

# 基于自适应窗长的光纤陀螺随机误差实时分析方法

朱战辉 汪立新 李 灿

二炮工程大学控制科学与工程系, 陕西 西安 710025

**摘要** 动态 Allan 方差是分析光纤陀螺随机误差的一种新方法。针对其采用固定窗长的窗函数截断信号, 导致动态跟踪效果与方差估计值的置信度不能兼顾的问题, 提出了一种基于峭度自动调节窗长的改进算法。算法引入峭度参数表征陀螺输出信号的平稳程度, 以滑动窗内数据的峭度值为变量构造窗长截取函数, 应用窗长函数根据短时信号的稳定程度自动确定截断窗窗长, 并用其来截取随机信号进而进行 Allan 方差估计及误差系数实时辨识和提取, 同时将方差估计值和误差系数时间曲线分别绘制在三维或二维图上。对仿真和实测数据分析结果表明: 新算法既能在平稳性好的数据段保持较高的置信度, 又能在发生动态变化时及时跟踪信号, 可以更好地对光纤陀螺的随机误差系数进行实时在线提取和分析。

**关键词** 测量; 光纤陀螺; 动态 Allan 方差; 自适应窗长; 随机误差

**中图分类号** V241.5

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201643.0105001

## Real-Time Analysis Method for Stochastic Error of Fiber Optic Gyroscope Based on Adaptive Window Length

Zhu Zhanhui Wang Lixin Li Can

*Department of Control Science and Engineering, the Second Artillery Engineering University,  
Xi'an, Shaanxi 710025, China*

**Abstract** The dynamic Allan variance (DAVAR) is a new method for analyzing stochastic error of gyroscope. However, it has difficulty in making a good tradeoff between tracking capabilities and variance reduction due to the window with fixed length. An improved algorithm based on kurtosis and time-variant window is proposed to quickly track variations in the signal and obtain a low variance of the estimate. The kurtosis is introduced into analysis of gyroscope output, and the window length function to truncate signal is built by taking kurtosis as variables, which can make window length change with the non-stationary of the signal automatically. Then the length of truncation window is estimated according to the function, the values of Allan variance is obtained in the windows, and the error coefficients can also be identified and extracted at the same time. The above data are expressed by three or two-dimensional to describe the dynamic characteristics of gyro. Simulation and experimental data analysis results show that the proposed algorithm can track the non-stationary of gyroscope more effectively and obtain a good confidence in stationary random process, and the method can be more effective for the extraction and identification of stochastic error coefficients.

**Key words** measurement; fiber optic gyroscope; dynamic Allan variance; adaptive window length; stochastic error

**OCIS codes** 060.2800; 060.2370; 120.4800

## 1 引 言

光纤陀螺是惯性导航系统的核心部件, 具有精度高、耐冲击力强、测量范围大等特点, 但工作环境变化和信号处理单元带来的随机误差会导致光纤陀螺的测量精度大幅降低。因此对其随机误差进行提取和特

收稿日期: 2015-07-01; 收到修改稿日期: 2015-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(61503390)、二炮装备基础项目(EP114054)

作者简介: 朱战辉(1978—), 男, 博士研究生, 主要从事惯性技术及测试方面的研究。E-mail: zzhhit@sina.com

导师简介: 汪立新(1966—), 男, 博士, 教授, 主要从事惯性技术及测试等方面的研究。E-mail: wanglixin066@sina.cn

性评估是提高导航精度的重要手段。Allan方差是测量和评价陀螺仪和加速度计等惯性传感器噪声特性的一种重要工具,能够非常容易地对各种误差源及其噪声统计特性进行细致的表征和辨识<sup>[1]</sup>,但该方法只能用来分析时域平稳信号。实际上,在陀螺实际工作中温度、辐射、振动和冲击、元器件参数漂移等因素都会造成惯性传感器的输出表现出非平稳特征。因此近年来有学者将用于分析原子时钟频率稳定度的动态Allan方差(DAVAR)引入到惯性传感器的非平稳随机过程辨识中来,以期更好地分析其动态条件下随机误差的变化规律<sup>[2-3]</sup>。

DAVAR是Allan方差的扩展和完善,原理是用固定长度的矩形窗函数按照时间顺序依次截取信号,计算其Allan方差,并将方差的集合用三维图的形式表示出来。李冀辰等<sup>[4-6]</sup>分别将该方法应用到光学陀螺的动态性能评价上,有效地辨识出了光学陀螺输出信号受环境影响所表现出的动态特征。然而经典动态Allan方差用固定长度的窗函数截断信号,使方差估计置信度的提高和动态跟踪能力的改善之间很难同时兼顾<sup>[7]</sup>。为解决这个问题,文献[8]通过模糊控制器来计算时域上各个分析点的最优截断窗长,使截断窗长度可以随着信号稳定性的变化而改变,在一定程度上解决了上述矛盾,但该方法不具有实时性,需要把所有待分析数据一起输入控制器,一次性直接算出所有点的最优窗长。

本文提出了一种将截断窗内峭度值作为短时陀螺输出的稳定性判据,实时监测信号平稳程度并自动调节截断窗长度的算法,在平稳性差的时间段用短窗宽跟踪动态变化,在平稳性好的时间段用长窗宽提高方差估计值的置信度,相对于文献[8]的方法,所提算法具有良好的实时在线分析功能。通过仿真及对光纤陀螺的瞬态冲击响应信号和启动信号进行动态参数提取及分析,验证了所提算法的有效性。

## 2 动态Allan方差及峭度

### 2.1 Allan方差和动态Allan方差

Allan方差法是一种基于时域的分析方法,可以方便地对随机误差源的统计特性进行辨识和分析。对于光纤陀螺来说,主要的随机误差系数包括量化噪声( $Q$ ),代表了光纤陀螺输出的最小分辨率,主要来源为模/数(A/D)和数/模(D/A)转换器的精度和稳定性;随机游走系数( $N$ )是衡量光纤陀螺噪声水平的重要指标,主要来源于各个光学器件;零偏不稳定性( $B$ )主要是由环境扰动和光纤陀螺的残余非互异性引起,表现为输出数据中零偏值的波动;速率斜坡( $R$ )是表征光纤陀螺趋势项漂移的一项指标,主要来源是光纤陀螺光源的强度或探测器的前置或后置放大器单向缓慢的变化。Allan方差法的缺点是只能对平稳条件下的陀螺输出进行分析,无法表征信号的时变动态特征。

近年来有学者提出了动态Allan方差方法,其原理是把数据按照相同的时间间隔和长度分段截取,分别计算Allan方差,最后再绘制在时间 $t$ 、相关时间(也称平均时间) $\tau$ 和Allan方差 $\sigma_y^2(t, \tau)$ 或Allan标准差 $\sigma_y(t, \tau)$ 的三维图中,以一种更直观的方式将信号的时域稳定性和频域稳定性以三维的形式表征出来<sup>[9]</sup>。然而Allan方差的估计是基于有限长度的数据,估计的可信度依赖于数据的独立组数<sup>[10]</sup>。由于DAVAR方法将原始信号截断成相对短的数据段,必然造成参与Allan方差计算的数据量大幅减小,可划分的独立组数也相应减小,会降低方差估计值的置信度。

### 2.2 峭度

峭度是反映信号分布特性的数值统计量,对信号标准差和幅值的变化特别敏感,文献[11]将其运用到语音信号的动态特征辨识与提取中,取得了理想效果。其可表达为

$$K = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} [x(t) - \bar{x}]^4 p(x) dx}{\sigma^4}, \quad (1)$$

式中 $x(t)$ 为瞬时幅值, $\bar{x}$ 为幅值均值, $p(x)$ 为概率密度, $\sigma$ 为标准差。峭度作为四阶中心距统计量可以反映振动信号的平坦程度。当器件正常工作时,幅值往往接近于正态分布,峭度指标值相对稳定;当发生动态变化时,信号分布曲线的峰顶高于正常高斯分布曲线,信号偏离高斯分布,峭度值随之发生改变。当信号受到干扰发生幅值变化或趋势变化时,峭度能随之发生改变,因而可根据峭度值的大小反映信号突变性成分所占的比重。

### 3 基于时变窗长的随机误差分析方法

#### 3.1 窗宽函数的构造

实时分析算法的设计原则要保证两个方面:一是能尽可能多地提取出信号的动态特征,二是方差估计值的置信度不能降低太多。结合光纤陀螺的工作环境 and 自身特性来看,大多数环境下其输出是平稳的,只有少数情况下输出会出现突变或非平稳的情况,如载体启动时温度变化大,导弹的头体分离、尾罩分离、阵风干扰造成短时的冲击等。因此算法设计思路为在发生动态变化时以追踪动态变化为主;在平稳工作时以保证误差系数提取准确度(即提高 Allan 方差估计值的置信度)为主。

DAVAR方法中截断窗的长度和类型可以自由选择,长窗宽截断窗可使方差计算样本包含更多数据,从而增加方差估计置信度,但同时用长窗宽截取数据计算方差又不可避免地把信号突变成成份包含进去并平均掉,导致跟踪信号超前或延迟,甚至无法跟踪;短窗宽可以及时追踪信号突变,但数据划分的独立子集个数会变少,方差估计值的置信度就会降低。这里提出在信号稳定的时段选择长窗宽,在发生动态变化的时段自动调节为短窗宽的算法,以兼顾动态信号跟踪能力和方差估计值的置信度,其窗长计算公式表示为

$$L(t+1) = \begin{cases} \lambda_1 & , L(t) < \lambda_1 \\ L(t) - \Delta L[K(t) - k] & , \lambda_1 \leq L(t) \leq \lambda_2 \\ \lambda_2 & , L(t) > \lambda_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  是常数,且  $\lambda_2 > \lambda_1$ , 为自适应窗宽度的上下限,可根据待分析信号的长度及期望达到置信度水平来取值;阈值  $k$  参考平稳条件下光纤陀螺量测信号的峭度计算值来确定,通常略大于该值;  $\Delta L$  为窗口调节的步长,可以决定窗口每次增加或者缩小的范围,也就是通过它来调节跟踪速度的快慢。从(2)式可以看出当分析窗沿时间轴向前滑动时,如果  $t$  时刻截取到的数据突然发生了变化,出现了影响平稳性的因素,窗内数据的峭度值  $K(t)$  就会大于稳态条件下的峭度阈值  $k$ ,  $t+1$  时刻窗宽会自动变短,峭度越大窗宽缩小的越多。相反,如果  $t$  时刻计算得到的峭度值小于阈值  $k$ , 窗长会自动变长,逐步增加参与计算的样本数据个数。这样就能保证在发生突变的数据段采用短的窗长追踪变化,在相对平稳的数据段采用长的窗口截取更多的数据以提高置信度。

#### 3.2 随机误差系数实时提取方法设计

新算法是基于时变窗长的动态 Allan 方差改进算法,简称 K-DAVAR。K-DAVAR 的流程图如图 1 所示,具体过程如下。

1) 确定随机信号  $x(t)$  分析时间起始点  $t_1$ 。

2) 用中心点为  $t_1$ , 起始宽度为  $L(t_1)$  的窗函数截断随机信号  $x(t)$ , 获得窗口截断信号  $y_r(t_1)$ , 支撑变量  $t'$  代表窗内渐变的时间

$$t - L(t_1)/2 \leq t' \leq t + L(t_1)/2. \quad (3)$$

$P_L(t')$  为长度  $L(t_1)$  的矩形窗函数,用它来截取  $x(t)$ , 得到截断信号为

$$y_r(t_1, t') = y(t')P_L(t_1 - t'). \quad (4)$$

3) 利用(1)式计算  $y_r(t_1, t')$  的峭度  $K(t_1)$ , 并将其代入到窗宽函数方程(2)式中,得到  $t_2$  段信号的截取长度  $L(t_2)$ 。

4) 将  $y_r(t_1, t')$  同 Allan 窗口  $h_\tau(t')$  做卷积建立增量过程,得

$$\Delta(t_1, t', \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} h_\tau(t' - t'')y_r(t_1, t'')dt'' . \quad (5)$$

这时变量  $t'$  的范围变为

$$t_1 - [L(t_1)/2 - \tau] \leq t' \leq t_1 + [L(t_1)/2 - \tau], \quad (6)$$

$0 \leq \tau \leq \tau_{\max}$ , 通常  $\tau_{\max} = L/3$ , 则  $t_1$  时刻估计值为

$$\sigma_y^2(t_1, \tau) = \frac{1}{2} \langle \Delta^2(t_1, t', \tau) \rangle = \frac{1}{2(T - 2\tau)} \int_{t_1 - L/2 + \tau}^{t_1 + L/2 - \tau} \Delta^2(t_1, t', \tau) dt'. \quad (7)$$

Allan 方差可以被定义为(7)式的总体期望值

$$\sigma_y^2(t_1, \tau) = \frac{1}{2} E \left[ \langle \Delta^2(t_1, t', \tau) \rangle \right]. \quad (8)$$

5)  $t_1$  时刻陀螺的随机误差系数可以通过最小二乘拟合分离出来,即

$$\sigma(t_1, \tau) = \sum_{i=-2}^2 B_i \tau^{i/2}. \quad (9)$$

则  $t_1$  时刻提取出的各个随机误差系数分别为:  $Q(t_1) = \frac{B_{-2}}{3600\sqrt{3}}(^{\circ})$ ,  $N(t_1) = \frac{B_{-1}}{60}[^{\circ}/h^{1/2}]$ ,  $B(t_1) = \frac{B_0}{0.6643}[^{\circ}/h]$ ,  $K(t_1) = 60\sqrt{3}B_1[^{\circ}/h^{3/2}]$ ,  $R(t_1) = 3600\sqrt{2}B_2[^{\circ}/h^2]$ 。

6) 将窗口中心滑动到  $t_2$ , 按照步骤 3) 计算所得的窗宽  $L(t_2)$  截断信号  $x(t)$ , 获得窗口截断信号  $y_{\tau}(t_2)$  并计算其峭度值  $K(t_2)$ , 即重复步骤 2)、3)、4)、5), 得到  $\sigma_y(t_2, \tau)$ , 以此类推, 可以得到时间域的方差序列  $\sigma_y(t_n, \tau)$  和噪声拟合系数  $Q(t_n), \dots, R(t_n)$ 。其中以  $t_{n+1}$  为中心的截断窗最好与以  $t_n$  为中心的截断窗相重叠。

7) 最终将动态 Allan 方差序列  $\sigma_y^2(t_n, \tau)$  或动态 Allan 标准差 (DADEV)  $\sigma_y(t_n, \tau)$  按时间顺序绘制在同一副  $\sigma_y - \tau - t$  三维图上, 将各个随机误差系数绘制在时间序列曲线图上, 从宏观上观测随机误差的时变特性及动态变化。

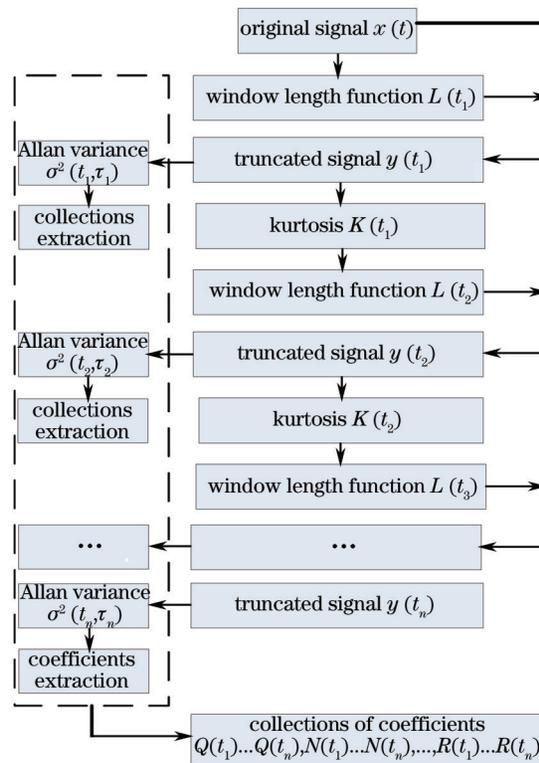


图 1 K-DAVAR 算法设计流程图

Fig.1 Flow chart of K-DAVAR

## 4 仿真实验与分析

为评估改进算法对信号动态变化的跟踪能力, 运用图 2 所示的有幅值突变的分段高斯白噪声  $x(t)$  来建立光纤陀螺输出信号误差模型, 仿真信号中部突变部分方差为 2, 前段和后段方差为 1, 突变起始点和结束点分别设置为 1000 点和 3000 点。对该信号分别用窗长为 401、801 的经典 DAVAR 和 K-DAVAR 进行分析, K-DAVAR 方法中截断窗宽的上下限  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别取 401 和 801,  $\Delta L$  取 2,  $k$  参考稳态条件下的峭度值取 3.25。该模型相当于由三个平稳段和两个突变点构成的时间序列模型。

图 3 是该仿真信号 K-DAVAR 三维分析图, 图 4 是峭度和截断窗窗宽在时间域上的变化过程, 可以看到在 1000 点和 3000 点左右, 即发生了动态变化的时间段, 峭度发生了明显改变, 新算法的窗宽也随之发生了收缩, 过了动态变化段后窗口宽度逐渐恢复到原来的宽度。通过对 Allan 方差曲线进行最小二乘拟合, 可以得到各项陀螺随机误差系数, 分别代表不同的误差来源。在这里以零偏不稳定性  $B$  和角度随机游走系数  $N$

这两个随机误差系数为研究对象比较K-DAVAR方法和DAVAR方法的动态跟踪能力和方差估计值信度水平,此二系数值在时间域的变化曲线如图5和图6所示。

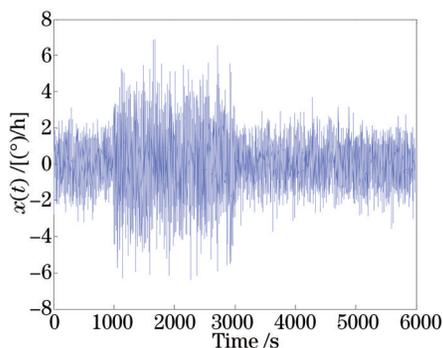


图2 具有不同方差的分段高斯白噪声信号

Fig.2 Piecewise white noise signal with different variance

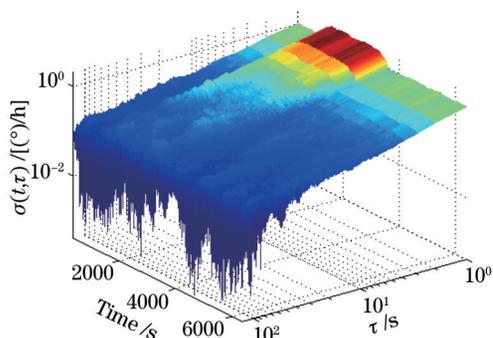


图3 分段高斯白噪声的K-DAVAR分析

Fig.3 K-DAVAR analysis of piece white noise

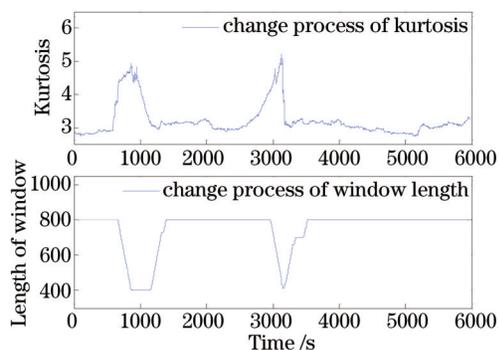


图4 峭度和窗宽变化过程

Fig.4 Change process of kurtosis and windows length

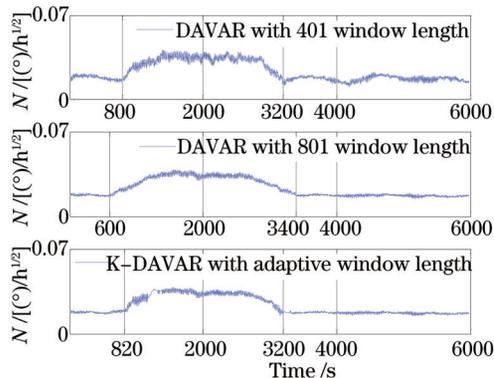


图5 角度随机游走的K-DAVAR和DAVAR分析

Fig.5 K-DTVAR and DAVAR analysis of N

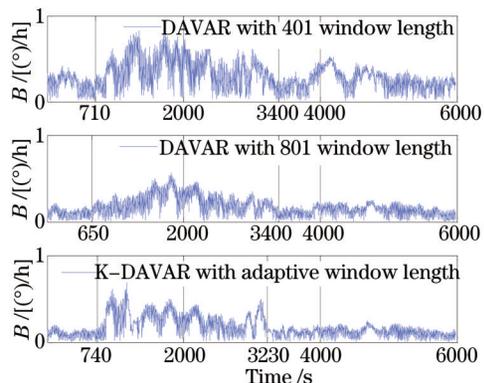


图6 零偏不稳定性的K-DAVAR和DAVAR分析

Fig.6 K-DTVAR and DAVAR analysis of B

可以看到,在DAVAR算法401短窗宽情况下,信号跟踪相对比较及时,但由于参与计算的样本数据少,造成方差估计值波动很大,置信度非常低。长窗宽801情况下,样本数据较大,置信度高,方差计算值相对稳定平滑,但也因为窗口长的原因,截断窗较早地把突变信号包含了进去,又较晚地退了出来,以致跟踪时间上出现了较大的超前和滞后;只有K-DAVAR算法做到了两者兼顾,动态信号跟踪能力优于DAVAR401窗宽,方差估计值的置信度却达到了DAVAR801窗宽的估计水平。

表1为K-DAVAR和DAVAR动态跟踪能力的比较,其中\*代表很难准确定位的点。特别值得一提的是,用DAVAR401短窗宽计算的零偏不稳定性系数值本来应该具有较高的动态定位能力,但由于其估计置信度低,方差波动较大,给动态变化点的确定带来了较大困难,反而是K-DAVAR方法非常清晰地指出了动态变化点。可见K-DAVAR方法动态跟踪能力明显优于DAVAR方法。此外,如果把突变段401窗宽的一半补偿进起始点的超前时间或结束点的滞后时间,信号动态变化点的定位达到了一个相当高的精度,几乎没有误差。

表1 K-DAVAR和DAVAR动态跟踪能力比较表  
Table 1 Comparison of dynamic tracking capability

		Real values	DAVAR 401	K-DAVAR	DAVAR 801
$N$	Beginning	1000	800	820	600
	End	3000	3200	3200	3400
$B$	Beginning	1000	710	740	*
	End	3000	3400	3230	*

## 5 实测数据分析

### 5.1 瞬态振动信号的分析

在陀螺工作时,其载体体会经历瞬态振动干扰(如导弹点火或飞行时的头体分离;外场标定时地基的突然振动等)。此时陀螺输出信号表现冲击响应特性。本采样信号为瞬态振动实验中采集到的光纤陀螺输出,相当于稳态过程中出现了突变成分。采样时间为0.5 s,采集数据约8000个,原始信号如图7所示。这里分别运用K-DAVAR方法和DAVAR方法对实验中采集到的陀螺数据进行比对分析,运用K-DAVAR对其三维分析,结果如图8所示。可以看到该方法很好地跟踪到了信号的突变成分及平稳过程中的细小波动。

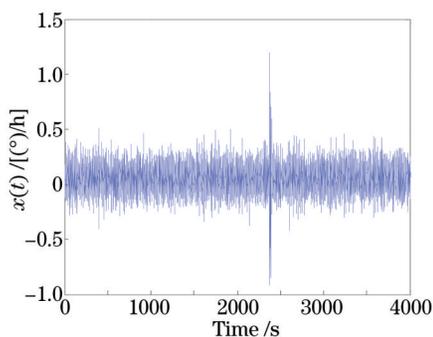


图7 光纤陀螺瞬态振动信号

Fig.7 Sampling curves of FOG under vibration condition

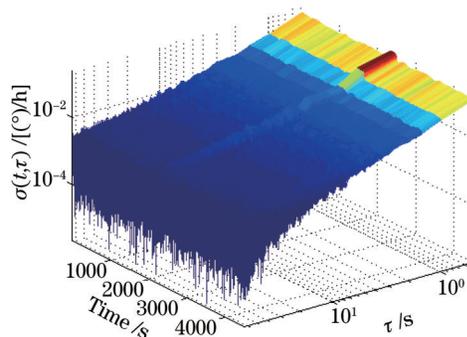


图8 振动条件下光纤陀螺的K-DAVAR分析

Fig.8 K-DAVAR analysis of FOG

图9是K-DAVAR方法中峭度和窗长在时间域的变化过程。从图中可以看出,新算法在探测到前方数据有突变发生时,截断窗宽自动由801收缩到401,很好地跟踪到了动态变化,动态变化结束后,信号逐渐回归平稳,峭度值趋于一致,窗长又从401逐渐变为801,以保证方差估计值的置信度。零偏不稳定性是光纤陀螺温度补偿算法或滤波算法中经常用到的重要参数,以该噪声系数为研究对象,运用401窗长和801窗长的DAVAR算法,上下限分别为401和801窗长的K-DAVAR方法展开比对分析。图10为三种算法下计算得到的零偏不稳定性时间变化曲线。可以看到K-DAVAR方法既拥有401窗长的跟踪速度,又拥有801窗长的较高的估计置信度。

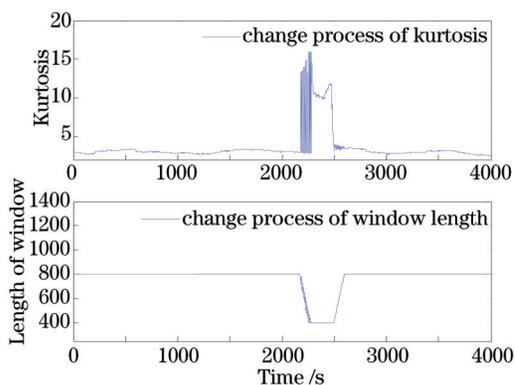


图9 峭度和窗宽变化过程

Fig.9 Change process of kurtosis and window length

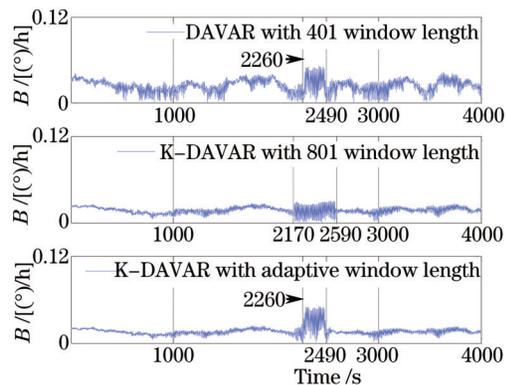


图10 不同分析方法下的零偏不稳定性B变化曲线

Fig.10 Time curves of B by different methods

当陀螺在平稳条件下工作时,可以假设各个随机误差系数在很小范围内波动,此时陀螺输出接近于静态条件下的输出,理论上用经典 Allan 方差当然是最好的,但对于动态算法来说,只能是尽可能地增加窗口的长度,或通过算法提高估计值的置信度。不过在算法比较验证阶段,可以把静态下用所有数据计算所得的 Allan 方差值及其拟合得到的各项噪声系数当作期望值(即希望动态算法能够取得的结果),通过比较哪种算法的结果更接近期望值来判断其性能。这里把 1~2000 数据段的 Allan 方差噪声系数拟合值作为大数据下的高置信度标准值,零偏不稳定性随时间变化过程如图 11 所示,其中数值  $1.29 \times 10^{-2}$  就是用 Allan 方差 2000 个数据点拟合出来的零偏不稳定性标准值。理想状态下,动态算法拟合出的噪声系数时间曲线应该是在期望值的上下波动<sup>[12]</sup>。

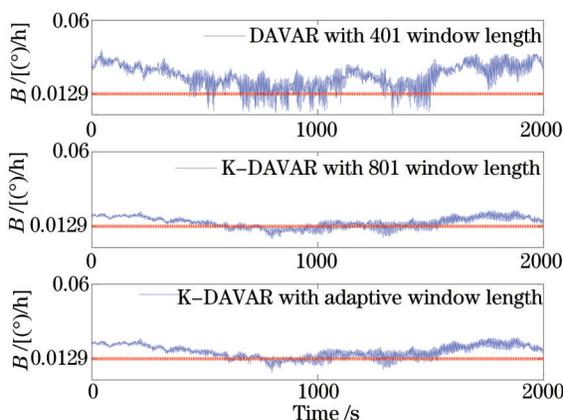


图 11 平稳条件下零偏不稳定性  $B$  的变化曲线

Fig.11 Time curves of  $B$  under stationary condition

表 2 稳定条件下噪声系数的方差估计值

Table 2 Noise coefficients under stationary condition

	$Q / (10^{-2} \mu\text{rad})$	$N / [10^{-4} (^\circ)/\text{h}^{1/2}]$	$B / [10^{-2} (^\circ)/\text{h}]$	$K / [10^{-2} (^\circ)/\text{h}^{3/2}]$	$R / [(^\circ)/\text{h}^2]$
Ref value	6.97	5.72	1.29	9.14	0.229
K-DAVAR	6.97	5.88	1.53	1.35	0.428
DAVAR801	7.00	6.11	1.75	1.77	0.649
DAVAR401	7.08	6.74	2.41	3.30	1.673

表 2 为不同分析方法下,光纤陀螺各个随机误差系数值的量化比较,对 K-DAVAR 和 DAVAR 而言,表中数值为随机误差系数随时间变化曲线在 0~4000 点的均值。可见,平稳条件下,相对于 DAVAR401 窗长而言, K-DAVAR 的方差估计置信度得到了大幅提高,比 DAVAR801 窗长的估计精度也高的原因是后者算法的窗长较长,把一部分非平稳信号包含进去参加计算,降低了平稳条件下的估计精度。

### 5.2 对光纤陀螺启动信号的分析

光纤陀螺启动段信号属于非平稳随机序列,包含有缓慢变化趋势且具有非线性特征。分别运用 K-DTVAR 方法和 DAVAR 方法对实验中采集到的陀螺启动阶段量测信号进行比对分析,采样时间为 0.3 s,采集数据约 10000 个,量测信号如图 12 所示。运用 K-DAVAR 进行三维分析,结果如图 13 所示,图 14 是峭度与

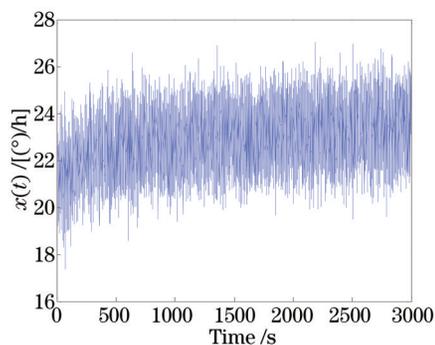


图 12 光纤陀螺启动信号

Fig.12 Start-up signal of FOG

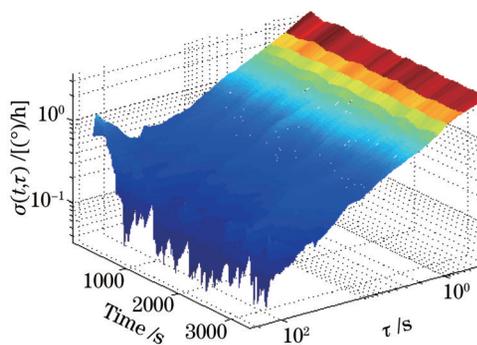


图 13 光纤陀螺启动信号的 K-DAVAR 分析

Fig.13 K-DAVAR analysis result of FOG start-up signal

窗宽的变化过程,图 15 是各个误差系数的时间变化曲线。

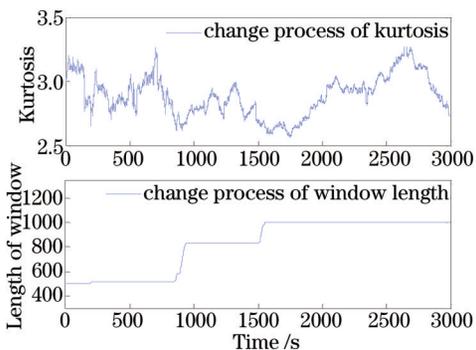


图 14 FOG 启动信号峭度和窗宽变化过程

Fig.14 Change process of kurtosis and windows length

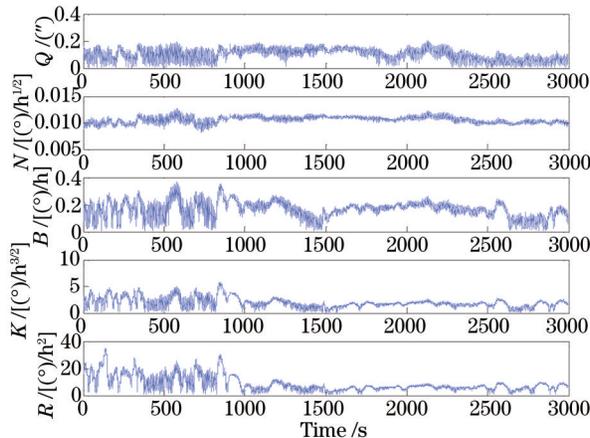


图 15 各个随机误差系数随时间变化曲线图

Fig.15 Time-variant curves of different coefficients

速率斜坡  $R$  是表征光纤陀螺趋势项漂移的一项指标。由图 13 和图 15 可以看出,在启动阶段主要是长相关时间下的随机误差系数(如角速率随机游走  $K$  和速率斜坡  $R$ )发生了漂移。以速率斜坡  $R$  为例,对 K-DAVAR 方法和经典 DAVAR 方法实时提取的随机误差系数进行比较,其中红色虚线所表示的 2.5352 是速率斜坡的期望值。可以看到只有 K-DAVAR 方法兼顾到了动态跟踪与方差估计置信度的提高。

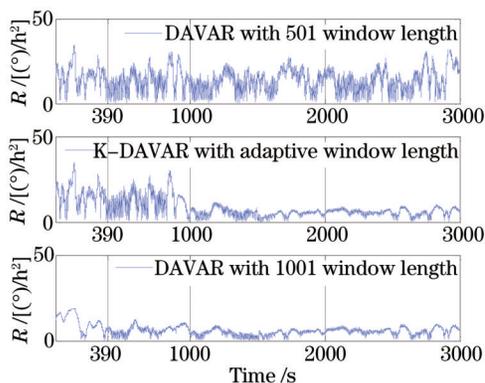


图 16 不同分析方法下的速率斜坡变化曲线

Fig.16 Time curves of  $R$  by different methods

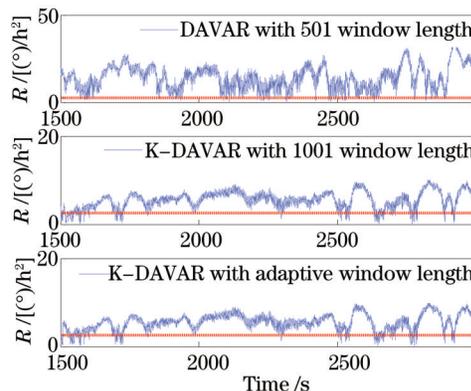


图 17 平稳条件下速率斜坡的变化曲线

Fig.17 Time curves of  $R$  under stationary condition

## 6 结 论

1) 针对动态 Allan 方差法的截断窗函数长度和类型不能随时间改变,造成动态跟踪效果与方差估计值的置信度不能兼顾的问题,提出了一种根据信号平稳性智能选择截断窗宽度并计算随机误差系数的算法。将提出的 K-DAVAR 算法用于仿真信号和光纤陀螺瞬态响应信号及启动信号随机误差的分析和辨识,同时

与 DAVAR 方法进行比较,结果表明:该方法无论在跟踪效果和方差估计置信度提高上都有较大程度的改善,可以为下一步导航滤波算法和补偿算法的改进、惯性器件性能评价和噪声抑制提供参考。

2) 通过数据分析可知,K-DAVAR 方法在短相关时间下辨识出的噪声系数(也就是高频噪声系数)与大样本下 Allan 方差噪声分离的结果基本一致;长相关时间下辨识的随机误差系数结果虽然优于 DAVAR 算法,但精度依然不高,下一步如何提高动态算法有限数据下的方差估计置信度,值得深入研究。

3) 所提算法中窗宽函数的峭度阈值  $k$  选取时,虽然可以参考静态时该陀螺的峭度值,但主要还是依据经验和对离线数据的反复试验,如果能更科学地确定  $k$  值,将能更好地完善该算法,增强其在线分析能力。

### 参 考 文 献

- 1 Wei Guo, Long Xingwu. Research on stochastic errors of dithered ring laser gyroscope based on dynamic Allan variance [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(12): 2975–2979.  
魏 国, 龙兴武. 基于动态 Allan 方差的机抖激光陀螺随机误差研究[J]. 中国激光, 2010, 37(12): 2975–2979.
- 2 I Sesia, L Galleani, P Tavella. Application of the dynamic Allan variance for the characterization of space clock behavior [J]. IEEE Trans Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(2): 884–895.
- 3 L Galleani. Characterizing changes in the noise statistics of GNSS space clocks with the dynamic Allan variance[C]. IEEE 2014 Proceedings of the 22<sup>nd</sup> European Signal Processing Conference, 2014: 426–430.
- 4 Li Jichen, Gao Fengqi, Wang Guanglong, *et al.*. Analysis of dynamic Allan variance for fiber optic gyro under vibration and variable temperature conditions[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0908004.  
李冀辰, 高凤岐, 王广龙, 等. 光纤陀螺振动和变温条件下的 DAVAR 分析[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0908004.
- 5 Zhang Na, Li Xuyou. Research on theoretical improvement of dynamic Allan variance and its application[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1106003.  
张 娜, 李绪友. 动态 Allan 方差的理论改进及其应用研究[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1106003.
- 6 Zhang Qian, Wang Wei, Wang Lei, *et al.*. Research on random errors of fiber optic gyro based on dynamic Allan variance and algorithm improvement[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0406003.  
张 谦, 王 玮, 王 蕾, 等. 基于动态 Allan 方差的光纤陀螺随机误差分析及算法改进[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0406003.
- 7 L Galleani. The dynamic Allan variance III: confidence and detection surfaces[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2011, 58(8): 1550–1558.
- 8 Gu Shanshan, Liu Jianye, Zeng Qinghua, *et al.*. Dynamic Allan variance analysis method with time-variant window length based on fuzzy control[J]. Journal of Sensors, 2015, 2015: 1–8.
- 9 L Galleani, P Tavella. The dynamic Allan variance[J]. IEEE Trans Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2009, 56(3): 450–464.
- 10 Cheng Xuwei, Tang Xiaqing, Huang Xiangyuan. Investigation on random error properties of optic gyroscope based on theoretical variance #1[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1005003.  
程旭维, 汤霞清, 黄湘远. 基于#1理论方差的光学陀螺长期随机误差分析[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1005003.
- 11 K Hayashida, M Nakayama, T Nishiura, *et al.*. Close/distant talker discrimination based on kurtosis of linear prediction residual signals[C]. 2014 IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2014: 2327–2331.
- 12 Xu Dingjie, Miao Zhiyong, Sheng Feng, *et al.*. Dynamic extraction MEMS gyro random error coefficients[J]. Journal of Astronautics, 2015, 36(2): 217–223.  
徐定杰, 苗志勇, 沈 峰, 等. MEMS 陀螺随机漂移误差系数的动态提取[J]. 宇航学报, 2015, 36(2): 217–223.

栏目编辑: 何卓铭