

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.07.015

基于量测多尺度预处理的 GPS/SINS 组合导航系统

林雪原, 李炳荣

(海军航空工程学院 电子信息工程系, 山东 烟台 264001)

摘要: 针对 GPS/SINS 组合导航系统的信息融合问题, 运用多尺度分析的思想, 结合传统的 Kalman 滤波方法, 提出了基于量测多尺度预处理的 Kalman 滤波算法。将上述方法引入到 GPS/SINS 组合导航系统中, 并通过实际的静态试验给予验证。试验结果表明, 该方法是一种有效的预处理方法, 使组合导航系统的各项导航参数精度得到了显著提高。

关键词: 多尺度分析; 离散小波变换; 量测预处理; 组合导航系统

中图分类号: P228.41; TP206+.1 **文献标识码:** A

GPS/SINS Integrated Navigation System Based on Measurement Multi-Scale Preprocessing

Lin Xueyuan, Li Bingrong

(Dept. of Electronic Information Engineering, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Aiming at the information fusion of GPS/SINS integrated navigation system, puts forward one kind of Kalman filtering algorithm based on measurement multi-scale preprocessing using the idea of multi-scale analysis and combining the traditional Kalman filter. Then the above method is introduced to the GPS/SINS integrated navigation system, and is validated by the practical static experiment. The experimental results show that when the method is used, the precision of every navigation parameter is improved obviously.

Keywords: multi-scale analysis; discrete wavelet transformation; measurement preprocessing; integrated navigation system

0 引言

GPS 与捷联惯性导航系统 SINS (Strap-down Inertial Navigation System) 的组合是航行载体以及测绘领域内理想的组合导航系统。许多学者开展了对组合系统滤波方法的研究, 并提出了许多改进方法^[1]。基于小波变换理论的多尺度分析理论在应用中得到了很大的发展, 在组合导航领域也得到应用。在国外, 加拿大的 Nassar Sameh 等人提出了将小波变换用于组合导航系统的思想^[2]。Nasser EI-Sheimy 等人提出了将小波变换理论用于 SINS 初始对准的思想^[3]。在国内, 也有学者提出了把量测信息经过小波变换预处理后引入 GPS/SINS 组合导航系统中的思想, 该方面的研究还仅仅停留在计算机理论仿真的阶段, 并没有对系统的融合算法做深入的研究^[4]; 也有的学者把惯性元件的输出信号进行小波消噪处理, 然后进行组合导航解算^[5]。量测多尺度预处理技术是提高滤波精度的有效途径^[6], 故将基于量测多尺度预处理的 Kalman 滤波算法应用于

GPS/SINS 组合导航系统中。

1 多尺度分析

根据多分辨率分析的理论, 对于 $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$ 进行多尺度二进小波分解, 等价于将信号投影到 Hilbert 空间 $L^2(\mathbb{R})$ 中具有不同的时间和频率分辨率的相互直交 (正交) 的闭子空间 W_j 和 V_j 中^[7]。

$$\begin{aligned} f_{j+1}(t) &= f_j(t) + d_j(t) = f_{j-1}(t) + d_{j-1}(t) + d_j(t) \\ &= \dots = f_0(t) + d_0(t) + d_1(t) + \dots + d_j(t) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $f_j = \sum_k (f, \tilde{\phi}_{j,k}) \phi_{j,k} \in V_j$; $d_j = \sum_k (f, \tilde{\psi}_{j,k}) \psi_{j,k} \in W_j$;

$j \in \mathbb{Z}$ 。 $\phi_{j,k}(x) = 2^{-j/2} \phi(2^{-j}x - k)$ 代表二进尺度函数。 $\tilde{\phi}_{j,k}$ 和 $\tilde{\psi}_{j,k}$ 分别是 $\phi_{j,k}$ 和 $\psi_{j,k}$ 的对偶函数。 W_j 代表小波子空间, V_j 代表尺度子空间, 且 $V_{j+1} = V_j + W_j$ 。可见 W_j 对应 V_{j+1} 中的高频部分, V_j 对应 V_{j+1} 中的低频部分。上述算法可通过 Mallat 算法进行分解, 其逆过程可通过 Mallat 算法进行重构^[7]。

收稿日期: 2010-01-10; 修回日期: 2010-03-16

基金项目: 国家自然科学基金 (60874112) (基于尺度的综合导航系统信息融合方法研究), “泰山学者”建设工程专项经费资助

作者简介: 林雪原 (1970-), 男, 山东人, 副教授, 博士, 从事卫星定位与信息融合研究。

2 量测多尺度预处理方法

量测多尺度预处理方法的基本思路是：对量测信号进行离散小波变换，根据系统的先验信息和细节信号的统计特性分析，对细节信号作阈值处理，再由离散小波逆变换重构量测，作为后续 Kalman 滤波的量测值。

对在原始尺度 N 上获得的一随机信号序列：

$$Z_V(N) = [\dots, z_V(N, -1), z_V(N, 0), z_V(N, 1), z_V(N, 2), \dots] \quad (2)$$

利用离散小波变换，从原始尺度 N 开始分解 j ($1 \leq j \leq N$) 次，得到尺度 $N-1, N-2, \dots, N-j$ 上的平滑信号 $Z_V(N-1), Z_V(N-2), \dots, Z_V(N-j)$ 和细节信号 $Z_D(N-1), Z_D(N-2), \dots, Z_D(N-j)$ ，其元素可表示为：

$$z_V(i-1, n) = \sum_k h(2n-k)z_V(i, k) = \sum_k h(k)z_V(i, 2n-k) \quad (3)$$

$$i = N, N-1, \dots, N-j+1; \quad j = 1, 2, \dots, N-1$$

$$z_D(i-1, n) = \sum_k g(2n-k)z_V(i, k) = \sum_k g(k)z_V(i, 2n-k) \quad (4)$$

$$i = N, N-1, \dots, N-j+1; \quad j = 1, 2, \dots, N-1$$

相应地： $Z_D(i) = [\dots, z_D(i, -1), z_D(i, 0), z_D(i, 1), z_D(i, 2), \dots]$ 。

可得，尺度 i 上的量测 $Z_V(i)$ 可由尺度 $i-1$ 上的信号 $Z_V(i-1)$ 和 $Z_D(i-1)$ 重构，而利用尺度 $N-m$ ($1 \leq m \leq j$) 上的平滑信号 $Z_V(N-m)$ 和尺度 $N-1, N-2, \dots, N-m$ 上的细节信号 $Z_D(N-1), Z_D(N-2), \dots, Z_D(N-m)$ 可重构各尺度 $N-m+1, N-m+2, \dots, N$ 上的量测 $Z_V^m(N-i+1), Z_V^m(N-i+2), \dots, Z_V^m(N)$ ：

$$z_V^m(i+1, n) = \sum_k h(2n-k)z_V^m(i, k) + \sum_k h(2k-n)z_D(i, k) \quad (5)$$

$$i = N-m, N-m+1, \dots, N-1; \quad m = N-1, N-2, \dots, N-j$$

上标 m 表示从尺度 m 开始重构而得的各尺度上的平滑信号。因此，分解 j 次后再分别从尺度 $N-1, N-2, \dots, N-j$ 重构到原始尺度 N ，可得到原始尺度 N 上的 j 个预处理后的量测： $Z_V^{N-1}(N), Z_V^{N-2}(N), \dots, Z_V^{N-j}(N)$ 。

根据系统的先验信息，当细节信号特别大时，则说明其对应时刻上的量测是野值的概率较大；剔除野值的方法是用左右相邻值的加权平均代替它，而后重构量测。

以 $Z_V^m(N)$ ($m = N-1, N-2, \dots, N-j$) 为量测，用传统 Kalman 滤波的方法对系统的状态进行最优估计：

$$\hat{X}^m(k+1|k) = A(k)\hat{X}^m(k|k) \quad (6)$$

$$\hat{z}_V^m(N, k+1|k) = C(k)\hat{X}^m(k+1|k) \quad (7)$$

$$\hat{X}^m(k+1|k+1) = \hat{X}^m(k+1|k) + K(k)[z_V^m(N, k+1) - \hat{z}_V^m(N, k+1|k)] \quad (8)$$

$$K(k) = P(k+1|k)C^T(k+1) \times [C(k+1)P(k+1|k)C^T(k+1) + R(k+1)]^{-1} \quad (9)$$

$$P(k+1|k) = A(k)P(k|k)A^T(k) + Q(k) \quad (10)$$

$$P(k+1|k+1) = [I - K(k+1)C(k+1)]P(k+1|k) \quad (11)$$

3 基于小波降噪误差方差模型的 GPS/SINS 组合导航模型

所选取的组合导航系统状态方程为 SINS 误差方程，在忽略高度通道的情况下，系统方程写成如下形式^[8]：

$$\dot{X}(t) = F(t)X(t) + W(t) \quad (12)$$

取状态向量为 10 阶：

$$X = [\phi_N, \phi_E, \phi_D, \delta V_N, \delta V_E, \delta L, \delta \lambda, \varepsilon_{rx}, \varepsilon_{ry}, \varepsilon_{rz}]^T$$

其中，下标 N, E, D 代表北向、东向、地向， ϕ 代表姿态角误差， δV 代表速度误差， $\delta L, \delta \lambda$ 分别代表纬度误差、经度误差， $\varepsilon_{rx}, \varepsilon_{ry}, \varepsilon_{rz}$ 代表 3 个方向陀螺误差的一阶马尔可夫过程， $F(t), W(t)$ 分别为系统状态转移矩阵、系统噪声矩阵，其定义可参照文献^[8]。而量测方程采用 GPS 输出的经度、纬度和水平速度作为外部观测值，表示如下：

$$Z(t) = HX(t) + V(t) \quad (13)$$

其中： H 为 4×10 的矩阵，不为零的元素为 $H(1,6) = 1, H(2,7) = 1, H(3,4) = 1, H(4,5) = 1, V(t)$ 为量测噪声矩阵。

将第 3 部分的基于量测多尺度预处理技术的 Kalman 滤波应用于 SINS/GPS 组合导航系统中，原理图如图 1。

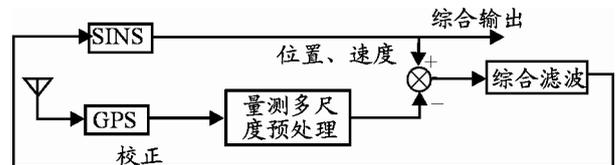


图 1 基于量测多尺度预处理的组合导航系统原理图

由于小波变换是一种全域变换，在 GPS 多尺度预处理过程中不能用到以前所有的信号，因此，在实际应用中，选取当前信息之前的 m 个值作为参考，并进行小波变换，提高信号处理的实时性^[7]。这种思想实际上是一种窗口思想。

4 实验

为验证所提出的组合导航系统算法的有效性, 对 SINS 和 GPS 进行了约 1 个小时的静态试验, 试验所采用的 SINS 为低精度的、型号为 YH5000, GPS 接收机的型号为 Garmin25, 选取 GPS 当前信息之前的 16 个值作为参考, 并利用前述方案进行多尺度预处理。为了方便比较, 首先对组合导航系统进行常规的卡尔曼滤波并对 SINS 进行校正, 得到一组导航误差数据曲线; 然后对 GPS 输出的位置与速度信息进行在线小波多尺度并行预处理; 最后, 应用式 (6)~式 (11) 的 Kalman 滤波模型对系统进

行滤波, 并对 SINS 进行校正, 又得到了第 2 组导航误差曲线, 如图 2~图 7。

在组合系统的 GPS 在线小波多尺度预处理时, 采用的小波为 db4, 分解层数为 4, 各高频系数的处理方法如前所述, 这样, 既消除了量测信号的野值, 又保留了量测系统的动态特性。由于状态方程中航向信息的可观测性较弱 (静态下和地球自转角速率的北向分量耦合), 所以经卡尔曼滤波修正后, 航向角误差虽有所改善, 但仍然有发散的趋势, 这一趋势的缓急与方位轴向陀螺的漂移大小有关, 故在下面的试验误差曲线中没有列出航向角误差曲线。

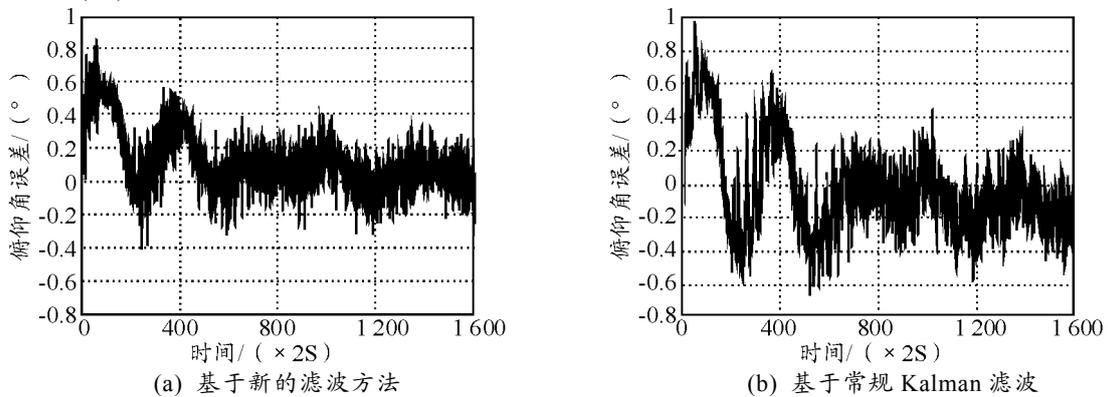


图 2 俯仰角误差曲线

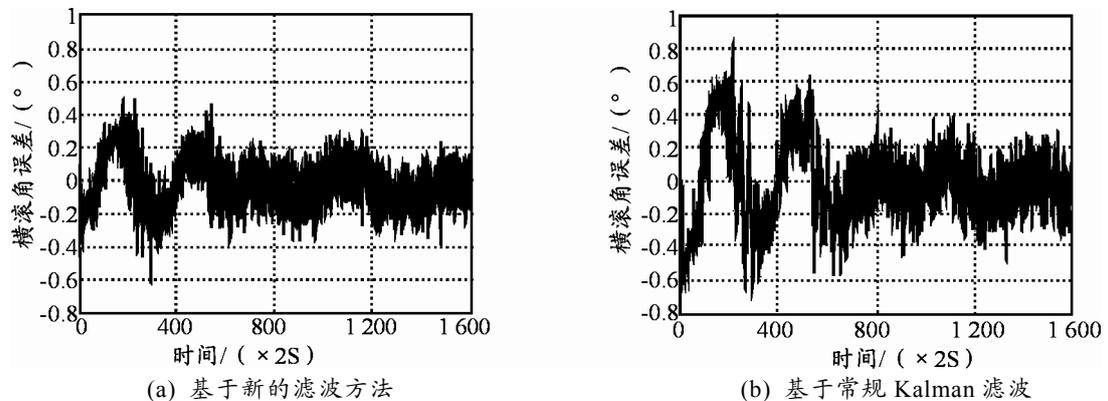


图 3 横滚角误差曲线

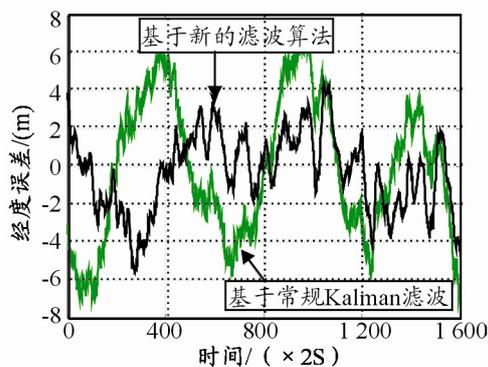


图 4 经度误差曲线

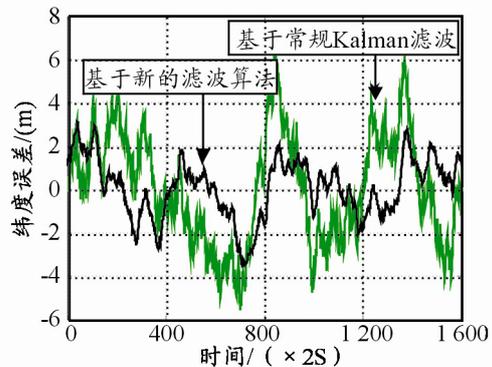


图 5 纬度误差曲线

(下转第 49 页)

(5) 备份指控系统利用共享的信息、情报数据库与成员节点的数据库进行对比、融合, 形成本地指控系统共享态势数据库;

(6) 备份指控系统完成本地态势数据信息管理后, 与上级指挥控制中心进行对比、融合, 形成信息资源的统一管理;

(7) 备份指控系统实施管理、控制、决策, 重组指控系统开始正常工作。

3 结束语

动态重组能力保证了作战指挥信息的畅通, 提高了全武器系统的战场生存能力, 是炮兵指控系统

适应未来网络中心作战条件的根本要求, 必须要加强对炮兵指控系统的动态重组技术的研究, 以促进炮兵指挥控制理论和实践探索的发展。

参考文献:

[1] 李署东, 等. 指挥自动化系统建模与仿真技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.

[2] 殷兴良. 网络化防空反导作战系统设计与演示[G]. 网络化作战技术文集(特辑). 现代防御技术编辑部, 2004.

[3] David S A etc.Understanding Information Age Warfare[M]. Washington DC: CCRP Publication Series, 2001.

[4] 郑相全, 等. 无线移动自组织技术实用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

[5] 陈春. 炮兵指挥自动化[M]. 北京: 解放军出版社, 2000.

(上接第 45 页)

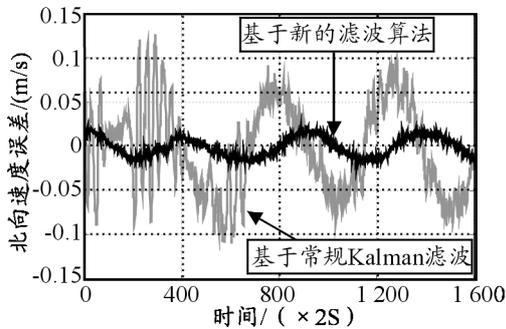


图 6 北向速度误差曲线

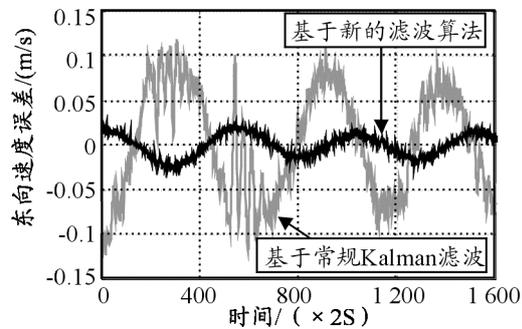


图 7 东向速度误差曲线

从试验结果可以看出, 该方法对各导航参数精度改善很大。为了进一步比较组合导航各导航参数

误差的改善程度, 计算各导航参数误差的均方根如表 1。

表 1 试验结果误差均方根比较

| | 俯仰角 (°) | 横滚角 (°) | 经度误差 (m) | 纬度误差 (m) | 北向速度误差 (m/s) | 东向速度误差 (m/s) |
|--------|------------|------------|-------------|-------------|-----------------|-----------------|
| 新的滤波算法 | 0.191 9 | 0.149 5 | 2.557 5 | 2.368 0 | 0.012 5 | 0.011 1 |
| 常规滤波算法 | 0.335 4 | 0.292 7 | 5.092 | 3.555 7 | 0.058 8 | 0.063 5 |

5 结论

在不增加计算量的数量级的情况下, 在 GPS/SINS 组合导航系统中引入了基于量测多尺度预处理的 Kalman 滤波算法。实验结果表明, 该算法能显著地提高 Kalman 滤波的精度, 达到了预处理的目的。同时, 以上述实验为基础, 加大小波分解的层数, 然后利用重构得到的量测进行信息融合, 各导航参数的误差将会进一步降低, 但会增加计算量, 因此, 在实际应用中, 应该综合考虑二者之间的关系。

参考文献:

[1] 孙德波, 杨功流, 张玉堂. SINS/GPS 组合导航序贯滤波算法[J]. 中国惯性技术学报, 2005, 13(1): 59-64.

[2] Sameh Nassar, Naser EI-Sheimy. Wavelet Analysis For Improving INS and INS/GPS Navigation Accuracy [J]. The Journal of Navigation, 2005, 58(1): 119-134.

[3] Naser EI-Sheimy, Sameh Nassar. Wavelet De-Noising for IMU Alignment [J]. IEEE A&E System, 2004, 40(10): 32-38.

[4] 刘建娟, 徐晓苏, 刘锡祥. 基于小波变换的自适应滤波技术在组合导航系统中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2005, 13(6): 34-28.

[5] 吴富海, 杨元喜. 基于小波阈值自适应滤波的 GPS/SINS 组合导航[J]. 测绘学报, 2007, 36(2): 124-128.

[6] 文成林, 施晨鸣, 潘泉, 等. 信号处理中量测多尺度预处理算法[J]. 河南大学学报, 2000, 30(2): 5-9.

[7] 孙延奎. 小波分析及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

[8] 袁信, 俞济祥, 陈哲. 导航系统[M]. 北京: 航空工业出版社, 1993.