

文章编号:1001-9014(2005)05-0374-04

基于伪线性卡尔曼滤波的多站IRST系统跟踪技术

辛云宏^{1,2}, 杨万海²

(1. 陕西师范大学物理学与信息技术学院, 陕西 西安 710062;

2. 西安电子科技大学 电子工程学院, 陕西 西安 710071)

摘要:建立了目标的多站IRST(红外搜索与跟踪)系统的伪线性观测模型,基于该模型提出了匀速运动目标的伪线性卡尔曼滤波算法.算法利用伪线性方程组获得滤波器的初值,从而提高了滤波器的跟踪精度和速度.分别采用伪线性卡尔曼滤波器与推广卡尔曼滤波器对目标进行跟踪的仿真结果表明:当探测器数目为3、4时,在跟踪初始阶段,伪线性卡尔曼滤波器在跟踪的速度和精度方面均优于推广卡尔曼滤波器,在稳定阶段,两者的性能基本相仿.当探测器数目为6时,则不论是在跟踪的初始阶段,还是在稳定阶段,伪线性卡尔曼滤波器与推广卡尔曼滤波器的性能基本相同.

关键词:红外搜索与跟踪;多站;无源跟踪;伪线性卡尔曼滤波

中图分类号:TN951 **文献标识码:**A

PSEUDO-LINEAR KALMAN FILTER WITH APPLICATION TO THE PASSIVE TRACKING OF MULTI-STATIONS IRSTS

XIN Yun-Hong^{1,2}, YANG Wan-Hai²

(1. School of Physics and Information shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China;

2. School of Electronics and Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A PLKF (pseudo-linear Kalman filter) was presented for tracking a moving target by using multi-stations of IRST systems. The initial value of the filter was attained from the pseudo-linear equations, which improves the tracking accuracy and speed of the filter. Results of the simulation of tracking a moving target by PLKF and EKF (extended Kalman filter) illustrate: for 3 or 4 stations, the tracking accuracy of PLKF is more advantage than that of EKF at the beginning of the tracking; for 6 stations, the PLKF and the EKF have the same tracking accuracy.

Key words: IRSTS; multi-stations; passive tracking; pseudo-linear Kalman filter

引言

现代战争中,IRST系统是进行防御的一个重要手段.该系统是一个仅有角测量的定位跟踪系统,基于角测量的目标定位及跟踪方法有很多种^[1-7].其中文献[1~3]的方法属于推广卡尔曼滤波算法的改进形式,主要目的是为了消除滤波过程中的发散现象.文献[4~6]将伪线性估计器应用于推广卡尔曼滤波器,进行仅有角测量的无源跟踪,尽管该方法是一个有偏估计,但由于将伪线性估计器的估值作为卡尔曼滤波器的初值,从而克服了滤波器的发散现象.S. koteswara^[7]提出了基于伪线性估计器的递推处理方法,该方法没有采用卡尔曼滤波器,而是用线性代数

的方法建立了一组递推公式,其性能与基于伪线性估计的推广卡尔曼滤波相当,但不需要预置初值,也不会引起发散.本文在上述思想启发下,将伪线性估计方法应用于多站IRST系统定位与跟踪,建立了多站IRST系统的伪线性观测模型,并对其作了进一步的推广,用伪线性卡尔曼滤波代替了上述文献中的推广卡尔曼滤波.这种取代产生了一定的效果,相同条件下的计算机仿真结果表明:当探测器数目较少时,在跟踪初始阶段,伪线性卡尔曼滤波器在跟踪的速度和精度方面均优于传统的推广卡尔曼滤波器.

1 伪线性观测模型

1.1 单站伪线性观测模型

收稿日期:2005-03-20,修回日期:2005-09-18

基金项目:国防预研基金资助项目(41101050108)

作者简介:辛云宏(1967-),男,陕西蒲城县人,西安电子科技大学博士生,主要研究方向为:多传感器信息融合,红外无源定位及多目标跟踪等.

Received date: 2005-03-20, revised date: 2005-09-18

设 IRST 系统共有 n 部红外探测器, $S_i(x_i, y_i, z_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 为第 i 部红外探测器的站址, $x_T(x, y, z)$ 为目标的位置, (α_i, β_i) 分别是第 i 部红外探测器关于目标的方位角和俯仰角. 对于方位角 α_i , k 时刻不含噪声的真实值表达式为:

$$\alpha_i(k) = \arctg \frac{y(k) - y_i}{x(k) - x_i} \quad (1)$$

含噪声的观测值 $\alpha_{im}(k)$ 表示为:

$$\begin{aligned} \alpha_{im}(k) &= \alpha_i(k) + \eta_i(k) \\ &= \arctg \frac{y(k) - y_i}{x(k) - x_i} + \eta_i(k) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $\eta_i(k)$ 为均值为零, 方差为 $\sigma_{\eta_i}^2$ 的高斯白噪声.

由式(1)、(2)可得:

$$\begin{aligned} &(x(k) - x_i) \sin \alpha_{im}(k) - (y(k) - y_i) \cos \alpha_{im}(k) \\ &= [(x(k) - x_i) \sin \alpha_i(k) - (y(k) - y_i) \cos \alpha_i(k)] \cos \eta_i(k) \\ &+ [(x(k) - x_i) \cos \alpha_i(k) + (y(k) - y_i) \sin \alpha_i(k)] \sin \eta_i(k) \\ &= r_{hi}(k) \sin \eta_i(k) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{其中: } r_{hi}(k) = \sqrt{(x(k) - x_i)^2 + (y(k) - y_i)^2} \quad (4)$$

上面的化简利用了以下两个公式:

$$(x(k) - x_i) \sin \alpha_i(k) - (y(k) - y_i) \cos \alpha_i(k) = 0 \quad (5)$$

$$(x(k) - x_i) \cos \alpha_i(k) - (y(k) - y_i) \sin \alpha_i(k) = r_{hi}(k) \quad (6)$$

进而整理式(3)可得:

$$z_{1i}(k) = H_{1i}(\alpha_{im}(k))X(k) + \varepsilon_{1i}(k) \quad (7)$$

式中:

$$z_{1i}(k) = x_i \sin \alpha_{im}(k) - y_i \cos \alpha_{im}(k) \quad (8)$$

$$X(k) = [x(k), y(k), z(k), v_x(k), v_y(k), v_z(k)]^T \quad (9)$$

$$H_{1i}(\alpha_{im}(k)) = [\sin \alpha_{im}(k), -\cos \alpha_{im}(k), 0, 0, 0, 0] \quad (10)$$

$$\varepsilon_{1i}(k) = r_{hi}(k) \sin \eta_i(k) \quad (11)$$

式(7)等号右侧 $\varepsilon_{1i}(k)$ 前, 从严格意义上讲应为负号“-”, 但对于均值为零的随机信号而言, 其特性相同, 为了讨论方便忽略了负号. 下面的论述也采用这种处理方法. $\varepsilon_{1i}(k)$ 的方差 $\sigma_{\varepsilon_{1i}}^2(k)$ 表示为:

$$\begin{aligned} \sigma_{\varepsilon_{1i}}^2(k) &= E[r_{hi}^2(k) \sin^2 \eta_i(k)] \\ &= r_{hi}^2(k) [1 - \exp(-2\sigma_{\eta_i}^2)]/2 \end{aligned} \quad (12)$$

若观测噪声不大(通常红外探测器的观测噪声很小), 则可近似表示为:

$$\varepsilon_{1i}(k) \approx r_{hi}(k) \eta_i(k) \quad (13)$$

$$\sigma_{\varepsilon_{1i}}^2(k) \approx r_{hi}^2(k) \sigma_{\eta_i}^2 \quad (14)$$

尽管式(7)表面上是状态向量的线性表达式,

但由于 $H_{1i}(\alpha_{im}(k))$ 中的测量量是含有噪声的随机信号, 因此从严格的意义上讲, $z_{1i}(k)$ 与 $X(k)$ 并不是线性关系, 所以, 称式(7)为伪线性观测方程.

对于俯仰角 β_i , k 时刻不含噪声的真实值表达式为:

$$\beta_i(k) = \arctg \frac{z(k) - z_i}{r_{hi}} \quad (15)$$

含噪声的观测值 $\beta_{im}(k)$ 表示为:

$$\begin{aligned} \beta_{im}(k) &= \beta_i(k) + v_i(k) \\ &= \arctg \frac{z(k) - z_i}{r_{hi}} + v_i(k) \end{aligned} \quad (16)$$

式(16)中, $v_i(k)$ 为均值为零, 方差为 $\sigma_{v_i}^2$ 的高斯白噪声.

令:

$$r_i(k) = \sqrt{(x(k) - x_i)^2 + (y(k) - y_i)^2 + (z(k) - z_i)^2} \quad (17)$$

利用公式:

$$\begin{aligned} &(x - x_i) \cos \alpha_i(k) \sin \beta_i(k) \\ &+ (y - y_i) \sin \alpha_i(k) \sin \beta_i(k) \\ &- (z - z_i) \cos \beta_i(k) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} &(x - x_i) \cos \alpha_i(k) \cos \beta_i(k) \\ &+ (y - y_i) \sin \alpha_i(k) \cos \beta_i(k) \\ &+ (z - z_i) \sin \beta_i(k) \\ &= r_i(k) \end{aligned} \quad (19)$$

由式(15)、(16)可得:

$$z_{2i}(k) = H_{2i}(\beta_{im}(k))X(k) + \varepsilon_{2i}(k) \quad (20)$$

式中:

$$\begin{aligned} z_{2i}(k) &= x_i \cos \alpha_{im}(k) \sin \beta_{im}(k) \\ &+ y_i \sin \alpha_{im}(k) \sin \beta_{im}(k) \\ &- z_i \cos \beta_{im}(k) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} H_{2i}(\beta_{im}(k)) &= [\cos \alpha_{im} \sin \beta_{im}(k), \\ &\sin \alpha_{im}(k) \sin \beta_{im}(k), \\ &\cos \beta_{im}(k), 0, 0, 0, 0] \end{aligned} \quad (22)$$

$$\varepsilon_{2i}(k) = r_i(k) v_i(k) \quad (23)$$

由式(23)知, $\varepsilon_{2i}(k)$ 为均值为零, $r_i^2(k) \sigma_{v_i}^2$ 方差为 $r_i^2(k) \sigma_{v_i}^2$ 的高斯白噪声.

于是, 第 i 探测器的伪观测方程表示为:

$$z_i(k) = H_i(k)X(k) + \theta_i(k) \quad (24)$$

其中: $z_i(k) = [z_{1i}(k) \ z_{2i}(k)]^T$, (25)

$$H_i(k) = [H_{1i}(\alpha_{im}(k))^T \ H_{2i}(\beta_{im}(k))^T]^T \quad (26)$$

$$\theta_i(k) = [\varepsilon_{1i}(k) \ \varepsilon_{2i}(k)]^T \quad (27)$$

1.2 多站伪线性观测模型

根据单站伪线性观测模型,可以很容易的写出多站的模型,对于具有 n 个观测站的 IRST 系统,其 k 时刻的伪线性观测模型即为:

$$Z(k) = H(k)X(k) + \theta(k) \quad (28)$$

式中:

$$Z(k) = [z_1(k)^T \ z_2(k)^T \ \dots \ z_n(k)^T]^T, \quad (29)$$

$$H(k) = [H_1(k)^T \ H_2(k)^T \ \dots \ H_n(k)^T]^T, \quad (30)$$

$$\theta(k) = [\theta_1(k)^T \ \theta_2(k)^T \ \dots \ \theta_n(k)^T]^T. \quad (31)$$

$\theta(k)$ 为噪声向量,假设噪声 $\eta_i(k)$ ($i = 1, 2, \dots, n$), $v_i(k)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 任意两个之间互不相关,则 $\theta(k)$ 的协方差矩阵 $R(k)$ 为:

$$R(k) = E[\theta(k)\theta(k)^T] \\ = \text{diag}[r_{h1}^2(k)\sigma_{\eta_1}^2, r_{v1}^2(k)\sigma_{v1}^2, \\ \dots, r_{hn}^2(k)\sigma_{\eta_n}^2, r_{vn}^2(k)\sigma_{vn}^2] \quad (32)$$

2 伪线性卡尔曼滤波器

2.1 伪线性卡尔曼递推公式

设目标作匀速直线运动,红外探测器的采样周期为 T ,则系统的状态方程为:

$$X(k) = \Phi X(k-1) + \Gamma w(k) \quad (33)$$

式中:

$$\Phi = \begin{bmatrix} I_3 & TI_3 \\ O & I_3 \end{bmatrix} \quad \Gamma = \begin{bmatrix} \frac{T^2}{2}I_3 \\ TI_3 \end{bmatrix} \\ u = [w_x, w_y, w_z]^T \quad (34)$$

w_x, w_y, w_z 为互不相关的均值为零,方差分别为 $\sigma_{w_x}^2, \sigma_{w_y}^2, \sigma_{w_z}^2$ 的高斯白噪声, W 的协方差矩阵为 $Q(k)$.

系统的伪线性观测模型由式(28)~(32)给出.于是,具有 n 个观测站的 IRST 系统的伪线性卡尔曼滤波算法表示为:

$$\hat{X}_{k|k-1} = \Phi \hat{X}_{k-1|k-1} \quad (35)$$

$$P_{k|k-1} = \Phi P_{k-1|k-1} \Phi^T + \Gamma Q_k \Gamma^T \quad (36)$$

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \quad (37)$$

$$\hat{X}_{k|k} = \hat{X}_{k|k-1} + K_k (Z_k - H_k \hat{X}_{k|k-1}) \quad (38)$$

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1} \quad (39)$$

式(35)~(39)便构成了伪线性卡尔曼递推公式,由此可得到目标的位置估计以及速度估计.

2.2 滤波初值的确定

对于卡尔曼滤波器来说,初值的确定是一个很关键的环节,它关系到滤波器是否收敛的问题.

令: $X_p(k) = [x(k), y(k), z(k)]$, $H_p(k)$ 为由 $H(k)$ 前 3 列组成的矩阵,并忽略噪声项.此时,伪线

性观测方程表示为:

$$Z(k) = H_p(k)X_p(k) \quad (40)$$

由此可得位置值为:

$$X_p(k) = [H_p^T(k)H_p(k)]^{-1} H_p^T(k)Z(k) \quad (41)$$

于是,令 $X(0) = [X_p(0)^T, 0, 0, 0]^T$, $P(0) = I$ 便可启动卡尔曼滤波的递推过程.

3 仿真与分析

设目标从点(5km, -15km, 1km)沿直线匀速飞行到点(5km, 15km, 1km),飞行速度为(0, 300m/s, 0).为了分析方便,在此令状态噪声 $W(k)$ 为零,角度测量噪声的均方差均为 5×10^{-4} rad,探测器的采样周期为 0.1s.

下面列出具有 3, 4, 6 个探测器,并且探测器均匀分布在半径为 3km 的圆周上的仿真结果.

3.1 3 站仿真

此时,3 个红外探测器的站址分别设置为: $S_1(3000\text{m}, 0, 0)$, $S_2(-1500\text{m}, 2598.1\text{m}, 0)$, $S_3(-1500\text{m}, 2598.1\text{m}, 0)$,仿真结果如图 1 所示.

3.2 4 站仿真

4 个红外探测器的站址分别设置为: $S_1(3000\text{m}, 0, 0)$, $S_2(0, 3000\text{m}, 0)$, $S_3(-3000\text{m}, 0, 0)$, $S_4(0, -3000\text{m}, 0)$,仿真结果如图 2 所示.

3.3 6 站仿真

6 个红外探测器的站址分别设置为: S_1

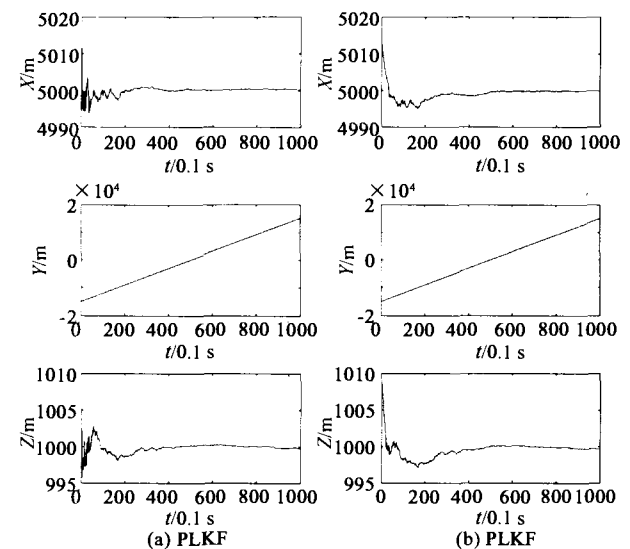


图 1 3 站跟踪仿真结果
Fig. 1 Results of tracking for three stations

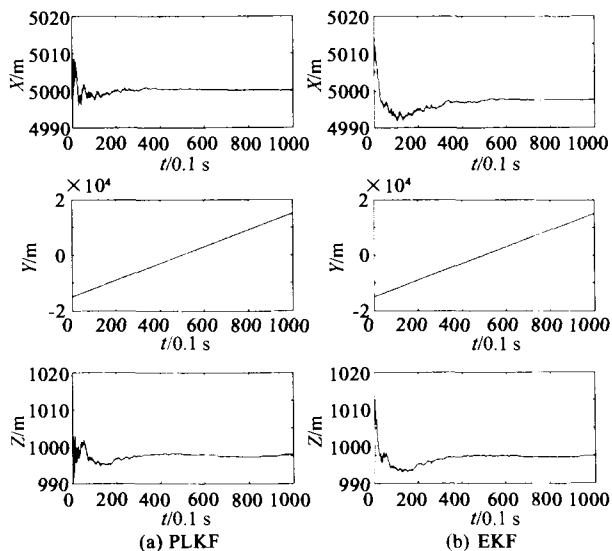


图 2 4 站跟踪仿真结果

Fig. 2 Results of tracking for four stations

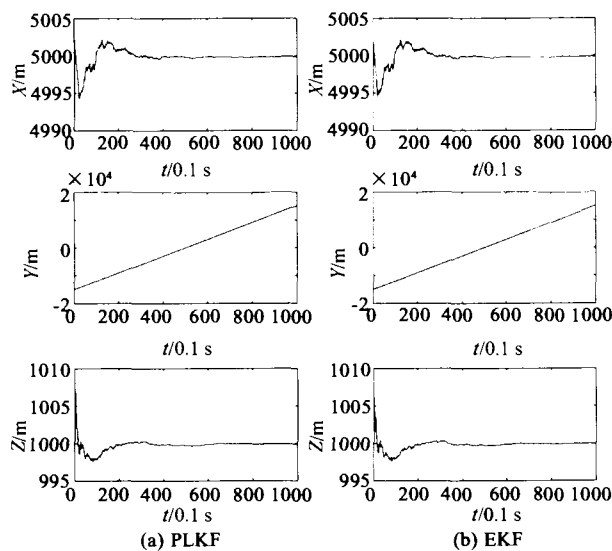


图 3 6 站跟踪仿真结果

Fig. 3 Results of tracking for six stations

(3000m, 0, 0), S2 (1500m, 2598.1m, 0), S3 (-1500m, 2598.1m, 0), S4 (-3000m, 0, 0), S5 (-1500m, -2598.1m, 0), S6 (1500m, -2598.1m, 0) 仿真结果如图 3 所示。

3.4 仿真结果分析

从图 1~3 的仿真结果中可以看出:当探测器数目为 3、4 时,在跟踪初始阶段,伪线性卡尔曼滤波在跟踪的速度和精度方面均优于推广卡尔曼滤波,在稳定阶段,两者的性能基本相仿。随着探测器数目的

增加,两者的性能逐渐接近,当探测器数目为 6 时,两者的性能已基本相同。

考虑到观察站的不同布局对跟踪精度有一定的影响,作者对一些不同布局的跟踪性能也进行了仿真(限于篇幅,文中没有给出仿真结果曲线),结果表明:尽管不同布局的跟踪精度有一定的差别,但在每种布局中,以上结论仍然成立。

4 结束语

本文将 Aidala 等人提出的伪线性估计方法应用于多站 IRST 系统定位与跟踪,建立了多站 IRST 系统的伪线性观测模型,并对其作了进一步的推广,用伪线性卡尔曼滤波器代替了上述文献中的推广卡尔曼滤波器。计算机仿真结果表明,这种取代产生了一定的效果,当探测器数目为 3、4 时,在跟踪初始阶段,伪线性卡尔曼滤波器在精度和速度两方面均优于推广卡尔曼滤波器。因此,本文提出的多站 IRST 系统的伪线性卡尔曼滤波方法是一种精度较高的定位跟踪方法,有很好的应用前景。其原理对其它类型的非线性无源定位技术也有重要的借鉴作用。

REFERENCES

- [1] 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
- [2] Aidala V J, Hammel S E. Utilization of modified polar coordinates for bearings only tracking [J]. *IEEE Trans Autom Control*, 1983, 28(3): 283—294
- [3] Grossman W. Bearing only tracking: A hybrid coordinate system approach [J]. *J Guid Control Dyn.* 17(3), 1994: 451—457
- [4] Lindgren A G, Gong K F. Position and velocity estimation via bearing observations [J]. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst.*, 1978, 14(5): 564—577
- [5] Aidala V J. Kalman filter behaviour in bearings only tracking applications. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst.*, 1979, 15(1): 29—39
- [6] Aidala V J, Nardone S C. Biased estimation properties of the pseudo linear tracking filter [J]. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst.*, 1982, 18(4): 432—441
- [7] S. Koteswara Rao. Pseudo-linear estimator for bearings-only passive target tracking [J]. *IEE Proc Radar Sonar Navig.*, 2001, 48(1): 16—22
- [8] WAN Qun, PENG Ying-Ning, YANG Wan-Lin. Infrared emitter location method using pseudo-range measurements [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (万群, 彭应宁, 杨万麟. 红外辐射源伪距测量定位方法. *红外与毫米波学报*), 2003, 22(3): 234—236.