

小波降噪技术的 Loran-C/INS 组合导航技术研究

林雪原¹ 徐宇茹²

(1 海军航空工程学院电子信息工程系,烟台市二马路 188 号,264000)

(2 海军航空工程学院科研部,烟台市二马路 188 号,264000)

摘要:运用小波降噪技术提高 Loran-C 输出的信噪比,并进一步进行组合导航系统的滤波运算。基于实测数据的试验结果证明,采用该技术后,组合系统的各导航参数精度得到了显著的提高。

关键词:小波分析;降噪技术;组合导航

中图法分类号:P228.41; U666.1

卫星定位系统,在许多领域内正发挥着越来越大的作用,但是 GPS 并不是万能的,不能作为惟一的导航系统^[1-3]。以舰艇为例,辅助导航系统除了 GPS 以外,Loran-C 也是一种重要的辅助导航系统^[4],如我国的中远海海洋测绘所用的辅助导航系统就采用了 GPS 与 Loran-C^[5]。而舰艇上所用的主导航系统为惯导系统以及罗经+计程仪^[6],惯导系统主要用于要求定位精度极高的特种舰艇,如导弹核潜艇、靶场测量船、石油勘探船等,而罗经+计程仪主要用于较先进的水面舰艇、远洋运输船和近海作业船等^[6]。

为此,以舰船导航为背景,文献[7]研究了 GPS/Loran-C/Omega/INS 组合导航系统的容错检测方案;文献[8]则研究了 INS/GNSS/Loran-C/航姿系统组合的方案,当 GPS 正常工作时,文献[5]~[8]都采取了 GPS/INS 为主的工作模式;当 GPS 信号质量变坏或中断时,组合导航系统自动切换到 Loran-C/INS 为主的工作模式。

由于 Loran-C 的定位精度相对于 GPS 来说较低,从而导致了 Loran-C/INS 组合系统的精度也较低。一旦 GPS 信号质量变坏或中断不能使用时,如何提高 Loran-C/INS 组合系统的精度是舰船导航迫切需要解决的问题。

1 小波降噪技术的基本原理^[9,10]

小波变换的涵义是,将基本小波 $\psi(t)$ 作位移 τ 后,在不同的尺度 s 下与待分析信号 $x(t)$ 作内积,即

$$WT_x(s, \tau) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-\tau}{s} \right) dt, s > 0 \quad (1)$$

如果一个信号 $f(n)$ 被噪声污染后为 $s(n)$,那么基本的噪声模型就可以表示为:

$$s(n) = f(n) + \sigma \cdot e(n) \quad (2)$$

式中, $e(n)$ 为噪声; σ 称为噪声强度。在最简单的情况下,可以假设 $e(n)$ 为高斯白噪声,且 $\sigma=1$ 。小波变换的目的就是要抑止 $e(n)$ 以恢复 $f(n)$ 。在 $f(n)$ 的分解系数比较稀疏(非零项很少)的情况下,这种方法的效率很高。这种可以分解为稀疏小波系数函数的一个简单例子就是有少数间断点的光滑函数。

在这个噪声模型下,用小波信号对信号降噪的过程如图 1 所示。

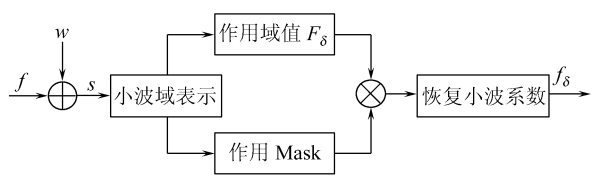


图 1 小波降噪技术的基本原理

Fig. 1 Basic Principle of Wavelet's Reducing Noise Technique

2 基于小波降噪技术的 Loran-C/INS 的组合导航

将小波变换中的降噪理论应用于组合导航的原理图如图 2 所示。由于小波变换是一种全域变换,在在线 Loran-C 降噪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。这种思想实际上是一种窗口思想。

由于试验条件的限制,这里用的 INS 为捷联惯导(SINS)。所选取的组合导航系统状态方程为 SINS 误差方程:

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{F}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{W}(t) \tag{3}$$

为了完整地描述式(3)中的状态向量, $\mathbf{X}(t)$ 应该为 INS 提供的 3 个方向的姿态角、3 个方向的位置信息、3 个方向的速度信息、INS 中 3 个陀螺的一阶马尔可夫过程、INS 中 3 个陀螺的随机常数、INS 中 3 个加速度计的一阶马尔可夫过程,即 18 阶^[11]。目前基于 18 阶状态向量的 INS 与卫星定位的组合导航系统已在工程中得到实际应用。

众所周知,卡尔曼滤波的计算量与状态向量的阶数的 3 次方成正比。由于在图 2 中,在 Loran-C 的后面增加了小波处理这一过程,因此,再采用 18 阶的状态方程势必难以保证该系统的实时性。解决该问题的有效方法是降低系统的阶数,由于该系统用于舰艇,因此,忽略高度通道并对陀螺与加速度计的误差进行简化,取状态向量为 10 阶,即

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

式中,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; δL 、 $\delta \lambda$ 分别代表纬度误差、经度误差; ϵ_{rx} 、 ϵ_{ry} 、 ϵ_{rz} 代表 3 个方向陀螺误差的一阶马尔可夫过程, $\mathbf{F}(t)$ 、 $\mathbf{W}(t)$ 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[11]。而量测方程采用 Loran-C 输出的经度、纬度作为外部观测值^[11],表示如下:

$$\mathbf{Z}(t) = \mathbf{H}\mathbf{X}(t) + \mathbf{V}(t) \tag{4}$$

式中, $\mathbf{H} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$; $\mathbf{V}(t)$ 为量测噪声矩阵。

在图 1 中,考虑到对 Loran-C 采集的为连续信号,因此,采用的小波基为四阶 Daubechies 小波。对于小波分解的层次,应根据信号变化的具体情况和数据采样率进行恰当选择。试验研究表明,当信号波动性较强而数据采样点过稀时,过高的 小波分解层次会对信号确定性的波动现象进行过滤,引起对原始信号恢复的失真。一般情况下,进行 3 层或 4 层分解便可达到理想效果。

去噪时,阈值量化处理的意义在于从高频信息中提取弱小的有用信号,而不至于在消噪过程中将有用的高频特征信号当作噪声信号而消除。阈值的选择有多种,可根据不同的分解目的选择不同的阈值,进行软阈值或硬阈值处理。研究表明,硬阈值处理后的信号比软阈值处理后的信号较为粗糙。因此,在本文中选择 Donoho 所提出的软阈值处理方法^[13]。

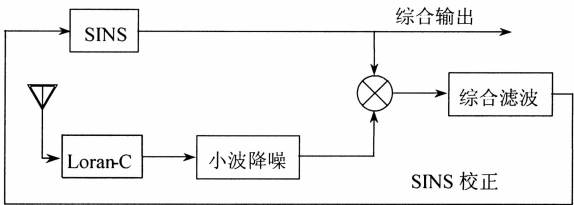


图 2 基于小波降噪的组合导航系统原理图

Fig. 2 Schematic Diagram of Integrated Navigation System Based on Wavelet

3 试验与结论

为了验证上述算法,在某地进行了 1 h 的静态试验,试验所采用的惯导型号为 YH500 的捷联式惯导,其陀螺精度为 0.6°/s,加速度计精度为 $5 \times 10^{-3} g$,数据采集周期为 0.01 s;静态试验时 Loran-C 的数据采集周期为 5 s。试验时,采用当前信息之前的 200 个值作为参考并采用了周期延拓的数据处理方法,经过小波降噪后取第 200 个值作为当前信息。静态试验曲线如图 3 所示,其中细实线代表常规卡尔曼滤波的结果,而粗实线代表应用本文算法得到的结果。

由于状态方程中航向信息的可观测性较弱(静态条件下和地球自转角速率的北向分量耦合),航向角误差呈发散的趋势,在静态时这一趋势的缓急与方位轴向陀螺的漂移大小有关,因此

在下面的试验结果误差曲线中并没有列出航向角误差曲线。

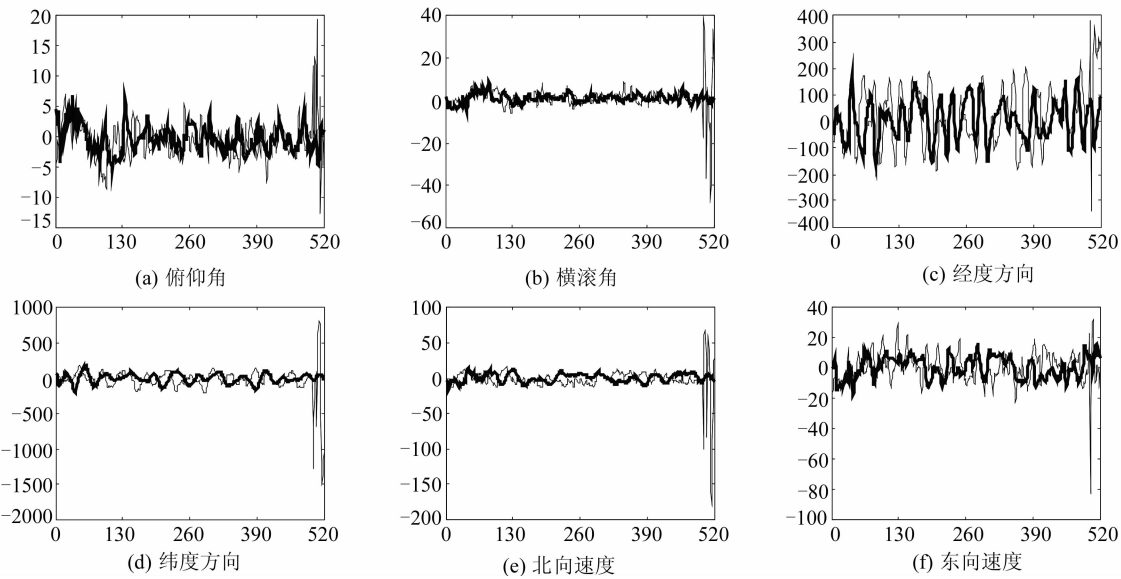


图 3 误差曲线
Fig. 3 Curves of Error

从试验曲线可以看出,在试验最后时刻的短期内 Loran-C 发生定位故障,从而导致在常规滤波中各项导航参数的误差迅速增大;而采用本文提出的算法,Loran-C 经过降噪预处理后故障信息被检测并被消除从而趋向于真实位置附近,最

终使各项组合导航参数的误差趋向于正常值附近。在试验曲线中取前 400 个点作统计分析,得到两种情况下的各项导航参数误差的均方根,如表 1 所示,可以看出本文提出的算法对导航参数精度的改善是非常明显的。

表 1 各项导航参数误差的均方根比较

Tab. 1 RMS Comparison of Each Navigation Parameter Error

	俯仰角/(°)	横滚角/(°)	经度误差/m	纬度误差/m	北向速度误差/m·s ⁻¹	东向速度误差/m·s ⁻¹
有小波	4.006 1	4.870 9	73.951 4	70.185 8	6.218 8	7.331 0
无小波	4.238 9	5.055 4	100.967 5	80.804 6	6.840 7	8.653 7

为了进一步验证本文所提算法在动态试验中的效果,在某海域进行了 1 h 30 min 的动态试验,试验采取的惯导与静态试验时的相同,Loran-C 接收机也相同,不过 Loran-C 接收机的数据采集周期为 2 s,同样采用当前信息之前的 200 个值作为参考。试验中 Loran-C 共发生 3 处短期内的定位故障,任选两处,试验曲线如图 4 所示。在试验中,为了便于比较经过小波降噪后 Loran-C 确定的航迹是否趋向于真实的航迹,同时采集了 GPS

定位的信息,如图中的点画线;虚细线代表 Loran-C 的实际定位结果;而粗实线代表 Loran-C 经过小波降噪后的试验结果,并且变化趋势与 GPS 的基本吻合。

由动态试验曲线可以看出,经过小波降噪后,可以消除 Loran-C 短期内发生的定位故障现象。之所以出现这种情况,是因为本文试验中的小波降噪所采用的为软阈值处理方法,同时对原始数据进行了周期延拓处理以及 Loran-C 短期内发生的定位故障为随机的,使得如果当前信号比阈值大,则软阈值处理方法可以用阈值对信号进行萎缩处理,把该时刻的故障数据去掉或把它的幅度降低到一定的范围^[9]。

同时进行了经过小波降噪处理前后 Loran-C 与 SINS 的组合试验,结果发现试验结果与图 4 的航迹曲线基本重合。因篇幅限制,就不再列出该试验结果曲线。

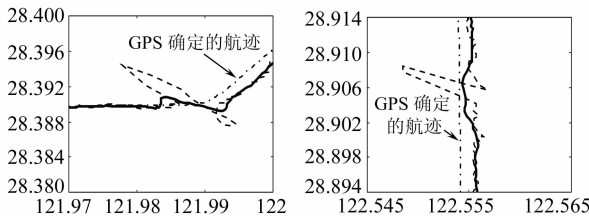


图 4 动态试验对比曲线
Fig. 4 Curves of Dynamic Experiment

从上述试验结果可以得出如下结论:① 本文提出的算法可明显地提高组合系统的定位精度,从而在 GPS 不可用时为提高 Loran-C/INS 组合系统的精度提供了一条有效的途径;② 由于本文试验用的惯导为低精度的捷联惯导,可以预见,如果采用高精度的惯导,则姿态角误差将会大大地降低;③ 该算法具有检测并消除 Loran-C 短期内发生的定位故障的能力;④ 该算法也为提高 GPS/INS 组合系统的定位精度提供了思路;⑤ 经过试验发现,系统可以满足实时性的需求,不存在因为引入小波降噪技术而引起的算法滞后现象。

参 考 文 献

[1] Lechner W, Baumann S. Loran-C/Eurofix Activities in Europe Status and Future Developments[C]. ION GPS 2000, Salt Lake City, 2000

[2] Hwang P, Young R, Marek J, et al. Darrpa Sniper: a Demonstration of Tightly-Coupled GPS/IMU/Loran Integration for Low-Power Portable Applications[C]. ION 55th Annual Meeting, Cambridge, MA, 1999

[3] Peterson B, Hartnett R, Bruckner D, et al. Integrated GPS/Loran, Structures and Issues[C]. ION 54th Annual Meeting, Denver, USA, 1998

[4] 徐力平. 组合导航系统故障检测技术的研究[D]. 上海:上海交通大学,2001

[5] 张崇伟,江汉红,周永余,等. H/HCLZ-I 型中远海测

量组合导航系统[J]. 中国惯性技术学报,1994,2(3):25-32

[6] 程禄. 舰船导航定位系统[M]. 北京:国防工业出版社,1991

[7] McMillan J C, Bird J S, Arden D A G. Techniques for Soft-Failure Detection in a Multi-sensor Integrated System[J]. Journal of The Institute of Navigation, 1993, 40(3): 227-248

[8] 吴美平,胡小平. 惯导/GNSS/罗兰 C/航姿系统组合导航方案[J]. 中国惯性技术学报,2000,8(3): 12-16

[9] 孙延奎. 小波分析及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2005

[10] 董长虹,高志,余啸海. Matlab 小波分析工具箱与原理[M]. 北京:国防工业出版社,2004

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

[12] 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种的应用[J]. 中国惯性技术学报,2005,13(5): 34-28

[13] Donoho D L. De-noising by Soft-Thresholding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41(3): 613-627

第一作者简介:林雪原,博士,副教授,现从事数据融合、雷达定位、捷联惯性以及组合导航系统的研究。
E-mail:linxy_ytcn@126.com

Technique and Experiment of Loran-C /SINS Integrated Navigation
Based on Wavelet’s Reducing Noise Technique

LIN Xueyuan¹ XU Yuru²

(1 Department of Electronic and Information Engineering, Naval Aeronautical Engineering Institute, 188 Erma Road, Yantai 264001, China)

(2 Department of Scientific Research, Naval Aeronautical Engineering Institute, 188 Erma Road, Yantai 264001, China)

Abstract: Now Loran-C is one of important navigation equipments in ship, and Loran-C/INS integrated system plays an important role in naval ship in special period. In order to increase the integrated system’s precision, the wavelet’s reducing noise technique is introduced into Loran-C/INS integrated system to increase the signal-noise ratio of Loran-C, and then into Kalman filter, the dynamic and static experiment results based on practically measured data show that this method can obviously increases every navigation parameter’s precision, and can remove the position fault of Loran-C in a short time.

Key words: wavelet analysis; reducing noise technique; integrated navigation

About the first author: LIN Xueyuan, doctor, associate professor. He majors in data fusion, radar position, inertial technology and integrated navigation system.
E-mail: linxy_ytcn@126.com