \beta_i) = \tan\varphi \begin{bmatrix} \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta_i \\ \sin\beta_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据文献[10]给出的纯方位角预测公式, 代入上式可得到纯仰角的预测公式:

$$\tan\varepsilon_i = \tan\varphi \frac{\begin{bmatrix} \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V/h_{\perp}(t_i - t_{\perp}) & 1 \\ -1 & V/h_{\perp}(t_i - t_{\perp}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\alpha_0 \\ \sin\alpha_0 \end{bmatrix}}{\sqrt{1 + (V/h_{\perp})^2 (t_i - t_{\perp})^2}} \quad (8)$$

应用三角形 MOE 的正弦定理及计算直线 OE 、 OP_t 、 EP_t 的距离,也可得到:

$$\begin{bmatrix} \cos \varepsilon_t \\ \sin \varepsilon_t \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} \sin(\theta + \alpha_0) \cos \varepsilon_0 \\ \sin(\theta + \beta_t) \sin \varepsilon_0 \end{bmatrix}}{\sqrt{\sin^2(\theta + \beta_t) \sin^2 \varepsilon_0 + \sin^2(\theta + \alpha_0) \cos^2 \varepsilon_0}} \quad (9)$$

结论:纯仰角的预测公式与纯方位角预测公式有较多的相似性,而且可以通过方位来表示仰角信息,由此说明两者之间存在较多的耦合,在实际跟踪中可以借助方位信息对仰角进行估计。本文算法适用于直线运动,如果目标机动,可采取分段直线逼近的方法进行讨论。

2.2 误差分析

外推模型中,方位角测量误差对仰角的影响,由式(9)对方位求微分:

$$\frac{d \cos \hat{\varepsilon}_t}{d \beta_t} = \frac{-\sin(\theta + \alpha_0) \cos(\varepsilon_0) \sin(\theta + \beta_t) \sin^2 \varepsilon_0 \cos(\theta + \beta_t)}{(\sin^2(\theta + \beta_t) \sin^2 \varepsilon_0 + \sin^2(\theta + \alpha_0) \cos^2 \varepsilon_0)^{\frac{3}{2}}} \quad (10)$$

$$\frac{d \sin \hat{\varepsilon}_t}{d \beta_t} = \frac{\cos(\theta + \beta_t) \sin \varepsilon_0 M^{\frac{1}{2}} - \sin^2(\theta + \beta_t) \cos(\theta + \beta_t) \sin^3 \varepsilon_0 M^{-\frac{1}{2}}}{M} \quad (11)$$

式中 $M = \sin^2(\theta + \beta_t) \sin^2 \varepsilon_0 + \sin^2(\theta + \alpha_0) \cos^2 \varepsilon_0$ 。

由于利用方位角估计仰角, $\theta, \alpha_0, \varepsilon_0$ 在此可看作常数。假设测量到的方位角误差 δ_{β_t} 是均值为零的高斯白噪声,则方差为 $\delta_{\beta_t}^2$,由式(9)、(10)得仰角余弦、正弦的方差为:

$$\delta_{\cos \hat{\varepsilon}_t}^2 = (d \cos \hat{\varepsilon}_t / d \beta_t)^2 \delta_{\beta_t}^2, \quad \delta_{\sin \hat{\varepsilon}_t}^2 = (d \sin \hat{\varepsilon}_t / d \beta_t)^2 \delta_{\beta_t}^2 \quad (12)$$

将式(10)、式(11)代入式(12)可得仰角余弦、正弦估计的方差。

2.3 算法步骤:

- 步骤1 根据式(4)求出目标飞行平面与参考平面的二面角 φ 和目标航向的水平补角 θ ;
- 步骤2 采用文献[10]中3参数求取方法求出 α_0 ;
- 步骤3 根据式(5)求出目标航迹的航向仰角 ε_0 ;
- 步骤4 根据式(9)估计出单站目标的航迹参数 $\hat{\varepsilon}_t$ 。

3 仿真与分析

设观测站初始位置为(1 000, 1 000, 0) m, 目标初始位置为(500, 1 000, 1 000) m。目标以 130 m/s 的速度沿(3, 4, 12)的方向作匀速直线运动。采样周期为 0.05 s。

3.1 二面角、水平补角正弦、余弦、目标航向仰角值的随测量次数的变化情况

1) 设仰角为 ε , 方位角为 β , 随机产生 2 个独立的正态分布序列, 其均值为 0, 当方差 $\sigma_\varepsilon = \sigma_\beta = \sigma = 0.003$ rad 时, 测量次数 $N \in [10, 110]$, 间隔为 1 取 101 个点, 结果见图 2 - 图 5。

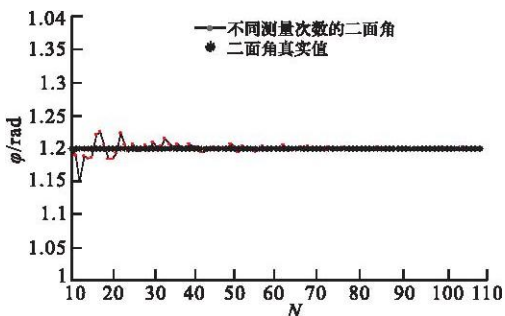


图2 二面角随测量次数变化

Fig. 2 Variation of dihedral angle with measurement time

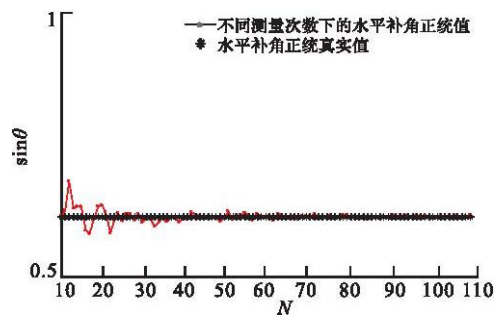


图3 水平补角正弦随测量次数变化

Fig. 3 Variation of sine of horizontal supplementary angle with measurement time

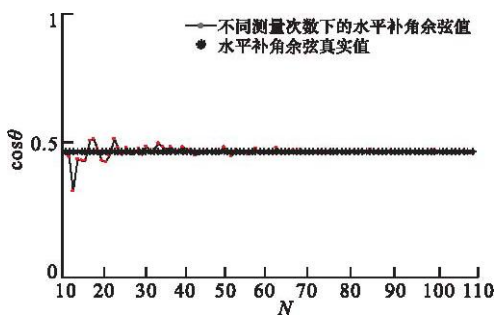


图4 水平补角余弦随测量次数变化

Fig.4 Variation of cosine of horizontal supplementary angle with measurement time

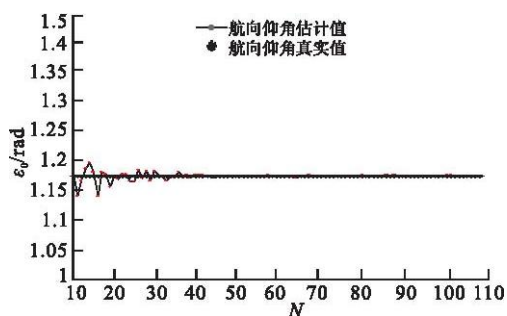


图5 目标航向仰角随测量次数变化

Fig.5 Variation of course elevation with measurement time

噪声标准差一定时,二面角、水平补角正弦、余弦、目标航向仰角估计值随测量次数增多趋于真实值。当 $N = 75$ 次时,二面角估计值约等于真实值。水平补角正弦值在 $N = 70$ 次时,估计值约等于真实值。水平补角余弦值在 $N = 65$ 次时估计值约等于真实值。目标航向仰角在 $N = 70$ 次时估计值约等于真实值。

2) 测量次数为 $N = 100$, 其标准差 $\sigma_\epsilon = \sigma_\beta = \sigma \in (0.001, 0.01)$ rad, 将此区间等间隔地取分成 100 等分, 得到不同噪声标准差下所对应的二面角、水平补角正弦与余弦值, 仿真结果见图 6 - 图 9。

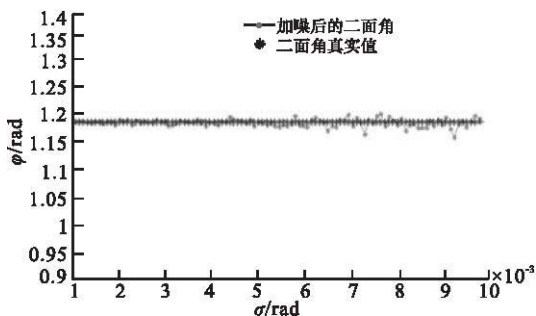


图6 二面角随噪声标准差变化

Fig.6 variation of dihedral angle with noise standard deviation

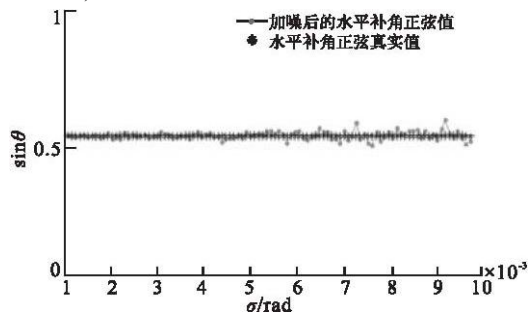


图7 水平补角正弦随噪声标准差变化

Fig.7 Variation of sine of horizontal supplementary angle with noise standard deviation

测量次数一定时,二面角、水平补角正弦、余弦及目标航向仰角估计值随噪声标准差的减小趋于真实值。噪声标准差为 0.003 rad 时,二面角估计值接近于真实值。噪声标准差为 0.002 8 rad 时,水平补角正弦估计值约等于真实值。噪声标准差为 0.004 1 rad 时,水平补角正弦估计值约等于真实值。噪声标准差为 0.002 1 rad 时,目标航向仰角估计值约等于真实值。

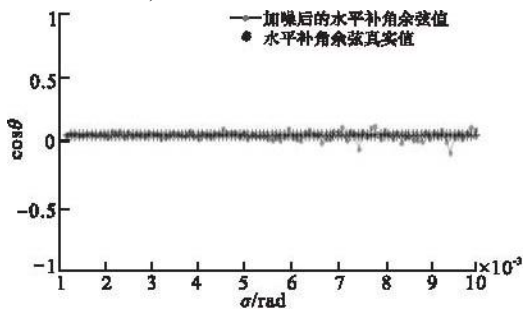


图8 水平补角余弦随噪声标准差变化

Fig.8 Variation of cosine of horizontal supplementary angle with noise standard deviation

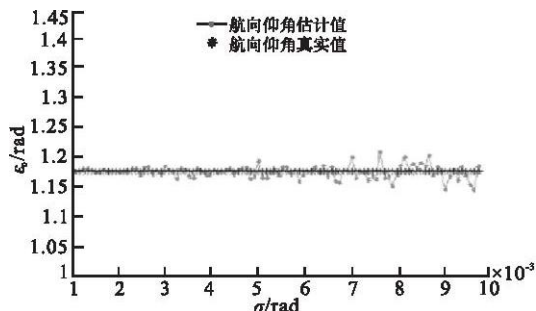


图9 目标航向仰角随噪声标准差变化

Fig.9 Variation of course elevation with noise standard deviation

3.2 目标仰角序列的估计

设测量次数 $N = 100$, $\sigma_\epsilon = \sigma_\beta = \sigma = 0.003$ rad, 测量时间设为 T 。

见图10-图11,仰角正、余弦的预测值都很好地接近于估计值,说明有仰角与方位角之间存在耦合关系。

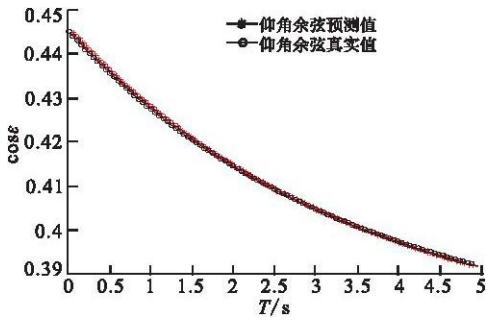


图10 仰角余弦随测量时间变化

Fig. 10 Variation of cosine of elevation with measurement time

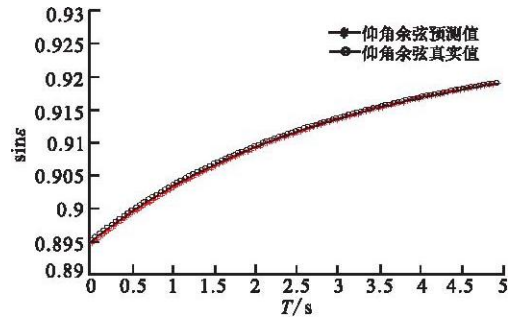


图11 仰角正弦随测量时间变化

Fig. 11 Variation of sine of elevation with measurement time

3.3 精度分析仿真

为了更好地验证方位与仰角的耦合关系,同时分析方位测量误差对仰角的精度影响,在此对式(12)进行仿真验证。假设测量到的方位角误差 $\delta_{b_i} \in (0.001, 0.01)$ rad,均值为零服从高斯分布,对此区间平均取100个样本点,然后对方位角进行100次观测,取误差平均值,观察方位误差对仰角正弦、余弦的影响。

从图12、图13可以看出,当方位测量噪声 $\delta_{b_i} \in (0.001, 0.01)$ rad时,仰角余弦、正弦的误差随方位的误差增大而增大,但都处于 10^{-4} 数量级,说明方位测量噪声对仰角估计值的影响很小,基本可以忽略。

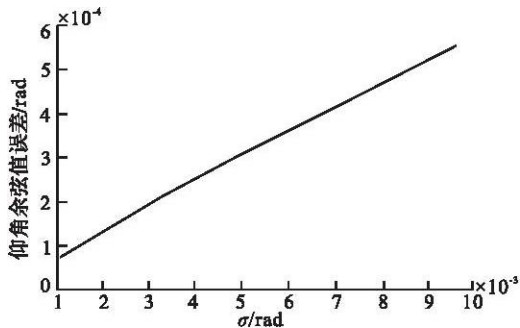


图12 方位噪声对仰角余弦误差的影响

Fig. 12 Impact of azimuth noise on cosine of elevation

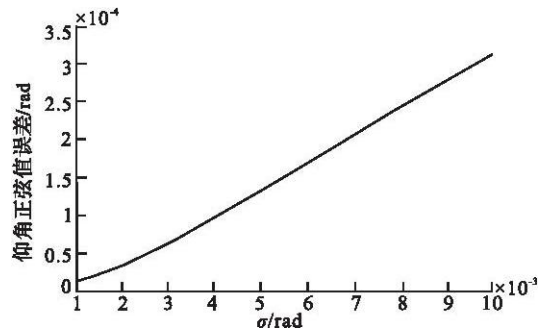


图13 方位噪声对仰角正弦误差的影响

Fig. 13 Impact of azimuth noise on sine of elevation

4 结束语

本文提出的一种基于单站目标飞行平面的二面角不变量和方位序列支援的仰角参数估计方法。在方位角序列关于目标参数航迹的支援下,利用目标飞行平面的几何关系,利用角度信息对被动单站传感器的目标参数滤波,仰角参数预测进行了研究,通过系统仿真实验,说明了所研究的方法是有效的。根据分坐标的处理思路,很容易对多个站分布式跟踪目标航迹进行航迹参数解算融合,这为工程实现奠定了很好的方向。该算法丰富了无源跟踪和分坐标处理理论,具有重要的理论和良好的军事工程意义。

参考文献:

- [1] Kutluyl Doganay. Bias compensation for the bearings - only pseudo linear target track estimator[J]. IEEE trans on signal processing, 2006, 54(1):59-67.
- [2] Bishop Adrian N, Anderson Brian D O, Baris Fidan, et al. Bearing - only localization using geometrically constrained optimization[J]. IEEE trans on aerospace and electronic system, 2009, 45(1):308-320.
- [3] Torrient D J. Statistical theory of passive location system[J]. IEEE trans on aerospace and electronic system, 1984, 20(2):

183 - 198.

- [4] Smith D, Singh S. Approaches to multisensor data fusion in target tracking: a survey[J]. IEEE transactions on knowledge and data engineering, 2006, 18(12): 1696 - 1710.
- [5] Wang Guohong, Bai Jing, He You, et al. Optimal deployment of multiple passive sensors in the sense of minimum concentration ellipse[J]. IET on radar sonar and navigation, 2009, 3(1): 8 - 17.
- [6] 张涛, 魏贤智, 庞春雨, 等. 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.
ZHANG Tao, WEI Xianzhi, PANG Chunyu, et al. Bearing - only tracking based on double band Information Fusion[J]. Laser and Infrared, 2009, 39(4): 454 - 458. (in Chinese)
- [7] 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.
LI Fudong. Status and development of airborneIRST systems[J]. Laser and infrared, 2008, 38(5): 409 - 412. (in Chinese)
- [8] 宋骊平, 姬红兵. 多站测角的最小二乘交互多模型跟踪算法[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2008, 35(2): 242 - 247.
SONG Liping, JI Hongbing. Least squares interacting multiple model algorithm for passive multi - sensor maneuvering target tracking[J]. Journal of xidian university: natural science edition, 2008, 35(2): 242 - 247. (in Chinese)
- [9] 盛琥, 杨景曙, 曾芳玲. 一种改进的机动目标跟踪方法[J]. 数据采集与处理, 2009, 24(1): 105 - 108.
SHENG Hu, YANG Jingshu, ZENG Fangling. Improved algorithm for maneuvering target tracking[J]. Journal of data acquisition & processing, 2009, 24(1): 105 - 108. (in Chinese)
- [10] 刘进忙, 姬红兵, 樊振华. 一种新的单站红外目标纯方位参数航迹滤波方法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(9): 2253 - 2257.
LIU Jinmang, JI Hongbing, FAN Zhenhua. A new parameterized track filtering method for single - station based bearing - only infrared target[J]. Journal of electronic & information technology, 2010, 32(9): 2253 - 2257. (in Chinese)

(编辑: 田新华)

The Method of Elevation Parameter Estimation Supported by Bearing - only Measurement of Target Flight Invariants

LIU Jin - mang, WU Zhong - lin, LI Yan - lei

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

Abstract: Aim at the problem of bearing - only target tracking of mono - station measurement, a new elevation parameter estimation algorithm is proposed which is based on invariable - information of mono - station flight plane and information supported by bearing - only measurement. According to the deduced dihedral angle relation, horizontal supplementary angle and dihedral angle can be easily solved and forecasting formula of target elevation series is given by utilizing target projection course angle calculated by bearing - only series. Finally, an analysis of impact of azimuth noise on elevation error is done. The use of this method preferably solves the problem of nonlinearity of mono - station measurement and the simulation experiment shows that the estimation of invariable parameter of target movement is good in effect and the elevation prediction series are of good accuracy and precision

Key words: invariable - information; bearing - only; least square estimation; horizontal supplementary angle