

旋转导向系统有色噪声的改进无迹卡尔曼滤波方法

徐宝昌¹, 杨全进^{1,2}, 蒋海旭³

(1. 中国石油大学地球物理与信息工程学院, 北京 102249; 2. 中国石化集团公司胜利石油工程公司钻井工艺研究院, 山东东营 257000; 3. 海油发展安全环保公司, 天津 300456)

摘要:在旋转导向钻井系统的姿态测量过程中,三轴加速度计测量数据中包含大量有色噪声,严重影响井底组合钻具姿态测量的精度。基于旋转坐标变换的四元数理论,结合所建立的三轴加速度噪声模型,提出一种改进无迹卡尔曼(UKF)迭代滤波算法。此方法利用陀螺测量原理构造观测方程和时变状态方程,将实时解算出的钻具姿态以四元数的形式更新时变状态方程中三轴角速度,通过更新观测方程加速度噪声模型实现加速度计传感器数据中有色噪声的UKF迭代滤波。实测数据滤波的结果表明,此方法可有效滤除加速度传感器数据中的有色噪声,保证旋转导向钻具姿态测量的精度。

关键词:旋转导向;有色噪声;姿态测量;四元数;无迹卡尔曼滤波

中图分类号:TE 927 **文献标志码:**A

引用格式:徐宝昌,杨全进,蒋海旭. 旋转导向系统有色噪声的改进无迹卡尔曼滤波方法[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(2):157-163.

XU Baochang, YANG Quanjin, JIANG Haixu. Improved unscented Kalman filtering method for colored noises of rotary steerable system[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(2): 157-163.

Improved unscented Kalman filtering method for colored noises of rotary steerable system

XU Baochang¹, YANG Quanjin^{1,2}, JIANG Haixu³

(1. College of Geophysics and Information Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. Drilling Technology Research Institute, Shengli Petroleum Engineering Company, SINOPEC, Dongying 257000, China;
3. CNOOC EnerTech-Safety & Environmental Protection Company, Tianjin 300456, China)

Abstract: In general, the measurements of three-axial accelerometers contain a great amount of colored noises, which can significantly affect the accuracy of the attitude measurement by the rotary steerable drilling system. Combined with the noise model of the three-axial accelerometer, an improved unscented Kalman filtering (UKF) algorithm based on quaternion was proposed. Based on the theory of gyroscope, the observation equation and time-varying state equation were constructed in real-time, and then the three-axis angular velocities of time-varying state equation were updated by the attitude of drilling assembly in the way of quaternion, and the UKF iterative filtering was applied. The filtering results measured from oil fields show that this method can filter the colored noises of accelerometer effectively and ensure the accuracy in the attitude measurement of rotary steerable assembly.

Keywords: rotary steerable; colored noises; attitude measurement; quaternion; unscented Kalman filtering

在推靠式旋转导向钻井姿态测量系统中,井底组合钻具由于受到非匀速转动及导向翼肋动作工况

下复杂振动的影响,三轴加速度计测量数据中包含大量有色噪声,严重影响钻具井斜及方位姿态测量

收稿日期:2014-10-05

基金项目:国家重大专项(2011ZX05022-003,2011ZX05021-003);中国石油大学(北京)基本科研基金(201206445008)

作者简介:徐宝昌(1974-),男,副教授,博士,研究方向为钻井工程自动化、复杂系统建模与先进控制、多传感器信息融合。E-mail: xbcyl@163.com。

精度。杨全进等^[1]提出的无迹卡尔曼滤波(UKF)方法虽然解决了组合钻具保持工况下的姿态滤波问题,但考虑复杂化振动干扰情况下有色噪声干扰时滤波解算结果出现很大偏差。薛启龙等^[2]提出井斜方位动态解算方法,针对传感器数据干扰噪声的硬件滤波并不能满足井底复杂噪声的有效去除。王小旭等^[3]提出非线性系统有色噪声的无迹卡尔曼滤波,采用量测信息扩增的方法将有色量测噪声转化为白噪声,但此滤波是基于假设条件(状态变量同观测噪声无关)下的滤波算法,对于一般情况下滤波过程并不适用。周静等^[4]基于干扰信号功率谱密度分析而提出的滤波算法精确度尚待提高。基于上述问题,笔者以中国石化集团公司胜利石油工程公司钻井工艺研究院(简称胜利钻井院)在研的全旋转推靠式旋转导向系统为研究对象,结合其三轴磁通门和三轴加速度计传感器姿态测量方式,借助四元数理论及陀螺测量原理,建立加速度振动噪声模型以及观测方程和时变状态方程,通过改进的UKF迭代滤波实现有效滤波。

1 加速度有色噪声模型

推靠式旋转导向钻具导向钻进过程中由于受到转速波动及翼肋动作影响^[5],组合钻具姿态测量单元中加速度传感器数据中叠加了大量有色噪声。为研究此干扰噪声特性,本文中结合组合钻具导向钻进过程的控制规律,对比分析转速波动对振动加速度数据的影响,根据石英加速度计测量原理,建立全旋转推靠式钻具测量系统轴向及侧向加速度噪声模型^[6],从而为合理有效滤波算法的提出及改进提供理论支持。

通过对组合钻具井下振动加速度计输出的历史数据进行回放分析,对比转速波动及翼肋动作控制时序(图1)。

由上述对比结果可知:振动加速度干扰信号与翼肋动作的触发时序及组合钻具转速密切相关,即每一次翼肋支出过程对井壁的反作用力及转速的波动均能直接反映在加速度信号中。区别于常规钻井,推靠式组合钻具导向钻进过程中加速度计数据中除了包含牙轮破岩及钻柱摆动的啮合振动干扰外,还包含转速波动及翼肋动作导致的振动干扰。

结合国内外研究成果^[7],分析上述各种振动干扰来源及特性^[8],以钻头钻具振动机制为基础,根据石英摆片挠性加速度计的结构原理及测量原理,

得出加速度计力学平衡方程:

$$M \frac{d^2(x-y)}{dt^2} - \zeta \frac{dy}{dt} - \chi y - F_\beta = 0.$$

式中, M 为惯性质量; ζ 为阻尼系数; y 为形变量,mm; χ 为弹簧刚度,N/mm; χy 为弹性力的大小,N; F_β 为力矩反馈力的大小,N。

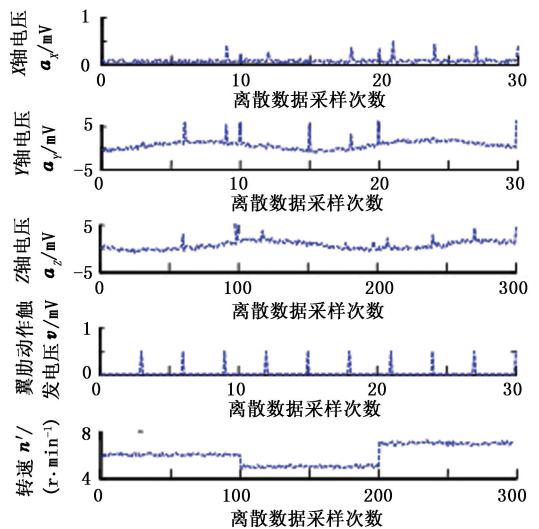


图1 钻具振动加速度计信号分析

Fig. 1 Acceleration signal analyse of vibration on drilling assembly

将上式经复变换后得到加速度计传递函数 $G(s)$ 为

$$G(s) = \frac{R_c S_0 (1 + \Gamma s)}{M s^2 + (\zeta + S_0 \Gamma B L) s + \left(1 + \frac{S_0 B L}{\chi}\right) \chi} \quad (1)$$

式中, B 为感应强度; L 为线圈长度,mm; R_c 为转换电阻, Ω ; S_0 为静态增益; Γ 为时间常数。

针对牙轮破岩及钻柱摆动的啮合振动特性,结合钻具振动特性研究结果证明3倍转速下的振动分量是振动干扰的主要组成部分,确定其主要振动频率为

$$f = \frac{3n'}{60} = \frac{n'}{20}$$

式中, f 为振动频率,Hz; n' 为转速,r/min。

则啮合振动干扰输入信号等效为

$$\psi(t) = \sin(2\pi f t) \quad (2)$$

根据信号分析理论周期信号分解方法,结合加速度噪声干扰信号历史离散数据,运用周期图法把转速在60 r/min上下波动时一系列轴横向加速度信号视为一能量有限的序列,直接计算连续傅里叶变换即得到钻具轴向及横向振动加速度信号频谱^[10],如图2所示。

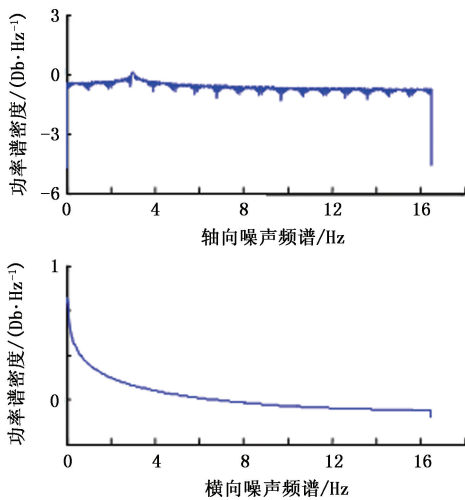


图2 钻具振动加速度信号频谱分析

Fig.2 Spectrum of acceleration signal of vibration on drilling assembly

观察钻具振动加速度信号频谱分析结果^[11],结合图1转速波动及翼肋动作对钻具振动加速度计信号的影响,确定转速波动及翼肋动作影响下加速度干扰输入信号等效为

$$\phi(t) = \frac{\iota}{D(n') + 1} \left(\left| \sin\left(\frac{2\pi}{n'}t + \frac{\pi}{3}\right) \right| + \left| \sin\left(\frac{2\pi}{n'}t + \frac{5\pi}{12}\right) \right| \right). \quad (3)$$

$D(n') = \text{var}(n')$.

式中, ι 为增益放大系数; $D(n')$ 为转速方差系数。

结合式(1)和(2),并运用拉普拉斯反变换得到钻具轴向加速度计输出信号 $P_1(t)$ 为

$$P_1(t) = F\xi(\psi(t)) + Mg\cos(lt) + J. \quad (4)$$

其中

$$F = \frac{R_c S_0 [(S_0 \beta \Gamma^2 + \zeta \Gamma - M) l^2 + S_0 \beta \chi]}{M^2 l^4 + [(S_0 \Gamma \beta + \zeta)^2 - 2M(S_0 \beta + \chi) l^2 + (S_0 \beta + \chi)^2]}.$$

式中, $Mg\cos(lt)$ 为余波干扰; J 为指数衰减因子; ξ 为振动放大倍数; l 为旋转角频率,rad/s。

结合式(1)和(3),考虑转速波动及翼肋动作影响,确定在钻具转速为 r 时,侧向加速度计在干扰信号 $\psi(t)$ 及 $\phi(t)$ 激励下加速度计信号输出信号 $P_2(t)$ 为

$$P_2(t) = F\xi(\psi(t) + \phi(t)) + Mg\cos(lt) + J. \quad (5)$$

通过加速度计噪声信号计算过程,推导出轴向、侧向加速度噪声模型 $P_1(t)$ 、 $P_2(t)$,分析此噪声信号中包含大量低频干扰,传统硬件滤波并不能满足实际工况下滤波要求^[12],为满足钻具姿态测量精度及实用性要求,必须结合三轴加速度计钻具姿态测量原理,建立与此噪声模型相符合的滤波计算模型。

2 钻具姿态测量模型

2.1 欧拉坐标变换

胜利钻井院钻具姿态测量系统三轴加速度计安装方式与航天航空业界常用的 $Z-Y-X$ 坐标变换一致^[13],地理坐标系 $O-NED$ 经过图3中 b_1 、 b_2 、 b_3 三个方向角旋转变换,可得到钻具坐标系 $O-XYZ$ ^[11]。

上述坐标变换过程可表示为

$$\mathbf{v} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{v}.$$

其中

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos b_3 & \sin b_3 \\ 0 & -\sin b_3 & \cos b_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos b_2 & 0 & -\sin b_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin b_2 & 0 & \cos b_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos b_1 & \sin b_1 & 0 \\ -\sin b_1 & \cos b_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

式中, \mathbf{v} 为钻具坐标系中的矢量; \mathbf{v} 为地理坐标系中的矢量; \mathbf{T} 为三欧拉角旋转变换矩阵。

2.2 加速度观测方程

为避免三欧拉角旋转变换矩阵解算过程中出现的万向节死锁问题^[14],以及考虑解算速度要求等问题,本文将坐标变换过程表示为以空间姿态测量过程中广泛应用的四元数形式。

四元数是由一个实数单位和三个虚数单位组成的超复数,具体形式可表示为

$$Q = q_0 + q_1 j_1 + q_2 j_2 + q_3 j_3.$$

式中, q_0, q_1, q_2, q_3 均为实数, j_1, j_2, j_3 为虚数单位,由于此表示形式与笛卡儿直角坐标系相似,故三个虚数单位相当于直角坐标系中的单位向量^[15-17]。

三欧拉角与四元数的转换关系如下所示:

$$q_0 = \cos\left(\frac{b_3}{2}\right) \cos\left(\frac{b_2}{2}\right) \cos\left(\frac{b_1}{2}\right) + \sin\left(\frac{b_2}{2}\right) \sin\left(\frac{b_2}{2}\right) \sin\left(\frac{b_1}{2}\right),$$

$$q_1 = \sin\left(\frac{b_3}{2}\right) \cos\left(\frac{b_2}{2}\right) \cos\left(\frac{b_1}{2}\right) - \sin\left(\frac{b_2}{2}\right) \cos\left(\frac{b_3}{2}\right) \sin\left(\frac{b_1}{2}\right),$$

$$q_2 = \cos\left(\frac{b_3}{2}\right) \sin\left(\frac{b_2}{2}\right) \cos\left(\frac{b_1}{2}\right) + \cos\left(\frac{b_2}{2}\right) \sin\left(\frac{b_3}{2}\right) \sin\left(\frac{b_1}{2}\right),$$

$$q_3 = \cos\left(\frac{b_3}{2}\right) \cos\left(\frac{b_2}{2}\right) \sin\left(\frac{b_1}{2}\right) - \sin\left(\frac{b_2}{2}\right) \sin\left(\frac{b_3}{2}\right) \cos\left(\frac{b_1}{2}\right).$$

$$\left(\frac{b_1}{2}\right). \tag{7}$$

根据上述变换,旋转矩阵 T 可变换为

$$T = \begin{bmatrix} q_0^2+q_1^2-q_2^2-q_3^2 & 2(q_1q_2+q_0q_3) & 2(q_1q_3-q_0q_2) \\ 2(q_1q_2-q_0q_3) & q_0^2-q_1^2+q_2^2-q_3^2 & 2(q_2q_3+q_0q_1) \\ 2(q_1q_3+q_0q_2) & 2(q_2q_3-q_0q_1) & q_0^2-q_1^2-q_2^2+q_3^2 \end{bmatrix}.$$

三轴加速度计在采样时刻 t 的测量输出如下:

$$a(t) = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = T(t) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix}. \tag{8}$$

式中, $a(t)$ 为 t 时刻三轴加速度计的测量时的输出数据矩阵, m/s^2 ; $T(t)$ 为矩阵 T 在 t 时刻的值; g 为重力加速度, m/s^2 .

由此可确定含时变四元数的传感器数据观测方程为

$$Y(t) = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = H[q(t)] + \begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ P_2(t) \end{bmatrix}. \tag{9}$$

式中, $q(t)$ 为 t 时刻 q_0, q_1, q_2, q_3 的取值; H 为非线性观测矩阵。

2.3 四元数状态方程

根据空间坐标旋转,结合四元数理论分析,确定四元数表示的钻具姿态运动学状态方程为

$$\begin{bmatrix} q_0' \\ q_1' \\ q_2' \\ q_3' \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}.$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix},$$

$$\omega(t) = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = T(t) \cdot \begin{bmatrix} \omega \cos \varphi \\ 0 \\ \omega \sin \varphi \end{bmatrix}. \tag{10}$$

式中, ω 为地球自转角速度, rad/s ; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 分别为地球自转角速度在钻具坐标系各轴上的分量, rad/s ; φ 为 GPS 设备实测的当地纬度, $(^\circ)$ 。

3 改进的无迹卡尔曼迭代滤波

由观测方程及状态方程可知,所建立的钻具姿态滤波模型是典型的非线性模型^[18-24],同时根据加

速度轴向及侧向噪声干扰分析,结合文献[1]中钻具保持状态下白噪声滤波方法,首先将状态方程及观测方程进行离散化处理,使得前文所构造的旋转向状态空间模型满足无迹卡尔曼滤波条件,进而通过三轴加速度计数据采样迭代滤波等步骤,最终实现加速度干扰数据的有效滤除。具体迭代滤波流程如图3所示。

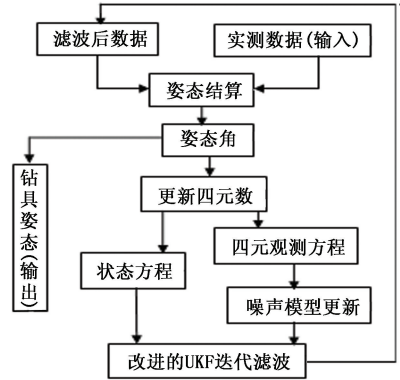


图3 改进的无迹卡尔曼迭代滤波

Fig.3 Schematic of iteration filtering based on improved UKF

根据香农采样定理及实际工程需要,确定加速度传感器离散采样时间为 $t_s = 0.03 s$,将状态方程及观测方程进行离散化处理得到离散化模型为

$$\begin{cases} q(k+1) = (I + t_s A) q(k) + U(k), \\ Y(k+1) = H[q(k)] + P(k). \end{cases} \tag{11}$$

式中, $q(k)$ 为连续系统做离散化后得到的离散向量, k 为对应采样时刻; $U(k)$ 为系统噪声; $P(k)$ 为传感器观测噪声。

考虑到姿态角更新四元数系统方程在实际测量滤波算法中的滞后特性,首先要对姿态传感器实测数据进行跟踪变换,即将测量数据 $Y(k)$ 按图4所示进行姿态解算及四元数变换,然后将变换所得代入滤波公式,进行迭代滤波运算。

假定初始滤波状态变量 $q(k-1)$ 及协方差矩阵 N_{k-1} ,用 U 变换求状态的一步预测 \bar{s} 和一步预测协方差矩阵 $\bar{N}_{k,k-1}$,执行如下 sigma 点及权值计算:

$$\begin{cases} X_0 = q(k-1), \\ X_i = q(k-1) + (\sqrt{(n+1)N_{k-1}})_i, i = 1, 2, 3, \dots, n, \\ X_i = q(k-1) - (\sqrt{(n+1)N_{k-1}})_i, i = n+1, \dots, 2n. \end{cases}$$

式中, n 为状态方程中状态变量的个数。

$$\begin{cases} w_0^m = \lambda / (n + \lambda), \\ w_i^c = \lambda / (n + \lambda) + (1 - \alpha^2 + \gamma), i = 1, 2, 3, \dots, 2n, \\ w_i^m = 1 / (2(n + \lambda)), i = 1, 2, 3, \dots, 2n. \end{cases}$$

其中

$$\lambda = \tau^2(n+e) - n.$$

式中, τ 取最小正值 0.001, γ 取 2, e 取 0。

通过状态方程将 sigma 点进行非线性传播

$$X_i^a = [I + t_s A(k-1)] X_i, i = 0, 1, 2, 3, \dots, 2n.$$

$$\bar{s} = \sum_{i=0}^{2n} w_i^m X_i^a, i = 0, 1, 2, 3, \dots, 2n.$$

一步预测协方差矩阵:

$$\bar{N}_{k,k-1} = \sum_{i=0}^{2n} w_i^c (X_i^a - \bar{s})(X_i^a - \bar{s})^T + N_{k-1}, i = 0, 1, 2, \dots, 2n.$$

观测更新方程:

$$Y_i^a = H(X_i^a) + P(k), i = 0, 1, 2, \dots, 2n.$$

$$Z = \sum_{i=0}^{2n} w_i^m Y_i^a, i = 0, 1, 2, \dots, 2n.$$

$$\bar{N}_z = \sum_{i=0}^{2n} w_i^c (Y_i^a - Z)(Y_i^a - Z)^T, i = 0, 1, 2, \dots, 2n.$$

$$\bar{N}_{x,z} = \sum_{i=0}^{2n} w_i^c (X_i^a - \bar{s})(Y_i^a - Z)^T, i = 0, 1, 2, \dots, 2n.$$

更新滤波方程得

$$K_k = \bar{N}_{x,z} \bar{N}_z^{-1},$$

$$q(k) = \bar{s} + K_k [\bar{q}(k) - Z],$$

$$N_k = \bar{N}_{k,k-1} - K_k \bar{N}_z K_k^T.$$

式中, $\bar{q}(k)$ 为第 k 步姿态传感器观测数据 $Y(k)$ 变换所得。

经过上述迭代滤波过程, 得到滤波后传感器三轴加速度计数据:

$$H(q(k)) = \begin{bmatrix} 2(q_1 q_3 - q_0 q_2)g \\ 2(q_2 q_3 + q_0 q_1)g \\ (q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2)g \end{bmatrix}. \quad (12)$$

将以上滤波后加速度计数据 $H(q(k))$ 应用于钻具姿态解算, 从而得到滤波后钻具精确姿态角。

4 实验与分析

4.1 实验条件

实验设备为: 中国石化胜利钻井工艺研究院动态推靠式旋转导向组合钻具, 便携式工控机, Pico-Scope 3200 示波器等。实验室地理条件为: 北纬 36° , 地球自转角速度为 $15.1^\circ/\text{h}$, 地球重力加速度为 9.78 m/s^2 。

4.2 实验结果及分析

将本文方法应用于胜利油田某实验井导向钻进过程的实钻数据滤波过程: 选取组合钻具井斜角 9.6° 、方向角 84° (停钻测量) 为初始滤波方向角, UT

变换过程 τ 取最小正值 0.001, γ 取 2, e 取 0。滤波得到三轴加速度计传感器数据滤波结果如图 4 所示。

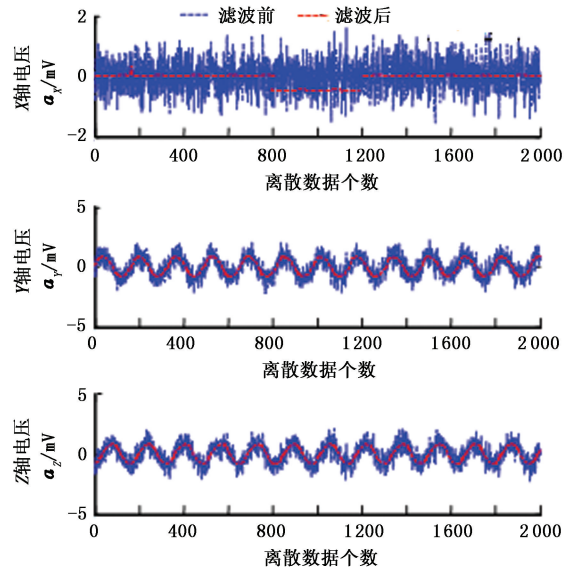


图 4 改进 UKF 滤波结果

Fig. 4 Filtering results of improved UKF

图 4 滤波结果表明: 导向钻进过程中改进的 UKF 迭代滤波可有效去除加速度计传感器数据中的有色噪声干扰。

为验证上述滤波结果对钻具姿态解算精度的影响, 本文中借助姿态传感器自带的误差修正及姿态解算算法, 将 UKF 滤波前后钻具姿态解算结果进行对比, 以评价滤波的效果, 具体对比结果见图 5。

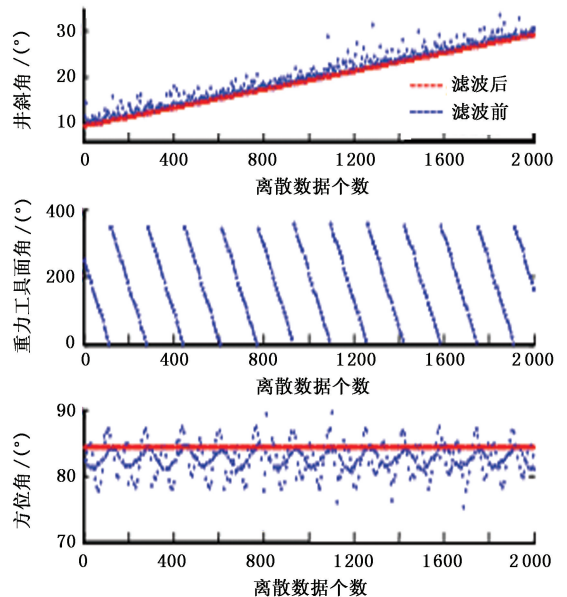


图 5 有色噪声 UKF 滤波前后姿态解算姿态对比结果

Fig. 5 Comparison of color noise UKF filtering results before filtering and filtered attitude of drilling assembly

根据上述滤波及滤波后姿态解算结果可知,基于所建立的钻具加速度振动有色噪声模型下的改进无迹卡尔曼滤波算法可有效滤除加速度计中的有色噪声,实验结果验证了此改进算法的有效性。

5 结 论

(1) 在钻具非匀速导向钻进过程中,改进的UKF迭代滤波算法结合钻具加速度振动干扰模型实现了加速度振动干扰信号的有效滤除,胜利油田某实验井导向情况下实钻数据的滤波实验结果验证了该方法的现场实用性及滤波精度。

(2) 本文算法仅考虑了钻具轴向振动信号作为主要干扰进行滤波,并没有考虑当井底复杂地层造斜力较大而产生复杂化振动干扰时(如横向的振动干扰)的滤波问题,其难点在于此情况下噪声模型的建立,这将在进一步的工作中深入研究。

参考文献:

- [1] 杨全进,徐宝昌,左信,等. 旋转导向钻具姿态的无迹卡尔曼滤波方法[J]. 石油学报, 2013, 34(6): 1168-1175.
YANG Quanjin, XU Baochang, ZUO Xin, et al. An unscented Kalman filter method for attitude measurement of rotary steerable drilling assembly [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(6): 1168-1175.
- [2] 薛启龙,王瑞和,孙峰,等. 捷联式旋转导向井斜方位动态解算方法[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2012, 36(3): 93-107.
XUE Qilong, WANG Ruihe, SUN Feng, et al. Dynamic solution approach to inclination and azimuth of strap-down rotary steerable system [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012, 36(3): 93-107.
- [3] 王小旭,梁彦,潘泉,等. 带有色量测噪声的非线性系统 Unscented 卡尔曼滤波器[J]. 自动化学报, 2012, 38(6): 986-998.
WANG Xiaoxu, LIANG Yan, PAN Quan, et al. Unscented Kalman filter for nonlinear systems with colored measurement noise [J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(6): 986-998.
- [4] 周静,赵毅,李星,等. 旋转导向钻井系统中振动加速度的消除方法[J]. 石油钻采工艺, 2010, 32(2): 19-22.
ZHOU Jing, ZHAO Yi, LI Xing, et al. Method of eliminating vibrational acceleration in rotary steerable drilling system [J]. Oil Drilling and Production Technology, 2010, 32(2): 19-22.
- [5] 刘白雁,苏义脑,陈新元,等. 自动垂直钻井中井斜动态测量理论与实验研究[J]. 石油学报, 2006, 27(4): 105-109.
LIU Baiyan, SU Yinao, CHEN Xinyuan, et al. Theoretical and experimental investigation on dynamic measurements of hole inclination in automatic vertical drilling process [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(4): 105-109.
- [6] 袁赣南,张涛. 四元数 UKF 超紧密组合导航滤波方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(7): 762-766.
YUAN Gannan, ZHANG Tao. Quaternion unscented Kalman filtering for ultra-tight integration [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(7): 762-766.
- [7] 程国采. 四元数矩阵[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 2002: 3-10.
- [8] 刘海颖,王惠南,刘新文. 基于 UKF 的四元数载体姿态确定[J]. 南京航空航天大学学报, 2006, 38(1): 37-42.
LIU Haiying, WANG Huinan, LIU Xinwen. Attitude measurement using quaternion based on UKF [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 38(1): 37-42.
- [9] 林柏亨. 一个新的钻井液流变模型[J]. 石油学报, 1999, 20(4): 78-82.
LIN Baiheng. A new rheological model for drilling fluids [J]. Acta Petrolei Sinica, 1999, 20(4): 78-82.
- [10] 罗武胜,徐涛,杜列波. 基于加速度计和磁强计的定向钻进姿态测量及方位校正[J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(1): 106-110.
LUO Wusheng, XU Tao, DU Liebo. Directional drilling attitude measurement and azimuth correction with accelerometers and magnetometers [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2007, 29(1): 106-110.
- [11] 祝效华,贾彦杰,童华. 气体钻井钻柱振动特性及控制措施[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 293-297.
ZHU Xiaohua, JIA Yanjie, TONG Hua. Vibrating characteristics of drill string in gas drilling and its control measures [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 293-297.
- [12] 祝效华,刘清友,童华. 三维井眼全井钻柱系统动力学模型研究[J]. 石油学报, 2008, 29(2): 287-295.
ZHU Xiaohua, LIU Qingyou, TONG Hua. Research on dynamics model of full hole drilling-string system with three-dimensional trajectory [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(2): 287-295.
- [13] HENNEUSE H. Surface detection of vibrations and drilling optimization: field experience [R]. SPE 23888,

- 1992.
- [14] MITCHELL R F, ALLEN M B. Case studies of BHA vibration failure[R]. SPE 16675, 1987.
- [15] 高德利,王德桂. 底部钻具振动特性分析及信息传输实验[J]. 石油钻采工艺,2007,29(5):1-4.
GAO Deli, WANG Degui. Vibration characteristic analysis and information transmission test of bottom drilling tool[J]. Oil Drilling and Production Technology, 2007, 29(5):1-4.
- [16] 高岩. 三牙轮钻头钻进时钻柱轴向振动的特征[J]. 石油学报,2000,21(6):93-96.
GAO Yan. Axial vibration performance of drill string when drilling with three-cone bit[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000,21(6):93-96.
- [18] 吕官云,孙峰. 捷联式自动垂直钻井系统井斜方位动态测量算法研究与应用[J]. 测井技术,2011,35(1):93-97.
LÜ Guanyun, SUN Feng. Dynamical measurement algorithm and application of inclination and azimuth in strap-down automatic vertical drilling system[J]. Well Logging Technology, 2011,35(1):93-97.
- [19] 邵佩,刘白雁,苏义脑,等. 垂直钻井工具测斜仪精确校正理论与实验[J]. 石油学报,2012,33(4):692-696.
SHAO Pei, LIU Baiyan, SU Yinao, et al. Theoretical and experimental study on precise calibration of the inclinometer in vertical drilling tools[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012,33(4):692-696.
- [20] YUN X. An improved quaternion-based Kalman filter for real-time tracking of rigid body orientation: proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems[C]. Piscataway: IEEE, c2003.
- [21] CHEON Y J, KIM J H. Unscented filtering in a unit quaternion space for spacecraft attitude estimation: proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics[C]. Piscataway: IEEE, c2007.
- [22] HAYKIN S. Kalman filtering and neural networks[M]. New York: John Wiley and Sons, Inc, 2001:234-240.
- [23] LI R, GEORGY J, ZHAO J H, et al. Testing a new integrated solution for MEMS inertial measurement unit used for measurement-while-drilling in rotary steerable system[J]. Sensor Letters, 2012,10(3/4):719-725.
- [24] 汤楠,霍爱清,汪跃龙,等. 旋转导向钻井工具稳定平台控制功能试验研究[J]. 石油学报,2008,29(2):284-287.
TANG Nan, HUO Aiqing, WANG Yuelong, et al. Experimental study on control function of stabilized platform for rotary steering drilling tool[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008,29(2):284-287.

(编辑 修荣荣)