

# 一种基于Kalman滤波的实时校准算法

王波, 王灿林, 李冬

(海军航空工程学院 山东 烟台 264001)

【摘要】雷达组网融合多雷达的观测数据,可监视大范围的空中态势。但是首先要解决各雷达的系统偏差校准问题,雷达组网才能发挥效能。传统的雷达组网校准技术多基于固定雷达站给出,没有考虑姿态角及其偏差对校准的影响,因此不适合机动雷达偏差校准。该文针对这一问题进行了研究,通过泰勒级数展开推导了系统偏差和量测之间近似的线性关系,在此基础上提出了一种基于Kalman滤波的实时机动雷达系统偏差校准算法。仿真表明,本文提出的算法能有效地对机载雷达的系统偏差和姿态角偏差进行实时估计。

关键词 融合; Kalman滤波; 雷达组网; 实时校准  
中图分类号 TP274 文献标识码 A

## A Real-Time Alignment Algorithm Based on Kalman filter

WANG Bo, WANG Can-lin, LI Dong

(Naval Aeronautical Engineering Institute Yantai Shandong 264001)

**Abstract** The radar networking can fuse observational datum of radars. But alignment problem is a prerequisite process for data fusion of the radar networking. Classical registration algorithms were always proposed for fixed radars, which can not solve the alignment problem of the mobile radars because of ignoring attitude and attitude errors. This problem is studied in this paper. Using Taylor series, the linear model between the measurements and the errors are derived, then a new real-time alignment algorithm for mobile radars is proposed based on Kalman filter. Finally, the effectiveness of this algorithm is conformed by simulation.

**Key words** fusion; Kalman filter; radar networking; real-time alignment

雷达组网可以将多部独立工作并且具有某些辅助功能的雷达的观测数据融合起来,相对于单部雷达具有更大的覆盖范围、更强的电子对抗及反隐身能力<sup>[1-4]</sup>。但是为了获得一个可靠的全局监视态势,单雷达的数据必须转换到同一公共坐标系中,才能进行处理。由于单部雷达本身的系统偏差,直接进行坐标转换的融合效果并没有多大改善,因此必需发展雷达组网系统的校准技术<sup>[5-7]</sup>。

根据雷达站址的类型可以将系统偏差校准技术分为固定雷达组网校准和机动雷达组网校准两类<sup>[8]</sup>。固定雷达组网校准一般只考虑方位角偏差、俯仰角偏差和测距偏差;机动雷达组网系统偏差校准还要考虑运动平台的姿态角偏差,因此机动雷达组网系统偏差校准的难度更大<sup>[9]</sup>。

在实际的工程背景中,机动雷达组网误差配准技术的难点在于姿态角偏差的存在使系统偏差的估计更加困难。Helmick<sup>[5]</sup>考虑了姿态角偏差,提出了一

种机动雷达组网误差配准的方法,该算法假设两部雷达之间的距离非常近,位于不同平台的两部雷达很难满足这一假设。本文以两部分别位于不同飞行平台上的机载雷达为例,研究了一般意义上的机动雷达误差校准问题。通过两部雷达对同一目标量测的几何关系,构造了量测与系统偏差、姿态角偏差之间的线性关系,提出了一种基于Kalman滤波的实时机动雷达偏差校准算法。

### 1 问题描述

对位于飞机等运动平台上的雷达,为了将其观测数据转换到统一的坐标系中,通常使用以下坐标系转换关系<sup>[10]</sup>。

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_g &= [X_g \ Y_g \ Z_g]^T = \\ & \mathbf{A}_{\text{head}} \mathbf{A}_{\text{pitch}} \mathbf{A}_{\text{roll}} \mathbf{r}_b + [X_r \ Y_r \ Z_r]^T = \\ & \mathbf{A} [X_b \ Y_b \ Z_b]^T + [X_r \ Y_r \ Z_r]^T \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $[X_g \ Y_g \ Z_g]^T$  为统一坐标系中坐标;

收稿日期: 2005-10-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60172033); 全国优秀博士论文作者专项资金资助项目(200036)

作者简介: 王波(1966-), 男, 博士, 讲师, 主要从事信号处理、传感器和仿真方面的研究。

$[X_b \ Y_b \ Z_b]^T$  为局部直角坐标;  $[X_r \ Y_r \ Z_r]^T$  为雷达在统一坐标系中的坐标;

$$\begin{cases} A_{\text{head}} = \begin{bmatrix} \cos \vartheta & \sin \vartheta & 0 \\ -\sin \vartheta & \cos \vartheta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ A_{\text{pitch}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \\ A_{\text{roll}} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

$\vartheta, \phi, \alpha$  为机动平台的姿态角, 即机动平台机体(载体、基座)坐标系  $Ox_b y_b z_b$  和地理坐标系  $Ox_g y_g z_g$  之间的三个夹角。

对于飞机等机动平台, 夹角  $\vartheta, \phi, \alpha$  可以通过惯导或航姿等系统提供。不论哪种设备提供, 这三个值和真实值之间总存在一定的偏差。因此, 对于位于不同机动平台上的雷达(或其他传感器)要得到完整、准确的统一态势, 必须消除由于姿态角偏差产生的负面影响。由于雷达系统偏差和姿态角偏差同时影响了统一坐标系中雷达对目标的量测, 所以只考虑系统偏差的校准技术是无法实现的。

## 2 实时系统偏差校准算法

以两部机载雷达为例, 假设雷达A和B的随机量测误差用  $(R_r(k), \theta_r(k), \eta_r(k))$  和  $(R'_r(k), \theta'_r(k), \eta'_r(k))$  来表示,  $(r_A''(k), \theta_A''(k), \eta_A''(k))$  和  $(r_B''(k), \theta_B''(k), \eta_B''(k))$  表示只考虑系统偏差, 不考虑随机量测误差时雷达A和B对同一目标的量测, 并且令  $\Psi_k'' = [r_A''(k), \theta_A''(k), \eta_A''(k), r_B''(k), \theta_B''(k), \eta_B''(k)]^T$ , 那么目标在雷达A的局部迪卡尔坐标系中的真实坐标为:

$$\begin{cases} X_b(k) = (r_A''(k) - \Delta r_A) \times \\ \quad \sin(\theta_A''(k) - \Delta \theta_A) \cos(\eta_A''(k) - \Delta \eta_A) \\ Y_b(k) = (r_A''(k) - \Delta r_A) \times \\ \quad \cos(\theta_A''(k) - \Delta \theta_A) \cos(\eta_A''(k) - \Delta \eta_A) \\ Z_b(k) = (r_A''(k) - \Delta r_A) \sin(\eta_A''(k) - \Delta \eta_A) \end{cases} \quad (3)$$

$$\beta = [\Delta r_A \ \Delta \theta_A \ \Delta \eta_A \ \Delta \vartheta_A \ \Delta \phi_A \ \Delta \alpha_A \ \Delta r_B \ \Delta \theta_B \ \Delta \eta_B \ \Delta \vartheta_B \ \Delta \phi_B \ \Delta \alpha_B]^T$$

对式(8)进行一阶泰勒级数展开:

$$f(\Psi_k'', \beta) \approx f(\Psi_k'', \beta') + G_k(\beta - \beta') + F_k(\Psi_k'' - \Psi_k) \quad (9)$$

其中:

$$\nabla_{\Psi''} [f(\Psi_k'', \beta')] = F_k, \nabla_{\beta} [f(\Psi_k'', \beta')] = G_k \quad (10)$$

式中  $\Psi_k$  为雷达在第  $k$  次采样时刻对目标的真实的量测值(包含系统偏差和随机量测误差, 没有进行校正);  $\beta'$  为对偏差的初始估计, 在没有任何先验信息

式中  $\Delta r_A, \Delta r_B, \Delta \theta_A, \Delta \theta_B, \Delta \eta_A, \Delta \eta_B$  分别为两部传感器的测距偏差、方位角偏差和俯仰角偏差。

假设带偏差的姿态角为  $\vartheta_A, \phi_A, \alpha_A$ , 其中姿态角偏差分别为  $\Delta \vartheta_A, \Delta \phi_A, \Delta \alpha_B$ , 由式(1)可得:

$$\begin{aligned} r_s(k) &= [X_s(k), Y_s(k), Z_s(k)]^T = \\ & A [X_b(k) \ Y_b(k) \ Z_b(k)]^T + \\ & [X_r(k) \ Y_r(k) \ Z_r(k)]^T \end{aligned} \quad (4)$$

式中

$$\begin{aligned} A &= \\ & \begin{bmatrix} \cos(\vartheta_A(k) - \Delta \vartheta_A) & \sin(\vartheta_A(k) - \Delta \vartheta_A) & 0 \\ -\sin(\vartheta_A(k) - \Delta \vartheta_A) & \cos(\vartheta_A(k) - \Delta \vartheta_A) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \\ & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi_A(k) - \Delta \phi_A) & \sin(\phi_A(k) - \Delta \phi_A) \\ 0 & -\sin(\phi_A(k) - \Delta \phi_A) & \cos(\phi_A(k) - \Delta \phi_A) \end{bmatrix} \times \\ & \begin{bmatrix} \cos(\alpha_A(k) - \Delta \alpha_A) & 0 & -\sin(\alpha_A(k) - \Delta \alpha_A) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\alpha_A(k) - \Delta \alpha_A) & 0 & \cos(\alpha_A(k) - \Delta \alpha_A) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

$r_s(k)$  为  $k$  时刻目标在统一坐标系中真实的迪卡尔坐标。同理可得传感器B量测  $(r_B''(k), \theta_B''(k), \eta_B''(k))$  对应的统一坐标系中的迪卡尔坐标为:

$$\begin{aligned} r'_s(k) &= [X'_s(k), Y'_s(k), Z'_s(k)]^T = \\ & A' [X'_b(k) \ Y'_b(k) \ Z'_b(k)]^T + \\ & [X'_r(k) \ Y'_r(k) \ Z'_r(k)]^T \end{aligned} \quad (6)$$

式中

$$\begin{aligned} A' &= \\ & \begin{bmatrix} \cos(\vartheta_B(k) - \Delta \vartheta_B) & \sin(\vartheta_B(k) - \Delta \vartheta_B) & 0 \\ -\sin(\vartheta_B(k) - \Delta \vartheta_B) & \cos(\vartheta_B(k) - \Delta \vartheta_B) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \\ & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi_B(k) - \Delta \phi_B) & \sin(\phi_B(k) - \Delta \phi_B) \\ 0 & -\sin(\phi_B(k) - \Delta \phi_B) & \cos(\phi_B(k) - \Delta \phi_B) \end{bmatrix} \times \\ & \begin{bmatrix} \cos(\alpha_B(k) - \Delta \alpha_B) & 0 & -\sin(\alpha_B(k) - \Delta \alpha_B) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\alpha_B(k) - \Delta \alpha_B) & 0 & \cos(\alpha_B(k) - \Delta \alpha_B) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

定义:

$$f(\Psi_k'', \beta) = [\Delta x_k, \Delta y_k, \Delta z_k]^T = r_s(k) - r'_s(k) \quad (8)$$

条件下, 可以假设  $\beta' = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 。

因为对于同一目标,  $f(\Psi_k'', \beta) = [0, 0, 0]^T$ 。假设系统误差  $(\Psi_k'' - \Psi_k)$  和  $(\beta - \beta')$  足够小, 高阶的分量可以忽略, 则:

$$G_k \beta + F_k \partial \Psi_k = G_k \beta' - f(\Psi_k'', \beta') \quad (11)$$

式中  $\partial \Psi_k = (\Psi_k'' - \Psi_k)$ ,  $\Psi_k''$  只包含系统偏差, 而没有包含随机量测误差:

$$\partial \Psi_k = [R_r(k), \theta_r(k), \eta_r(k), R'_r(k), \theta'_r(k), \eta'_r(k)] \quad (12)$$

因为  $G_k$  是已知参数的矩阵，所以式(11)的右半部分代表观测；因为  $F_k \partial \Psi_k$  是由量测噪声导致的误差，所以可以构造卡尔曼滤波的量测方程为：

$$Y(k) = H(k)X(k) + W(k) \quad (13)$$

式中

$$Y(k) = G_k \beta'(k) - f(\Psi_k, \beta'(k)) \quad (14)$$

$$H(k) = G_k \quad (15)$$

$$X(k) = \beta'(k) \quad (16)$$

$$W(k) = F(k) \partial \Psi(k) \quad (17)$$

$$E[W(k)W^T(k)] =$$

$$F(k) \text{diag}[\sigma_r^2(A), \sigma_\theta^2(A), \sigma_\eta^2(A), \sigma_r^2(B), \sigma_\theta^2(B), \sigma_\eta^2(B)] F(k)^T \quad (18)$$

在没有其他先验信息条件下，可以假设系统的状态方程为：

$$X(k+1) = \Phi(k)X(k) \quad (19)$$

式中  $\Phi(k)$  为  $12 \times 12$  的单位阵。

相应地可以写出卡尔曼滤波算法：

$$\hat{X}(k+1|k) = \Phi(k)\hat{X}(k|k) \quad (20)$$

$$P(k+1|k) = \Phi(k)P(k|k)\Phi'(k) \quad (21)$$

$$S(k+1) = H(k+1)P(k+1|k) \times H'(k+1) + E[W(k)W^T(k)] \quad (22)$$

$$K(k+1) = P(k+1|k)H'(k+1)S^{-1}(k+1) \quad (23)$$

$$\hat{X}(k+1|k+1) = \hat{X}(k+1|k) +$$

$$K(k+1)(Y(k+1) - H(k+1)\hat{X}(k+1|k)) \quad (24)$$

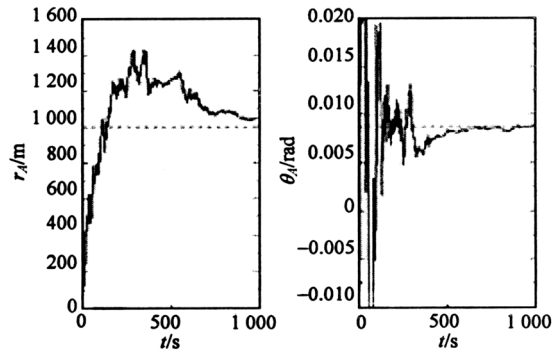
$$P(k+1|k+1) = P(k+1|k) - K(k+1)S(k+1)K'(k+1) \quad (25)$$

根据卡尔曼滤波得到的状态值  $\hat{\beta}(k)$ ，就可以实现机动雷达组网实时校准。

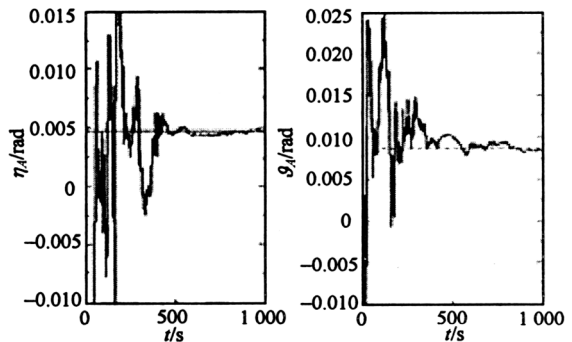
### 3 仿真

以两部机动平台为例，假设平台上分别载有一部三坐标雷达，雷达的系统偏差为  $\Delta r_A = \Delta r_B = 1000 \text{ m}$ ， $\Delta \theta_A = \Delta \theta_B = 0.0087 \text{ rad}$ ， $\Delta \eta_A = \Delta \eta_B = 0.0047 \text{ rad}$ ，精度为  $\sigma_{\rho A} = \sigma_{\rho B} = 100 \text{ m}$ ， $\sigma_{\theta A} = \sigma_{\theta B} = 1^\circ$ ， $\sigma_{\eta A} = \sigma_{\eta B} = 1^\circ$ 。两平台的姿态角偏差分别为  $\Delta \vartheta_A = \Delta \vartheta_B = 0.0087 \text{ rad}$ ， $\Delta \phi_A = \Delta \phi_B = 0.0047 \text{ rad}$ ， $\Delta \alpha_A = \Delta \alpha_B = 0.0037 \text{ rad}$ 。使用文中给出的实时校准算法，得到了两部雷达系统偏差和姿态角偏差的实时校准结果，如图1所示。其中虚直线代表系统偏

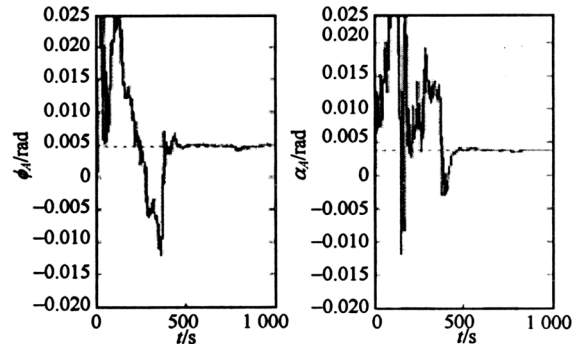
差和姿态角偏差的真值，实线为卡尔曼滤波的实时校准结果。本文提出的算法能有效地对系统偏差和姿态角偏差进行实时校准。



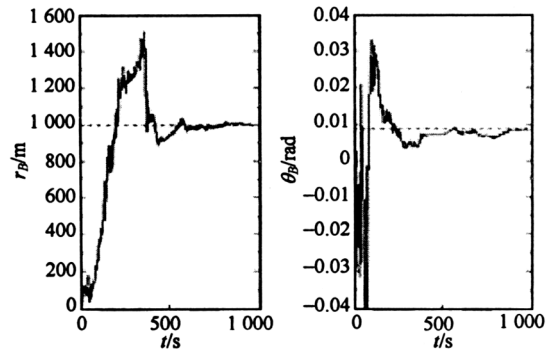
a. 传感器A测距偏差校准 b. 传感器A方位角偏差校准



c. 传感器A俯仰角偏差校准 d. 传感器A姿态角  $\vartheta_A$  偏差校准



e. 传感器A姿态角  $\phi_A$  偏差校准 f. 传感器A姿态角  $\alpha_A$  偏差校准



g. 传感器B测距偏差校准 h. 传感器B方位角偏差校准

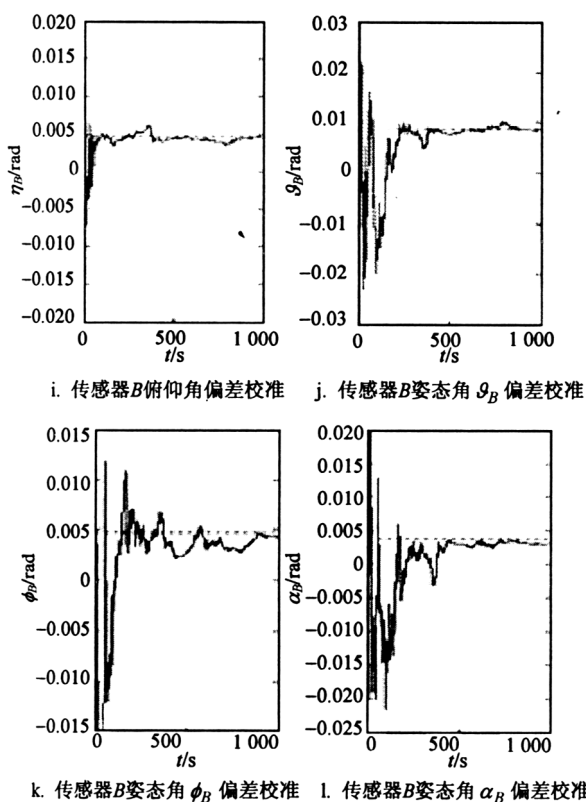


图1 机动雷达实时校准结果

## 4 结论

本文研究了机动雷达组网系统偏差和姿态角偏差实时校准问题。根据统一坐标系中两部雷达对同一目标量测的几何关系,构造了系统偏差、姿态角偏差和量测之间的线性近似关系。在此基础上提出了一种基于Kalman滤波的机动雷达组网实时校准算

法。仿真表明,该算法能较为准确地对系统偏差和姿态角偏差进行实时估计和校准。

## 参考文献

- [1] ELIAS-FUSTE A R, BROQUETAS B A, ANTEQUERA J P, et al. CFAR data fusion center with inhomogeneous receivers[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1992, 28(2): 276-284.
- [2] 何友, 王国宏, 陆大绘. 多传感器信息融合及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.
- [3] 张晶伟, 熊伟, 何友. 当前统计概率数据关联算法[J]. 电子科技大学学报, 2005, 34(1): 4-7.
- [4] ZHOU Yi-feng, HENRY L. An exact maximum likelihood registration algorithm for data fusion[J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1997, 45(6): 1560-1572.
- [5] HELMICK R E, RICE T R. Removal of alignment errors in an integrated system of two 3D sensors[J]. IEEE T-AES, 1993, 29(4): 1333-1343.
- [6] SIMON J J, JEFFREY U K. A new method for the nonlinear transformation of means and covariances in filters and estimators[J]. IEEE Trans. on AC, 2000, 45(3): 477-482.
- [7] JOSEPH J, LAVIOLA J. A comparison of unscented and extended kalman filtering for estimating quaternion motion[C]//In the Proceedings of the 2003 American Control Conference. New York: CRC Press, 2003: 2435-2440.
- [8] 贺席兵, 李教, 敬忠良. 多传感器中传感器配准技术发展综述[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2001, 2(2): 11-14.
- [9] 徐毅, 陈非, 敬忠良, 等. 基于扩展卡尔曼滤波的空基多平台多传感器的数据配准和目标跟踪算法[J]. 信息与控制, 2001, 30(5): 403-407.
- [10] 张宗麟. 惯性导航与组合导航[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.

编辑 税红