

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.02.007

## 三种传递对准延时误差补偿方法的比较研究

徐林, 李世玲, 屈新芬

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 以一种典型的速度加姿态匹配传递对准模型为例, 系统地分析和介绍 3 种延时误差补偿方法: 外推—滤波法、滤波—更新法和建模补偿法。为验证和比较这 3 种方法的补偿效果, 采用 S 行飞行轨迹进行计算机仿真。仿真结果表明, 在该种飞行条件下, 3 种方法都能够有效地减小传递对准延时误差, 其中滤波—更新法对延时误差的补偿最为彻底。

**关键词:** 惯导系统; 传递对准; 延时补偿方法; 速度加姿态匹配

**中图分类号:** O241.1; TP391.9 **文献标志码:** A

### Comparison and Study of Three Time-Delay Compensation Methods for Transfer Alignment

Xu Lin, Li Shiling, Qu Xinfen

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** Taking a typical transfer alignment model with velocity plus attitude matching as example, three time-delay error compensation methods, namely extrapolating-filtering method, filtering-updating method and modeling method, are systemically analyzed and introduced. To validate and compare their compensation performance, computer simulation is carried out in which a S-shaped flight path was adopted. Simulation results indicate that under this flight condition all three methods could decrease time-delay error of transfer alignment effectively, where filtering-updating method can compensate for the error most thoroughly.

**Keywords:** inertial navigation system; transfer alignment; time-delay compensation method; velocity plus attitude matching

## 0 引言

传递对准是指利用一套已对准好的惯导系统(主系统)对另一套需要对准的惯导系统(子系统)进行初始对准的方法。主系统在传递对准中主要起 2 方面的作用: 一是为子系统的初始装订提供导航参数; 二是在进行精对准时作为参考系统。这 2 个过程均需要主系统将相关数据处理之后传输给子系统。由于数据的处理和传输需要一定时间, 子系统接收到主系统数据时会有一定的延迟。当载体导航参数变化较快时, 主系统数据延迟将会引起较大的传递对准误差。文献[1-2]将延迟时间视为随机常值, 建立了包括延迟时间状态在内的传递对准模型, 并利用传递对准滤波器对其进行估计和补偿。对于已知主系统延时的传递对准问题, 文献[3]采用了先对主系统数据进行外推, 再进行滤波计算的外推—滤波法, 文献[4]则提出了在主系统数据对应的时刻进行滤波, 然后对状态变量进行时间更新的滤波—更新法。故以一种典型的传递对准模型为例, 详细

分析这 3 种延时误差处理方法, 并运用仿真手段对其补偿效果进行了验证和对比。

## 1 传递对准数学模型

不考虑载体挠曲变形的影响, 惯性传感器误差建模为随机常值, 结合捷联惯导姿态误差方程及速度误差方程可得系统方程如下<sup>[5]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{\psi} = \psi \times \omega_m^n - C_s^n \varepsilon^s + w_1 \\ \delta \dot{V} = [(C_s^n f^s) \times] \psi - (2\omega_e^n + \omega_{en}^n) \times \delta V + C_s^n \nabla^s + w_2 \\ \dot{\varepsilon}^s = 0; \quad \dot{\nabla}^s = 0; \quad \dot{\phi} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $\psi$  为子系统的平台失准角;  $\delta V$  为速度误差;  $\varepsilon$  和  $\nabla$  分别为陀螺和加速度计的常值误差;  $\phi$  为主子系统之间的相对姿态误差;  $C_s^n$  表示子系统的姿态矩阵;  $f$  和  $\omega$  分别表示比力和角速度;  $w$  表示系统噪声;  $i$ 、 $e$ 、 $n$ 、 $s$  分别表示地心惯性坐标系、地心坐标系、子系统导航坐标系、子系统坐标系。

速度加姿态匹配是公认较好的传递对准匹配方案<sup>[6]</sup>, 其表达式为:

收稿日期: 2010-09-11; 修回日期: 2010-11-15

基金项目: 中国工程物理研究院电子工程研究所创新基金(S20090101)

作者简介: 徐林(1985—), 男, 重庆人, 硕士研究生, 从事惯导系统传递对准技术研究。

$$\begin{cases} V_s - V_m - V_l = Z_V = \delta V + v_1 \\ \text{rot}(C_b^i C_n^s) = Z_A = \psi - C_s^n \phi + v_2 \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $Z_V$  和  $Z_A$  分别表示速度观测量和姿态观测量,  $V_s$ 、 $V_m$ 、 $V_l$  分别表示子系统速度、主系统速度和杆臂速度;  $C_b^i$  为主系统的姿态矩阵;  $v$  为量测噪声; 符号“rot”表示从矩阵非对角元素中提取出的旋转矢量。

式 (1) 与式 (2) 构成了一种连续形式的传递对准模型。其量测方程清楚表明, 如果主系统数据  $V_m$ 、 $C_b^i$  相对于  $V_s$  和  $C_s^n$  存在滞后, 会直接引起观测量的误差, 进而影响传递对准性能。

## 2 延时误差补偿方法

如图 1, 主系统以时间间隔  $T$  向子系统提供对准数据, 由于数据的处理和传输需耗费一定时间, 子系统接收到的对准数据总会存在延时  $\tau$  (通常  $\tau < T$ )。不失一般性, 以区间  $[t_k, t_{k+1})$  内的延时  $\tau_k$  为例介绍延时误差处理方法。若  $\tau_k$  已知, 可将主系统提供的对准数据由  $t_k$  外推至  $t_k + \tau_k$  时刻, 用  $t_k + \tau_k$  时刻的观测量进行滤波<sup>[3]</sup> (外推—滤波法), 也可以用  $t_k$  时刻的观测量滤波, 然后将状态变量的估计值更新到  $t_k + \tau_k$  时刻<sup>[4]</sup> (滤波—更新法)。若  $\tau_k$  未知, 则以上 2 种方法失效, 一种解决办法是建立  $\tau_k$  的数学模型, 利用传递对准滤波器对其进行估计和补偿<sup>[1-2]</sup>。

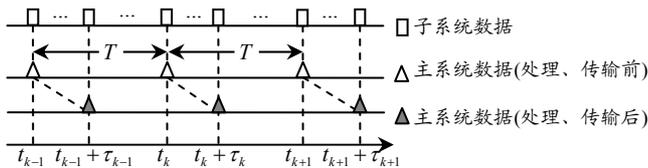


图 1 传递对准中主系统数据延迟示意图

### 2.1 外推—滤波法

外推的目标是要将  $t_k$  时刻的主系统数据外推至  $t_k + \tau_k$  时刻, 以便在  $t_k + \tau_k$  时刻进行滤波。设  $t_k + \tau_k$  时刻子系统接收到的数据有速度  $V_m(t_k)$  和姿态矩阵  $C_b^i(t_k)$ 。根据惯导基本方程<sup>[7]</sup>

$$\dot{V} = f^n - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times V + g^n \quad (3)$$

可得如下差分方程:

$$\frac{V_m(t_k + \tau_k) - V_m(t_k)}{\tau_k} \approx \dot{V}_m(t_k) = f^n(t_k) - (2\omega_{ie}^i(t_k) + \omega_{en}^i(t_k)) \times V_m(t_k) + g^n(t_k) \quad (4)$$

即:

$$V_m(t_k + \tau_k) \approx \tau_k (f^n(t_k) - (2\omega_{ie}^i(t_k) + \omega_{en}^i(t_k)) \times V_m(t_k) + g^n(t_k)) + V_m(t_k) \quad (5)$$

类似地, 由姿态矩阵微分方程  $\dot{C}_b^i(t_k) = C_b^i(t_k) \Omega_{ib}^b$  可得:

$$C_b^i(t_k + \tau_k) \approx \tau_k C_b^i(t_k) \Omega_{ib}^b(t_k) + C_b^i(t_k) \quad (6)$$

式 (5)、式 (6) 分别为主系统速度和姿态的外推表达式。由这 2 式可知, 在进行主系统数据的外推时, 需用到主系统在  $t_k$  时刻的比力  $f^n(t_k)$  和角速度  $\omega_{nb}^b(t_k)$  等数据。为减少数据传输量, 在计算时可利用子系统的相应数据代替<sup>[2]</sup>。

### 2.2 滤波—更新法

同外推—滤波法不同, 滤波—更新法的着眼点是对状态参数的估计值进行更新, 而不是对滞后的参考数据进行外推。假设在  $t_k + \tau_k$  时刻进行的滤波运算已获得状态估计值  $\hat{X}(t_k)$  和均方误差矩阵  $P(t_k)$ , 为获得当前时刻的状态估计即  $\hat{X}(t_k + \tau_k)$ , 需对  $\hat{X}(t_k)$  进行时间更新。设从  $t_k$  到  $t_k + \tau_k$  的状态转移矩阵为  $\Phi(t_k + \tau_k, t_k)$ , 则有

$$\hat{X}(t_k + \tau_k) = \Phi(t_k + \tau_k, t_k) \hat{X}(t_k) \quad (7)$$

为使下一次滤波计算能够正确进行, 还需对均方误差矩阵进行更新

$$P(t_k + \tau_k) = \Phi(t_k + \tau_k, t_k) P(t_k) \Phi(t_k + \tau_k, t_k)^T + B(t_k) Q(t_k) B(t_k)^T \quad (8)$$

其中,  $Q(t_k)$  为系统噪声方差阵,  $B(t_k)$  为适当的输入矩阵。

### 2.3 建模补偿法

延迟时间  $\tau$  是具有一定数据范围的随机值。为简单起见, 将其建模为随机游走, 即:

$$\dot{\tau} = w \quad (9)$$

式中,  $w$  为一定强度的白噪声。

选择子系统接收到主系统数据的时刻为滤波时刻, 以  $t_k + \tau_k$  时刻为例, 此时理想的量测值应为

$$\begin{cases} Z_V(t_k + \tau_k) = V_s(t_k + \tau_k) - V_m(t_k + \tau_k) - V_l(t_k + \tau_k) \\ Z_A(t_k + \tau_k) = \text{rot}(C_b^i(t_k + \tau_k) C_n^s(t_k + \tau_k)) \end{cases} \quad (10)$$

而实际的主系统数据为  $V_m(t_k)$  和  $C_b^i(t_k)$ , 将式 (5)~式 (6) 代入式 (10), 并令

$$\begin{cases} D_V = f^n(t_k) - (2\omega_{ie}^i(t_k) + \omega_{en}^i(t_k)) \times V_m(t_k) + g^n(t_k) \\ D_A = C_b^i(t_k) \Omega_{ib}^b(t_k) C_n^s(t_k + \tau_k) \end{cases} \quad (11)$$

可得:

$$\begin{cases} Z_V(t_k + \tau_k) \approx V_s(t_k + \tau_k) - (\tau_k D_V + V_m(t_k)) - V_l(t_k + \tau_k) \\ Z_A(t_k + \tau_k) \approx \text{rot}(\tau_k D_A + C_b^i(t_k) C_n^s(t_k + \tau_k)) \end{cases} \quad (12)$$

再令

$$\begin{cases} Z'_V(t_k + \tau_k) = V_s(t_k + \tau_k) - V_m(t_k) - V_l(t_k + \tau_k) \\ Z'_A(t_k + \tau_k) = \text{rot}(C_b^l(t_k)C_n^s(t_k + \tau_k)) \end{cases} \quad (13)$$

则有

$$\begin{cases} Z'_V(t_k + \tau_k) = Z_V(t_k + \tau_k) + \tau_k D_V = \\ \delta V(t_k + \tau_k) + \tau_k D_V + v_1(t_k + \tau_k) \\ Z'_A(t_k + \tau_k) = Z_A(t_k + \tau_k) - \tau_k \text{rot}(D_A) = \\ \psi(t_k + \tau_k) - C_s^n(t_k + \tau_k)\phi - \tau_k \text{rot}(D_A) + v_2(t_k + \tau_k) \end{cases} \quad (14)$$

式 (14) 即为补偿了延时误差的离散量测方程。

在第 1 节给出的传递对准模型基础上增加系统方程 (9)，并用量测方程 (14) 代替原来的量测方程 (2)，即可得到包括延时误差状态的传递对准模型。

### 3 仿真分析

#### 3.1 仿真步骤<sup>[8-10]</sup>

1) 设定载体飞行轨迹，计算出主惯导系统的导航参数以及理想的比力和角速度信息；2) 在理想的比力和角速度数据基础上，叠加杆臂效应误差、失准角误差和子系统惯性传感器误差，获得子系统惯性传感器的输入；3) 子系统导航参数解算；4) 根据子系统提供的导航参数建立数值化、离散化的传递对准模型，结合主系统的数据计算出观测量（需考虑延时）；5) 滤波计算及后处理。

#### 3.2 仿真条件和参数

载体初始位置为东经 150°，北纬 10°，高度 15 km，初始飞行速度 3 000 m/s，航向角 100°。仿真时间 30 s，其中 3~26 s 载体作 S 形机动飞行，其余时间为直线飞行。主子惯导系统之间的失准角  $\phi = [0.8^\circ - 0.6^\circ \ 1^\circ]^T$ ，杆臂长度取为  $[0.5 \text{ m} \ 2 \text{ m} \ -0.5 \text{ m}]^T$ ，子系统惯性传感器的误差参数如表 1。

表 1 加速度计和陀螺仪误差参数

惯性传感器	常值误差	刻度因子/ppm	随机误差(一阶指数过程)	
			误差标准差	相关时间 t/s
加速度计	2 mg	100	0.01 mg	200
陀螺仪	10 (°)/h	100	0.02 (°)/h	200

滤波算法采用经典的卡尔曼滤波算法，状态变量初值设为 0，速度量测噪声标准差 0.1 m/s，姿态量测噪声标准差 0.01°，均方误差矩阵初值为  $P(0) = \text{diag}\{(5 \text{ m/s})^2, (5 \text{ m/s})^2, (5 \text{ m/s})^2, (1^\circ)^2, (1^\circ)^2, (1^\circ)^2, (10^\circ/\text{h})^2, (10^\circ/\text{h})^2, (10^\circ/\text{h})^2, (1 \text{ mg})^2, (1 \text{ mg})^2, (1 \text{ mg})^2, (1^\circ)^2, (1^\circ)^2, (1^\circ)^2, (0.1 \text{ s})^2\}$ （最后一个数值与延迟时间对应，仅在建模补偿法中出现，下同），系统噪声协方差矩阵  $Q = \text{diag}\{(0.05 \text{ mg})^2, (0.05 \text{ mg})^2, (0.05 \text{ mg})^2, (0.1^\circ/\text{h})^2, (0.1^\circ/\text{h})^2,$

$(0.1^\circ/\text{h})^2, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, (5 \text{ ms})^2\}$ 。主系统每隔 0.2 s 向子系统发送一次参考信息，延迟时间为 50~100 ms 之间的随机值，子系统导航参数解算周期 0.01 s。

#### 3.3 仿真结果

子惯导失准角  $\phi_x$ 、 $\phi_y$  和  $\phi_z$  的估计误差分别如图 2~图 4，图中“方法 1”、“方法 2”、“方法 3”分别代表外推—滤波法、滤波—更新法和建模补偿法。从图 2~图 4 可见，在不采取任何补偿措施时，失准角估计值出现了较大的波动，且估计结果存在较大的误差，例如  $\phi_x$  的估计误差达到了 0.2°，但在引入延时误差补偿措施后，估计效果得到了明显改善，最大估计误差在 15 s 之内即减小到 0.02° 以下。这表明所介绍的 3 种方法均能有效地补偿传递对准延时误差。对比各种处理方法，不难发现，外推—滤波法和建模补偿法对延时误差的补偿效果不如滤波—更新法：滤波—更新法对应的失准角估计值能很快收敛到真实值附近；而外推—滤波法和建模补偿法对应的失准角估计值在较长一段时间内存在比较明显的波动。其主要原因在于，采用外推—滤波法和建模补偿法需对主系统的数据进行外推，由于外推误差的存在，导致延时误差的补偿不够彻底。

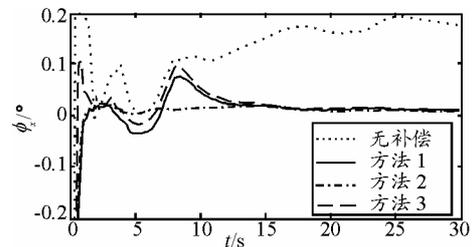


图 2 失准角  $\phi_x$  的估计误差

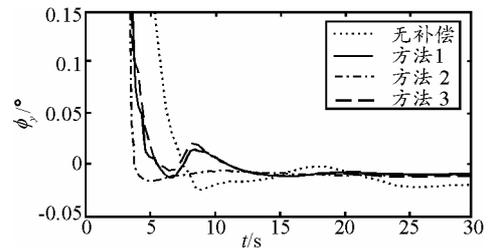


图 3 失准角  $\phi_y$  的估计误差

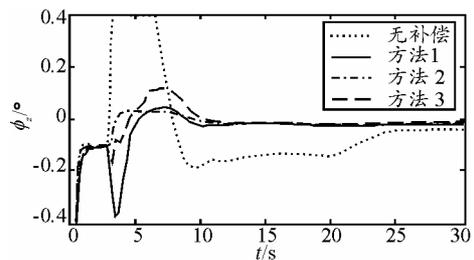


图 4 失准角  $\phi_z$  的估计误差

## 4 结论

外推—滤波法、滤波—更新法和建模补偿法是3种典型的传递对准延时误差补偿方法。笔者以速度加姿态匹配传递对准模型为例,对这3种处理方法进行了分析和介绍,并在S形机动飞行条件下进行了仿真。由理论分析及仿真结果可知,3种传递对准延时误差补偿方法具有如下特点:1)当载体导航参数变化较快时,主系统数据延迟会引起较大的传递对准误差。文中的3种补偿方法能有效地减小这种因素对传递对准的不利影响;2)3种方法中,滤波—更新法对延时误差的补偿最为彻底,而外推—滤波法和建模补偿法中由于包含了主系统数据的外推过程,外推误差在一定程度上影响了补偿效果。滤波—更新法的缺点是需预先存储子系统的一些数据,需占用较多的存储空间;3)同外推—滤波法和滤波—更新法相比,建模补偿法不需要提供延迟时间信息,具有更广的适用范围,但由于模型维数有所增加,其计算量也会相应增加。

## 参考文献:

[1] Lim Y C, Lyou J. An error compensation method for transfer alignment[C]// Proceedings of IEEE Region 10

\*\*\*\*\*  
(上接第9页)

综合射频集成分系统包括了雷达和电子战装备、敌友识别子系统、电磁告警子系统、通信子系统、导航子系统,这些子系统都拥有自己的天线、射频单元、信号和数据处理单元等,随着电子技术的进步,共享天线和孔径,集成信号和数据处理单元已经成为发展趋势,成为提高电子设备作战效能的积极举措。

## 3 结束语

介绍了飞行器管理系统的发展背景及机载系统综合发展的必然趋势。在总结未来预警机功能特点的基础上讨论了预警机飞行器管理系统的功能构架,可为预警机的总体设计提供参考。

## 参考文献:

- [1] 申功璋,高金源,张津.飞机综合控制与飞行管理[M].北京:北京航空航天大学出版社,2008:8-13.  
[2] 郭锁凤,申功璋,吴成富,等.先进飞行控制系统[M].北京:国防工业出版社,2003:131-135.  
[3] 吴文海.飞行综合控制系统[M].北京:航空工业出版社,2007:195-198.  
[4] Advisory Group for Aerospace Research & Development. Integrated Vehicle Management Systems [R]. France:North Atlantic Treaty Organization, AGARD

- International Conference on Electrical and Electronic Technology, 2001: 850-855.  
[2] 扈光峰,王艳东,范跃祖.传递对准中测量延迟的补偿方法[J].中国惯性技术学报,2005,3(1):10-15.  
[3] 杨尧,王氏钢,崔伟成,等.传递对准中时间延迟的补偿方法[J].计算机仿真,2008,25(2):26-28.  
[4] 夏家和,秦永元,赵长山.传递对准中主惯导参考信息滞后处理方法研究[J].兵工学报,2009,30(3):342-345.  
[5] 程向红,黄华.捷联惯性系统初始对准中IMU安装误差及陀螺漂移的估计与补偿[J].中国惯性技术学报,2004,12(5):13-15.  
[6] 陈凯,鲁浩,闫杰.传递对准姿态匹配优化算法[J].航空学报,2008,29(4):981-987.  
[7] Titterton D H, Weston J L. Strapdown inertial navigation technology (second edition)[M]. USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. and the Institution of Electrical Engineers, 2004.  
[8] Jones D, Roberts C, Tarrant D, et al. Transfer alignment design and evaluation environment[C]// Proceedings of the First IEEE Regional Conference on Aerospace Control Systems, 1993: 753-757.  
[9] 屈新芬,李世玲,谭惠民,等.捷联惯性测高误差分析[J].信息与电子工程,2006,4(3):181-186.  
[10] 周峰,孟秀云.机载武器捷联惯导系统传递对准仿真环境研究[J].弹箭与制导学报,2009,29(1):35-42.  
[11] 许章凯,石磊,董承博,等.基于虚拟目标点的闭路制导方法误差分析[J].四川兵工学报,2009(9):60-62.  
\*\*\*\*\*  
Advisory Report 343, 1996.  
[5] Ian moir, Allan Seabridge. Military Avionics Systems[M]. USA: John Wiley, 2003: 498-500.  
[6] Churchman A D. Strategic Flight Management Demonstration/Evaluation Program[C]. NEACON Proceeding, 1992: 528-537.  
[7] Edward Grantonic. Airborne Tactical Information Management System In-cockpit Mission Replanning and Rehearsal[C]. NEACON Proceeding, 1994: 998-1005.  
[8] 周志刚.机载火力控制系统分析[M].北京:国防工业出版社,2008:35-37.  
[9] 霍曼.飞速发展的航空电子[M].北京:航空工业出版社,2007:265-268.  
[10] R.P.G Collinson. Introduction to Avionics Systems 2<sup>nd</sup> edition [M]. Springer, 2006: 1-5.  
[11] 曹晨.预警机—信息化战争的空中帅府[M].北京:电子工业出版社,2009.  
[12] 邓中卫.预警机的现状和发展趋势[J].国防,2005(3):69-71.  
[13] 李人厚,邵福庆.大系统的分散与递阶控制[M].西安:西安交通大学出版社,1989.  
[14] Mesarovic M D, Macko D, Takahara Y. Theory of Hierarchical Multilevel Systems[M]. New York: Academic Press, 1970.  
[15] Mesarovic M D. Multilevel Systems and Concepts in Process Control[J]. Proceedings of the IEEE, 1970: 112-125.  
[16] 刘开封,刘新学,许章凯,等.飞行器被雷达发现的概率计算[J].四川兵工学报,2009(11):35-38.