

文章编号: 1000-6893(2006)01-0120-05

星基 ADS 与雷达误差校准算法的研究

刘 伟, 黄智刚, 张 军, 罗喜伶

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

Studies on Satellite based ADS and Radar Registration Algorithm

LIU Wei, HUANG Zhigang, ZHANG Jun, LUO Xiling

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics
and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘 要: 基于星基自动相关监视(ADS)系统和雷达各自的特点,分析了空中交通管制中 ADS 与雷达数据融合的模式,提出了在传统的地球中心地球固(ECEF)坐标系中星基 ADS 和雷达系统误差校准的算法。同时,针对 ADS 数据的特性,又进一步提出了在 Geodetic 坐标系和以雷达站为极点的极坐标系(以下简称雷达站极坐标系)中的系统误差校准算法。最后,对校准效果进行了仿真分析和比较,并介绍了一种有效应用上述算法的方法。

关键词: 空中交通管制(ATC); 误差校准; 自动相关监视(ADS); 雷达

中图分类号: V355.1 文献标识码: A

Abstract: Based on the characteristics of the satellite based automatic dependent surveillance (ADS) system and radar, the model of ADS and radar data fusion system are studied and the registration algorithm in the traditional Earth Centered Earth Fixed (ECEF) coordinate system is presented. In the meantime, according to the characteristics of ADS data, the registration algorithms in Geodetic coordinate system and radar polar coordinate system are further proposed. Simulated and real life data are used to evaluate the performance of the proposed algorithms and comparisons are made. The effect way to better use the above algorithms in practical situations is introduced.

Key words: air traffic control (ATC); registration; automatic dependent surveillance (ADS); radar

空中交通管制的根本目的是使航线上的飞机安全、有效和有计划的在空域中飞行,管制员需要对管制空域内飞机的飞行动态进行实时监视。实施空中交通监视有两种主要方法:一是雷达监视,二是国际民航组织的未来空中航行系统(FANS)专门委员会推荐采用的自动相关监视(Automatic Dependent Surveillance,以下简称 ADS)^[1,2]。雷达系统是目前普遍使用的飞行动态监视手段。但是,雷达系统具有很多局限性:雷达波束的直线传播形成了大量雷达盲区;无法覆盖海洋和荒漠等地区;无法获得飞机的计划航线、速度等态势数据,限制了跟踪精度的提高和短期冲突检测告警(STCA)的能力。发展中的 ADS 借助导航卫星和通信卫星不仅可以实现对飞机的整个飞行阶段进行连续的无间断的监视,还可以提高监视的可靠性和精度,尤其适合海洋和荒漠等地区使用。由于 ADS 的机载设备和地面设备建设费用比雷达低一个数量级^[3]。因此,ADS 有良好的开发应用前景。

但是,如果将 ADS 作为唯一的监视手段,一

旦导航系统出现问题,将导致监视功能的丧失。因此,雷达监视和 ADS 监视将在相当长的时间内共存。如何将 ADS 数据与雷达数据有效的融合在一起,最大限度地发挥它们的综合效力,提高监视精度,是一个亟待解决的问题。

在监视系统中,目标的相对位置和方位十分重要。当监视源为单数据源时,其距离和方位的偏差对所有飞机的作用一样,对性能没有影响。但是,当具有覆盖范围互有重叠的两个或两个以上数据源时,要求对同一目标的不同数据进行空间迭合,这就需要对各数据源数据进行校准。在空管系统中,要处理 ADS 数据与雷达数据,首先要将这两种数据转换到统一的坐标系中,而直接的坐标转换将由于系统误差的存在而使结果产生较大的偏差。由于 ADS 数据的特殊性,ADS 与雷达系统误差校准不同于传统的多雷达系统误差校准,因而迫切需要寻找一种新的能有效校准 ADS 与雷达系统误差的算法。

1 星基 ADS 与雷达数据融合模型

星基自动相关监视系统,由飞机通过机载惯导系统或全球导航卫星系统导出自己的位置、速

度及其它相关数据, 通过卫星数据链传输至地面的空管数据处理中心。星基 ADS 数据可以周期向地面发送, 也可以由飞行员选择发送。雷达一般设置在机场附近, 重要机场可能会设置多部雷达来实现对飞机的监视。

空管数据处理中心同时接收到星基 ADS 数据和雷达数据后, 必须实现星基 ADS 数据与雷达数据的融合处理。在星基 ADS 与雷达数据融合模型中, 首先将多部雷达数据进行融合, 生成一条多雷达航迹, 再将多雷达航迹数据与 ADS 航迹数据进行融合, 生成系统航迹。这样可以保证雷达监视与 ADS 监视的独立性, 从而提高系统的冗余性和可靠性。图 1 给出了一个星基 ADS 与雷达数据融合系统的示意图。

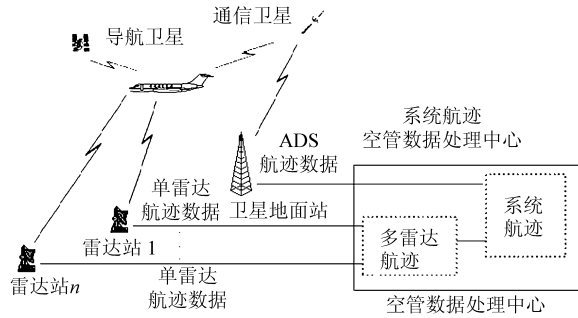


图 1 星基 ADS 与雷达数据融合系统

Fig 1 Satellite based ADS and radar data fusion system

在空管数据处理中心的星基 ADS 与雷达数据融合系统中, 会涉及以下一些关键问题:

- ①误差校准 校准系统误差, 提高监视精度。
- ②相关判断 关联由不同雷达和 ADS 探测到的属于同一目标的航迹。
- ③融合处理 融合多部雷达数据并进一步融合 ADS 数据。

ADS 和雷达的系统误差不仅会直接影响到目标跟踪精度, 而且还可能导致 ADS 数据和雷达数据对同一目标的相关失败, 导致错误的融合, 不能生成正确的系统航迹。因此, 误差校准在整个数据融合模型中有着极其重要的地位, 是本文研究的重点。

2 校准算法

(1) 在 ECEF 坐标系中的校准算法 取 ECEF 坐标系为中心坐标系。

对于雷达数据的处理, 令 $X_d(k) = [r_d(k) \theta_d(k) \eta_d(k)]^T$ 表示雷达测得的第 k 个目标的斜距、方位角、俯仰角, 雷达的系统误差表示为 $\xi_{d,i} = [\Delta r \ \Delta \theta \ \Delta \eta]^T$, 则可以由雷达测得的第 k 个目

标的斜距、方位角、俯仰角得到目标的雷达本地迪卡尔坐标

$$\left. \begin{aligned} x_{d1}(k) &= [r_d(k) + \Delta r] \sin[\theta_d(k) + \Delta \theta] \cdot \cos[\eta_d(k) + \Delta \eta] \\ y_{d1}(k) &= [r_d(k) + \Delta r] \cos[\theta_d(k) + \Delta \theta] \cdot \cos[\eta_d(k) + \Delta \eta] \\ z_{d1}(k) &= [r_d(k) + \Delta r] \sin[\eta_d(k) + \Delta \eta] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$X_{d1}(k) = [x_{d1}(k) \ y_{d1}(k) \ z_{d1}(k)]^T$ 为第 k 个目标的雷达本地迪卡尔坐标。

然后将第 k 个目标的雷达本地迪卡尔坐标转换为 ECEF 坐标^[4]

$$\left. \begin{aligned} X_{dt}(k) &= X_s + R X_{d1}(k) \\ R &= \begin{bmatrix} -\sin \lambda & -\sin L_s \cos \lambda & \cos L_s \cos \lambda \\ \cos \lambda & -\sin L_s \sin \lambda & \cos L_s \sin \lambda \\ 0 & \cos L_s & \sin L_s \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

为旋转矩阵, $X_{dt}(k) = [x_{dt}(k) \ y_{dt}(k) \ z_{dt}(k)]^T$ 为第 k 个目标的 ECEF 坐标; $X_s = [x_s \ y_s \ z_s]^T$ 为雷达站的 ECEF 坐标; L_s, λ 为雷达站的纬度、经度。

令 $J_d(k)$ 表示在 $\xi_d = \mathbf{0}$ 处 X_{dt} 对 ξ_d 的雅克比矩阵, $X_{dte}(k) = [x_{dte}(k) \ y_{dte}(k) \ z_{dte}(k)]^T$ 表示由雷达对第 k 个目标的测量值通过式(1)和式(2)得到的目标 ECEF 坐标。考虑到系统误差相对较小, 可以利用一次近似由目标的测量值估计出目标的真实 ECEF 坐标

$$X_{dt}(k) = X_{dte}(k) + R J_d(k) \xi_{d1} \quad (3)$$

对 ADS 数据的处理, 将 ADS 测得的第 k 个目标的 Geodetic 坐标转换为 ECEF 坐标^[5]

$$\left. \begin{aligned} x_{A1} &= [N + h_A(k) + \Delta h] \cos[\phi_A(k) + \Delta \phi] \cdot \cos[\lambda_A(k) + \Delta \lambda] \\ y_{A1} &= [N + h_A(k) + \Delta h] \cos[\phi_A(k) + \Delta \phi] \cdot \sin[\lambda_A(k) + \Delta \lambda] \\ z_{A1} &= [N(1 - e^2) + h_A(k) + \Delta h] \cdot \sin[\phi_A(k) + \Delta \phi] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $\lambda_A(k), \phi_A(k), h_A(k)$ 为 ADS 测得的第 k 个目标的经度、纬度、高度; ADS 的系统误差表示为 $\xi_{A,i} = [\Delta \lambda \ \Delta \phi \ \Delta h]^T$, $X_{A1}(k) = [x_{A1}(k) \ y_{A1}(k) \ z_{A1}(k)]^T$ 为第 k 个目标的 ECEF 坐标; N 为大地水准面高; e 为椭圆偏心率。

令 $X_{Ate}(k) = [x_{Ate}(k) \ y_{Ate}(k) \ z_{Ate}(k)]^T$ 表示由 ADS 对第 k 个目标的测量值通过式(4)得到的目标 ECEF 坐标, $J_A(k)$ 表示在 $\xi_A = \mathbf{0}$ 处 $X_{A1}(k)$ 对 ξ_A 的雅克比矩阵。由于系统误差相对

较小,可以利用一次近似由 ADS 的测量值估计出目标的真实 ECEF 坐标

$$X_{Ae}(k) = X_{Ate}(k) + J_A(k)\xi_A \quad (5)$$

因为雷达和 ADS 测的是同一个目标,所以由式(3)和式(5)得到

$$X_{de}(k) + RJ_d(k)\xi_d = X_{Ate}(k) + J_A(k)\xi_A \quad (6)$$

将上式写为矩阵形式

$$L(k)\xi = \Delta X(k)$$

其中:

$$L(k) = [RJ_d(k) \quad -J_A(k)];$$

$$\Delta X(k) = X_{Ate}(k) - X_{de}(k);$$

$$\xi = [\xi_d \quad \xi_A]^T$$

只由一组测量值无法得到方程式(6)的唯一解。而由 $N(N > 1)$ 个目标的测量值,可以通过求下面等式的最小方差解得到 ADS 和雷达的系统误差

$$L\xi = \Delta X \quad (7)$$

其中:

$$L = [L(1) \quad \dots \quad L(N)]^T;$$

$$\Delta X = (L^T L)^{-1} L^T \Delta X$$

解得

$$\xi = (L^T L)^{-1} L^T \Delta X$$

ADS 下传的是目标的 Geodetic 坐标,不同于雷达探测到的目标极坐标,因而可以考虑在下述两种坐标系中进行误差校准。

(2) 在 Geodetic 坐标系中的校准算法 取 Geodetic 坐标系为中心坐标系。

首先处理雷达数据,由式(1)、式(2)和式(3)将雷达测得的第 k 个目标的斜距、方位角、俯仰角转换为 ECEF 坐标。令

$$\Delta X_{dt}(k) = [\Delta x_{dt}(k) \quad \Delta y_{dt}(k) \quad \Delta z_{dt}(k)]^T =$$

$$RJ_d(k)\xi_d$$

表示由于雷达的系统误差产生的第 k 个目标 ECEF 坐标的误差。

与前面不同,这里将第 k 个目标的 ECEF 坐标进一步转换为 Geodetic 坐标^[6]

$$\left. \begin{aligned} \lambda(k) &= \arctan 2[y_{dt}(k) \quad x_{dt}(k)] \\ b(k) &= a \sqrt{1 - e^2} \\ U(k) &= \arctan \left[\frac{z_{dt}(k)a}{b(k) \sqrt{x_{dt}^2(k) + y_{dt}^2(k)}} \right] \\ \phi_h(k) &= \arctan(z_{dt}(k) + b(k)e^2 \sin^3 U(k) / \\ &\quad \sqrt{x_{dt}^2(k) + y_{dt}^2(k)} - ae^2 \cos^3 U(k)) \\ h_d(k) &= z_{dt}(k) / \sin \phi_h(k) - N(1 - e^2) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$Y_d(k) = [\lambda_d(k) \quad \phi_h(k) \quad h_d(k)]^T$ 为第 k 个目标的经度、纬度、高度; $Y_{de}(k) = [\lambda_{de}(k) \quad \phi_{de}(k) \quad h_{de}(k)]^T$ 表示将雷达对第 k 个目标的测量值进行转换后得到的目标 Geodetic 坐标; a 为椭球赤道半径; N 为大地水准面高; e 为椭球偏心率。

令 $J_d(k)$ 表示在 $\xi_d = 0$ 处 $Y_d(k)$ 对 ΔX_d 的雅克比矩阵,由于系统误差相对较小,可以利用一次近似由雷达的测量值估计出目标的真实 Geodetic 坐标

$$Y_d(k) = Y_{de}(k) + J_d \times (k)R \times J_d(k) \times \xi_d \quad (9)$$

利用 ADS 的原始数据,ADS 的系统误差表示为 $\xi_A = [\Delta \lambda \quad \Delta \phi \quad \Delta h]^T$, ADS 测得的第 k 个目标的 Geodetic 坐标为 $Y_A = [\lambda_A(k) \quad \phi_A(k) \quad h_A(k)]^T$, 因为雷达和 ADS 测的是同一个目标,所以,

$$Y_{de}(k) = J_d(k) \times R \times J_d(k) \times \xi_d = Y_A(k) + \xi_A \quad (10)$$

类似式(5)、式(6)和式(7)可求得 ADS 和雷达的系统误差。

(3) 在雷达站极坐标系中的校准算法 取雷达站极坐标系为中心坐标系。

与前面不同,这里首先处理 ADS 数据,由 ADS 测得的第 k 个目标的 Geodetic 坐标得到目标的 ECEF 坐标,见式(4)。

然后将第 k 个目标的 ECEF 坐标转换为雷达本地迪卡尔坐标

$$X_{A1}(k) = R^{-1} \times [X_{Ae}(k) - X_s] \quad (11)$$

式中 $X_{A1}(k) = [x_{A1}(k) \quad y_{A1}(k) \quad z_{A1}(k)]$ 为第 k 个目标的雷达本地迪卡尔坐标。

令

$$\begin{aligned} \Delta X_{A1}(k) &= [\Delta x_{A1}(k) \quad \Delta y_{A1}(k) \quad \Delta z_{A1}(k)]^T \\ &= R^{-1} J_1(k)\xi_d \end{aligned}$$

表示由于 ADS 的系统误差产生的第 k 个目标雷达本地迪卡尔坐标的误差。

再将第 k 个目标的雷达本地迪卡尔坐标进一步转换为雷达站极坐标^[4]

$$\left. \begin{aligned} r_A(k) &= \sqrt{x_{A1}^2(k) + y_{A1}^2(k) + z_{A1}^2(k)} \\ \theta_A(k) &= \arctan 2[x_{A1}(k), y_{A1}(k)] \\ \eta_h(k) &= \arcsin \{ [h_A^2(k) - h_s^2 + 2E(h_A(k) - h_s) + r_A^2(k)] / \sqrt{2r_A(k)(E + h_s)} \} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

其中: E 为地球平均半径; h_s 为雷达站高度。

令

$$Y_A(k) = [r_A(k) \quad \theta_A(k) \quad \eta_h(k)]^T,$$

$$Y_{Ae}(k) = [r_{Ae}(k) \quad \theta_{Ae}(k) \quad \eta_{Ae}(k)]^T$$

表示由 ADS 对第 k 个目标的测量值得到的目标雷达站极坐标, J_A 表示在 $\xi_A = 0$ 处 $Y_A(k)$ 对

$\Delta X_{A1}(k)$ 的雅克比矩阵。由于系统误差相对较小, 可以利用一次近似由 ADS 的测量值估计出目标的真实雷达极坐标

$$Y_A(k) = Y_{Ae}(k) + J(k) \times R^{-1} \times J(k) \times \xi_A \quad (13)$$

因为雷达和 ADS 测的是同一个目标, 所以

$$Y^d(k) + \xi_y = Y_{Ae}(k) + J^A(k) \times R^{-1} \times J^A(k) \times \xi_A \quad (14)$$

类似式(5)、式(6)和式(7)可求得 ADS 和雷达的系统误差。

3 仿真结果及误差分析

导致误差产生的原因包括:

(1) 在 ECEF 坐标系中校准时, 需要将 ADS 下传的目标 Geodetic 坐标和雷达测得的目标雷达站极坐标统一转换为 ECEF 坐标, 两组 ECEF 坐标数据中都带有了一个一次近似;

(2) 在 Geodetic 坐标系中校准时, 需要将雷达测得的目标雷达站极坐标转换为 Geodetic 坐标, 其中带有两个一次近似;

(3) 在雷达站极坐标系中校准时, 需要将 ADS 下传的目标 Geodetic 坐标转换为雷达站极坐标, 其中也带有了两个一次近似。

另外, 坐标转换的算法本身也不可避免的引入了一部分误差。通过仿真对在这几种坐标系中校准的效果进行进一步的分析和比较。

在中国西部航路上采集航路点数据进行仿真试验, 地球模型采用 WGS-84 模型, $e^2 = 0.006\ 694\ 4$, 雷达站位置矢量为 $X_s = [0\ 568\ 8\ \text{rad}, 1.727\ 95\ \text{rad}, 50\ \text{m}]$, 观测目标点个数 $N = 10$, 仿真结果如表 1 和图 2 所示。

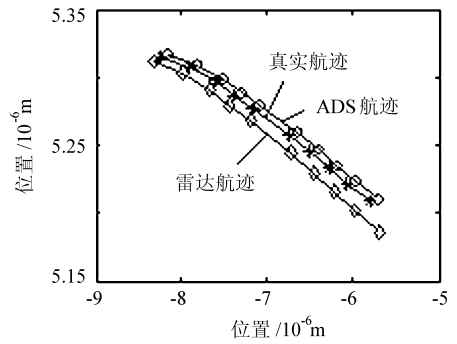
表 1 在各坐标系中校准后的残留系统误差

Table 1 The remaining system error after the registration in three coordinate systems

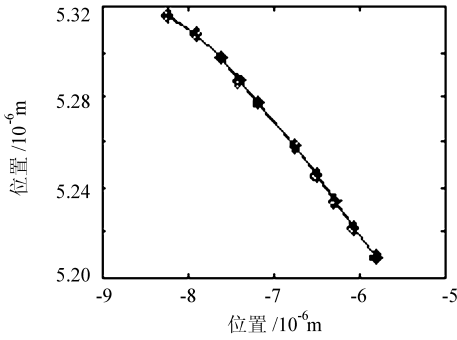
坐标系	ΔN (10^{-6}rad)	$\Delta \phi$ (10^{-6}rad)	Δh m	Δr m	$\Delta \theta$ (10^{-4}rad)	$\Delta \Omega$ (10^{-4}rad)
ECEF	1.425	-2.543	-30	-34	0	-1
Geodetic	-4.6585	-6.2094	7	-6	-2	0
雷达极	-3.459	4.019	61	33	6	4

图 2 中的 xy 平面表示地球的赤道平面, 原点位于地球中心, x 轴正半轴由地球中心指向格林威治子午线, y 轴正半轴由地球中心指向东经 90° 经度线。图中航迹为物理航迹在地球赤道平面上的投影。标记为“*”的点为真实航迹点, 标记为“O”的点为 ADS 下传航迹点, 标记为“◇”的点为雷达测得的航迹点。

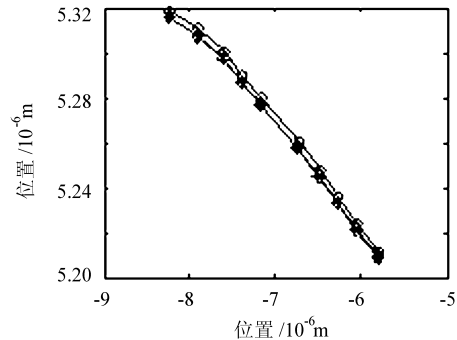
由表 1 可以看出, 在 ECEF 坐标系中对 $\Delta \lambda$, $\Delta \phi$ 和 $\Delta \theta$ 的校准效果较好, 在 Geodetic 坐标系中



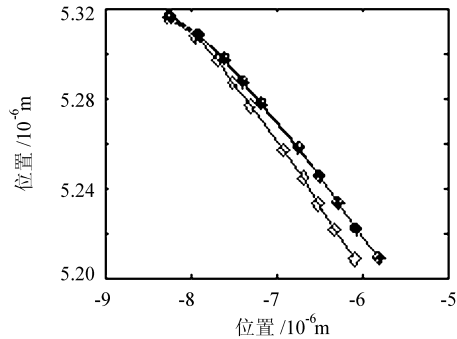
(a) 显示未校准时的航迹



(b) 显示在 ECEF 坐标系中校准后的航迹



(c) 显示在 Geodetic 坐标系中校准后的航迹



(d) 显示在雷达极坐标系中校准后的航迹

图 2 航迹

Fig 2 Flight tracks

对 Δh , Δr 和 $\Delta \Omega$ 的校准效果较好。

由图 2 可以看出, 由于 ADS 和雷达的系统误差, 导致测量到的航迹数据相对于真实航迹数据有了较大偏差, 而经过校准后的航迹数据更接近于真实航迹数据。综合比较而言, 在 ECEF 坐标

系中的校准效果较好。

在校准误差时,可以根据所需校准的参数的不同,选择不同的坐标系作为中心坐标系。或者根据实际的需要,选取整体校准效果最好的 ECEF 坐标系作为中心坐标系。

随着飞机速度的提高,对航空监视精度也提出了更高的要求。但获取高精度是以增加算法复杂度为代价的。而随着计算机硬件的发展,已经可以实时处理越来越复杂的算法。为了最大限度的消除系统误差,可以循环利用校准算法,图3以在 ECEF 坐标系中的校准算法为例给出了循环利用校准算法的校准效果,横坐标表示循环校准的次数,0表示未校准,纵坐标表示航迹间距离的对数,可以看出,ADS 航迹与真实航迹间的距离以及雷达航迹与真实航迹间的距离随着循环次数的增加而变小,但由于算法本身及坐标转换的精度限制,经过2次校准后,ADS 航迹与真实航迹间的距离以及雷达航迹与真实航迹间的距离趋于一个小的稳定值。虽然循环利用校准算法可以最大限度的消除系统误差,但同时算法的复杂度也大大增加了,考虑到经过2次循环校准后,系统误差已基本被消除,通常只需要循环校准2次即可满足系统对精度的要求。

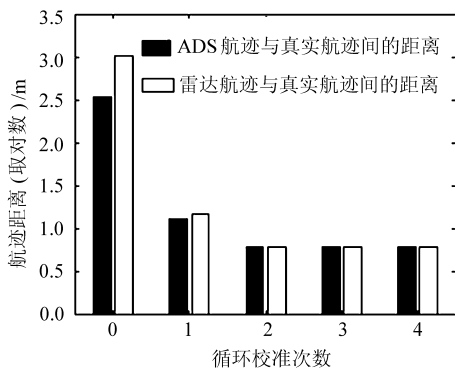


图3 多次循环校准的效果

Fig. 3 Effects of multicyle

4 结论

考虑 ADS 数据和雷达数据各自的特点,分别在3种坐标系中提出了相应的误差校准算法。仿真结果表明,对误差进行校准后,大大提高了目标跟踪精度。并且,在各坐标系中对各参数的校准效果各有不同。在实际系统设计中,选取哪个坐标系为中心坐标系以及需要对哪个或哪些参数进

行误差校准要视具体情况而定。可以视具体情况不同而选择不同的校准算法。在实际应用中,经过2次循环利用校准算法进行校准,可以将系统误差对系统造成的影响降到最低。

参 考 文 献

- [1] Interoperability requirements for ATS applications using ARINC 622 data communications [M]. America: RTCA Inc, 2000.
- [2] Minimum aviation system performance standards for automatic dependent surveillance broadcast (ADS-B) [M]. America: RTCA Inc, 1998.
- [3] Massoglia P L, Pozesky M T, Germana G T. The use of satellite technology for oceanic air traffic control [J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(11): 1695-1708.
- [4] Zhou Y F, Leung H, Blanchette M. Sensor alignment with Earth Centered Earth Fixed (ECEF) coordinate system [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 1999, 35(2): 410-418.
- [5] 朱华统, 杨元喜, 吕志平. GPS 坐标系统的变换 [M]. 武汉: 测绘出版社, 1994.
Zhu H T, Yang Y X, Lu Z P. The conversion of GPS coordinate system [M]. Wuhan: Mapping Press, 1994. (in chinese)
- [6] 崔永俊. 空间直角坐标与大地坐标之间的变换方法研究 [J]. 华北工学院学报, 2003, 24(1): 37-75.
Cui Y J. Study on the transformation methods between rectangular space coordinate and geodetic coordinate [J]. Journal of North China Institute of Technology, 2003, 24(1): 73-75. (in chinese)

作者简介:

刘伟(1979-) 男,山东潍坊人,硕士生,北京航空航天大学电子信息工程学院交通信息工程及控制专业,主要研究方向: ADS 与多雷达数据融合,空中交通流量管理等。E-mail: enjoy_work@yahoo.com.cn

黄智刚(1962-) 男,河北邢台人,北京航空航天大学电子信息工程学院教授、硕士生导师,博士,主要研究方向: 通信与信息系统,无线电导航系统,自动测控等。E-mail: buaahzg@163.com

张军(1965-) 男,安徽合肥人,北京航空航天大学电子信息工程学院副院长、教授、博士生导师,博士,主要研究方向: 航空数据通信、天空地一体化网络、遥控遥测、新航行系统等。E-mail: buaazhangjun@vip.sina.com

罗喜伶(1974-) 男,江西泰和人,博士后,北京航空航天大学电子信息工程学院通信与信息系统专业,主要研究方向: 新航行系统,航空数据链,空中交通流量管理等。E-mail: luoxl@adcc.com.cn

(责任编辑: 李泓洁)