

双基地系统收站自主的自适应跟踪算法*

何黎星** 周一宇 孙仲康

(电子技术系)

摘 要 本文介绍了双基地系统收站自主的定位原理及跟踪算法 WMEKF (Weighted Modified Extended Kalman Filter), 提出了一种对机动目标的自适应跟踪算法 AWMEKF (Adaptive WMEKF), 并对典型的机动目标航迹进行了计算机仿真。

关键词 雷达, 导航, 被动定位, 双基地, 机动目标跟踪

分类号 TN959.2

在现代电子战环境中, 为了增强探测系统的隐蔽性, 文献 [1] ~ [3] 提出了一种单站无源被动定位与跟踪技术 Single Observer Passive Location And Tracking (SOPLAT), 并把 SOPLAT 技术推广应用到双基地系统之中^{[4][5]}。采用 SOPLAT 技术的双基地系统中, 发射站只起照射作用, 收发站之间无需同步工作要求。在已知发射电波重频以及发射站位置的条件下, 被动接收站利用 DOA (Direction of Arrival) 和 TOA (Time of Arrival) 测量序列, 采用 WMEKF 算法就能对匀速运动目标进行定位与跟踪。但对于作机动飞行的目标, WMEKF 算法容易发散, 以致于不能应用。据此, 本文根据双基地系统中收站自主定位的特点, 在 WMEKF 算法的基础上, 研究了一种机动检测后实现自适应调整带宽的跟踪算法 AWMEKF。

1 双基地系统收站自主定位原理和 WMEKF 算法

1.1 定位原理

如图 1 所示, 接收站在第 k 时刻获得的测量数据为:

$$\varphi_k^m = \operatorname{tg} \frac{y_k - y_r}{x_k - x_r} + \delta_{\varphi, k} \quad (1)$$

$$\epsilon_k^m = \operatorname{tg}^{-1} \frac{z_k - z_r}{\sqrt{(x_k - x_r)^2 + (y_k - y_r)^2}} + \delta_{\epsilon, k} \quad (2)$$

$$(\Delta \text{TOA})_{k, k-1}^m = T_s + [(r_{t, k} + r_{R, k}) - (r_{t, k-1} + r_{R, k})] / c + \delta_{\Delta, k, k-1} \quad (3)$$

式中上标 m 表示带有测量噪声的实测值; $\delta_{\varphi, k}$ 、 $\delta_{\epsilon, k}$ 、 $\delta_{\Delta, k, k-1}$ 分别表示方位角、俯仰角及时间差的测量噪声, 对应的标准差分别为 σ_{φ} 、 σ_{ϵ} 和 σ_{Δ} ; c 为光速; T_s 为测量采样间隔。

当发射脉冲重频恒定, 目标作匀速运动时, 由 (1) (2) (3) 组成的多次测量方程组, 经过非线性

* 1992 年 2 月 27 日收稿

** 博士研究生

递推处理, 可得到目标的位置和运动速度。

1.2 WMEKF 算法

1) 目标运动模型: $x_{k+1} = \Phi x_k + \omega_k$ (4)

其中扰动噪声 $\omega_k \sim N(0, Q_k)$

2) 观测模型: 第 k 次滤波利用第 $k, k-N_k, k-N_k-I_k, k-N_k-I_k-J_k$ 四点所测得的数据 (N_k, I_k, J_k 为大于 1 的正整数), 即

$$z_i^k = h(x_k) + v_k \quad (5)$$

其中 $z_i^k = [z_{i1}^k, z_{i2}^k, z_{i3}^k]^T$

$$e_{i1}^k, e_{i2}^k, e_{i3}^k, e_{i1}^{k-N_k}, e_{i2}^{k-N_k}, e_{i3}^{k-N_k}, e_{i1}^{k-N_k-I_k}, e_{i2}^{k-N_k-I_k}, e_{i3}^{k-N_k-I_k}, e_{i1}^{k-N_k-I_k-J_k}, e_{i2}^{k-N_k-I_k-J_k}, e_{i3}^{k-N_k-I_k-J_k}$$

$$\Delta s_{i1, k-N_k}^k, \Delta s_{i2, k-N_k}^k, \Delta s_{i3, k-N_k}^k, \Delta s_{i1, k-N_k-I_k}^k, \Delta s_{i2, k-N_k-I_k}^k, \Delta s_{i3, k-N_k-I_k}^k, \Delta s_{i1, k-N_k-I_k-J_k}^k, \Delta s_{i2, k-N_k-I_k-J_k}^k, \Delta s_{i3, k-N_k-I_k-J_k}^k$$

$$\Delta s_{i1, k-N_k-I_k, k-N_k-I_k-J_k}^k \quad (6)$$

测量噪声

$$v_k \sim N(0, R_k)$$

3) WMEKF 算法: 如果非线性函数 $h(x_k)$ 同时满足如下两个条件:

$$(1) h(x_k) - h(\hat{x}_{k,k-1}) = g_k(z_i^k, \hat{x}_{k,k-1})(x_k - \hat{x}_{k,k-1}) \quad (7)$$

其中 $z_i^k = h_k(x_k)$ 表示真实测量值。

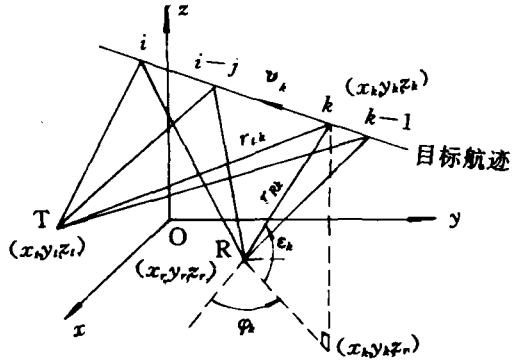
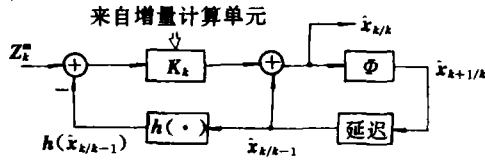
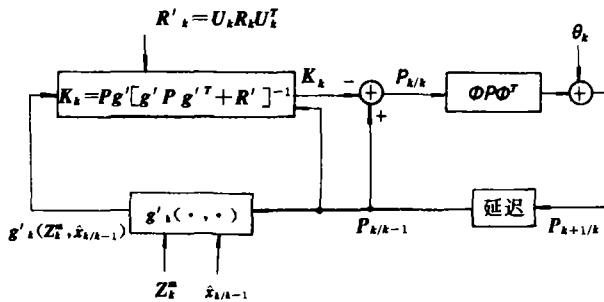


图 1 双基地系统一目标的位置关系



(a) 状态估计与预测



(b) 协方差及增益计算

图 2 WMEKF 算法结构简图

$$(2) \mathbf{h}(\mathbf{x}_k) - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}) = \mathbf{g}'_k(\mathbf{z}_k^m, \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1})(\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}) + (\mathbf{U}_k - \mathbf{I}_k)\mathbf{v}_k \quad (8)$$

其中, \mathbf{I}_k 为与 \mathbf{z}_k^m 同维的单位矢量;

$$\mathbf{U}_k = \text{diag} \left[\frac{1}{1 - \mu_{k1}}, \dots, \frac{1}{1 - \mu_{kN}} \right], |\mu_{ki}| < 1 \quad (9)$$

$$\mathbf{g}'_k(\mathbf{z}_k^m, \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}) = \mathbf{U}_k \mathbf{g}_k(\mathbf{z}_k^m, \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}) \quad (10)$$

则可以推导出 WMEKF 算法^{[4][5]}, 其算法结构简图如图 2 所示。

2 自适应跟踪算法 AWMEKF

实际跟踪系统需要对观测噪声进行有效的过滤, 同时能够很迅速地跟踪某种形式的机动。对于所讨论的双基地系统, 由于接收站是采用 SOPLAT 技术独立地进行即时定位与跟踪, 所利用的数据是过去的测量序列, 即测量模型不仅与现在的目标状态有关, 而且与其过去的一段历史也有关。因此, 如果要对目标运动模型进行修正, 势必造成观测模型异常复杂, 运算量随之增大, 有时甚至难以实现。基于上述原因, 本文提出了一种带机动检测器的自适应跟踪算法 AWMEKF, 使滤波器的参数/结构适应真实环境。

由式(8)得残差矢量及其协方差矩阵分别为:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_k &= \mathbf{z}_k^m - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}) \\ &= \mathbf{g}'_k(\mathbf{z}_k^m, \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1})(\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}) + (\mathbf{U}_k - \mathbf{I}_k)\mathbf{v}_k \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_k &= \mathbf{g}'_k(\mathbf{z}_k^m, \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}) \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{g}_k^T(\mathbf{z}_k^m, \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}) + \mathbf{R}_k \\ &\triangleq \Gamma_k + \mathbf{R}_k \end{aligned} \quad (12)$$

2.1 机动检测算法

将残差的各分量 $\nu_k(i)$ 进行归一化, 并与门限 c_i 进行比较检测。

$$|\nu_k(i) / \mathbf{J}_k^{\frac{1}{2}}(i, i)| \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} c_i \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (13)$$

其中: H_1 表示有机动, H_0 表示没有机动; c_i 为一正常数, 可依据期望落入区间 $(\pm c_i \sqrt{\mathbf{J}_k(i, i)})$ 的概率来估算出来。

2.2 对增益 K_k 的自适应调整^[6]

当检测到第 i 个分量发生机动时, 则修正其方差, 使之满足

$$\nu_k^2(i) \{a_k(i) \Gamma_k(i, i) + \mathbf{R}_k(i, i)\} = c_i^2 \quad (14)$$

其中 $a_k(i) > 1$, 且可求得

$$a_k(i) = \frac{[\nu_k(i) / c_i]^2 - \mathbf{R}_k(i, i)}{\Gamma_k(i, i)} \quad (15)$$

从式(15)可以看出, K_k 的自适应调整是通过增大预测误差的协方差, 即将 $\mathbf{P}_{k/k-1}$ 修改为 $a_k(i) \mathbf{P}_{k/k-1}$, 使跟踪滤波器带宽变宽, 从而使得 $\nu_k(i)$ 存在于可接受区域的边界上。

当机动幅度太大时, 除协方差校正外, 要引入偏置校正项 $\mathbf{b}_k(i)$ 。即若 $a_k(i) > \alpha$ (规定的值), 则有

$$\frac{[\nu_k(i) - \mathbf{b}_k(i)]^2}{a \Gamma_k(i, i) + \mathbf{R}_k(i, i)} = c_i^2 \quad (16)$$

即

$$\mathbf{b}_k(i) = \nu_k(i) - c_i \text{sign}[\nu_k(i)] \sqrt{a \Gamma_k(i, i) + \mathbf{R}_k(i, i)} \quad (17)$$

综上所述, AWMEKF 算法有如下方程式, 对应的算法结构简图如图 3 所示。

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}_{k-1, k} = \Phi \hat{\mathbf{x}}_{k, k} \\ \hat{\mathbf{x}}_{k, k} = \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} + \mathbf{K}_k [\mathbf{z}_k^m - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}) - \mathbf{b}_k] \\ \mathbf{P}_{k-1, k} = \Phi \mathbf{P}_{k/k} \Phi^T + \mathbf{Q}_k \\ \mathbf{P}_{k, k} = \alpha_{k, N} [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{g}_k(\mathbf{z}_k^m, \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1})] \mathbf{P}_{k/k-1} \\ \mathbf{K}_k = \alpha_{k, N} \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{g}_k^T(\mathbf{z}_k^m, \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}) [\mathbf{g}_k(\cdot, \cdot) \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{g}_k^T(\cdot, \cdot) + \mathbf{R}_k]^{-1} \end{cases} \quad (18)$$

参数 $b_k(i)$ ($i=1, 2, \dots, N$) 和 $a_{k,N}$ 的选取方法如下: 若没有检测到机动时, $a_{k,N}=1, b_k(i)=0, (i=1, 2, \dots, N)$; 若 v_k 中有一个或多个分量出现机动时, 且所有 $a_k(i) < \alpha$ 时, 则

$$\begin{cases} a_{k,N} = \max\{a_k(1), \dots, a_k(N)\} \\ b_k(i) = 0 \quad (i=1, 2, \dots, N) \end{cases}$$

若 v_k 中有一个或多个分量出现

机动, 且至少有一个 $a_k(i) > \alpha$ 时, 则取 $a_{k,N} = \alpha$; 当 $a_k(i) < \alpha$ 时, $b_k(i) = 0$; 当 $a_k(i) > \alpha$ 时, $b_k(i)$ 由式 (17) 决定。

3 计算机模拟及结果

为了评估 AWEKF 算法的跟踪性能, 模拟了两条典型的机动目标航迹, 分别由两条直线段及其间插入一向心加速度段组成, 如图 4(a)、(b) 所示, 对应的跟踪滤波误差如图 5 (a)、(b) 所示。由图中的误差曲线可看出:

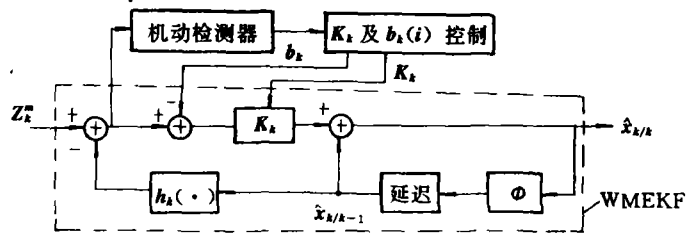
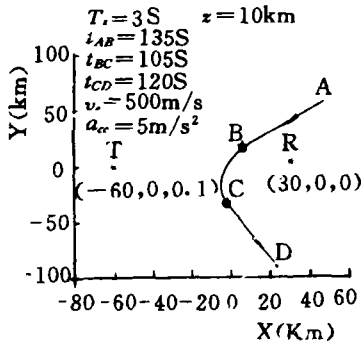
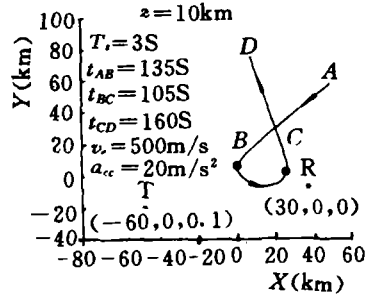


图 3 自适应跟踪算法 AWMEKF 结构简图

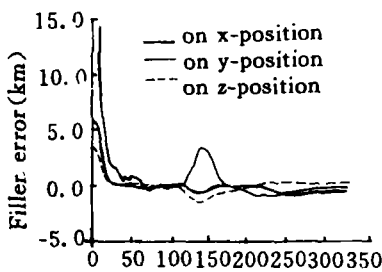


(a) 航迹 1 ($a_{cc}=5\text{m/s}^2$)

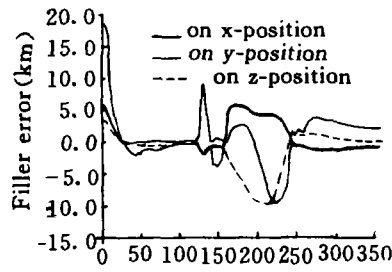


(b) 航迹 2 ($a_{cc}=20\text{m/s}^2$)

图 4 机动目标航迹



(a) 航迹 1



(b) 航迹 2

$$\sigma_x = \sigma_y = 2\text{mrad}, \sigma_\Delta = 20\text{ns}, \mu_{h_i} = 0.7(e^{0.006k} - 1), (\mu_{h_i})_{\max} = 0.98$$

图 5 跟踪误差

(1)AWMEKF 算法能有效地跟踪机动目标。

(2)对低向心加速度航线,自适应调整容易。其中 y, z 方向上的跟踪误差较小,而在机动段 x 方向的跟踪误差较大。这是由于双基地系统的基线与 x 轴向平行, ΔTOA 测量变化较小,因而加速噪声对它的影响较大。

(3)在高向心加速度航线,机动段的跟踪误差在各个方向都比较大,说明加速度对各个测量分量都有较大影响,自适应调节缓慢。

4 结束语

本文针对双基地系统接收站自主定位跟踪的特点,从 WMEKF 算法出发,提出了一种自适应跟踪算法 AWMEKF。计算机模拟结果表明,该算法能有效地跟踪作机动转弯、直线加速度等飞行的目标,进一步开阔了 SOPLAT 技术在双基地系统中的应用前景。AWMEKF 算法的优点在于结构简单,实时性好,便于实现。为了减小机动段存在的较大偏差,有必要采用其它修正方法。有关这些问题有待深入研究。

参 考 文 献

- 1 孙仲康,周晓丽.利用 DOA、TOA 测量的单站被动定位与跟踪. CIE Radar '87
- 2 张铭,孙仲康.利用不机动单站 DOA、TOA 测量实现被动定位与跟踪. 航空学报,1989,10(5)
- 3 周一宇,孙仲康.利用 DOA 和 TOA 测量对三维运动辐射源的定位与跟踪. 电子学报,1991,(2)
- 4 刘荣.增强单站独立性的非机动双站定位及算法研究. 国防科技大学硕士论文,1990
- 5 He Lixing, Sun Zhongkang. Location and Tracking Technique in a Multistatic System Established by Multiple Bistatic Systems, Proc. NAECON'91:437~441
- 6 Farina A, Studer F. A. Radar Data Processing, Research Studies Press LTD, 1985, 1

An Adaptive Tracking Algorithm for Bistatic Radar Systems with an Independent Receiver

He Lixing Zhou Yiyu Sun Zhongkang
(Department of Electronic Technology)

Abstract

This paper introduces the location principle and a tracking algorithm WMEKF (Weighted Modified Extended Kalman Filter) for bistatic radar systems with an independent receiver. An adaptive tracking algorithm AWMEKF (Adaptive WMEKF) of maneuvering targets is proposed in the paper. Its tracking performance for typical maneuvering target paths is evaluated by means of computer simulation.

Key words radar, navigation, passive location, bistatic systems, maneuvering target tracking