

一种基于大型光纤陀螺仪的世界时解算方法

王惜康^{1,2,3,4*}, 高玉平^{2,3,4}

¹西安测绘研究所地理信息工程国家重点实验室, 陕西 西安 710000;

²中国科学院国家授时中心, 陕西 西安 710600;

³中国科学院时间频率基准重点实验室, 陕西 西安 710600;

⁴中国科学院大学, 北京 100049

摘要 世界时(UT1)是大地测量、导航等应用领域必不可少的参数之一,当前利用国际地球自转服务(IERS)可以实现 1 天获取 1 个 UT1 参数,但是对于在 1 天以内任意时刻的 UT1 参数还无法实现实时测量与获取。大型光纤陀螺仪可以测量并提供高时间分辨率的地球自转角速度变化测量值,为 UT1 的实时监测提供了可能。依托现有的大型光纤陀螺仪测量平台,并从陀螺仪测量的基本原理出发,设计了一种基于大型光纤陀螺仪的 UT1 参数解算方法,并通过对陀螺仪实测数据的分析,验证解算方法的可行性,初步实现了利用大型光纤陀螺仪测量数据解算 UT1 参数的目标,使 UT1 参数获取的时间间隔提高到 5 min,证明了基于大型光纤陀螺仪有潜力成为一种新的 UT1 测量方式。

关键词 光计算; 大型光纤陀螺仪; 世界时; 数值积分; 定向误差改正; 地球自转角速率

中图分类号 P126

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0920001

Universal Time Calculation Method Based on Large-Scale Fiber Optic Gyroscopes

Wang Xikang^{1,2,3,4*}, Gao Yuping^{2,3,4}

¹State Key Laboratory of Geo-Information Engineering, Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an, Shaanxi 710000, China;

²National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710600, China;

³Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710600, China;

⁴University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Universal time (UT1) is an indispensable parameter in applications of geodesy and navigation. Currently, an UT1 parameter per day can be obtained from the international Earth rotation service (IERS). However, UT1 parameters cannot be measured and obtained in real time on any day. Large-scale fiber optic gyroscopes (FOGs) can measure and provide high-temporal-resolution measurements of variations in the Earth's rotation angular rate; thus, FOGs may provide a way to monitor UT1 in real time. Herein, we report the design of a novel UT1 calculation method based on the existing large-scale FOG measurement platform and the basic principles of FOG measurement. Data measured from FOG by this new method are analyzed to verify the method's accuracy and feasibility for implementation. The UT1 parameters are preliminarily calculated by measuring data from the large-scale FOG; the time interval for UT1 parameter acquisition is also shortened to 5 min. Thus, based on the large-scale FOG, the proposed method has the potential to become a new method of UT1 measurement.

Key words optics in computing; large-scale fiber optic gyroscope; universal time; numerical integration; orientation error correction; Earth's rotation angular rate

OCIS codes 200.4560; 140.3370; 200.4740

收稿日期: 2019-03-13; 修回日期: 2019-05-13; 录用日期: 2019-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(11373028)、“精密测量物理”重大研究计划资助项目(91736207)、地理信息工程国家重点实验室开放基金(SKLGIE2016-Z-1-5)

* E-mail: wangxikang12@mailsucas.ac.cn

1 引 言

世界时(UT1)是以地球自转运动为基础的时间计量系统,目前被广泛应用于大地测量和天文导航等相关领域,它是实现天球与地球坐标系转换的必要联系参数之一。UT1 反映了地球自转角速度的变化,它是地球定向参数(EOP)之一, UT1 是 EOP 中变化最大、最快且最不易精准预测的量,每1 s内的变化都是不可忽略的^[1-2]。现阶段,人们可以通过国际地球自转服务(IERS)获取定期发布的 UT1 计算结果,其获取的 UT1 计算结果的时间分辨率为1 d。随着现代空间导航和深空探测等技术的不断发展,对 UT1 的及时性要求也越来越高,有的应用甚至需要实时的 UT1 计算结果,而通过 IERS 获取的 UT1 参数有时无法满足应用需求。

与地球固连的大型光纤陀螺仪(FOG)可以实现对地球自转运动的实时监测^[3-4],利用陀螺仪实时输出的地球自转角速度测量值可以用于解算 UT1 参数,该测量方法可以有效提高 UT1 参数获取的时间分辨率。本文从光纤陀螺仪的基本原理出发,研究一种利用光纤陀螺仪测量数据解算 UT1 的方法,并结合实测数据对计算方法进行验证,并与 IERS 提供的 UT1 参数结果进行对比,论证基于大型光纤陀螺仪测量解算高时间分辨率 UT1 参数的可行性。

2 基本原理

2.1 光纤陀螺仪的观测方程

利用光纤陀螺仪测量地球自转角速度的基本原理是基于 Sagnac 效应,它是法国物理学家 Sagnac 在 20 世纪初研究以太与地球之间的相互关系时发现的。光纤陀螺仪产生的 Sagnac 效应描述的是两束相同的光在同一光纤环路中沿相反方向传播,当光纤环路所在平面内存在旋转角速度时,两束光经过光纤环路传播后产生的相位差值与旋转角速度之间的转换关系^[5-6]可表示为

$$\Delta\phi = K\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\Omega}, K = \frac{8\pi S}{\lambda c}, \quad (1)$$

式中: $\Delta\phi$ 为 Sagnac 相位差; K 为光纤陀螺仪的标度系数,其值与光纤环路所包围的面积成正比,与光源的平均波长 λ 和光速 c 之积成反比; \mathbf{n} 为光纤环平面的法向量,反映光纤环平面法线的瞬时指向; $\boldsymbol{\Omega}$ 为旋转角速度矢量。(1)式为理想状态下的 Sagnac 效应表达式,在实际测量过程中,需要考虑测量系统存在的噪声及各项误差,可以将(1)式改写为包含地

球自转参数、陀螺仪定向变化以及陀螺仪仪器噪声的关系式^[7-8],即

$$\Delta\phi = K\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\Omega} + \Delta\phi_{\text{instr}} = K\mathbf{n} \cdot (\boldsymbol{\Omega}_0 + \Delta\boldsymbol{\Omega}) + \Delta\phi_{\text{instr}}, \quad (2)$$

式中: $\Delta\phi_{\text{instr}}$ 表示光纤陀螺仪的固有噪声引起的等效相位差变化量,该项噪声主要来源于背向散射、温度变化以及数据采集过程中光电探测器产生的噪声等; $\boldsymbol{\Omega}_0$ 为地球的平均自转角速度矢量; $\Delta\boldsymbol{\Omega}$ 为地球自转角速度矢量的变化量,该变化包括自转轴的变化和自转角速率的变化。在大地坐标系下,地球的瞬时自转角速度矢量可以表示为

$$\boldsymbol{\Omega} = \Omega_0 (m_1, m_2, 1 + m_3)^T, \quad (3)$$

式中: Ω_0 为地球平均自转角速率; m_1, m_2 表示地球自转轴的瞬时位置, m_3 为地球自转角速率的瞬时变化。

对于水平安放于地面的光纤陀螺仪,其光纤环平面的法向量可以表示为

$$\mathbf{n} = (\cos\alpha\cos\beta, \cos\alpha\sin\beta, \sin\alpha). \quad (4)$$

图 1 所示为观测方程展开过程中涉及各方向的示意图, $\boldsymbol{\Omega}$ 为地球瞬时自转角速率(时间 t 的函数), (α, β) 为向量 \mathbf{n} 在大地坐标系下的两个指向角,其值与测站所在的大地经纬度 (α_0, β_0) 和陀螺仪测量平台在局部地壳形变的作用下产生的实际倾斜角度有关^[9-10]。将(3)式、(4)式代入(2)式中,则 Sagnac 相位差可表示为

$$\Delta\phi = K'[\sin\alpha_0 + m_1\cos\alpha_0\cos\beta_0 + m_2\cos\alpha_0\sin\beta_0 + m_3\sin\alpha_0 + dT_{\text{ns}}\cos\alpha_0] + \Delta\phi_{\text{instr}}, \quad (5)$$

式中: $K' = (8\pi S/\lambda c)\Omega_0 = K\Omega_0, \Omega_0 = 7.2921150 \times 10^{-5}$ rad/s; dT_{ns} 表示 \mathbf{n} 在南北方向产生的倾斜变化。(5)式即为光纤陀螺仪的观测方程。

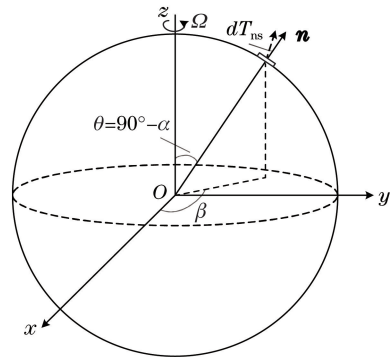


图 1 观测方程展开过程中各方向夹角示意图

Fig. 1 Schematic of each direction angle in expansion of observation equation

2.2 光纤陀螺仪的定向误差改正

在测量地球自转的过程中,光纤环平面法向量

n 发生偏移会导致光纤陀螺仪测量产生附加相位差,从而使输出的地球自转角速度值存在误差。通常情况下,法向量 n 的偏移是由测站地壳几何形变引起的,其主要原因是测站周围地理环境变化引起的地壳几何形变以及潮汐形变等^[11-12]。因此,测量过程中需要利用多台水平仪实时监测平台的倾斜变化,以便于对光纤陀螺仪进行定向改正。

利用水平仪可以完整测量出地壳几何形变引起的倾斜变化,但是除了测量到地壳几何形变外,水平仪还可以同时测量到地方铅垂线的变化,该变化主要由潮汐效应引起。测量过程中,光纤陀螺仪只对地壳的几何形变敏感,对测站铅垂线的变化不敏感。依据固体潮理论模型,测站在固体潮影响下产生的铅垂线变化可以表示为^[13-14]

$$T_{VD} = -(1 + k_2 - l_2) \frac{\partial W_2^{(m)}}{a g_0 \partial \theta}, \quad (6)$$

式中: k_2, l_2 为 2 阶勒夫数; $W_2^{(m)}$ 为 2 阶 m ($m = 0, 1, 2$) 级外部引潮力位; a 为地球赤道平均半径; g_0 为赤道平均重力加速度。

通过以上分析可知,单纯利用水平仪测量数据对光纤陀螺仪进行定向误差改正在消除地壳几何形变产生的影响时,会引入铅垂线变化的影响。因此,可以先利用水平仪测量结果对光纤陀螺仪进行倾斜改正,再通过(6)式利用固体潮理论模型模拟铅垂线变化结果对水平仪改正后结果进行修正,以补偿引入的铅垂线变化的影响,最终完成对光纤陀螺仪的定向误差改正。

2.3 角速率与 UT1 的转换关系

UT1 是以地球自转动为基础的时间,它与地球自转速率直接相关^[15-16],具体可以表示为

$$t_{UT1}(t) = t_{UT1}(t_0) + \frac{1}{\Omega_0} \int_{t_0}^t \Omega(t) dt, \quad (7)$$

式中: $t_{UT1}(t)$ 表示协调世界时(UTC)的 t 时刻对应的 UT1 值; t 与 t_0 分别表示时刻; $\Omega(t)$ 为地球瞬时自转角速率; Ω_0 表示地球平均自转角速率,所对应的转动周期为 1 恒星日^[17]。

通常,UT1 在 UTC(或 TAI)时刻的值以改正的形式(UT1-UTC)给出,下文中以 δ_{UT1} 表示(UT1-UTC),设地球自转角速率变化量 $\Delta\Omega(t) = \Omega(t) - \Omega_0$,则(7)式可改写为

$$\delta_{UT1}(t) = \delta_{UT1}(t_0) + \frac{1}{\Omega_0} \int_{t_0}^t \Delta\Omega(t) dt, \quad (8)$$

式中: $\delta_{UT1}(t)$ 表示在 UTC 的 t 时刻对应的 UT1 的改正值。光纤陀螺仪的优点是可以实时监测并提供

地球自转角速度的测量值,利用其输出的角速度测量值可以计算出地球自转角速率的变化量 $\Delta\Omega(t)$,对 $t_0 \sim t$ 时间段内的 $\Delta\Omega(t)$ 积分就可以得到 δ_{UT1} 的变化量 ξ 为

$$\xi = \delta_{UT1}(t) - \delta_{UT1}(t_0) = \frac{1}{\Omega_0} \int_{t_0}^t \Delta\Omega(t) dt. \quad (9)$$

利用光纤陀螺仪测量数据理论上可以实现每秒计算并提供 UT1 参数的计算结果,该方法可以提高 UT1 获取的时间分辨率,同时该方法也可以依据用户的不同需求提供任意时刻的 UT1 参数结果,每次的计算结果以对应时间段内 δ_{UT1} 的变化量 ξ 的形式给出。

3 测量数据来源与处理流程

依托国家授时中心的光纤陀螺仪实验平台,利用光纤陀螺仪输出的地球自转角速度测量值验证 UT1 的解算方法。实验所用光纤陀螺仪光纤环直径为 40 cm,光纤总长为 30 km,所用光源的平均波长为 1550 nm;陀螺仪采用双偏振双端口设计^[18],该设计既可有效抑制光纤过长而导致的温度梯度效应,也可以最大程度地减小光纤环平面的面积;利用多匝光纤环绕的方式实现放大 Sagnac 效应的效果。光纤陀螺仪经过初期的调试,现已稳定运行。光纤陀螺仪水平放置在实验室的恒温、恒湿的密闭环境中,尽可能地避免周围环境对陀螺仪的干扰,测量平台上安放有两台高精度电子水平仪,可以实时监测平台的倾斜变化情况。图 2 所示为 2018-11-08UTC00:00:00—2018-11-13UTC00:00:00 时间段的陀螺仪实测数据,该数据采样频率为 10 Hz,在采集时间段内连续不间断测量。光纤陀螺仪输出的测量数据以旋转角速率(单位:rad/s)的形式给出。结合实测数据,依据(5)式

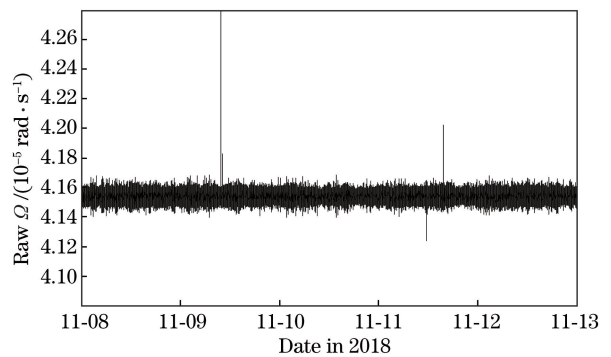


图 2 大型光纤陀螺仪测量的地球自转角速率的原始数据
Fig. 2 Raw data of Earth's rotation angular rate measured from large-scale FOG

的光纤陀螺仪观测方程,设计了如图 3 所示的 UT1 数据解算流程,由于目前光纤陀螺仪还无法完全测量出地球瞬时自转轴的变化,所以在接下来的分析中暂时忽略该部分的影响。

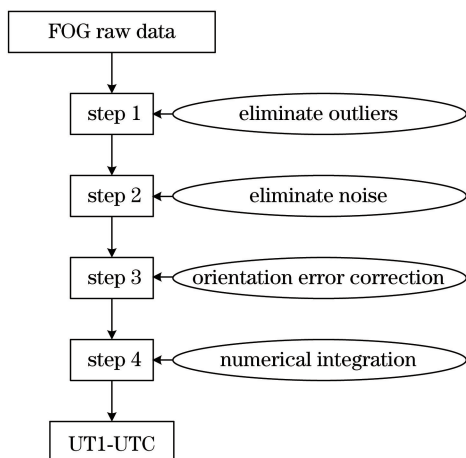


图 3 基于大型光纤陀螺仪的 UT1 数据解算流程
Fig. 3 Flow chart of UT1 calculation process by using data measured from large-scale FOG

4 数据分析与讨论

对光纤陀螺仪原始测量数据进行处理,首先需要消除测量数据中存在的若干数据异常值以及噪声,异常值并不是地球自转变化的真实反映,并且该值会对后续的数据处理过程产生影响。采用 PauTa 准则剔除数据中的异常值^[19],通过计算可知该段数据的标准偏差 $\sigma = 2.07093 \times 10^{-8}$ rad/s,将实际测量值与平均值之差大于 3σ 的值视为异常值予以剔除,并用该段数据的算术平均值替换异常值。消除数据异常值后需要进一步消除测量数据中的噪声,利用光纤陀螺仪测量的地球真实自转角速度信息通常淹没在背景噪声中,该背景噪声通常具有白噪声的统计特性。利用 Allan 方差分析法可以分析光纤陀螺仪测量数据中的噪声特性^[20-21],如图 4 所示。在 Allan 方差分析曲线中,光纤陀螺仪的噪声随着平均时间的增加而逐渐减小,而平均时间越短,表示计算得到地球自转角速率的时间分辨率越高。对于实验所用光纤陀螺仪,取平均时间为 5 min 可以使该测量数据中的噪声降到最低。因此,采用对 5 min 内的光纤陀螺仪测量数据取算术平均值的方式来消除原始数据中的背景噪声,消噪后的结果如图 5 所示。所选取的平均时间 5 min 也是利用光纤陀螺仪的输出数据解算所得的 UT1 参数的时间分辨率,即通过光纤陀螺仪测量可以每隔 5 min 进行一次 UT1 参数的解算。

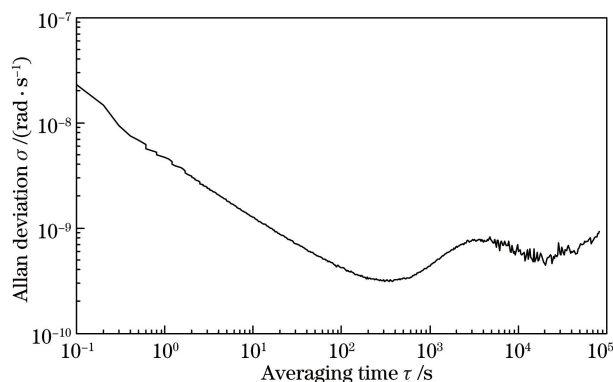


图 4 光纤陀螺仪测量数据的 Allan 方差分析曲线
Fig. 4 Curve of Allan variance of data measured from FOG

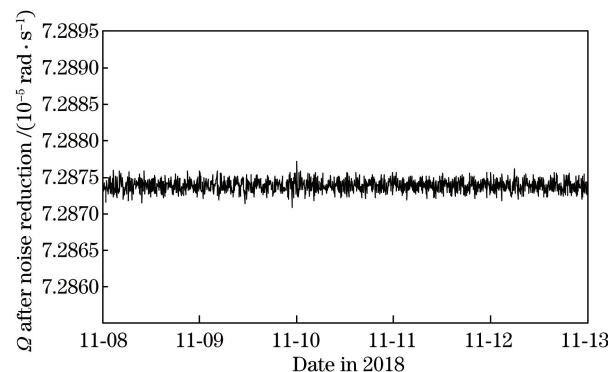


图 5 平均消噪后的数据结果(平均时间为 5 min)
Fig. 5 Data after average denoising (average time is 5 min)

校正定向误差的目的是消除光纤陀螺仪因定向变化而产生的误差数据。本研究首先通过水平仪测量数据对陀螺仪进行倾斜改正,再利用固体潮理论模型消除因固体潮引起的地方铅垂线变化,最终实现定向误差的校正。定向误差校正结果如图 6 所示,其中由于地壳形变产生的倾斜变化量可以通过 (5) 式转换为等价的角速率变化。

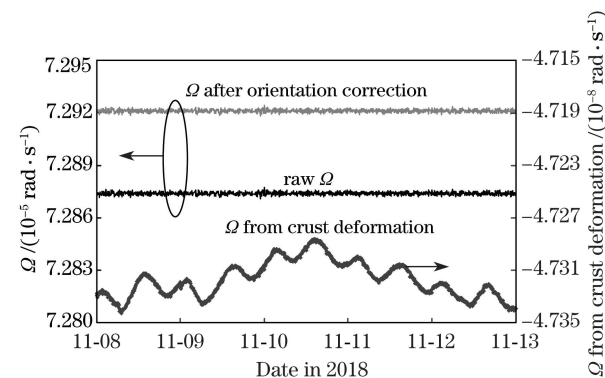


图 6 光纤陀螺仪测量数据的定向改正
Fig. 6 Orientation correction of data measured from FOG

消除定向误差后,利用 (9) 式可以计算得到 5 min 内的 $\xi_{5 \text{ min}}$,进而通过 (8) 式可以在测量时间段内每隔 5 min 计算一个 δ_{UT1} 参数,将计算结果

与 IERS 提供的 δ_{UT1} 结果进行对比,如图 7 所示,两段数据的起始时刻均为 11 月 8 日 0 时(UTC)。

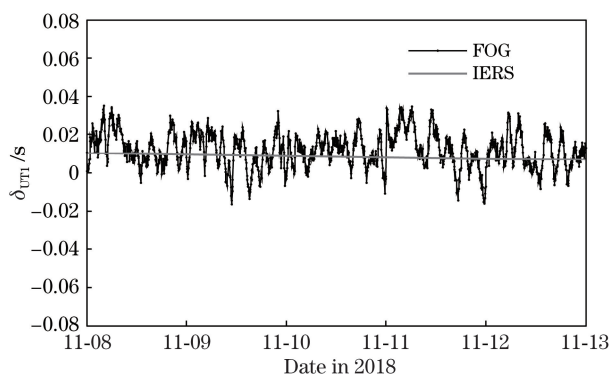


图 7 利用大型光纤陀螺仪测量数据解算的 δ_{UT1} 结果与 IERS 提供的数据对比

Fig. 7 Comparison between δ_{UT1} calculated by data measured from large-scale FOG and δ_{UT1} from IERS

通过对比可以看出,利用目前的光纤陀螺仪输出数据计算的 δ_{UT1} 值围绕着真实的 δ_{UT1} 上下波动,在一天内波动变化范围主要集中在 ± 20 ms 内。鉴于目前实验所用陀螺仪在 5 min 平均时间内测量角速度的灵敏度可达到 3.15×10^{-10} rad/s(对应产生的一天内 δ_{UT1} 的计算误差介于 ± 500 ms 之间),实际计算的波动范围并没有超出理论的误差范围,说明目前的计算结果已经基本达到了实验光纤陀螺仪的测量极限。

5 结 论

通过上述实测数据分析,初步实现了利用大型光纤陀螺仪测量的地球自转角速度数据解算 UT1 的目标。利用目前的大型光纤陀螺仪的测量数据可以使 UT1 的获取时间间隔缩短为 5 min,说明基于大型光纤陀螺仪可以提高 UT1 参数获取的时间分辨率,理论上可以实现实时提供 UT1 参数。但是,目前受限于光纤陀螺仪自身测量极限,计算结果与 IERS 提供的 UT1 参数结果还具有一定的差距,但是随着光纤陀螺仪技术的不断发展,测量灵敏度的不断提高,当灵敏度提高到 7×10^{-12} rad/s 时,一天内通过光纤陀螺仪测量解算的 UT1 参数的波动范围可限制在 ± 1 ms 以内。该方法有潜力成为一种新型的 UT1 测量方法,通过大型光纤陀螺仪测量 UT1 也可以对目前现有的 UT1 测量方法(天顶筒、VLBI 等)起到良好的互补作用。

参 考 文 献

- [1] Qi G R. Fundamentals of time science[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 19-29.
- [2] 漆贯荣. 时间科学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 19-29.
- [2] Gambis D, Luzum B. Earth rotation monitoring, UT1 determination and prediction[J]. Metrologia, 2011, 48(4): S165-S170.
- [3] Schreiber K U, Velikoseltsev A, Rothacher M, *et al.* Direct measurement of diurnal polar motion by ring laser gyroscopes[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2004, 109(B6): B06405.
- [4] Mendes Cerveira P J, Boehm J, Schuh H, *et al.* Earth rotation observed by very long baseline interferometry and ring laser[J]. Pure and Applied Geophysics, 2009, 166(8/9): 1499-1517.
- [5] Zhang G C. Principles and technique of fiber optic gyroscope[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 2-8.
- [5] 张桂才. 光纤陀螺原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 2-8.
- [6] Clivati C, Calonico D, Costanzo G A, *et al.* Large-area fiber-optic gyroscope on a multiplexed fiber network[J]. Optics Letters, 2013, 38(7): 1092-1094.
- [7] Nilsson T, Böhm J, Schuh H, *et al.* Combining VLBI and ring laser observations for determination of high frequency Earth rotation variation[J]. Journal of Geodynamics, 2012, 62: 69-73.
- [8] Liu W T, Liu J Y, Shen Q. Integrated modeling and filtering of fiber optic gyroscope's random errors[J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(10): 180082.
- [8] 刘文涛, 刘洁瑜, 沈强. 光纤陀螺随机误差的集成建模及滤波处理[J]. 光电工程, 2018, 45(10): 180082.
- [9] Schreiber K U, Klügel T, Velikoseltsev A, *et al.* The large ring laser G for continuous earth rotation monitoring[J]. Pure and Applied Geophysics, 2009, 166(8/9): 1485-1498.
- [10] Tian W. Modeling and data analysis of large ring laser gyroscopes[D]. Dresden: Technische Universität Dresden, 2013: 18-24.
- [11] Schreiber K U, Klügel T, Stedman G E. Earth tide and tilt detection by a ring laser gyroscope[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2003, 108(B2): ETG-19.
- [12] Rautenberg V, Plag H P, Burns M, *et al.* Tidally induced Sagnac signal in a ring laser[J]. Geophysical Research Letters, 1997, 24(8): 893-896.
- [13] Tian W. On tidal tilt corrections to large ring laser gyroscope observations[J]. Geophysical Journal International, 2014, 196(1): 189-193.
- [14] Xu H Z. Solid earth tides[M]. Wuhan: Hubei Science & Technology Press, 2010: 13-35.

[1] Qi G R. Fundamentals of time science[M]. Beijing:

- 许厚泽. 固体地球潮汐[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2010: 13-35.
- [15] Zhao M. The introduction of astrometry[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2006: 137-149.
- 赵铭. 天体测量学导论[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2006: 137-149.
- [16] Hu Y H. Principle of time measurement[M]. Hong Kong: Hong Kong Asia-Pacific Science Press, 2000: 261-275.
- 胡永辉. 时间测量原理[M]. 香港: 香港亚太科学出版社, 2000: 261-275.
- [17] Petit G, Luzum B. IERS conventions 2010[R]. [S. l.]: IERS, 2010, 36: 43-62.
- [18] Liao H Q, Luo R Y, Deng S, *et al.* Characteristics of light source based on dual polarization fiber optic gyroscope[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 0505009.
- 廖恢齐, 罗荣亚, 邓圣, 等. 双偏振光纤陀螺光源特性研究[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0505009.
- [19] Shen C, Bao X J, Tan J B, *et al.* Two noise-robust axial scanning multi-image phase retrieval algorithms based on Pauta criterion and smoothness constraint[J]. Optics Express, 2017, 25(14): 16235-16249.
- [20] Wu Y, Yang M X, Wei M, *et al.* Random error analysis of fiber optic gyro using Allan variance method[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006, 26(1): 717-720, 724.
- 吴一, 杨孟兴, 韦明, 等. 光纤陀螺仪随机误差的 Allan 方差分析[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(1): 717-720, 724.
- [21] Cui Y Q, Qin F J, Feng S L. Research on stability of fiber optic gyro based on dynamic Allan variance[J]. Electronic Design Engineering, 2018, 26(6): 161-164.
- 崔逸群, 覃方君, 丰仕林. 基于动态 Allan 方差的光纤陀螺稳定性分析[J]. 电子设计工程, 2018, 26(6): 161-164.