文章编号:1674-7070(2011)01-0067-05

基于平移不变小波变换的多普勒速度声纳输出信号处理

王其[1]　杨常松[1]

摘要

针对水下航行器组合导航系统所使用的多普勒速度声纳输出信号的特点,采用了平移不变小波变换的多分辨率分析的方法,利用 Daubechies 小波函数,采用了半软阈值去噪的方法,能够在低信噪比的情况下准确地估计多普勒声纳的频移,从含有噪声的多普勒输出信号中提取出原始信号. 通过仿真实验表明:采用 4 层小波分解,算法计算量减小,有效地消除多普勒噪声,从而提高水下组合导航系统的精度.

关键词

水下航行器组合导航;多普勒速度声纳;半软阈值滤波

中图分类号 U666.1

文献标志码 A

0　引言

在 21 世纪,人类将越来越多地向海洋索取物质资源和生存空间,探索海洋和开发海洋将成为人类的主要生产活动,而水下潜器将成为人类在这一生产活动中的重要工具和得力助手. 由于水下航行器的活动范围广、体积小、重量轻、噪音低、隐蔽性好,因此在军事上是一种有效的水中兵器,装载战斗部队后可以进行远距离投送,侦查对方水下设施等. 水下航行器组合导航系统中,捷联惯性导航系统/多普勒速度声纳/电子磁罗经常用来构成组合导航系统,本文就是依据此组合导航方式进行分析研究的.

1　多普勒速度声纳工作原理

声纳与目标间的相对运动会使接受信号波形发生变化,表现为信号频率的偏移,称为多普勒频移现象. 多普勒计程仪就是依据这一原理进行速度测量的. 发射声纳信号时,经海底反射回的信号的频率f不仅与发射信号的频率有关,还与声纳与目标的相对运动速度 V 有关. 关系式如下[1-2]:

$$f = \left(\frac{c + V}{c - V}\right) f_0. \tag{1}$$

式(1)中:c 为声波在水中的传播速度;V 为目标与观察者的相对径向运动速度,且相对运动时,其符号为正;f_0 为声源发射信号频率.

由式(1)可以看出,观察者接收到的声波频率与声源的频率、声源与目标的相对运动速度之间有着一定的关系. 因此,可以想象,当观察者接收到声波频率时,便可以求出目标与观察者的相对运动速度,这便是多普勒计程仪最初的设计思想. 图 1 描述了最简单的多普勒计程仪——单向单波束多普勒计程仪.

设在船底安装收发公用换能器,船向前以速度 V 相对于海底航行. 换能器的一个笔形波束以俯角 α 向下发射声波,照射到海底. 发射信号的频率为 f_0. 在声信号达到海底经反射返回接收基阵的传播时间 t 内,船将移动 Vt,此时回波入射角为 α_1,由于 $V \ll c$,可近似为 $\alpha = \alpha_1$,则可知接收到的回波信号频率为

$$f = \left(\frac{c + V\cos\alpha}{c - V\cos\alpha}\right) f_0. \tag{2}$$

收稿日期 2010-07-26

资助项目 南京信息工程大学科研基金(S811-0045001);国家自然科学基金(61004001)

作者简介

王其,男,博士,主要研究精密气象仪器及导航、制导与控制. wangqi@nuist.edu.cn.

1　南京信息工程大学　信息与控制学院,南京,210044

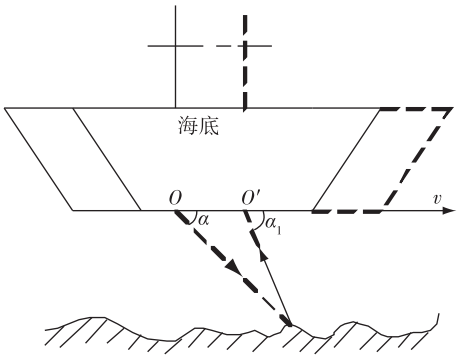


图 1　单向单波束多普勒计程仪原理

Fig. 1　Principle of single direction Doppler velocity log with one beam

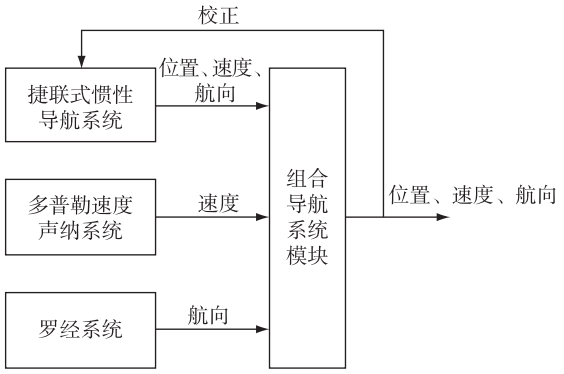


图 2　组合导航系统原理

Fig. 2　Block diagram of integrated navigation system

将式(2)按照泰勒级数展开,并舍去高次项,可得

$$f_d = f_1 - f_0 = \frac{2Vf_0}{c}\cos\alpha. \tag{3}$$

其中 f_d 称为多普勒频偏. 式(3)中 f_0、c、α 均为已知数,只需测得 f_d,即可得到船速 V.

在实际多普勒测速导航系统中,经常采用的是詹纳斯配置[3-4]. 詹纳斯配置有助于减小测速误差,采用詹纳斯配置的多普勒计程仪可以分别测出两个速度 V_x 和 V_y. 在本文的应用中,需要测量船首尾向以及横向的移动速度,故分别在左右船舷方向和首尾方向按詹纳斯配置各装有一对换能器,构成了四波束詹纳斯配置,给出了两个速度 V_x、V_y. 由于水下航行器在水下航行的过程中受到摇摆、海流、海水温度、盐度以及多普勒系统本身的频移量等因素的影响,使得多普勒声纳系统输出信号中不可避免地受到噪声的污染,可以使用小波变换的滤波方法对受污染的多普勒速度声纳信号进行处理,消除噪声的影响,提高多普勒速度声纳的输出信号的精度.

2　捷联惯性组合导航系统

组合导航系统使用多普勒速度声纳测量水下航行器相对于海底的航行速度,在组合捷联式惯性导航系统中,利用多普勒速度信息和电子磁罗经的航向角信息进行组合,这就要求多普勒提供的速度信息需要足够的精度,从而可以有效地减小捷联系统随着时间的增长而引起的误差[5]. 图 2 所示为组合导航系统的原理.

3　信号多尺度小波分解

小波变换是一个时间和频率的局域变换,能有效地从信号中提取信息,通过伸缩和平移等运算功能对函数或者信号进行多尺度分析. 在不同尺度下分析品质因数,即中心频率与带宽的比值能够保持不变. 当分解尺度较大时,滤波器的中心频率移向低频端,且带宽也随之减小,反映了信号的低频成分;反之,当分解尺度值较小时,滤波器的中心频率移向高频端,且带宽也随之增加,反映了信号的高频部分. 此多尺度分析是小波变换的联系工程应用的重要方面.

小波分析基本原理如下.

设 $\psi(t) \in L^2(\mathbf{R})$,其 Fourier 变换为 $\hat{\psi}(\omega)$,当 $\hat{\psi}(\omega)$ 满足允许条件,即 $C_\psi = \int_{\mathbf{R}} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|}{\omega} d\omega < \infty$ 时,称 $\psi(t)$ 为一个基本小波,其中 ω 为频率. 基本小波 $\psi(t)$ 经尺度伸缩和平移后,就可以得到一个小波序列[6-7].

对于连续情况,小波序列为

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a,b \in \mathbf{R}, \quad a \neq 0. \tag{4}$$

其中,a 为伸缩因子,b 为平移因子. 小波变换时一种信号的时间-频率分析方法,在不同尺度值下分析的品质因数,即带宽与中心频率的比值能够保持不变. 当 a 较大的时候,滤波器的中心频率移向低端,且带宽也随之减小,反映了信号的低频部分;反之,当 a 较小时,滤波器的中心频率移向高频端,且带宽随之增加,反映了信号的高频部分,此称为小波变换的变焦特性,又称为多分辨率分析. 多分辨率分析也是小波变换联系工程应用的重要方面[8-10].

对于 $L^2(\mathbf{R})$ 空间的函数 $x(t)$ 在小波基下进行展开,则称为函数 $x(t)$ 的连续小波变换(CWT),表达式为

$$WT_x(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}}\int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\,\overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)}\mathrm{d}t. \quad (5)$$

在实际应用中,为了方便用计算机进行分析、处理,经常使用二进小波和二进小波变换. 二进小波函数定义为 $\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2}\psi(2^{-j}t-k)$, $j,k \in \mathbf{Z}$. 对信号 $x(t)$ 的离散小波变换(DWT)定义为

$$WT_x(j,k) = 2^{-j/2}\int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\,\overline{\psi(2^{-j}t-k)}\mathrm{d}t. \quad (6)$$

另外,为了减少连续小波变换的冗余度以及为了计算的方便,必须实现小波变换时对参数进行离散化. Mallat 算法是离散小波变换的一种快速的算法,在工程中应用得最广泛. Mallat 算法的实质是对于 $L^2(\mathbf{R})$ 空间上的任意信号 f,由于信号的分辨率是有限的,按最大尺度 N 度可以分解为分辨率为 2^{-N} 的低频部分和分辨率为 $2^{-j}(j=1,2,\cdots,N)$ 的高频部分,并可以由它们进行完全重构. 多分辨率分析只对分解的低频部分进行进一步分解,而对高频部分不予考虑. Mallat 算法体现了小波的多分辨率分析性质,当尺度较小时,时间分辨率较高,适于分析高频信号;尺度较大时,频率分辨率较高,适于分析低频信号. 离散序列的正交小波变换如图 3 所示.

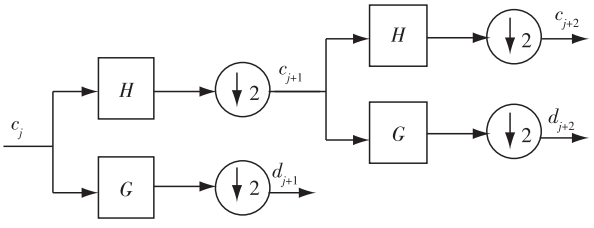


图 3　离散序列的正交小波变换

Fig. 3　Orthogonal wavelet transform of discrete series

4　仿真实验分析

仿真分析时,多普勒速度声纳的带宽为 400 Hz,信号的发射频率为 1 000 Hz,考虑水下航行器的摇摆振动,风浪以及背景噪声的因素,计算机仿真产生了多普勒速度声纳系统的一组原始信号,并利用紧支集规范正交小波 Db4 小波信号,对其进行分析. 多普勒速度声纳原始信号如图 4 所示.

多普勒速度声纳的小波消噪效果如图 5—7 所示. 在尺度 4 下的效果已经能够满足对于多普勒声纳系统的要求,大部分的噪声已被消除,得到了比较干净的多普勒速度声纳信号,如果小波的分解尺度继续增加,整体的滤波效果提高得不明显,而且计算量急剧增加,故仿真实验中选择尺度 4 为分解最大尺度.

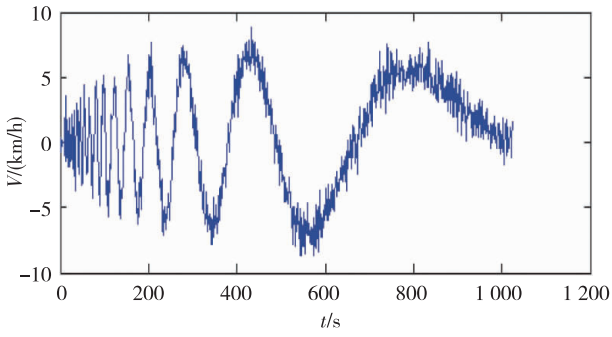


图 4　多普勒速度声纳原始输出信号

Fig. 4　Output signal of Doppler velocity sonar

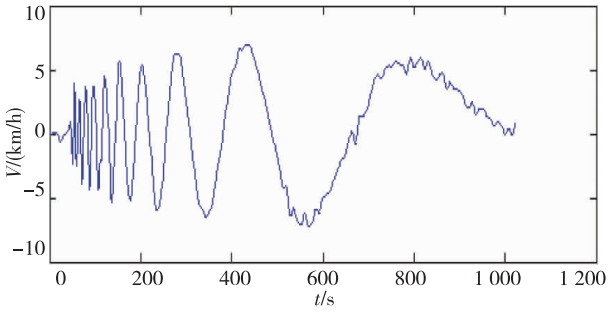


图 5　多普勒速度声纳 3 尺度小波滤波后信号

Fig. 5　Filtered Doppler signal after 3 scales wavelet decomposition

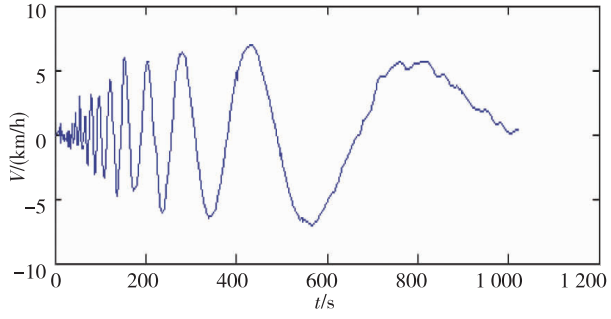


图 6　多普勒速度声纳 4 尺度小波滤波后信号

Fig. 6　Filtered Doppler signal after 4 scales wavelet decomposition

对于捷联式惯性组合导航系统中引入的外部速度信息,分别考虑了原始的多普勒速度信息造成的系统位置误差和经过小波消噪后多普勒速度造成的系统位置误差的对比如图 8 和 9 所示.

从图 8 和 9 可以看出:经过小波变换滤波以后的多普勒速度声纳的速度信息大大降低了捷联/多

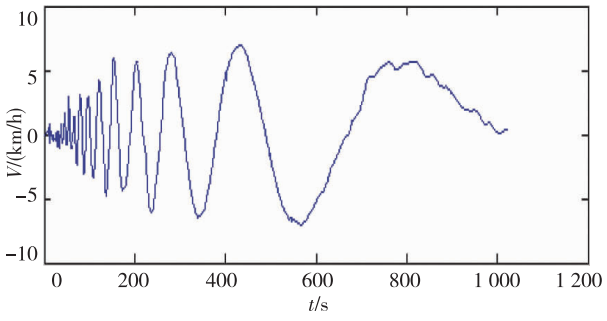


图 7　多普勒速度声纳 5 尺度小波滤波后信号

Fig. 7　Filtered Doppler signal after 5 scales wavelet decomposition

普勒速度声纳组合导航系统的位置误差,有效地提高了组合导航系统的导航定位精度.

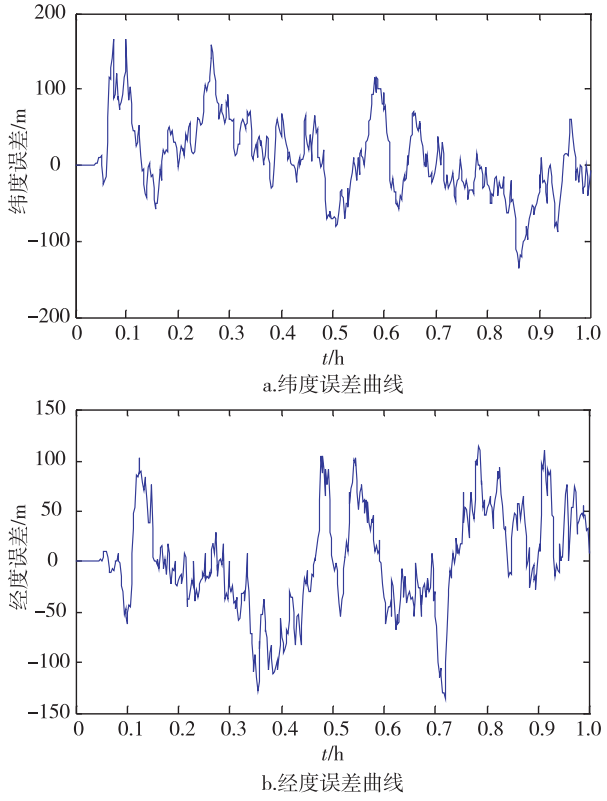


图 8　多普勒速度声纳滤波前纬度、经度误差曲线

Fig. 8　Latitudinal and Longitudinal error diagram before filtering

5　结论

针对水下组合导航定位的特殊使用环境,基于捷联/多普勒速度声纳/电子磁罗经组合导航系统,对多普勒速度声纳输出信号信噪比低的情况,采用了小波变换的滤波方法对多普勒速度声纳输出信号

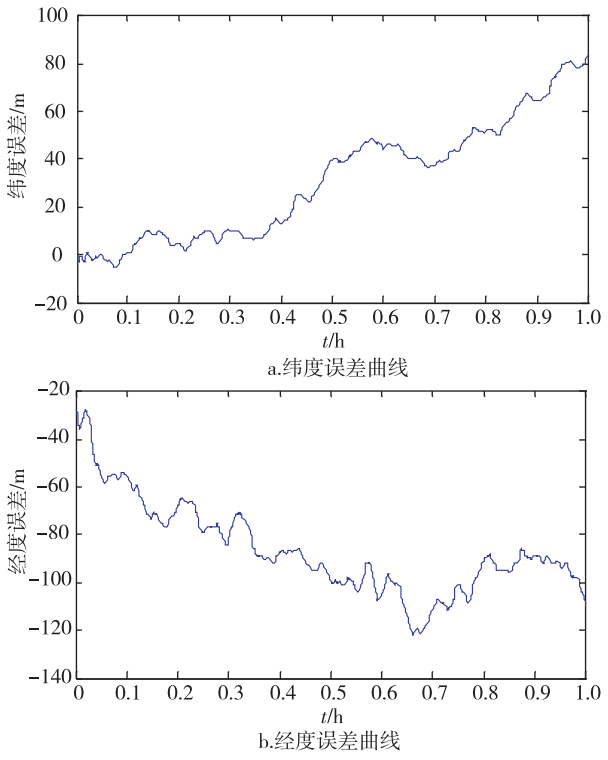


图 9　多普勒速度声纳滤波后纬度、经度误差曲线

Fig. 9　Latitudinal and Longitudinal error diagram after filtering

进行滤波,得到重建后的多普勒速度声纳信号,可以有效地消除多普勒速度误差信号,从而提高了组合导航系统的精度.

参考文献

References

[1] 郭业才,丁雪洁. 正交小波变换和时间分集联合盲均衡算法[J]. 南京信息工程大学学报:自然科学版,2010,2(1):1-5
GUO Yecai, DING Xuejie. The orthogonal wavelet transform and time diversity combined blind equalization algorithm[J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology: Natural Science Edition, 2010, 2(1): 1-5

[2] 文学志,郑钰辉,赵英男,等. 一种基于不平衡样本集的摩托车识别算法[J]. 南京信息工程大学学报:自然科学版,2010,2(2):118-123
WEN Xuezhi, ZHENG Yuhui, ZHAO Yingnan, et al. An algorithm based on imbalanced data sets for motorcycle recognition[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology: Natural Science Edition, 2010, 2(2): 118-123

[3] Guo J C, Teng J F, Li Q, et al. The de-noising of gyro signals by bi-orthogonal wavelet transform[C]// Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2003: 1985-1988

[4] Phoony S M,Kim C W,Vaidyanathan P P,et al. A new class of two-channel biorthogonal filter banks and wavelet bases[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,1995,43(3):649-665

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

[6] Tang Y Y,Yang L H,Liu J M. Characterization of dirac-structure edges with wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Systems,Mman and Cybernetics-Part B:Cybernetics,2000,30(1):93-109

[7] Xie R S,Sun E. Strapdown gyro signal filtering method based on wavelets[J]. Journal of Harbin University of Engineering,2001,22(3):2074-2080

[8] 高勇,黄振,陆建华. 基于小波变换的 MDPSK 信号盲解调算法[J]. 清华大学学报:自然科学版,2009,49(8):1172-1175
GAO Yong,HUANG Zhen,LU Jianhua. Blind demodulation algorithm for MDPSK signals based on wavelet transforms[J]. Journal of Tsinghua University:Science and Technology,2009,49(8):1172-1175

[9] Magin R L,Abdullah O,Baleanu D,et al. Anomalous diffusion expressed through fractional order differential operators in the Bloch_Torrey equation[J]. Journal of Magnetic Resonance,2008,190(2):255-270

[10] Dinç E,Baleanu D. A review on the wavelet transform applications in analytical chemistry[J]. Mathematical Methods in Engineering,2007,20(3):265-284

Signal processing of Doppler velocity sonar based on translation invariant discrete wavelet transform

WANG Qi[1] YANG Changsong[1]

1 School of Information and Cybernetics,Nanjing University of Information Science & Technology,Nanjing 210044

Abstract According to the characteristics of Doppler velocity sonar of underwater vehicle integrated navigation system,a novel method of multi-resolution analysis based on translation invariant discrete wavelet transform was proposed. Doppler frequency drift can be accurately estimated under low signal/noise ratio with semi-soft threshold filtering using Daubechies wavelet function. The original signal can then be acquired from the composite signal. Simulation experiments show that 4 wavelets deposition method improves the filtering effect greatly with calculation quantity reduction,and the Doppler noise can be eliminated efficiently with the wavelet transform method,thus improve the navigation accuracy of underwater vehicle integrated navigation system.

Key words underwater vehicle integrated navigation;Doppler velocity sonar;semi-soft threshold filtering