

一种用于光纤陀螺信号滤波的 AMA-DWT-DMKF 算法

高伟伟¹ 王广龙¹ 张春熹² 陈建辉¹ 高凤岐¹

(¹ 军械工程学院 纳米技术与微系统实验室, 河北 石家庄 050003)
(² 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要 为解决光纤陀螺(FOG)信号滤波过程中噪声抑制与信号跟踪的矛盾,提出了一种自适应滑动平均离散小波变换——双模式卡尔曼滤波(AMA-DWT-DMKF)算法,利用 AMA 算法将 FOG 输出信号划分为信号过渡区域和稳定区域,并融合 DWT 算法和基于不同过程噪声方差 Q /测量噪声方差 R 比条件下 Kalman 滤波算法的优势特性,对 AMA 算法判定结果进行针对性滤波。采用 AMA-DWT-DMKF 算法对 FOG 静态信号、扰动信号以及变化的速率信号进行滤波,实验结果表明,所提算法在保证较高噪声抑制能力的同时,具有较好的信号跟踪能力。

关键词 光通信;光纤陀螺;信号滤波;自适应滑动平均;信号跟踪

中图分类号 TP253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0605004

An AMA-DWT-DMKF Method for Fiber Optic Gyroscope Signal Filtering

Gao Weiwei¹ Wang Guanglong¹ Zhang Chunxi² Chen Jianhui¹ Gao Fengqi¹

¹ Nanotechnology and Microsystems Laboratory, Ordnance Engineering College,

Shijiazhuang, Hebei 050003, China

² School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and

Astronautics, Beijing 100191, China

Abstract In order to solve the contradiction between noise suppression and signal tracking in filtering for fiber optic gyroscope (FOG), a method as AMA-DWT-DMKF is proposed. Using the AMA algorithm, FOG output signal is divided into a signal transition region and a stability region, and combining the advantages of two algorithms such as DWT and Kalman with different Q/R values, in the end giving a targeted filtering for the results of the AMA algorithm. The proposed method is used for denoising the static signal, disturbance signal and the change rate signal. Experimental results show that the proposed algorithm not only has higher denoising capability, but also has a better signal tracking capability.

Key words optical communications; fiber optic gyroscope; signal filtering; adaptive moving average; signal tracking

OCIS codes 060.2370; 060.2800; 120.7280; 120.6780

1 引 言

随机漂移是影响光纤陀螺(FOG)精度的一个重要因素,由于电路噪声、光路噪声及环境噪声的影响,会造成陀螺输出信号的随机漂移^[1-3]。为抑制 FOG 随机漂移对导航系统性能的影响,需要选择合适的滤波算法对随机噪声进行抑制,得到信噪比更高的信号。判断信号滤波算法性能的好坏主要基于

两点考虑:抑制噪声的能力和对真值信号的跟踪能力^[4-9]。通常采用 FOG 的随机漂移模型与 Kalman 滤波方法相结合的方法对 FOG 的输出数据进行滤波,如基于自回归(AR)或自回归滑动平均模型(ARMA)的 Kalman 滤波方法,这些方法是基于信号平稳性的假设提出的,且随机漂移模型是固定的,在实际应用中过程噪声方差值 Q 、测量噪声方差值

收稿日期: 2013-12-05; 收到修改稿日期: 2013-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(50875015)

作者简介: 高伟伟(1986—),男,博士研究生,主要从事光纤陀螺惯性导航系统方面的研究。

E-mail: weiweizhiwa@126.com

导师简介: 王广龙(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事测试性分析和故障诊断等方面的研究。

E-mail: glwang2005@163.com

R 的选择至关重要,不同的 Q, R 值会产生不同的滤波效果^[10-11]。因此,如何根据信号的变化特点选择合理的 Q, R 值成为滤波过程中需要解决的关键问题。此外,在 FOG 信号滤波中,离散小波变换(DWT)也得到广泛的应用,但动态条件下 DWT 算法在有效抑制噪声的同时对信号跟踪的能力较弱,不适用于应用在实时性要求较高的场合^[12-13]。基于 ARMA 的 Kalman 滤波算法与 DWT 算法对恒定输入条件下的 FOG 输出噪声的抑制效果明显,但在动态条件下,无法根据信号的变化对相关参数进行调整,以实现 FOG 输出信号的自适应滤波,其根本原因在于:在 FOG 信号过渡区域两种算法在噪声抑制和信号跟踪方面不能兼顾。为解决这一问题,本文提出了一种自适应滑动平均离散小波变换、双模式卡尔曼滤波(AMA-DWT-DMKF)算法,通过 AMA 算法检测 FOG 输出信号的过渡区域,并根据过渡区域 DWT 算法和基于 ARMA 的 Kalman 滤波算法的滤波特性选择合理的方法进行滤波,在保证最大程度抑制噪声的同时,提高了对信号的跟踪能力。

2 FOG 信号过渡区域的定义

设初始条件下 FOG 输入角速率为定值 ω_0 ,此时输出信号围绕在 ω_0 附近发生小幅波动,当输入角速率变为 $\omega_0 + \Delta\omega$ 时,FOG 输出信号在另一定值 $\omega_0 + \Delta\omega$ 附近变化;在对 FOG 输出信号进行滤波过程中,恒定输出区域的滤波信号稳定,称此区域为稳定区,在信号变化前后部分区域,滤波输出信号不在围绕真值稳定变化,出现噪声抑制不明显、跟踪能力不佳等现象,称此区域为过渡区,过渡区域示意图如图 1 所示。

由于实际信号滤波过程中,FOG 信号输出处于

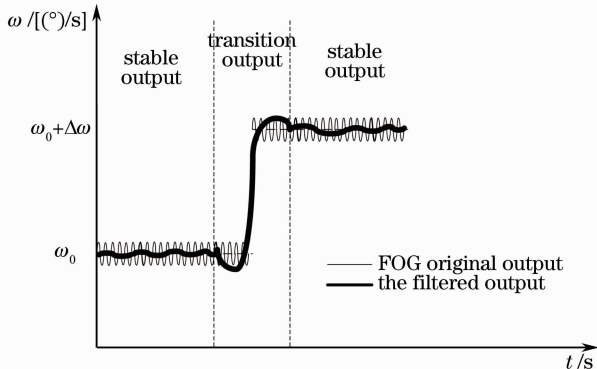


图 1 过渡区域示意图

Fig. 1 Schematic of transition region

不断的变化当中,因此研究并解决过渡区域 FOG 信号滤波的有效方法有更现实的意义。

3 自适应滑动平均算法

自适应滑动平均算法通过比较信号的样本方差与设定阈值的大小来检测信号的过渡位置^[14]。自适应滑动平均是基于滑动平均方法实现的,滑动平均方法基本公式如下:

$$y_i = \frac{1}{2q+1} \sum_{j=-q}^q x_{i+j}, \quad (1)$$

式中 x 代表输入数据, $2q+1$ 表示滑动平均窗的长度, y 代表输出数据。通过将输出作为下一次迭代的输入,滑动平均过程可通过迭代方式实现。自适应滤波也可如以上过程通过一定的迭代方式实现。若 $Z(t)$ 代表最终迭代的输出信号, $D(t)$ 代表对 $Z(t)$ 进行差分运算后的绝对值, $D'(t)$ 代表 $D(t)$ 的变化率。则

$$D(t) = |Z(t+q) - Z(t-q)|, \quad (2)$$

$$D'(t) = D(t+1) - D(t), \quad (3)$$

适应滑动平均滤波输出的计算如下:

$$Y_t = \frac{1}{q_H(t) + q_T(t)} \sum_{i=-q_T(t)}^{q_H(t)} x_{t+i}, \quad (4)$$

式中

$$q_H(t) = \begin{cases} q, & D'(t) < 0 \\ f[D(t)]q, & D'(t) \geq 0 \end{cases}, \quad (5)$$

$$q_T(t) = \begin{cases} q, & D'(t) > 0 \\ f[D(t)]q, & D'(t) \leq 0 \end{cases}, \quad (6)$$

$$f[D(t)] = 1 - \frac{D(t)}{\max[D(t)]}, \quad (7)$$

式中 q 为滑动平均参数, Y_t 代表采用自适应滑动平均方法对 $2q+1$ 个样本进行处理后的结果。相比基本的滑动平均方法采用固定的 q 值进行运算,通过引入 q_T 和 q_H 便于根据信号的变化特点决定滑动平均的样本个数,提高算法的自适应能力。通过比较 Y_t 的样本方差和设定阈值 λ , 自适应滑动平均算法可用于检测信号的过渡区域^[15]。样本的方差可定义为

$$\hat{\delta}_t^2 = \frac{\sum_{i=-q_T}^{q_H} (Y_i - \bar{Y}_t)^2}{q_T + q_H}. \quad (8)$$

4 AMA-DWT-DMKF 算法

在研究基于 ARMA 的 Kalman 滤波算法过程中,发现在其他条件一定的条件下,选择不同的 Q, R 值所得到的滤波结果呈现不同的特性,当 Q/R 比较大时(KF_1),滤波输出信号过渡区域较窄,对原始

信号的跟踪性能较好,但对随机噪声的抑制效果较差;当 Q/R 比较小时(KF_2),滤波输出信号过渡区域较宽,在原始信号变化前的区域对随机噪声的抑制效果明显,但在原始信号变化后的区域出现了较大的延迟,信号的跟踪性能较差;两种算法的综合应用称之为双模 Kalman 滤波算法(DMKF)。DWT 算法滤波输出过渡区域宽度介于两者之间,在原始数据变化前后位置均出现噪声抑制效果变差的现象,但在原始信号变化后的区域收敛速度较快,呈现较强的噪声抑制效果。综合以上分析,提出一种 AMA-DWT-DMKF 算法,通过 AMA 算法检测并划定过渡区域,在过渡区域前段采用 KF_2 算法对随机噪声进行有效抑制,在过渡区域中段采用 KF_1 算法对原始信号进行快速跟踪,在过渡区域末段采用 DWT 算法抑制随机噪声。鉴于 KF_2 算法在稳定区域较强的噪声抑制能力,FOG 输出信号的稳定区域选择 KF_2 算法。

AMA-DWT-DMKF 算法的具体实现步骤如下:

- 1) 将处理信号划分为多帧数据,每一帧数据包含样本数为 N (如 $N=4096$);
- 2) 顺序读取一帧数据,采用 AMA 算法获取第 $(2q+1)$ 至第 $(N-2q-1)$ 的样本方差 $\hat{\delta}_i^2$;
- 3) 计算阈值 λ ,取当前帧数据的样本方差均值

作为指数分布的期望值, λ 取指数分布的 95% 上尾值,即假设有 100 个按升序排列指数分布值,取第 95 个值作为阈值。

4) 获取所有不连续点 τ_i ,且满足 $\tau_i = (t|\hat{\delta}_i^2 > \lambda, t = 2q+1, 2q+2, \dots, N-2q-1$;

5) 若计算得到的不连续点数小于 1,说明在当前信号帧中不存在不连续点,对当前帧信号进行 KF_2 滤波,并返回步骤 2) 步对下一帧信号进行处理,否则,进入步骤 6);

6) 若当前帧数据中检测到不连续点,如 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_i, \dots, \tau_n (n < N-2q-1)$,分别对个各不连续点进行定位,将 $(\tau_i, \tau_i + \sigma_1)$ 区间数据定义为过渡区域中段数据, $(\tau_i + \sigma_1, \tau_i + \sigma_1 + \sigma_2)$ 区间数据定义为过渡区域后段数据,对中段数据采用 KF_1 算法滤波,对后段数据采用 DWT 算法滤波,其余区域采用 KF_2 算法滤波;

7) 判断是否有未处理帧数据,若有则返回步骤 2),若无则停止计算,并退出循环。

5 实验分析

5.1 静态滤波实验

将一 FOG 惯组置于大理石平台上,对一轴向指向西的 FOG 信号进行静态采集,采样时间为 100 ms,

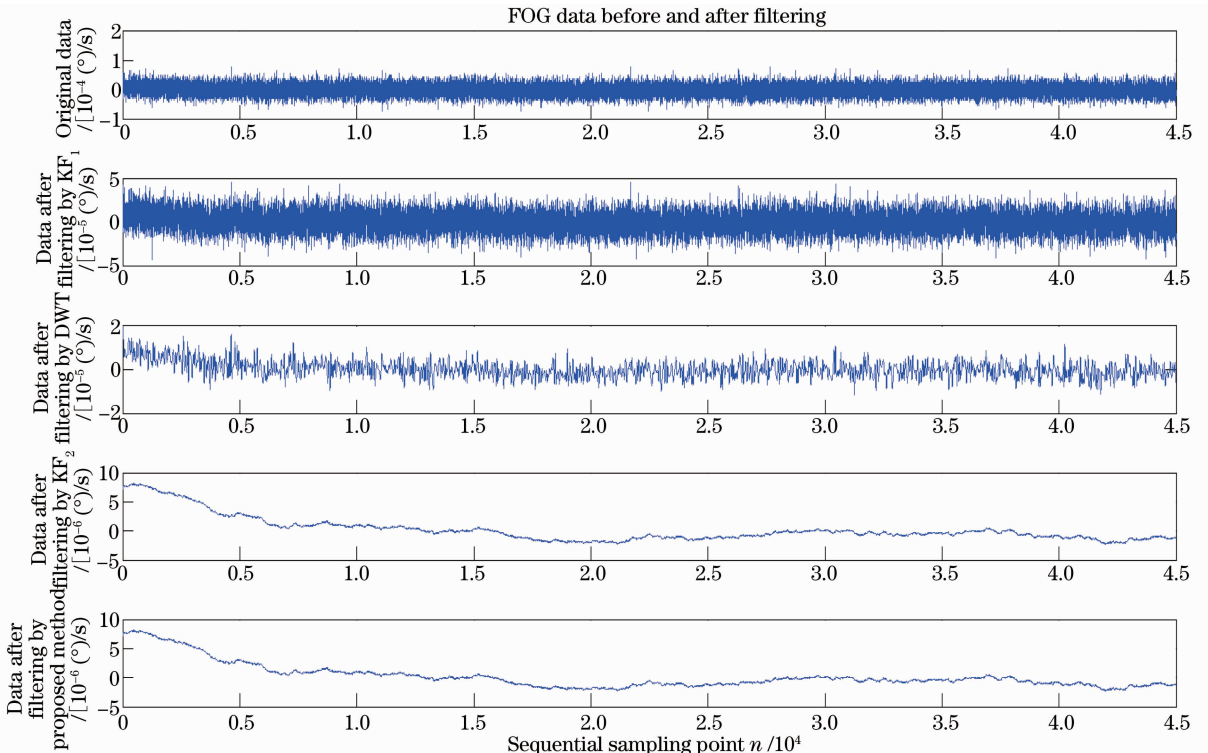


图 2 静态滤波实验结果

Fig. 2 Filtering results of FOG static data

采集时间为 4500 s。分别采用 KF_1 算法、DWT 算法、 KF_2 算法以及 AMA-DWT-DMKF 算法对 FOG 静态信号进行滤波,得到结果如图 2 所示。

从图 2 中可看出, KF_1 算法抑制噪声能力较差,相比 KF_1 算法,DWT 算法噪声抑制效果有明显提

高,由于 FOG 静态信号不存在过渡区域, KF_2 算法和 AMA-DWT-DMKF 算法处理结果重叠,在抑制噪声方面均比 KF_1 算法和 DWT 算法效果明显。对静态滤波实验数据的零偏稳定性(BI)进行分析,得到结果如表 1 所示。

表 1 静态滤波前后零偏稳定性

Table 1 BI value around static filtering

| FOG data | Raw | KF_1 | DWT | KF_2 | AMA-DWT-DMKF |
|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------------|
| BI / [$10^{-6} (^{\circ})/s$] | 18.415 | 10.586 | 6.6244 | 2.2088 | 2.2088 |

分析表 1 的数据,可发现 AMA-DWT-DMKF 算法和 KF_2 算法滤波得到的 BI 数值最小,比原始数据的 BI 提高了将近一个数量级,比 KF_1 滤波结果的 BI 提高了 79.1%,比 DWT 滤波结果的 BI 提高了 66.7%。

5.2 扰动滤波实验

在实际应用中,振动干扰和人为干扰是影响 FOG 输出的重要因素,因此研究振动和人为干扰条

件下的信号滤波方法具有实际意义。将 FOG 惯组固定于一车体内,对 FOG 加入扰动干扰,主要分为三个阶段:振动干扰阶段、人为干扰阶段以及振动与人为干扰叠加阶段。振动干扰的添加主要通过开动发动机实现,人为干扰主要通过上车、下车,在车体内进行来回走动的方式实现。对上述条件下的一 FOG 输出信号进行滤波实验,得到结果如图 3 所示。

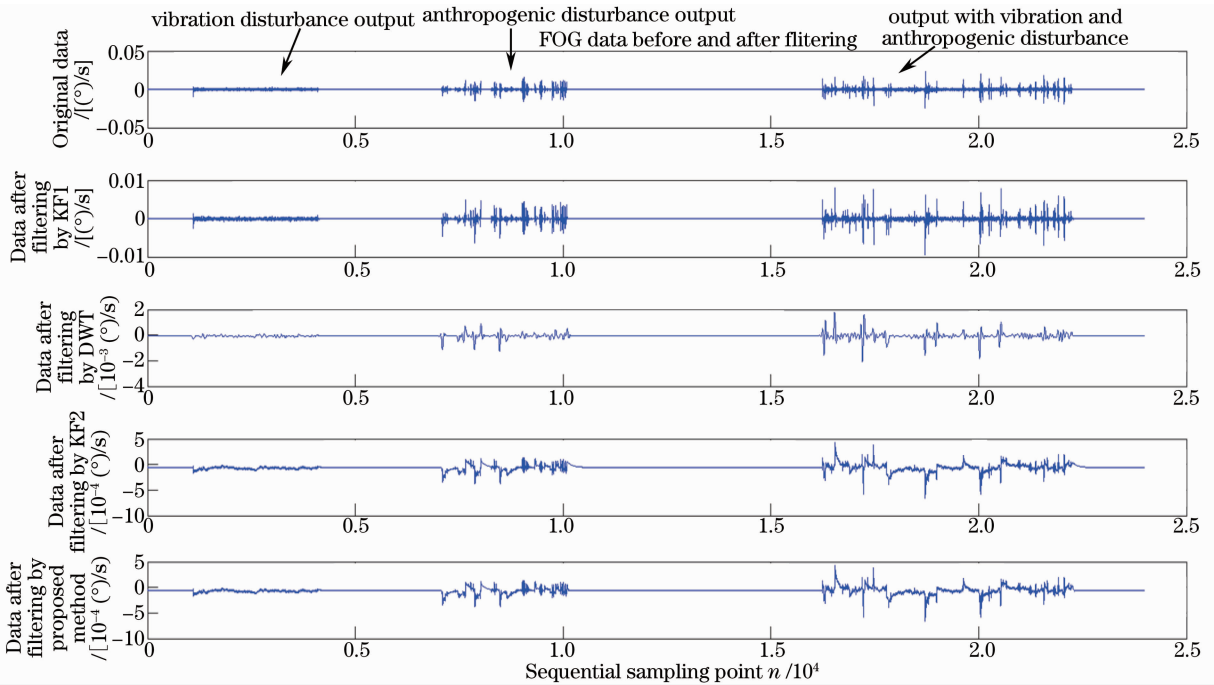


图 3 扰动滤波实验结果

Fig. 3 Disturbance filtering results

从图中可看出, KF_1 算法抑制噪声的能力有限,DWT 算法抑制噪声的效果仅次于 KF_2 算法和 AMA-DWT-DMKF 算法,AMA-DWT-DMKF 算法滤波效果最好。在对过渡区域判定阈值选择较大的条件下,AMA-DWT-DMKF 算法与 KF_2 算法滤波结果基本重合,最大限度的抑制了振动与人为干扰对 FOG 输出信号的影响。对扰动滤波实验数据的 BI 进行分析,得到结果如表 2 所示。

分析表 2 数据,可得出 AMA-DWT-DMKF 算法在扰动条件下对 FOG 数据进行滤波,得到的 BI 数值最低,不论是在扰动前的静态输出、振动扰动输出、人为扰动输出,还是在叠加扰动条件下的输出均表现出最好的 BI。其中,总体输出的 BI 比 KF_1 输出提高了 1 个数量级,比 DWT 输出提高了 48.0%,比 KF_2 输出提高了 0.33%。

表 2 扰动滤波前后零偏稳定性[单位: $10^{-5} (^{\circ})/s$]Table 2 BI value around the disturbance filter [unit: $10^{-5} (^{\circ})/s$]

| FOG data | Raw | KF ₁ | DWT | KF ₂ | AMA-DWT-DMKF |
|-----------------------------------|--------|-----------------|---------|-----------------|--------------|
| Overall output | 150 | 52.543 | 9.6832 | 5.0496 | 5.0329 |
| Static output | 6.3014 | 1.9622 | 0.46213 | 0.25032 | 0.24932 |
| Vibration output | 68.269 | 20.332 | 3.3426 | 1.9858 | 1.9736 |
| Anthropogenic interference output | 260 | 83.602 | 9.7302 | 6.8070 | 6.7331 |
| Superimposed interference output | 210 | 75.517 | 12.0359 | 7.9095 | 7.9006 |

5.3 动态滤波实验

为使滤波实验更贴近实际,采用三轴转台对 FOG 惯组输入变化的速率信号,其速率范围为 $0.1 (^{\circ})/s$ 至 $0.6 (^{\circ})/s$,分别采用上述研究算法进行滤波,得到结果如图 4 所示。为使读者看到明显的效果,对采样点在 5900 至 6300 的区域进行局部分

析,显示结果如图 5 所示。从图中可看出, KF₁ 算法对原始信号的跟踪效果最好,但对噪声的抑制能力较差; DWT 算法在信号过渡前后抑制噪声的能力有明显的减弱,且跟踪能力不如 KF₁ 算法; KF₂ 在信号稳定区域抑制噪声的效果最好,但在过渡区域对信号的跟踪能力最差,出现了较大的延迟。相比

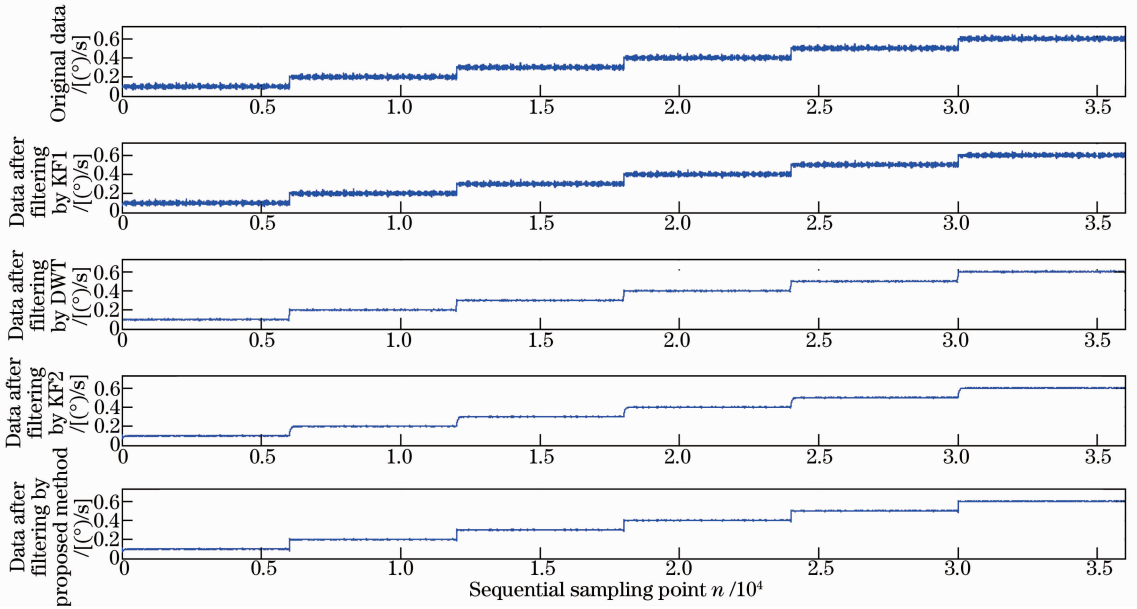
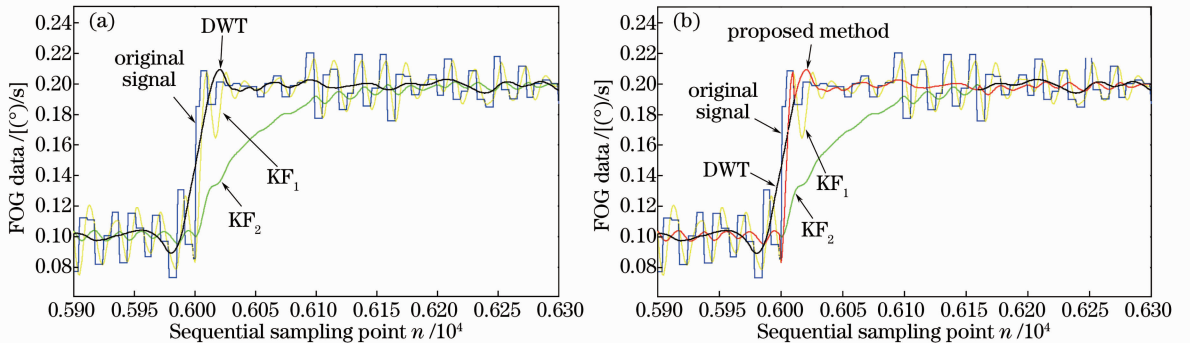


图 4 速率滤波实验结果

Fig. 4 Rate filtering results

图 5 速率滤波实验局部分析图。(a) KF₁、KF₂ 和 DWT 滤波结果; (b) AMA-DWT-DMKF 算法滤波结果Fig. 5 Enlarged view of the rate filtering results. (a) Filtering results of KF₁, KF₂ and DWT;

(b) filtering results of AMA-DWT-DMKF

以上算法, AMA-DWT-DMKF 算法综合利用了以上各算法的优势, 在信号稳定区域和过渡区域均具有较好的噪声抑制和信号跟踪能力, 相比 KF_2 算法, 新的算法可提前 150 步对原始信号进行有效跟踪, 在信号过渡区域实现了对原始信号的快速跟踪,

且在跟踪后迅速收敛到真值附近, 在信号稳定区域最大限度地抑制了噪声。

对动态滤波实验数据的 BI 进行分析, 得到结果如表 3 所示。

表 3 动态滤波前后零偏稳定性[单位: ($^{\circ}$)/s]

Table 3 BI value of around dynamic filtering [unit: ($^{\circ}$)/s]

| Input /[($^{\circ}$)/s] | Raw | KF_1 | DWT | KF_2 | AMA-DWT-DMKF |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------------|
| 0.1 | 0.0119 | 0.0107 | 0.0045 | 0.0032 | 0.0017 |
| 0.2 | 0.0121 | 0.0109 | 0.0046 | 0.0033 | 0.0019 |
| 0.3 | 0.0122 | 0.0110 | 0.0048 | 0.0035 | 0.0020 |
| 0.4 | 0.0124 | 0.0111 | 0.0050 | 0.0036 | 0.0022 |
| 0.5 | 0.0126 | 0.0112 | 0.0051 | 0.0038 | 0.0023 |
| 0.6 | 0.0128 | 0.0113 | 0.0053 | 0.0040 | 0.0025 |

分析表 3 数据, 可得出: 输入从 0.1 ($^{\circ}$)/s 至 0.6 ($^{\circ}$)/s 递增的条件下, 原始输出与各算法的滤波输出 BI 值呈递增趋势。在各输入条件下, AMA-DWT-DMKF 算法滤波输出的 BI 值最小; 以 0.1 ($^{\circ}$)/s 输入条件下 FOG 数据滤波结果为例, AMA-DWT-DMKF 算法滤波输出的零偏稳定性相比 KF_1 算法提高了 84.1%, 相比 DWT 算法提高了 62.2%, 相比 KF_2 算法提高了 46.9%。相比扰动条件下的滤波, 由于动态滤波过程中速率的变化导致出现了明显的过渡区域, KF_2 算法输出的较大延迟影响了 BI, 而 AMA-DWT-DMKF 算法由于提高了对原始信号跟踪能力, 降低了延迟, 因此滤波输出的 BI 得到了较大程度的提高。由于现实应用中大多是在动态条件下对 FOG 输出信号进行滤波, 因此 AMA-DWT-DMKF 滤波算法在 FOG 组成系统中的应用更具有实际价值。

6 结 论

在 FOG 信号滤波算法研究中, 提高算法的噪声抑制和信号跟踪能力是需要解决的关键问题。然而在 FOG 信号过渡区域, 以往研究算法在噪声抑制和信号跟踪方面不能兼顾。为解决以上问题, 提出了一种 AMA-DWT-DMKF 滤波算法, 通过 AMA 算法比较信号的样本方差与设定阈值的大小来检测信号的过渡区域, 将 FOG 输出信号划分为信号过渡区域和稳定区域, 并融合 DWT 算法和基于不同 Q/R 比条件下 Kalman 滤波算法的优势特性, 对 AMA 算法判定结果进行滤波, 在保证最大程度抑制噪声的同时, 提高了对信号的跟踪能力。实验结果证明了 AMA-DWT-DMKF 算法的优越性。

参 考 文 献

- Li Jialei, Xu Hualong, He Jing. Modeling of static temperature drift for fiber optic gyroscope based on wavelet network [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(12): 2980—2985.
李家全, 许化龙, 何 婧. 光纤陀螺静态温度漂移的小波网络建模[J]. 中国激光, 2010, 37(12): 2980—2985.
- Tang Xiqing, Cheng Xuwei, Guo Libing, *et al.*. Error modeling and compensating of fiber optic gyro based on wavelet analysis and grey neural network [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1008003.
汤霞清, 程旭维, 郭理斌, 等. 小波分析和灰色神经网络融合的光纤陀螺误差建模与补偿[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1008003.
- Li Ying, Chen Xinglin. Identification with ARMA model and its application to modeling of FOG drift [J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(9): 1752—1754.
李 颖, 陈兴林. ARMA 模型辨识及其在光纤陀螺漂移建模中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(9): 1752—1754.
- Li Jialei, Xu Hualong. Real-time filtering methods of random drift of fiber optic gyroscope [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(12): 2717—2721.
李家全, 许化龙. 光纤陀螺随机漂移的实时滤波方法研究[J]. 宇航学报, 2010, 31(12): 2717—2721.
- Li Jialei, Xu Hualong. Research and improvement of denoising method of fiber optic gyroscope based on wavelet packet analysis [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2224—2228.
李家全, 许化龙. 光纤陀螺信号的小波包去噪及改进[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2224—2228.
- Duan Keke, Li Denghua, Yi Lina. Study on modeling and filtering of the fiber optic gyroscope random drift [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2011, 33(5): 738—741.
段苛苛, 李邓化, 伊丽娜. 光纤陀螺随机漂移的建模与滤波研究[J]. 压电与声光, 2011, 33(5): 738—741.
- Liu Jieyu, Yu Zhiyong, Ma Xuewen. Modeling and compensation of static temperature error synthetically for fiber optic gyroscope [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0823005.
刘洁瑜, 余志勇, 马学文. 光纤陀螺静态温度综合误差建模及补偿[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0823005.
- Tan Xi, Liu Jun, Yin Jianling, *et al.*. Magnetic sensitivity studies of fiber optic gyroscope in direct current and alternating current magnetic fields [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 0905006.
谭 曦, 刘 军, 殷建玲, 等. 光纤陀螺在直流及交变磁场中的磁敏感性研究[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0905006.
- Wang Xiaoxiao, Zhang Meng, Li Chuansheng, *et al.*. Research on

- dynamic model of digital closed-loop fiber optic gyroscope[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205002.
- 王夏霄, 张 猛, 李传生, 等. 数字闭环光纤陀螺动态模型研究[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205002.
- 10 Halims, Bisonoin, Melissa. Automatic seasonal auto regressive moving average models and unit root test detection[C]. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2007. 1129—1133.
- 11 Li Xue, Wang Qin. A novel Kalman filter for combining outputs of MEMS gyroscope array[J]. Measurement, 2012, 45(4): 745—754.
- 12 Dang Shuwen, Tian Weifeng, Qian Feng. EMD-and LWT-based stochastic noise eliminating method for fiber optic gyro [J]. Measurement, 2011, 44(1): 2190—2193.
- 13 C Kownacki. Optimization approach to adapt Kalman filters for the real-time application of accelerometer and gyroscope signals filtering[J]. Digit Signal Process, 2011, 21(1): 131—140.
- 14 Chen Xiyuan, Shen Chong. Study on temperature error processing technique for fiber optic gyroscope[J]. Optik, 2013, 124(9): 784—792.
- 15 Rangababu Peesapati, Samrat L Sabat, K P Karthik, *et al.*. Efficient hybrid Kalman filter for denoising fiber optic gyroscope signal[J]. Optik, 2013, 124(20): 4549—4556.

栏目编辑:何卓铭