

动态 Allan 方差的理论改进及其应用研究

张 娜 李绪友

(哈尔滨工程大学自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 动态 Allan 方差(DAVAR)法是一种分析非平稳性信号的有效工具,但在辨识噪声时存在功率泄漏和定量表示单一的缺陷。为此,提出窗函数组合法和噪声量值的二维表示法对其加以改进,用于分析和定量描述光纤陀螺动态误差中的各种噪声项。窗函数组合法在光纤陀螺动态误差分解的基础上采用矩形窗和汉宁窗分别对其中的中低频噪声和高频噪声进行分析。噪声量值的二维表示法即根据 DAVAR 原理得到噪声量值随采样点数目增加的变化规律。实验结果证明窗函数组合法可以满足不同频段噪声的辨识要求,减小功率泄漏;噪声量值的二维表示法可以准确地反映出动态误差中各噪声项的变化特征。

关键词 信号处理;动态 Allan 方差;窗函数组合;噪声;光纤陀螺;动态误差

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1106003

Research on Theoretical Improvement of Dynamic Allan Variance and Its Application

Zhang Na Li Xuyou

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract The dynamic Allan variance (DAVAR) is an effective method for analyzing non-stationary signal. However, it has defects such as power leakage and single quantification in noise identification. Therefore, window function combination method and two-dimensional expression of noise value are introduced for their improvements. They are used for analysis and quantitative measurement of various noise terms in the fiber optic gyroscope dynamic error. Based on the dynamic error resolution of fiber optic gyroscope, rectangular window and Hanning window are applied to analyze low and intermediate frequency noise and high-frequency noise, respectively. According to the principle of DAVAR, the noise variation laws with the numbers of sampling point are obtained, namely, the two-dimensional expression of noise value. The experimental results indicate that window function combination method satisfies the identification requirements of noise in different frequency ranges and reduces power leakage; moreover, the changing characteristics of every noise item in the dynamic error are accurately reflected by the two-dimensional expression of noise value.

Key words signal processing; dynamic Allan variance; window function combination; noise; fiber optic gyroscope; dynamic error

OCIS codes 060.2800; 120.4800; 070.4790

1 引 言

Allan 方差法是分析光纤陀螺(FOG)静态测试数据的重要工具,它能够有效地辨识陀螺数据中的各类误差和噪声的特征。然而,这通常是以信号为平稳信号的理想状态为前提。但在实际情况中,光纤陀螺内部的不稳定性使得测试数据中含有很多非

平稳性因素。特别是当光纤陀螺处于动态环境中时,动态测试数据通常具有明显的非平稳特征且所占频带范围较宽,测试数据里各噪声项的量值也受光纤陀螺内部器件和外界环境的影响随时间的推移而变化。因此,Allan 方差法已不适用于光纤陀螺动态测试数据的分析。

收稿日期: 2011-05-24; **收到修改稿日期**: 2011-07-27

基金项目: 中俄科技合作专项(2010DFR80140)资助课题。

作者简介: 张 娜(1983—),女,博士研究生,主要从事光纤陀螺动态性能测试及分析方面的研究。

E-mail: zn0630@126.com

导师简介: 李绪友(1964—),男,博士,教授,主要从事高精度光纤陀螺技术方面的研究。E-mail: lixuyou@yahoo.com.cn

动态 Allan 方差 (DAVAR) 法是分析时间序列的一个新工具,它可以跟踪和描述信号中的各种非平稳性因素。Galleani 等^[1~7]提出 DAVAR 法并将其用于分析原子时钟的非平稳性。李颖等^[8]将 DAVAR 法应用于分析光纤陀螺的静态测试数据并得到噪声量值的一维表示。魏国等^[9]将其应用于机抖激光陀螺随机误差的评定中,并得到噪声量值的一维表示。本文提出将其应用于分析光纤陀螺的动态测试数据^[10]。

DAVAR 的本质是通过使用窗函数在不同的时段内计算 Allan 方差,并将所有的结果都绘制在同一幅三维图上。由于 DAVAR 法引入窗函数,这就不可避免地存在功率泄漏等缺陷,而 DAVAR 法辨识和表征噪声是以 Allan 方差与功率谱之间的定量关系为基础的,所以功率泄漏必然会对结果的精确性带来不利影响。另外,与 Allan 方差法相比,DAVAR 法的优越性之一是可以得到 DAVAR 随时间的变化规律,因此其噪声量值评定也不应局限于 Allan 方差的一维表示。然而,以往研究 DAVAR 法的文献在测定噪声量值时只采用一种窗函数(多使用矩形窗)对研究对象进行分析,并未涉及到引入窗函数对分析结果带来的影响,且测定噪声量值时依旧沿用 Allan 方差的一维表示方法。

针对 DAVAR 法所分析信号具有频带范围宽的特点,本文提出采用窗函数组合法,即在不同的频段采用不同的窗函数,以减小功率泄漏对结果的不利影响。通过对 DAVAR 基本原理的分析,提出噪声量值的二维表示方法,得到噪声量值随时间的变化规律。将上述方法用于光纤陀螺的动态测试数据分析中,进行了实验验证。

2 DAVAR 法的基本原理

Allan 方差是从时域分析信号频域稳定性的经典工具,是光纤陀螺各类误差和噪声特性的一种公认的测试和评价标准。它利用光纤陀螺输出数据的 Allan 方差与功率谱密度之间存在的定量关系,对陀螺的整个输出数据样本进行处理,进而根据得到的输出数据的 Allan 方差 $\sigma(\tau)-\tau$ 双对数曲线来对陀螺数据中的各种误差和噪声的特征进行描述。它的不足之处在于无法准确地捕捉到信号中的各种非平稳性因素。为了弥补这个缺陷,DAVAR 法以一种更直观的方式将信号的时域稳定性和频域稳定性展示在同一幅三维图上。它是 Allan 方差法的改进和扩展,可以用以下步骤来描述:首先,对于一个给

定的分析点,采用以其为中心的固定长度的窗口截取原始信号,暂时摒弃窗口以外的数据,以窗口内的样本为研究对象,计算其 Allan 方差。然后,移动窗口并重复上述过程,直到完成整个时间轴上的数据分析。最后,将所有的 Allan 方差按顺序排列起来就可以得到 DAVAR。具体过程如下。

设 $x(n)$ 为光纤陀螺的待分析信号,其长度为 N ,采用窗口长度为 L 的窗函数 $P_L(t)$ 在时间轴上对其进行截断, n' 为窗口中心点,故 n' 满足 $n-L/2 \leq n' \leq n+L/2$,因此可得截断信号 $y(n, n')$ 为

$$y(n, n') = x(n)P_L(n - n'). \quad (1)$$

假定截断信号 $y(n, n')$ 由 m 个采样时间为 t_0 的连续数据 $y_i(n, t_0)$ 组成,把其中 k 个连续数据作为一个数组,数组的长度 τ 为 kt_0 。分别取 τ 等于 $t_0, 2t_0, \dots, kt_0$, 满足 $0 < \tau \leq \tau_{\max}$ ($\tau_{\max} < L/2$, 一般取 $L/3$), 并求出每个时间长度的数组的平均值(群平均)。则群平均可以表示为

$$\bar{y}_p(n, \tau) = \frac{1}{k} \sum_{i=p}^{p+k} y_i(n, t_0), \quad (2)$$

式中 $\bar{y}_p(n, \tau)$ 表示 m 个连续数据中始于第 p 个数据点的一个数组的群平均,数组的时间长度 τ 为 kt_0 。给定 τ , 共有 $m-k+1$ 个这样的群平均。

求相邻两个群平均的差为

$$\xi_{p+1, p} = \bar{y}_{p+1}(n, \tau) - \bar{y}_p(n, \tau). \quad (3)$$

给定 τ , (3) 式定义了一个元素为群平均差的随机变量集合,共有 $m-k$ 个元素。

由一个窗口长度内整个数组生成的、数组时间长度为 τ 的所有群的群方差为

$$\sigma^2(n, \tau) = \frac{1}{2(m-k-1)} \sum_{p=1}^{m-k-1} (\xi_{p+2, p+1} - \xi_{p+1, p})^2. \quad (4)$$

分别取 τ 等于 $t_0, 2t_0, \dots, kt_0$ ($0 < \tau \leq \tau_{\max}$), 可以得到 $\sigma(n, \tau)-\tau$ 的关系。在信号 $x(n)$ 的时间轴上移动窗口中心点,反复计算 Allan 方差,并将其按时间顺序排列起来,绘制在同一幅三维图中,就可以得到 DAVAR^[1~7]。

3 窗函数组合法在 DAVAR 中的应用原理

DAVAR 法的本质是滑动的 Allan 方差,它通过窗函数实现。目前基本都采用单一窗函数进行分析。然而,由于采用 DAVAR 处理的信号通常所占频带较宽,如果只采用一种窗函数进行分析,不可避

免地会引起功率泄漏的问题,势必会造成分析结果精度下降,可信度降低,甚至不能准确地反映信号的真实情况。针对这一问题,提出采用窗函数组合法进行 DAVAR 分析,即在信号不同的频段采用不同的窗函数进行数据处理。

各种窗函数的幅频响应都存在明显的主瓣和旁瓣。主瓣频宽和旁瓣的幅值衰减特性决定了窗函数的应用,不同的窗函数在这两方面的特点是不同的。为了减小窗函数对数据处理结果的影响,提高处理结果的可信度,可根据以下原则选择理想的窗函数:1) 窗函数频谱的主瓣应尽可能窄,即能量尽可能地集中在主瓣内,以获得较窄的过渡带;2) 尽量减小旁瓣的相对幅度和减少旁瓣的数量,以增大通带的平稳度和阻带的衰减度^[11]。

此外,所分析信号的特点也是选择窗函数的重要依据。光纤陀螺在摇摆状态下的动态误差信号主要由系统趋势项和各种噪声组成。系统趋势项一般为低频信号。噪声项主要包括角随机游走、零偏不稳定性($1/f$ 或闪烁速率)、速率斜坡、量化噪声、速率随机游走、指数相关噪声、斜坡不稳定性(闪烁角加速度)、白角度(角度测量噪声)以及闪烁角度(粉角度噪声)等。以上各噪声项中,除了角随机游走、白角度和闪烁角度属于高频信号之外,其余都属于中低频信号^[12]。可以看出,光纤陀螺动态误差信号中的各个误差和噪声主要集中于中低频段。对于此频段的数据,可以采用主瓣比较集中、频率分辨率高的矩形窗进行处理,它可以对尽可能多的噪声项进行辨识。而对于高频段的噪声项,相对于频率,其幅值更值得关注。由于矩形窗旁瓣幅值较高,对其辨识精度低,如果继续采用矩形窗进行分析,会造成严重泄漏。而汉宁窗可以看作是 3 个矩形窗的频谱之和,通过旁瓣相互抵消,较大程度地降低旁瓣的高度,有效地抑制功率的泄漏。因此,采用汉宁窗对高频段的数据进行辨识。

使用不同窗函数进行 DAVAR 分析的前提是光纤陀螺动态误差信号中不同频段的数据分离。小波变换是一种信号的时间-频率分析方法,在时域和频域都具有良好的局部化性质。它通过伸缩平移运算对信号进行多尺度细化,最终实现在低频部分具有较低的时间分辨率和较高的频率分辨率,在高频部分具有较低的频率分辨率和较高的时间分辨率,自动适应时频信号分析的要求^[13,14]。因此,小波变换可以随频率的变化自动调整分析窗的大小,正适合分离含有多种频率成分且为非平稳信号的光纤陀

螺动态误差。

4 各种噪声量值的二维表示原理

不同的噪声分布在不同的时(τ)域。据此,结合 Allan 方差与噪声功率谱密度的关系,可从 Allan 方差分析结果中定量地辨识出各种噪声。然而,这是以噪声的量值不随测试时间变化为前提的。因此,以往的文献在分析光纤陀螺的噪声时,不论是 Allan 方差法还是 DAVAR 法,对于每种噪声都是通过一维数值来进行评定^[8,15]。然而,在实际的光纤陀螺测试中,光纤陀螺的各种噪声并不是始终保持为恒值,它们是随时间变化的,特别是在动态测试中,这种现象更加明显。在本文中,结合 DAVAR 的基本原理,通过噪声与观测长度 τ 的关系,得到各种噪声的量值随时间的变化规律,即各种噪声量值的二维表示。

由 DAVAR 的基本原理可知,DAVAR 由时间轴上不同时间段的 Allan 方差组成。一个时段就是一个窗口,并且,在每个窗口长度内都可以根据 Allan 方差的原理得到一个 $\sigma(n, \tau)$ 。同时,Allan 方差与功率谱密度之间存在以下定量关系:

$$\sigma^2(\tau) = 4 \int_0^{\infty} S_{\Omega}(f) \frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df. \quad (5)$$

由(5)式可以看出,信号的功率谱在经过了一个传递函数为 $(\sin^4 x)/x^2$ 的滤波器后与 Allan 方差成正比。滤波器的带通取决于 τ ,不同类型的随机过程可通过调节滤波器带通来检验,即用不同的 τ 来检验。根据以上关系,就可以使用 Allan 方差对光纤陀螺中的各种噪声进行测定。

在使用 Allan 方差对光纤陀螺噪声进行分析时,常常需要对速率斜坡 $[\sigma_{\text{R}}^2(n, \tau)]$ 、速率随机游走 $[\sigma_{\text{RRW}}^2(n, \tau)]$ 、零偏不稳定性 $[\sigma_{\text{BI}}^2(n, \tau)]$ 、随机游走系数 $[\sigma_{\text{shot}}^2(n, \tau)]$ 、量化噪声 $[\sigma_{\text{Q}}^2(n, \tau)]$ 和指数相关噪声 $[\sigma_{\text{M}}^2(n, \tau)]$ 进行评定。假定各噪声所代表的随机过程在统计学上相互独立,则总的 Allan 方差可以表示为各噪声项 Allan 方差的和,即

$$\sigma_{\text{total}}^2(n, \tau) = \sigma_{\text{R}}^2(n, \tau) + \sigma_{\text{RRW}}^2(n, \tau) + \sigma_{\text{BI}}^2(n, \tau) + \sigma_{\text{shot}}^2(n, \tau) + \sigma_{\text{Q}}^2(n, \tau) + \sigma_{\text{M}}^2(n, \tau) = \sum_{m=-2}^2 A_m \tau^m. \quad (6)$$

由(6)式可以看出,在 n 值固定的条件下(即窗口固定),在 Allan 方差曲线上,可以分别从各噪声项对应的 τ 值读出其相应的量值,也可以通过最小二乘拟合获得一个窗口长度内各噪声项的系数。随

着窗口中心点在时间轴上移动,可以得到不同窗口内各噪声项的量值,将这些量值按照时间顺序排列起来,就得到各噪声量值随时间的变化规律。

5 实验结果分析

光纤陀螺的动态测试采用三轴转台作为测试设备。测试时,将光纤陀螺安装在机械台体上,在上位机中编写程序,设定转台框以一定的幅度和频率做往复摇摆运动。此时,光纤陀螺的输入角速度可根据系统实际的采样时间间隔对理论角速度曲线(由转台的输入摇摆幅度和摇摆频率确定)进行离散得到,其输出信号可通过数据接收软件获得。光纤陀螺动态测试的基本原理是通过静态补偿后的光纤陀螺输出信号与输入角速度比较,得到反映光纤陀螺动态性能的动态误差^[16]。按照该测试方法,对实验室某光纤陀螺进行动态测试。设定转台的摇摆幅度为 5° ,摇摆频率为 0.5 Hz ,可得到光纤陀螺在此条件下的动态误差如图1所示,图中 $D(t)$ 代表光纤陀螺的动态误差, n 代表采样点数目。

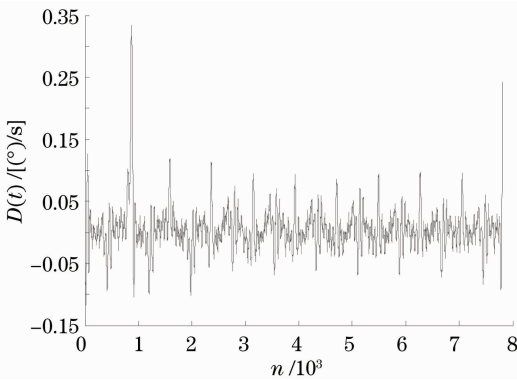


图1 光纤陀螺的动态误差

Fig. 1 Dynamic error of FOG

从图1可以看出,光纤陀螺的动态误差组成成分较复杂且存在各种非平稳性因素,包括周期性因素、突变性因素和慢变性因素等。因此,对动态误差进行分析,需采用适用于非平稳信号的处理方法。当光纤陀螺处于摇摆状态时,动态误差形式较复杂,且存在按正弦规律变化的稳态误差。但如果直接采用DAVAR法对动态误差中的噪声进行评定,稳态误差的影响会造成辨识精度下降。同时,由于动态误差所占频带较宽,较易引起功率泄漏。因此,需要对动态误差进行分离,以准确地评价其中的各种误差和噪声。

采用小波分析法对图1中的动态误差进行分离。根据各小波基函数的基本特性,选用db5小波,

同时根据采样频率和欲识别的频率成分,选用5层分解。通过小波函数对动态误差中的各部分进行分解与重构,将其分为3部分:系统趋势项、中低频噪声和低频噪声,结果如图2所示。

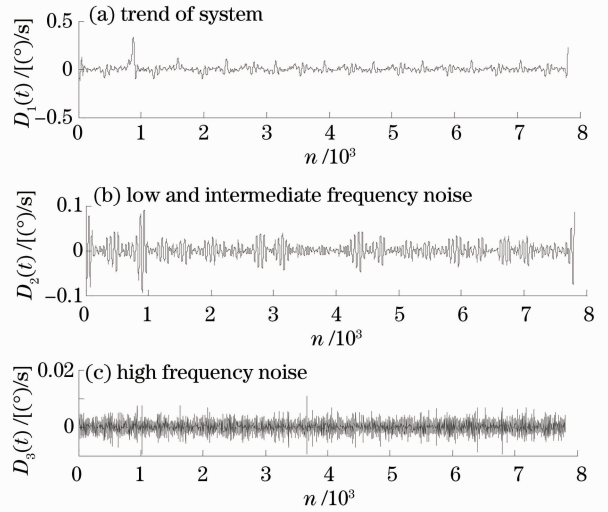


图2 光纤陀螺动态误差的分解结果

Fig. 2 Resolution of dynamic error of FOG

对动态误差的分解结果进行DAVAR分析时,需要截取原始信号中的一段信号作为研究对象,即对原始信号加窗。这就使得该截取信号不能完全反映原始信号的频率特性,出现频率泄漏,表现为以频谱中的实际频率值为中心,以窗函数频谱的波形向两边扩散。从能量的角度来说,频率泄漏现象相当于原始信号中各频率成分的能量泄漏到其他频率处,因此又可以称为功率泄漏。为了减小这种泄漏效应,对于不同特点的原始信号需要采用合适的窗函数进行截断。高频段信号的分析对幅值精度要求高,故采用汉宁窗对其进行分析。图3是分别采用矩形窗和汉宁窗对图2(c)中的高频噪声进行功率谱分析的对比图。

从图3可以看出,采用矩形窗时,由于其旁瓣较大,在有些频率处会掩盖真实谱中的谱峰;而采用汉宁窗时,可以将各频率成分间的泄漏控制在很小的范围之内。虽然采用汉宁窗会使主瓣变宽,但是主瓣变宽造成的泄漏是次要的;而旁瓣变高造成的泄漏是主要的,它能引起较严重的皱波效应。汉宁窗在不太加宽主瓣的情况下,很大程度上压低了旁瓣的高度,从而较好地抑制了功率泄漏。因此,采用汉宁窗对高频噪声进行分析具有较高的精度。

下面采用窗函数组合法对图2中的动态误差分解结果进行DAVAR分析。图2(a)中的趋势项误差是在动态环境中产生的,是光纤陀螺动态误差与

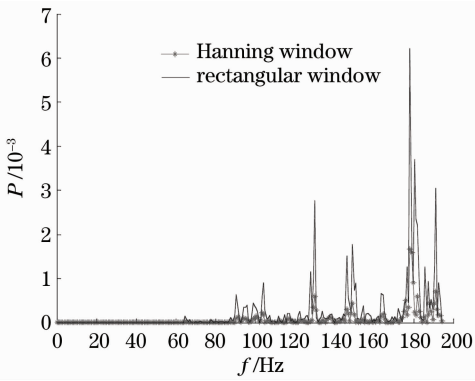


图 3 不同窗函数下高频噪声的功率谱

Fig. 3 Power spectra of high-frequency noise under different window functions

静态测试数据的主要区别。趋势项误差具有明显的周期性,应在 DAVAR 分析的数据预处理中去掉,否则会影响分析结果的准确性。但其作为光纤陀螺在动态下的重要特征,需要单独提取出来分析其在不同动态环境中的规律,在此不作讨论。对图 2(b)中的中低频噪声进行 DAVAR 分析,如图 4(a)所示,窗函数采用矩形窗,窗口长度为 401。对图 2(c)中的高频噪声进行 DAVAR 分析,如图 4(b)所示,窗函数采用汉宁窗,窗口长度为 401。

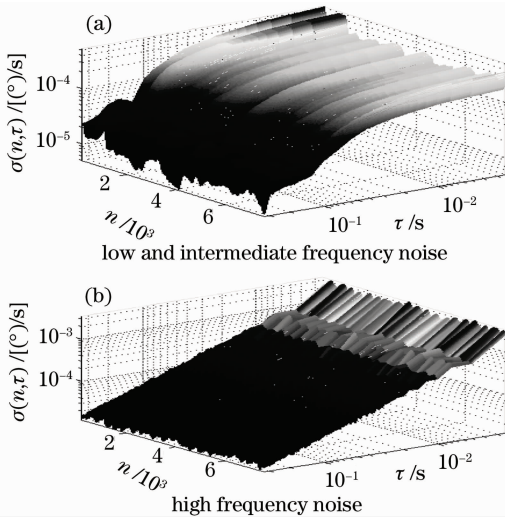


图 4 各频段噪声的 DAVAR 分析

Fig. 4 DAVAR analysis of noise in different frequency ranges

图 4 以三维的形式表示出采样点数 n 、观测长度 τ (即时间)和 DAVAR 三者的关系。可以看出当 τ 一定时,随着 n 的增加,在 DAVAR 的整体变化趋势中存在周期性因素。这是由于摇摆运动,使得光纤陀螺中的各种误差和噪声项被正弦所调制,所以其包络线具有周期性变化的特点。从图 4(a)可以看出,在采样点数为 1000 的附近,DAVAR 较大,反

映出图 2(b)中对应位置的突变性因素。当 n 一定时,可以得到 $\sigma(n, \tau) - \tau$ 的关系,即经典 Allan 方差的结果,可以反映出 Allan 方差随 τ 变化的规律。图 2(c)表现为高频噪声的集合,内部的变化趋势无法辨认,但从图 4(b)中可以清晰地反映出高频噪声被正弦所调制:当 τ 较小时,正弦包络线可明显地辨识出;当 τ 较大时,高频噪声可辨识出。由此可见,DAVAR 分析可以更全面形象地表征光纤陀螺动态误差中的各种非平稳性因素。

根据噪声量值的二维表示原理,对图 4 中光纤陀螺的各噪声项进行评定,可以得到角随机游走、零偏不稳定性、速率随机游走、速率斜坡和量化噪声随采样点数 n 增加的变化规律,如图 5 所示。

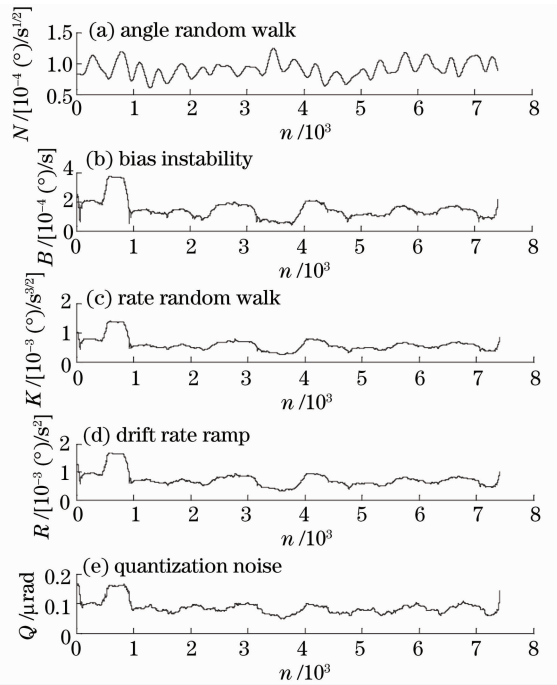


图 5 各噪声量值的变化规律

Fig. 5 Value variation of noise items

由图 5 可以看出,随着 n 的增加,各噪声项并不是恒定值,而是存在起伏变化。在 n 为 500~1000 之间,零偏不稳定性、速率随机游走、速率斜坡和量化噪声的数值出现突变。由图 5(c)和(d)可以看出,正弦调制使得速率随机游走和速率斜坡的整体量级较大。各噪声量值的二维表示图有助于抑制噪声方法的提出,进而提高光纤陀螺的动态输出精度。

6 结 论

窗函数是实现 Allan 方差向 DAVAR 转化的工具,它使得 DAVAR 能够以三维形式形象地表征光纤陀螺动态误差信号中的非平稳性因素。但是,单

一窗函数无法同时满足光纤陀螺动态误差中所有频段噪声的辨识精度。窗函数组合法较好地解决了这一问题。通过矩形窗对动态误差的中低频噪声的分析,满足了频率分辨率高的要求,达到了对尽可能多的噪声进行描述的目的。同时,汉宁窗在高频段噪声辨识中的应用提高了幅值估计精度,减小了功率泄漏。DAVAR对各种噪声量值的二维表示突破了一维数值描述的局限性,它不仅可以得到量化的结果,而且还可以准确地反映出动态误差中各噪声项的变化特征。本文的工作不仅是对DAVAR理论的改进和补充,也是对DAVAR在光纤陀螺动态误差噪声辨识中应用的验证。

参 考 文 献

- 1 L. Galleani, P. Tavella. The characterization of clock behavior with the dynamic Allan variance[C]. Proc. IEEE FCS-EFTF, 2003, 239~244
- 2 L. Galleani, P. Tavella. Tracking nonstationarities in clock noises using the dynamic Allan variance [C]. Proc. Joint FCS-PTTI Meeting, 2005, 392~396
- 3 L. Galleani, P. Tavella. Interpretation of the dynamic Allan variance of nonstationary clock data[C]. Proc. IEEE FCS-EFTF, 2007, 992~997
- 4 L. Galleani, P. Tavella. The dynamic Allan variance [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2009, **56**(3): 450~464
- 5 L. Galleani, P. Tavella. Fast computation of the dynamic Allan variance[C]. Proc. IEEE FCS-EFTF, 2009, 685~687
- 6 L. Galleani. The dynamic Allan variance II: a fast computational algorithm[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2010, **57**(1): 182~188
- 7 I. Sesia, L. Galleani, P. Tavella. Application of the dynamic Allan variance for the characterization of space clock behavior[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, **47**(2): 884~895
- 8 Li Ying, Chen Xinglin, Song Shenmin. Dynamic Allan variance analysis for the drift error of fiber optic gyroscope [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2008, **19**(2): 183~186
- 9 李 颖, 陈兴林, 宋申民. 光纤陀螺漂移误差动态 Allan 方差分析[J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(2): 183~186
- 9 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
- 10 Li Xuyou, Zhang Na. Analysis of dynamic characteristics of a fiber optic gyroscope based on dynamic Allan variance [J]. *J. Harbin Engineering University*, 2011, **32**(2): 183~187
- 李绪友, 张 娜. 基于动态 Allan 方差的光纤陀螺动态特性分析 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2011, **32**(2): 183~187
- 11 Yang Yanjuan. Service ability analysis of windowed function [J]. *Coal Technology*, 2007, **26**(2): 124~125
- 杨艳娟. 窗函数的适用性分析 [J]. *煤炭技术*, 2007, **26**(2): 124~125
- 12 Li Di, Sun Yao, Li Xuyou *et al.*. Research and analysis of marine FOG random drift [J]. *Navigation of China*, 2005, **62**(1): 35~37
- 李 迪, 孙 尧, 李绪友等. 船用光纤陀螺随机漂移分析与研究 [J]. *中国航海*, 2005, **62**(1): 35~37
- 13 Dang Shuwen, Tian Weifeng, Qian Feng. De-noising fractional noise in fiber optic gyroscopes based on lifting wavelet [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 625~629
- 党淑雯, 田蔚风, 钱 峰. 基于提升小波的光纤陀螺分形噪声滤除方法 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 625~629
- 14 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
- 李家垒, 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
- 15 Li Jialei, Xu Hualong, He Jing. Research and improvement of denoising method of fiber optic gyroscope based on wavelet packet analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2224~2228
- 李家垒, 许化龙, 何 婧. 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
- 16 Li Xuyou, Zhang Na, Gao Wei *et al.*. Application of wavelet analysis in testing of dynamic characteristics of fiber optic gyroscope [C]. Symposium Gyro Technology, 2009, 5.1~5.13

栏目编辑: 韩 峰