

# 用误差估值累加实现组合导航系统的闭环校正

邹世开, 庄琼琼, 丁子明

(北京航空航天大学电子工程系, 北京 100083)

**摘要:** 本文对目前已成为导航技术发展方向的组合导航系统提出一种新的闭环校正方法,即用误差状态估值累加抵消输出实现闭环校正,并以 INS/GPS 组合系统为例,说明了具体算法,给出了计算机模拟结果.这种方法兼有闭环校正和开环校正的优点,可应用于各种测距间接滤波定位的组合导航系统,颇有实用价值.

**关键词:** 组合导航系统; INS/GPS; 误差累加; 闭环校正; 卡尔曼滤波

**中图分类号:** V249.33\*8 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 09-1221-04

## Using Accumulated Errors to Realize Close-Loop Rectification of Integrated Navigation System

ZOU Shi-kai, ZHUANG Qiong-qiong, DING Zi-ming

(Dept. of Electronic Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract:** This paper devised a new method of close-loop rectification for integrated navigation system, which has been the important developing direction of the navigation technique at present. This method realizes close-loop rectification by using the accumulated error to compensate the output of the subsystems. Taking the INS/GPS integrated system as example, the paper illustrates the practicable algorithm, and provides the result of computer simulation. The method has the advantages of the open-loop and close-loop rectifications, and can be used in various navigation systems which use indirect-filter-positioning method by the measurement of pseudo-range. As a result, the method has extraordinary practical value in the technique developed for the integrated navigation systems.

**Key words:** integrated navigation system; INS/GPS; accumulated errors close-loop rectification; Kalman filtering

### 1 组合导航系统的开环校正和闭环校正<sup>[1,3]</sup>

为了提高导航系统的精度和可靠性,可将多个导航系统(称为子系统)通过卡尔曼滤波器综合为组合导航系统.当前组合导航已成为导航技术的主要发展方向,其系统结构和卡尔曼滤波器的设计是实现组合的关键技术.组合系统一般用滤波输出的误差估值对各子系统实行开环校正或闭环校正.以惯性导航系统(INS)和卫星全球定位系统(GPS)构成的组合导航系统为例,图1(a)、(b)示出了INS/GPS组合导航系统开环校正和闭环校正原理框图.

开环校正的优点是工程实现简单,滤波器输出噪声和故障不影响原系统的工作,但由于INS的定位误差是随时间累加的,使滤波器输入(误差量)随时间不断增大,线性滤波方程出现越来越大的模型误差,从而使定位精度随工作时间增长而下降.闭环校正利用滤波输出的误差估值反馈回去调整子系统的内部状态参数,使滤波输入(误差量)保持小量,保证了线性滤波方程的准确性,但滤波器噪声和故障会直接影响闭环系统的工作,可靠性降低,并且工程实现困难.本文提出一种新的校正方法,它在形式上不同于反馈校正,不是用滤波误差估值去调整子系统内部参数,而是将误差估值累加在各

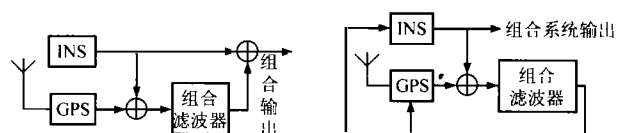


图1 (a)INS/GPS组合导航系统开环校正  
(b)INS/GPS组合导航系统闭环校正

子系统输出端实行抵消校正,达到和闭环校正相同的效果,系统结构如图2所示.由于累加的估值误差和子系统参数误差同步增大,使抵消(相减)后的滤波器输入量(误差量)总保持小量,保证了线性滤波方程的准确性;又由于校正用误差累加抵消子系统输出,工程实现简单,滤波器噪声和故障不会影响子系统工作,因此误差累加抵消校正法兼有开环和闭环校正的优点,对组合系统是一种工程上行之有效的实用校正方法.

### 2 闭环校正等效定理

**定理** 用滤波误差估值累加抵消原系统输出的校正等效于组合系统闭环校正.

**证明:**在图1(b)所示的真实闭环校正系统中,设各个子

收稿日期:2000-07-28;修回日期:2001-02-20

系统的状态参数(包括 INS 输出的位置和速度, GPS 的时钟和频率等), 在给定的滤波时刻  $t_0, t_1, t_2, t_3, \dots, t_{k-1}, t_k$  各点上, 分别用矢量  $X_0, X_1, \dots, X_{k-1}, X_k$  表示, 在时间间隔  $t_1 - t_0 = t_2 - t_1 = \dots = t_k - t_{k-1} = \Delta t$  内系统状态的变化量用矢量  $\Delta X_0, \Delta X_1, \Delta X_2, \dots, \Delta X_{k-1}$  表示, 则有:

$$\begin{aligned} X_1 &= X_0 + \Delta X_0, X_2 = X_1 + \Delta X_1, \\ X_3 &= X_2 + \Delta X_2, \dots, X_k = X_{k-1} + \Delta X_{k-1}, \\ \text{各相应时刻闭环滤波误差估值用矢量 } &\Delta \hat{X}_1, \Delta \hat{X}_2, \Delta \hat{X}_3, \end{aligned}$$

$\dots, \Delta \hat{X}_k$  表示, 并用  $\hat{X}_i(-)$  表示  $t_i$  时刻测前系统状态预测矢量,  $\hat{X}_i(+)$  表示  $t_i$  时刻测后系统状态滤波估计矢量, 那么  $t_i$  时刻的状态预测矢量  $\hat{X}_i(-)$  应为  $t_{i-1}$  时刻的滤波估值  $\hat{X}_{i-1}(+)$  与从  $t_{i-1}$  时刻到  $t_i$  时刻的状态变化量  $\Delta X_{i-1}$  之和, 即:  $\hat{X}_i(-) = \hat{X}_{i-1}(+) + \Delta X_{i-1}$ ; 而  $t_i$  时刻的滤波估值  $\hat{X}_i(+)$  应由该时刻的状态预测值经误差状态估值反馈校正后得到, 即有:  $\hat{X}_i(+)=\hat{X}_i(-)+\Delta \hat{X}_i$ . 于是可写出闭环系统在各滤波时刻的系统状态值矢量, 如表 1.

表 1

滤波时刻	系统状态预测矢量	系统状态滤波校正矢量
$t_1$	$\hat{X}_1(-) = \hat{X}_0 + \Delta X_0 = X_0 + \Delta X_0 = X_1$	$\hat{X}_1(+)=\hat{X}_1(-)-\Delta \hat{X}_1=X_1-\Delta \hat{X}_1$
$t_2$	$\hat{X}_2(-)=\hat{X}_1(+)+\Delta X_1=X_1-\Delta \hat{X}_1+\Delta X_1=X_2-\Delta \hat{X}_1$	$\hat{X}_2(+)=\hat{X}_2(-)-\Delta \hat{X}_2=X_2-(\Delta \hat{X}_1+\Delta \hat{X}_2)$
$t_3$	$\hat{X}_3(-)=\hat{X}_2(+)+\Delta X_2=X_2-(\Delta \hat{X}_1+\Delta \hat{X}_2)+\Delta X_2=X_3-(\Delta \hat{X}_1+\Delta \hat{X}_2)$	$\hat{X}_3(+)=\hat{X}_3(-)-\Delta \hat{X}_3=X_3-(\Delta \hat{X}_1+\Delta \hat{X}_2+\Delta \hat{X}_3)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$t_k$	$\hat{X}_k(-)=X_k-\sum_{i=1}^{k-1} \Delta \hat{X}_i$ (1)	$\hat{X}_k(+)=X_k-\sum_{i=1}^k \Delta \hat{X}_i$ (2)

式(2)中,  $\hat{X}_k(+)$  为图 1(b) 所示真实闭环系统  $t_k$  时刻经滤波校正后的系统输出, 而  $X_k$  是子系统在  $t_k$  时刻的输出,  $\sum_{i=1}^k \Delta \hat{X}_i$  为各次滤波后的反馈校正状态误差累加值. 所以式(2)表明

了图 1(b) 所示的真实闭环校正系统滤波后输出状态校正值  $\hat{X}_k(+)$  等于原系统不加校正的状态输出与各次滤波后的状态误差累加之差. 然而, 对式(2)的运算, 可用图 2 所示的滤波误差估值累加对子系统输出实行抵消校正来实现, 因此, 用滤波输出的误差状态累加值校正原系统输出与闭环校正等效. 证毕

用滤波误差状态估值累加实现闭环校正概念上也很明确, 因为闭环校正调整原系统内部参数, 而在原系统输出端相减进行抵消校正, 原系统参数并未变化, 为使抵消效果保持对后续滤波的影响, 必须把校正量累加起来, 其抵消作用就和调整原系统内部参数等效了. 所以, 对原系统来说相当于开环校正, 对组合滤波器输入来说, 等效于调整了原系统内部参数, 完成了闭环校正的作用, 因此这种校正也是兼有开环和闭环校正优点的闭环校正.

必须指出, 应用误差累加反馈校正, 每次滤波反馈的状态误差校正不一定就是滤波直接所得的该状态误差值. 例如, 如果闭环校正的状态参数除位置外, 还包括速度, 那么在每次滤波后, 要累加的位置校正误差量, 除滤波估计的位置误差外, 还应包括速度误差累加值由于外推产生的位置误差, 频差对钟差的影响也一样, 这一点在后面还要详细讨论.

**推论** 在子系统输出端实行误差累加校正后的输出状态量代表了组合系统闭环校正的输出状态量.

### 3 对 INS/GPS 组合系统用误差估值累加实现闭环校正

以 INS/GPS 组合系统为例, 取 INS 为平台惯导, 与 GPS 采

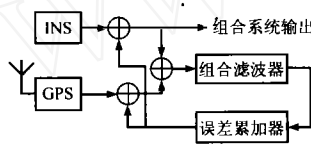


图 2 用误差累加抵消子系统输出的闭环校正

用伪距组合卡尔曼滤波, 滤波器选用间接组合方式, 滤波状态量选取如下: 三维位置误差  $X_p$ 、三维速度误差  $X_v$ 、三维平台姿态角误差  $X_\phi$ , 以及用户与卫星间钟差距离  $I_t$ , 频差距离  $I_f$  等 11 维状态变量.

#### 3.1 组合导航系统原理结构框图

如图 3 所示, 滤波输出的误差估值经误差累加器累加, 并对 INS 和 GPS 输出实行误差累加抵消校正, 由卫星位置和用户位置(惯导输出经校正后并外推到观测点)求得计算伪距, 由 GPS 接收机输出的测量

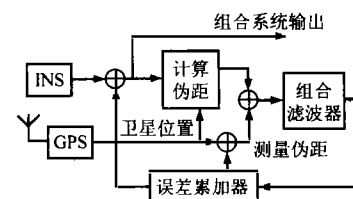


图 3 INS/GPS 用误差累加实现闭环校正的组合

伪距(经钟差距离和频差距离修正), 以此二伪距之差作为组合滤波器的观测量  $Z$ . 由于 INS 和 GPS 的输出经校正后才到滤波器输入端的相减电路, 所以观测量  $Z$  总保持小量, 保证了滤波线性方程的准确性.

#### 3.2 滤波方程

一般只对系统部分状态量(例如位置、速度、时间和频率)实行误差累加抵消校正. 在每次滤波后, 由于用系统状态量误差(滤波状态量)反馈校正系统状态量(相当于将误差调为零), 使这部分状态量满足闭环滤波方程<sup>[1]</sup>, 因此, 对下次滤波来说, 应将  $\hat{X}_{k-1}$  中相应状态量置零.

#### 3.3 观测量 $Z$ 的计算

对真实的闭环系统, 滤波状态量钟差和频差应该用来校正 GPS 接收机时钟和工作频率, 减小测量伪距中包含的钟差距离. 因此, 根据闭环校正等效定理, 在误差累加校正中, 钟差距离  $I_t$  和频差距离  $I_f$  累加值应用于校正 GPS 输出的测量伪距, 那么第  $K$  次滤波校正的测量伪距为:

$$\rho'_{GPS, K} = \rho_{GPS, K} - \sum_{i=1}^{K-1} I_{t_i} - \Delta t \sum_{i=1}^{K-1} I_{f_i} \quad (3)$$

上式中,  $\rho_{GPS,K}$  为 GPS 接收机输出的第  $K$  次滤波测量伪距(经电离层、对流层和接收机延时等校正后的输出伪距<sup>[2]</sup>).

同样,真实闭环校正系统的滤波状态位置误差和速度误差量应该用来校正惯导 INS 的状态量位置和速度.由闭环校正等效定理,用误差累加反馈校正,INS 输出经第  $K-1$  次滤波抵消校正后的系统输出位置(载体滤波校正位置)为:

$$(\hat{\lambda}_u, \hat{\phi}_u, \hat{h}_u)_{K-1} = (\lambda_I - \sum_{i=1}^{K-1} \Delta\lambda_w, \phi_I - \sum_{i=1}^{K-1} \Delta\phi_w, h_I - \sum_{i=1}^{K-1} \Delta h_w)_{K-1} \quad (4)$$

式中,  $(\lambda_I, \phi_I, h_I)_{K-1}$  为第  $K-1$  次滤波时刻 INS 输出位置

INS 输出经第  $K-1$  次滤波抵消校正的系统输出速度(载体的滤波校正速度)为:

$$(\hat{v}_e, \hat{v}_n, \hat{v}_h)_{K-1} = (v_{Ie} - \sum_{i=1}^{K-1} \Delta v_{ei}, v_{In} - \sum_{i=1}^{K-1} \Delta v_{ni}, v_{Ih} - \sum_{i=1}^{K-1} \Delta v_{hi})_{K-1} \quad (5)$$

式中,  $(v_{Ie}, v_{In}, v_{Ih})$  为第  $K-1$  次滤波时刻 INS 输出速度.

则第  $K$  点载体的预测(外推)位置为:

$$\lambda_{u,K} = \lambda_{I,K-1} - \sum_{i=1}^{K-1} \Delta\lambda_w + \frac{\Delta t}{(R_N + h) \cos \phi_{u,K-1}} \cdot (v_{Ie,K-1} - \sum_{i=1}^{K-1} \Delta v_{ei})$$

$$= \lambda_{I,K} - \sum_{i=1}^{K-1} \Delta\lambda_w - \frac{\Delta t}{(R_N + h) \cos \phi_{u,K-1}} \cdot \sum_{i=1}^{K-1} \Delta v_{ei}$$

同样:

$$\phi_{u,K} = \phi_{I,K} - \sum_{i=1}^{K-1} \Delta\phi_w - \frac{\Delta t}{R_M + h} \cdot \sum_{i=1}^{K-1} \Delta v_{ni}$$

$$h_{u,K} = h_{I,K} - \sum_{i=1}^{K-1} \Delta h_w - \Delta t \cdot \sum_{i=1}^{K-1} \Delta v_{hi}$$

将  $(\lambda_u, \phi_u, h_u)_K$  经坐标变换到地心坐标系  $(x_u, y_u, z_u)_K$ , 可求得用户与卫星间的第  $K$  次滤波计算伪距  $\rho_{CK}$ :

$$\rho_{CK} = ((x_s - x_u)^2 + (y_s - y_u)^2 + (z_s - z_u)^2)^{1/2} \quad (7)$$

式中,  $(x_s, y_s, z_s)_k$  是考虑了星历校正<sup>[2]</sup>的卫星位置.

观测量  $Z_K$  则为:

$$Z_K = \rho'_{GPSK} - \rho_{CK} \quad (8)$$

### 3.4 第 $K$ 次滤波载体校正位置

用  $(\Delta\hat{\lambda}_u, \Delta\hat{\phi}_u, \Delta\hat{h}_u)_K$  表示第  $K$  次滤波后滤波器输出的位置误差(滤波状态量),由式(6)表示的载体预测位置,可得第  $K$  次滤波载体校正位置为:

$$\hat{\lambda}_{u,K} = \lambda_{u,K} - \Delta\hat{\lambda}_{u,K} = \lambda_{I,K} - \sum_{i=1}^{K-1} \Delta\lambda_{w,i} - \frac{\Delta t}{(R_N + h) \cos \phi_{u,K-1}} \cdot \sum_{i=1}^{K-1} \Delta v_{ei} - \Delta\hat{\lambda}_{u,K} \quad (9)$$

$\hat{\phi}_{u,K}$  和  $\hat{h}_{u,K}$  的表达式具有与  $\hat{\lambda}_{u,K}$  相似的形式.

令:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta t}{(R_N + h) \cos \phi_{u,K-1}} \cdot \sum_{i=1}^{K-1} \Delta v_{ei} + \Delta\hat{\lambda}_{u,K} &= \Delta\lambda_{u,K} \\ \frac{\Delta t}{R_M + h} \cdot \sum_{i=1}^{K-1} \Delta v_{ni} + \Delta\hat{\phi}_{u,K} &= \Delta\phi_{u,K} \\ \Delta t \cdot \sum_{i=1}^{K-1} \Delta v_{hi} + \Delta\hat{h}_{u,K} &= \Delta h_{u,K} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$(\Delta\lambda_{u,K}, \Delta\phi_{u,K}, \Delta h_{u,K})$  称为第  $K$  次滤波对 INS 输出位置的误差校正值,简称为  $K$  次位置误差校正值,它是第  $K-1$  次滤波 INS 的速度误差  $\sum_{i=1}^{K-1} \Delta v_i$  外推产生的位置误差与第  $K$  次滤波的滤波位置误差之和.

将式(10)代入式(9)并化简可得第  $K$  次滤波载体的校正位置为:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{u,K} &= \lambda_{I,K} - \sum_{i=1}^K \Delta\lambda_{u,i} \\ \phi_{u,K} &= \phi_{I,K} - \sum_{i=1}^K \Delta\phi_{u,i} \\ h_{u,K} &= h_{I,K} - \sum_{i=1}^K \Delta h_{u,i} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式(11)和式(4)的表达形式是一样的,说明用闭环等效定理写出的表示式(4)是正确的.

### 3.5 用误差累加法实现 INS/GPS 组合系统闭环校正的计算机模拟结果

为了简单,对于 INS/GPS 组合导航系统,只对 INS 的位置和 GPS 的钟差应用误差累加闭环校正,限于篇幅,仅给出了模拟的位置误差和 GPS 接收机钟差的误差曲线如图 4 所示.

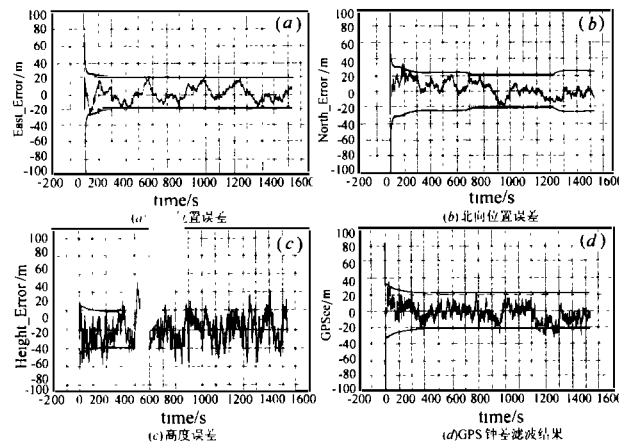


图 4 (a) 东向位置误差; (b) 北向位置误差; (c) 高度误差; (d) GPS 钟差滤波结果

## 4 结论

(1) 误差累加输出抵消校正等效于闭环校正,具有闭环和开环校正的优点,并克服了各自的缺点,是一种实用的构造组合系统的校正方法.

(2) 消除了积累误差对滤波器输入的影响,保证了误差模型的准确性,提高了组合系统的精度,使系统能长时间稳定工作.

(3) 应用误差累加输出校正构成组合系统的各个子系统及滤波器之间相互独立,既可按不同的组合方式工作,也可单独工作,可靠性高.由于在结构上相当于开环校正,系统便于调试、组合试验,这对实际运用具有重要意义.

(4) 误差累加反馈校正法也可应用于其它多传感器(特别是包含有推航系统)数据融合系统之中.

## 参考文献:

- [1] 袁信,等.导航系统[M].北京:航空工业出版社,1993,12:183-185.
- [2] 言中,丁子明.卫星无线电导航[M].北京:国防工业出版社,1989,7.
- [3] 顾启泰.INS/GPS组合导航系统实现方法及其应用[J].导航,1992,6:95-97.
- [4] Grewal M S, Hendlenson V D, Miyasako R S. Application of kalman filtering to the calibration and alignment of inertial navigation systems [J]. IEEE Transaction on Automatic Control, January 1991, 36(1):4-13.

## 作者简介:



邹世开 男,1938年1月生于四川自贡.1964年毕业于北京航空学院无线电系.现为北航电子工程系教师,研究员.现从事组合导航系统和纠错编码研究.



庄琼琼 女,1975年10月生于福建惠安.1997年获山东矿业大学机电系学士学位.2000年获北航电子工程系硕士学位.