

文章编号:1001-5078(2024)04-0495-08

· 综述与评论 ·

环境对大型激光陀螺仪的影响研究综述

张旭¹, 郭文阁^{1,2}, 王飞³, 胡天籟¹, 刘帆¹, 张立松², 高玉平², 张首刚²

(1. 西安石油大学理学院, 陕西 西安 710065; 2. 中国科学院国家授时中心时间频率基准重点实验室, 陕西 西安 710600;

3. 湖南二零八先进科技有限公司, 湖南 长沙 410006)

摘要: 基于萨格纳克效应的大型激光陀螺仪被认为是精确监测地球自转的合适传感器, 可用于潜在的地面科学研究和重大工程应用, 如世界时 UT1 精密测量, 地球固体潮观测、旋转地震波探测、广义相对论预言引力磁效应等领域。激光陀螺的灵敏度随环形腔尺寸增大而提高, 其运行的长期稳定性受环境变化的影响。本文从激光陀螺仪工作原理出发, 梳理了温度、倾斜、气压和风等环境变化对大型激光陀螺仪灵敏度和稳定度的影响, 分析说明监测环境因素变化对其输出的萨格纳克频差修正和处置方法, 为提高大型激光陀螺仪应用性能提供相关指导。

关键词: 大型激光陀螺仪; 环境影响; 温度; 倾斜; 气压; 风

中图分类号: TN248; V241.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.04.002

A review of environmental effects on large laser gyroscopes

ZHANG Xu¹, GUO Wen-ge^{1,2}, WANG Fei³, HU Tian-lai¹, LIU Fan¹,

ZHANG Li-song², GAO Yu-ping³, ZHANG Shou-gang³

(1. School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2. Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standard, National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

3. Hunan 208 Advanced Technology Limited Company, Changsha 410006, China)

Abstract: Large laser gyroscopes, based on the Sagnac effect, are considered to be suitable sensors for precise monitoring of the Earth's rotation for potential ground-based scientific research and major engineering applications, such as Universal Time 1 (UT1), solid Earth tide observations, rotational seismic wave detection, and the testing of predicted gravitational magnetic effects in general relativity. The sensitivity of laser gyroscopes increases with the size of their ring cavity and the long-term stability of its operation is influenced by environmental changes. The paper explores the impact of various environmental factors on the sensitivity and stability of large laser gyroscopes. It delves into the effects of temperature, tilt, air pressure, and wind, and the Sagnac frequency difference correction and disposal method of monitoring the changes of environmental factors on its output are analyzed and illustrated, so as to provide relevant guidance for the enhancement of the application performance of large laser gyroscope.

Keywords: large-scale laser gyroscope; environmental influence; temperature; inclination; atmospheric pressure; wind

基金项目: 中科院西部之光项目(中科院人字[2018]6号); 中国科学院“十三五”科教基础设施建设项目“空间科学与应用技术研究平台”项目(发改投资[2020]1394号); 西安石油大学研究生联合培养基地“中科-西石油光电检测研究生联合培养基地”项目(西石大研[2017]43号); 西安石油大学创新与实践能力培养项目(No. YCS23114192)资助。

作者简介: 张旭(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大型激光陀螺仪和世界时测量。E-mail: xusunrises@foxmail.com

通讯作者: 郭文阁(1967-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为激光与光电子学。E-mail: wguo@xsyu.edu.cn

收稿日期: 2023-11-03

1 引言

大型激光陀螺仪是一种用于测量旋转角速度或方向的高精度传感器,可以不需要提供任何外部参考就能测量地球自转运动等信息^[1],主要应用于实时测量地球自转角速度,进而解算世界时(UT1),也可在地震探测等领域提供高分辨率测量数据^[2]。

大型激光陀螺仪需要相对分辨率 $\Delta\Omega/\Omega_E < 10^{-8}$,才能满足世界时测量的需求,而极高灵敏度的不仅可以探测到在这些应用中的地球物理信号中包含的信息,也会引入一些非周期性的环境噪声,如潮汐、风和大气角动量变化等^[3]。对于世界时测量来说,需要进行长时间高精度的监测,需要很高的灵敏度和长期运行稳定性,其监测周期从几天到几年不等,因此研究缓慢变化的环境扰动的作用非常重要^[4]。本文从环境因素对大型激光陀螺仪的影响进行研究,结合国内外文献分析环境扰动对于陀螺仪的影响作用,为进一步提高大型激光陀螺仪测量中的稳定性和精确性提供相关参考。

2 激光陀螺仪原理

激光陀螺仪的工作原理是基于 Sagnac 效应,如图 1 所示,从光源同时发射出两束激光在闭合的环形腔体内沿着顺时针(CW)和逆时针(CCW)方向相向传播,环形腔静止时两束激光传播一周后会回到出发点的位置,当环形腔旋转时,两束激光走过的路程就会产生差异,进而谐振频率会发生变化^[5],产生频率差值(拍频) $\Delta\nu$,其与两束激光传播围绕的环形腔面积 A ,激光波长 λ ,环形腔周长 P ,环形腔在空间中旋转的角速度 Ω ,环形腔平面的法向量 n 的一般关系为(1)式:

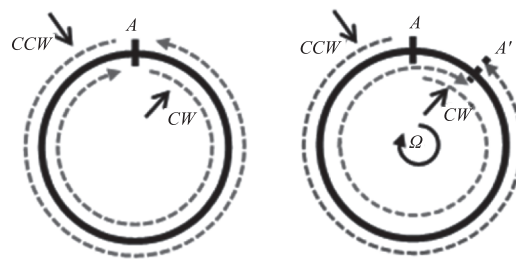


图 1 Sagnac 效应示意图

Fig. 1 Sagnac effect diagram

$$\Delta\nu = \frac{4A}{\lambda P} n \cdot \Omega \quad (1)$$

拍频 $\Delta\nu$ 和旋转速率 Ω 与环形腔面积 A 成正比,与激光波长 λ 、环形腔周长 P 成反比,其中 $K = 4A/\lambda P$, K 为比例因子。

环形激光陀螺仪灵敏度公式为(2)式所示^[6-7]:

$$\delta\Omega = \frac{cP}{4AQ} \sqrt{\frac{hv}{P_{\alpha}t}} \quad (2)$$

其中, c 为光速; Q 是质量因子; h 为普朗克常数; P_x 是来自腔体的光束功率损失,对应于光电探测器上的光子通量值; t 为积分时间。

由(1)式和(2)式中各项关系可知,大型激光陀螺仪要获得更高的测量灵敏度,主要取决于比例因子,比例因子越大,理论上就能获得更高的灵敏度^[8]。但同时,陀螺仪比例因子越大,受环境变化的影响也越显著。温度引起环形腔体热胀冷缩,潮汐引力和风冲压等导致的倾斜以及压力引起的环形腔体的变形等,这些环境因素变化都会改变比例因子大小,进而影响陀螺仪测量的灵敏度和拍频。

表 1 所示为几种大型激光陀螺仪的相关物理特性,包括边长 a 和 b ,环形腔面积 $Area$,周长 P ,精度 F ,品质因子 Q ,衰荡时间 τ ,光束功率 P , Sagnac 频率,锁定阈值 $f_{lock-in}$ 和分辨率 S ^[3]。

表 1 几种大型激光陀螺仪的参数对比

Tab. 1 Comparison of parameters for various large laser gyroscopes

| Ring laser | a/m | b/m | $Area/m^2$ | Perimeter/m | F | Q |
|------------|-------|-------|------------|-------------|--------|----------------------|
| C-II | 1 | 1 | 1 | 4 | 85000 | 5.3×10^{11} |
| GEOsensor | 1.6 | 1.6 | 2.56 | 6.4 | 300000 | 3×10^{12} |
| G-0 | 3.5 | 3.5 | 12.25 | 14 | 113000 | 2.5×10^{12} |
| G-ring | 4 | 4 | 16 | 16 | 138000 | 3.5×10^{12} |
| UG-1 | 21 | 17.5 | 367.5 | 77 | 2100 | 1.2×10^{12} |
| UG-2 | 21 | 39.7 | 834.34 | 121.4 | 1100 | 1.5×10^{12} |

(续表)

| Ring laser | $\tau/\mu\text{s}$ | P/nW | $f_{\text{Sagnac}}/\text{Hz}$ | $f_{\text{lock-in}}/\text{Hz}$ | $S/(\text{prad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}})$ |
|------------|--------------------|---------------|-------------------------------|--------------------------------|--|
| C-II | 180 | 20 | 79.4 | 0.24 | 146.2 |
| GEOsensor | 1000 | 5 | 102.6 | 0.014 | 108.1 |
| G-0 | 829 | 50 | 288.6 | 0.013 | 11.6 |
| G-ring | 1200 | 20 | 348.5 | 0.010 | 12 |
| UG-1 | 409 | 10 | 1512.8 | 0.01 | 17.1 |
| UG-2 | 640 | 10 | 2180 | 0.008 | 7.8 |

3 环境因素对大型激光陀螺仪的影响

对于大型激光陀螺仪在大地测量学和地球物理学中应用的分辨率和稳定性需求,一般会将陀螺仪放置在地下或山体中,以尽量避免非地球物理信号的干扰,然而,在这种环境中安装的陀螺仪还是不可避免地会受到地球应变、热弹性变形和大气压力变化的影响^[9]。这些环境的变化会增加 Sagnac 信号中的噪声,进而影响到监测数据的准确性,为了尽量降低或消除上述几个环境变化带来的影响,必须对相应的温度、倾斜和气压等几个环境因素进行研究分析,明确相关环境项影响的机理和量级等,为陀螺仪运转保持高精度和稳定性提供在环境影响方面的参考依据。

3.1 温度影响

温度变化是环境因素中不可避免且对大型激光陀螺仪造成影响较大的一项,比如温度变化引起的热胀冷缩会改变陀螺仪腔体的几何形状,也会使陀螺仪平台底座变形倾斜,产生额外的旋转^[10]。

文献[4]对图2所示 GINGERINO 大型激光陀螺仪的旋转角速度和温度变化在时间序列上的相关性进行了研究^[11],提出 Sagnac 角频率 ω_s ($\omega_s = 2\pi\Delta\nu$) 为:

$$\omega_s = \omega_{\text{geo}} + \omega_{\text{local}} \quad (3)$$

ω_{geo} 由 $2\pi \cdot K \cdot \Omega_{\text{geo}}$ 得出, K 为陀螺仪比例因子; Ω_{geo} 是国际地球自转和系统参考服务 (IERS) 测量并发布的地球自转速率。 ω_{local} 由 $2\pi \cdot K \cdot \Omega_{\text{local}}$ 给出, Ω_{local} 表示局部环境扰动对于旋转速率的影响。

图3显示了 GINGERINO 的温度和 Ω_{local} 随时间的关系^[4],中心曲线表示温度变化,周围曲线表示 Ω_{local} 变化,分析的目的是尽可能多的了解温度变化对陀螺仪信号的影响作用^[12]。

如图3所示, Ω_{local} 在时间序列上具有跟随温度变化而变化的特征,这表明两个变量之间可能存在

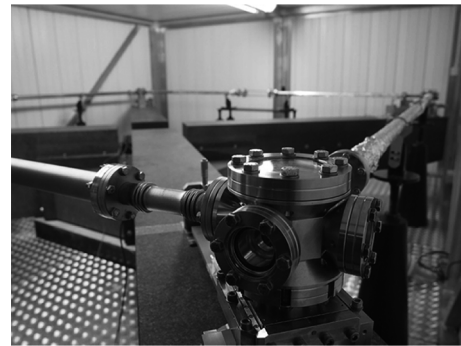
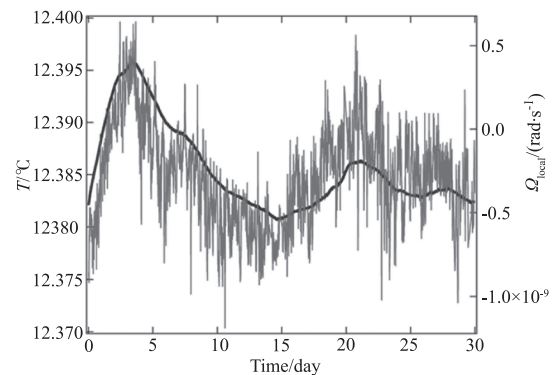


图2 GINGERINO 激光陀螺仪

Fig. 2 GINGERINO laser gyroscope

图3 温度和 Ω_{local} 变化关系Fig. 3 Temperature and Ω_{local} change relationship

线性关系,这可以解释为由于温度变化引起的陀螺仪环形腔边长变化的影响,因为由式(1)可知, K 与环形腔长度存在线性关系。此外,假设对于长期运行,温度变化 ΔT 对 Sagnac 频率的影响是由 $\rho \cdot \Delta T$ 这一项造成的,其中 ρ 是热膨胀系数。然后在分离 ω_{local} 数据后,对数据集进行线性回归,即可得出预计影响效果为 $\Delta\nu \cdot \rho \cdot \Delta T$ Hz 数量级,对于文献[4]中实验,花岗岩热膨胀系数为 $6.5 \times 10^{-6}/\text{°C}^{-1}$, Sagnac 平均频率为 $\Delta\nu = 280$ Hz。在分离 ω_{local} 数据后对数据集进行计算,得到预计影响效果为 $1.8 \times 10^{-3} \text{ Hz} \cdot \text{°C}^{-1}$ ^[13]。

文献[4]中提到的另一种研究温度影响的方法

是在温度线性变化的区域内对 Ω_{local} 和 T 两个变量绘制散点图。从图 3 观察,选择第 1~3 天的温度数据。图 4 显示了 ω_{local} 和 T 关系的散点图^[4],通过对数据处理得知两个变量在这种线性关系的情况下的影响数量级为 $0.45/\text{Hz} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$,这表明温度对陀螺仪的影响比热膨胀造成比例因子变化带来的影响大得多。这在文献[14]中给出了相关解释,其指出温度同时影响陀螺仪水平和垂直两个方向,水平面内的比例因子变化的主要来源是热膨胀,且水平面内的热膨胀是线性的。垂直方向受温度影响较弱,但其影响是非线性的,这种非线性的影响可能会加剧陀螺仪测量中的比例因子变化甚至产生环形腔体扭转,进而增大了陀螺仪测量误差。这些影响可以通过建立一个由环形腔平面顶点和四边管道中点组成的温度监测网,通过温度监测网和温度对陀螺仪的几何变形模型进行腔体变化的补偿^[14]。

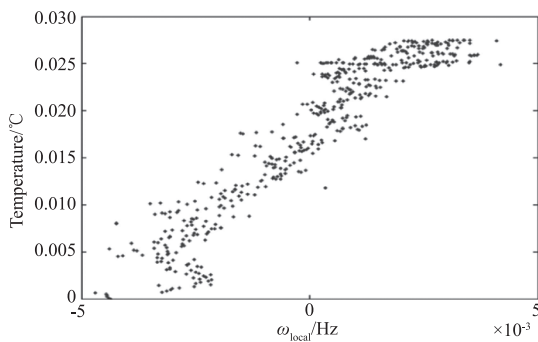


图 4 1~3 天温度和 ω_{local} 关系散点图

Fig. 4 Scatterplot of the relationship between temperature and ω_{local} for days 1~3

3.2 倾斜影响

目前大部分的大型测地激光陀螺仪都是在地球上水平定向的,放置在水平地面上的环形激光陀螺仪受到局部倾斜或环形腔面法向量相对于地球旋转轴改变方向时,会产生旋转速率的变化,而这也表现出明显的纬度依赖性。

图 5 说明了激光陀螺仪在位于余纬度 θ 处的这种情况^[3]。 \vec{n} 为环形腔平面法向量, $\vec{\Omega}$ 为地球旋转矢量, a 表示环形腔平面的局部倾斜造成的法向量角度变化, b 表示旋转轴相对于地球的方向变化。

大型激光陀螺仪的安装是使环形腔面的法向量和重力方向平行,利用高分辨率倾斜仪(传感器分辨率: $\Delta\theta \leq 1 \text{ nrad}$)监测重力方向与环形腔面法向量的相对变化。对于 G-ring 和 C-II 两个大型激光

陀螺,虽然在搭建安装中采用了一些保护措施,使得对地层形变或大气载荷变化等引起的倾斜有较好的抑制^[15],但对这两个大型激光陀螺来说,倾斜都不能降到 μrad 以下^[16]。

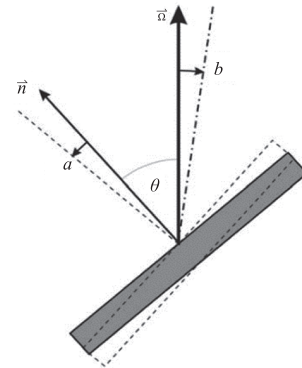


图 5 余纬度 θ 处的激光陀螺仪倾斜示意

Fig. 5 Schematic tilt of the laser gyroscope at the residual latitude θ

计算陀螺仪在不同余纬度处发生倾斜的影响是将式(1)中的 $n \cdot \Omega$ 进一步表示为:

$$n \cdot \Omega = |\Omega| \cos(\theta - \Delta_N) \cos \Delta_E \quad (4)$$

其中, θ 是余纬度; Δ_N 和 Δ_E 是向北和向东的小角度倾斜变化。以 G-ring 为例,它在顶部的不同位置放置的六个 1 nrad 精度的倾斜仪,用于相互控制和区分陀螺仪体倾斜和变形。由于 G-ring 实验室中具有良好的实验环境稳定条件,所以倾斜仪可以准确检测低至 1 nrad 级的倾斜度。监测数据显示向北 $1 \mu\text{rad}$ 的角度变化会使 Sagnac 频率增加 1×10^{-6} ,而向东相同的角度变化只会使 Sagnac 频率变化 5×10^{-13} ,可以忽略不计。因此,只需要去监测陀螺仪南北方向上的方位变化^[17]。

在潮汐影响的倾斜中,不仅要考虑潮汐体的直接引力作用导致的倾斜,还要考虑由潮汐影响的地球局部质量移动引起的附加倾斜,这可以用洛夫数 k 来表示,它给出了附加倾斜 V_d 相对于直接引力所致倾斜 V_l 的比例:

$$V_{\text{tot}} = V_l + V_d = (1 + k)V_l \quad (5)$$

从倾斜仪读数中减去由总潮汐势 V_{tot} 引起的倾斜度,然后根据式(1)和(4)就可以对测量的 Sagnac 频率进行校正。海洋负荷也会影响陀螺仪在潮汐频率下的测量,以 C-II 为例,虽然它的灵敏度不足以显示出受到固体潮引起的倾斜的影响,但它能清楚地显示出周期为 12.43 h 的潮汐信号,在 C-II 附近的海洋负荷效应产生的潮汐倾斜度是固体潮的 5 倍^[18]。而对于 G-ring,海洋负荷所致的潮汐倾斜度

只占固体潮汐倾斜度的 5% 左右。局部倾斜的另一个来源是大气载荷,对文献[19]中的载荷模型和文献[20]中的高分辨率倾斜记录分析,可知大气载荷造成的倾斜可达到 ± 50 nrad,这个程度的倾斜会明显的影响到陀螺仪和倾斜仪。此外,倾斜仪对大气密度变化影响下的引力也很敏感,大气引力是通过基于局部和全球天气模型在三维坐标中不同位置的大气质量的数值积分来计算的^[21]。其计算结果显示,大气引力影响造成的倾斜不超过 ± 10 nrad。

3.3 气压影响与频率稳定

大型测地激光陀螺仪为了能明确地检测低频信号(例如频率为 26.6 nHz 的钱德勒摆动),稳定光学频率以抵抗压力变化引起的腔体变化是很必要的^[21]。对大型环形激光陀螺仪进行频率稳定的尝试,如 C-II 激光陀螺利用压电驱动器放置在陀螺仪的反射镜上,通过推动反射镜来补偿腔体变化带来的频率影响^[23]。通过这种方式让 C-II 在很低的输出光束功率情况下,几天内将 C-II 的频率稳定性提高了十倍^[24]。

除此之外,也需要进行必要的隔离措施,对于 C-II 和 G-ring 激光器来说,采取的措施都是通过将激光陀螺仪的整个主体包裹在一个隔绝外部环境的钢制容器中来实现的。以 G-ring 为例,这个“压力容器”是 4.5 m × 4.5 m,重量超过 3 t,如图 6 所示^[25]。

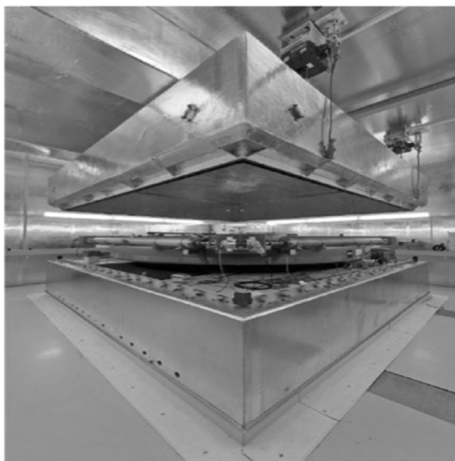


图 6 G-ring 的压力隔离容器

Fig. 6 Pressure isolation vessel for G-ring

它可以通过滑轮上升和下降,并配备了相应的电气和光学访问端口。然后通过测量环形激光束与碘稳氦氖激光器的合光束得到的拍频信号来监测环形激光的光频率。通过改变包裹 G-ring 的容器内的压力,将监测到的光学频率变化转换为相应的压力

变化,可以将环形激光和碘稳参考激光之间的频率差保持在预设值。数据结果显示,通过这项措施 G-ring 的激光频率可以在三个月内保持在 60 kHz 的标准差之内,如图 7(a)^[3]。此外,也要防止由于射频功率变化引起激光腔内发生的非互易效应,这可以通过保持环形腔内两束反向传播激光的光束功率比为恒定值来实现。对 G-ring 利用这些措施进行数据 Allan 方差分析后的结果如图 7(b)所示^[3]。其中曲线 A 为没有采取稳频措施时的方差曲线,曲线 B 为压力和光束功率稳定时的方差曲线,曲线 C 为理论灵敏度噪声极限方差曲线。

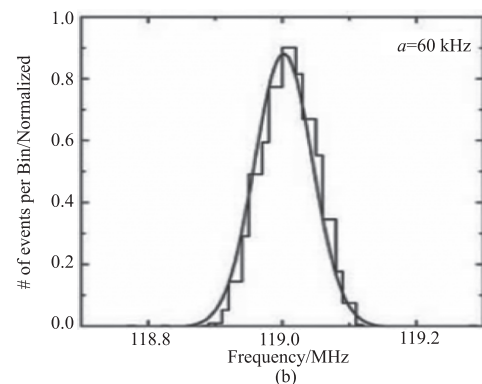
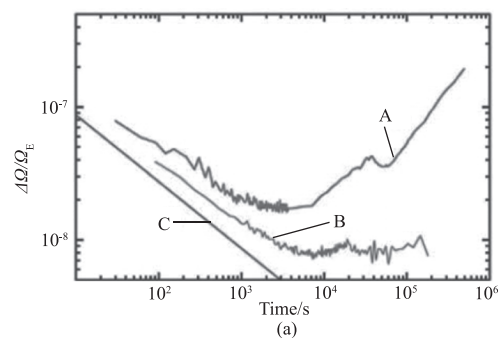


图 7 对 G-ring 稳频的 Allan 方差分析

和相对于碘稳激光变化的环形激光频率直方图

Fig. 7 Allan ANOVA for G-ring frequency stabilization and histogram of ring laser frequency relative to iodine-stabilized laser variation

能够明显看出,在没有稳频措施的情况下,分辨率曲线在 10^4 s 后发生了明显的下降,这是由压力引起的环形腔体的压缩变形引起的,这一变化发生的时间范围与 G-ring 所在的中欧地区天气模式的变化有明确的关联性。这种压缩变形不仅影响环形腔长度,而且影响后向散射相位和伴随引入的振幅。在稳定的 Allan 方差曲线 B 中没有出现陡变,在其曲线后端的细微变化代表的是长周期运行的后向散射变化^[26]。

3.4 风的影响

在考虑自然环境因素对高灵敏度大型激光陀螺

仪带来的影响时,风是一个不能被忽略的噪声源。强风会通过和陀螺仪地下安装位置上方的地面摩擦以及和山坡起伏区域产生的风荷载影响陀螺仪的背景噪声水平。但由于剪切转变机理和相关参数的不确定性,风的影响是比较复杂的^[27]。

如果风对陀螺仪的影响能够被正确的认识分析和建模,这个影响因素就可以通过计算被消除或降低,从而提高信噪比。文献[28]就对 G-ring 的安装地区 Wetzell 创建有限元模型的这一过程进行了详细的描述。模型在东西方向、南北方向和垂直方向表示为一个 $20 \text{ km} \times 20 \text{ km} \times 4.5 \text{ km}$ 的地壳块体,如图 8 所示,地形取自水平分辨率为 25 m 的数字地形模型(DTM)^[29],并利用实验室和现场测量得到的弹性参数对有限元模型进行了均匀参数化。

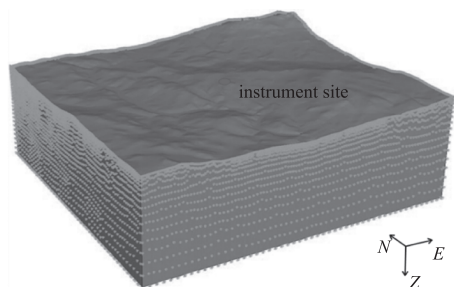


图 8 用于估计风的影响的 Wetzell 大地测量观测站区域有限元模型

Fig. 8 Finite element model of the Wetzell Geodetic

Observatory region for estimating wind effects

风荷载作为直接作用的力施加到模型上。根据位置的不同,计算了在模型表面施加的力的大小和方向。风施加的力 $F_{w(i,j)}$ 是地形引起的风压 $F_{p(i,j)}$ 和表面粗糙度控制的风摩擦 $F_{f(i,j)}$ 之和:

$$F_{w(i,j)} = F_{p(i,j)} + F_{f(i,j)} \quad (6)$$

其中:

$$F_{p(i,j)} = \frac{\rho}{2} c_d v^2 A_{i,j} \quad (7)$$

其中, ρ 为空气密度; c_d 为阻力系数; v 为风速; $A_{i,j}$ 为有效荷载面积,有效荷载面积是地形坡度垂直于风向的投影。

$$F_{f(i,j)} = \frac{\rho}{2} c_{d(i,j)} v^2 A_0 \quad (8)$$

风摩擦力计算中 A_0 是区域平面有效面积,阻力系数 $c_{d(i,j)}$ 是表面粗糙度的函数,取决于地面类型,图 9 为 Wetzell 区域的地面类型模型,所使用的阻力系数(森林取 0.5,居住区取 0.05,草地和田地取 0.005,水面取 0)是在气象学中使用的典型值^[30]。

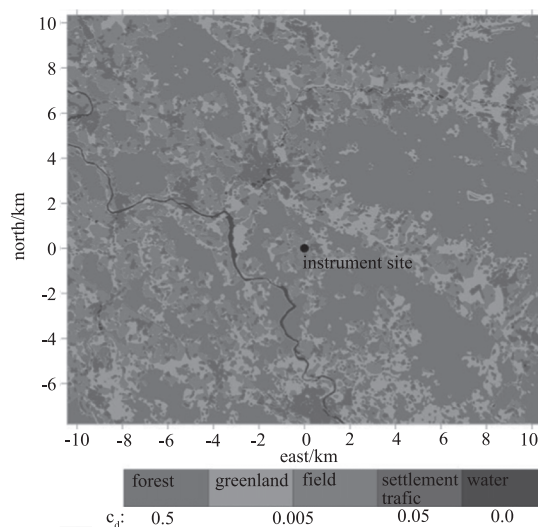


图 9 地面类型分布和阻力系数

Fig. 9 Ground type distribution and drag coefficients

模型被参数化后,地表产生的位移变形就是风速和风向的函数,为了得到这两个变量的影响,计算了从 0° (北风)到 355° ,风速从 1 到 16 m/s 的变化场。

为了将地表位移变形转换为对陀螺仪的影响,首先需要从研究区域的位移分布中选取 10 个点,计算空间中的水平旋转,东西方向倾斜和南北方向倾斜三个方向上的变化。根据文献[31]中的方法,对每个选取点的位移进行推导计算后根据风向和风速生成了沿三个方向的角度变化,如图 10 所示^[27]。

然后以 Wetzell 气象站以固定的采样率记录实时风数据,得到与 Sagnac 频率和倾斜数据进行比较的时间序列。对于每个数据点,从图 10 中对照查看该点的风速和风向引起的变化,用这种方法得到的时间序列与观测到的 Sagnac 信号进行对比。测试结果是在 5 min 到 2 h 的时间序列中,使用不同的截止频率会产生几乎相同的信号。因此得出结论,风带来的影响主要发生在 5 min 以下的短周期范围内^[27]。

对比只有风压即图 10(a)和同时存在风压和风摩擦即图 10(b)的角度变化,可以看出,风摩擦的影响明显占主导地位。

对水平旋转,东西倾斜和南北倾斜这三项的变化,和风向的相关性比较大。在有风摩擦的情况下,南风 and 北风造成的影响最大。 90° 和 270° 附近的变化表明,东西方向风的影响较弱。而图 10 中东西方向的倾斜显示出受南北方向风的影响最强烈,约为 0.4 mrad 。在南北方向倾斜中,当风速为 16 m/s 时,

其倾斜度仅为 0.2 nrad, 不足以影响环形激光器的方向变化而影响 Sagnac 频率, 因为倾斜度至少需要达到约 10 nrad 才会显示出这一影响。水平旋转角

度最大可达 0.3 nrad, 对水平旋转来说, 其信号如果在几秒或几十秒内出现并逐渐增强, G-ring 就可以检测到这一旋转信号^[27]。

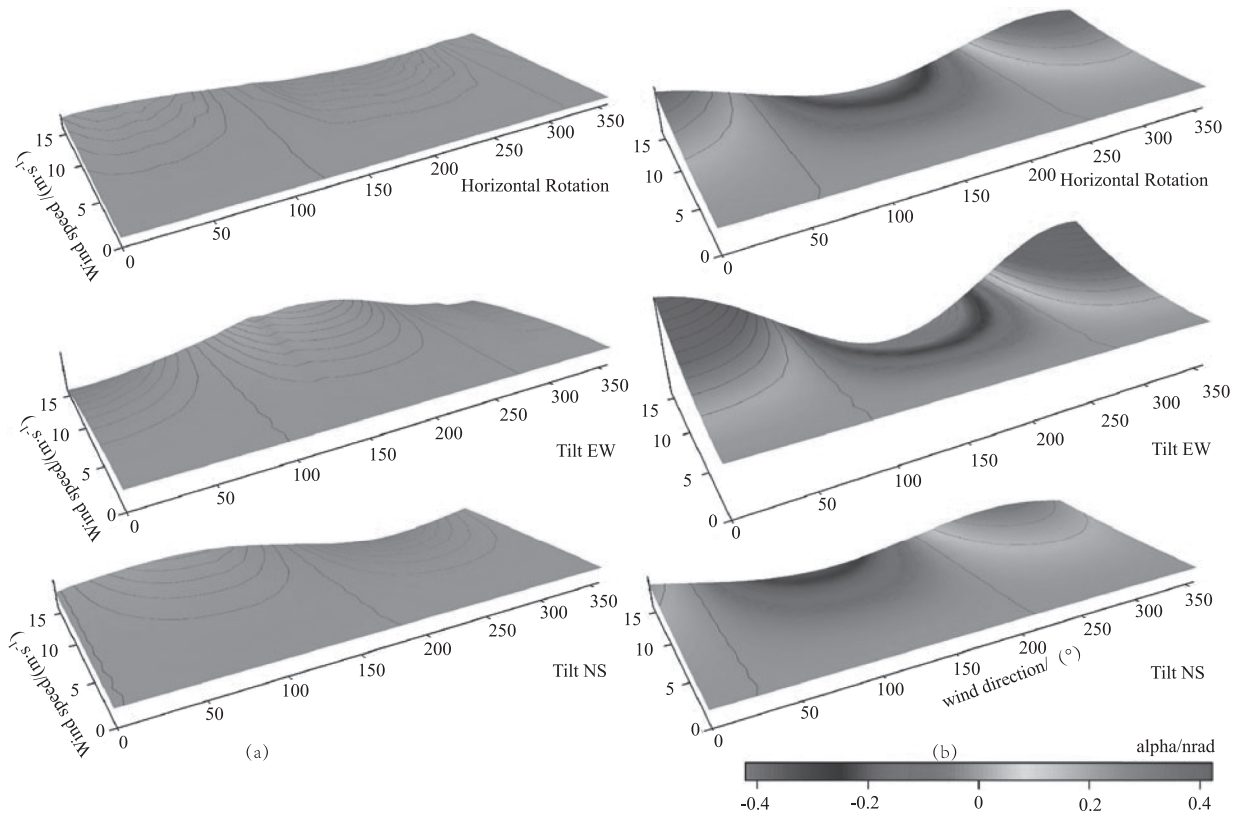


图 10 风压作用于地形的模型角度变化和风压加风摩擦的模型角度变化

Fig. 10 Modeled angular change of wind pressure on terrain and wind pressure plus wind friction

4 总结

从大型测地激光陀螺仪的应用和原理出发, 介绍了环境因素变化对陀螺仪影响的各个相关方面。由于大型激光陀螺仪的安装大多选择在地下或者山体中等受人类活动影响较小的环境中, 所以本文主要讨论研究地球物理环境变化对陀螺仪带来的影响。主要对 C-II, G-ring, GINGERINO 三个大型激光陀螺仪在环境影响方面进行了研究整理, 包括温度, 气压, 潮汐以及风等环境因素引起的影响。通过对各环境因素对激光陀螺仪造成影响的方式机理研究, 结合国内外在环境影响方面的前期研究分析工作, 在文中论述了应对这些影响的处置和补偿方法。即便如此, 环境因素对激光陀螺仪的影响仍不能很好的消除。一方面需要组成大型激光陀螺仪的相关结构器件进一步提高其可靠性, 另一方面是各项环境因素对激光陀螺仪的影响作用机理较为复杂, 且各项环境因素之间也存在相互影响或共同作用。现今, 环境因素对大型激光陀螺仪的影响已经成为进

一步提高陀螺仪精度的重要研究方向。本文结合国内外相关研究, 希望能够为在环境因素方面研究而进一步提高大型激光陀螺仪测量的精度和长期稳定性提供参考。

参考文献:

- [1] Liu Kui, Zhang Fenglei, Li Zongyang, et al. Noise analysis of a passive resonant laser gyroscope [J]. *Sensors*, 2020, 20(18).
- [2] Hurst R B, Mayerbacher M, Gebauer A, et al. High-accuracy absolute rotation rate measurements with a large ring laser gyro: establishing the scale factor [J]. *Appl Opt*. 2017, 56(4): 1124 - 1130.
- [3] Ulrich K S, R J W. Invited review article: large ring lasers for rotation sensing. [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(4).
- [4] Andrea B, Nicolò B, Filippo B, et al. Effects of temperature variations in high-sensitivity sagnac gyroscope [J]. *The European Physical Journal Plus*, 2021, 136(5).
- [5] Zhang Fenglei, Liu Kui, Lu Zehuang, et al. Review of large-scale geodetic laser gyroscopes [J]. *Huazhong Univ.*

- of Sci. & Tech. : Natural Science Edition, 2023, 51 (3) : 120 - 131. (in Chinese)
- 张风雷, 柳奎, 陆泽晃, 等. 大型测地激光陀螺仪研究综述[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2023, 51 (3) : 120 - 131.
- [6] W W Chow, J Gea-Banacloche, L M Pedrotti, et al. The ring laser gyro[J]. Rev. Mod. Phys, 1985, 57(61).
- [7] G E Stedman. Ring-laser tests of fundamental physics and geophysics[J]. Rep. Prog. Phys, 1997, 615(60).
- [8] Hurst B R, Stedman E G, Schreiber U K, et al. Experiments with an 834 m² ring laser interferometer[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105(11).
- [9] Harrison C J. Cavity and topographic effects in tilt and strain measurement[J]. Journal of Geophysical Research, 1976, 81(2).
- [10] Zhai Erjiang, Guo Wenge, Yao Lixun, et al. Influence of geometric deformation of large laser gyroscope on scale factor[J]. Infrared, 2020, 41(8) : 36 - 43. (in Chinese)
- 翟二江, 郭文阁, 姚黎郁, 等. 大型激光陀螺几何形变对标度因数的影响[J]. 红外, 2020, 41(8) : 36 - 43.
- [11] Virgilio D V D A, Beverini N, Carelli G, et al. Identification and correction of sagnac frequency variations: an implementation for the GINGERINO data analysis[J]. European Physical Journal C: Particles and Fields, 2020, 80(31).
- [12] Virgilio D V D A, Belfi J, Ni W, et al. GINGER: a feasibility study[J]. European Physical Journal Plus, 2017, 132(4).
- [13] D A V D, Carlo A, Francesco B, et al. Sensitivity limit investigation of a sagnac gyroscope through linear regression analysis[J]. European Physical Journal C, 2021, 81(5).
- [14] Zhang L, Guo W, Yao L, et al. Simulation of temperature compensation for geometrical stability in large ring laser [C]//Fourth International Conference on Photonics and Optical Engineering. SPIE, 2021, 11761 : 102 - 107.
- [15] Klügel T Tilt variations at shallow depth; implications for the installation of a laser gyroscope at the Geodetic Observatory Wettzell[J]. Bull d'Inf Marées Terr, 2002, 137 : 10927 - 10930.
- [16] Schreiber U K, Schneider M, Rowe C H, et al. The C-II ring laser project[J]. Physics & Chemistry of the Earth Part A Solid Earth & Geodesy, 2000, 25(12) : 805 - 807.
- [17] Schreiber, K. U. , Kodet, J. , Hugentobler, U. et al. Variations in the Earth's rotation rate measured with a ring laser interferometer [J]. Nat. Photon. , 2023, 17 : 1054 - 1058.
- [18] Schreiber U K, Klügel T, Stedman E G. Earth tide and tilt detection by a ring laser gyroscope [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2003, 108(B2).
- [19] Rabbel, W. , & Zschau, J. Static deformations and gravity changes at the Earth's surface due to atmospheric loading [J]. Journal of Geophysics, 1984, 56(1) : 81 - 99.
- [20] A Weise. Neigungsmessungen in der geodynamik-ergebnisse von der 3 Komponenten-station metsähovi [D]. TU Clausthal, 1992 : 180.
- [21] Klügel T, Wziontek H. Correcting gravimeters and tiltmeters for atmospheric mass attraction using operational weather models [J]. Journal of Geodynamics, 2009, 48 (3 - 5) : 204 - 210.
- [22] Jiang Xingtao, Guo Wenge, Wu Wei, et al. Research progress of power supply technology for ring laser gyroscope [J]. Laser & Infrared, 2023, 53(3) : 323 - 331. (in Chinese)
- 江兴涛, 郭文阁, 武威, 等. 环形激光器电源激励技术研究进展[J]. 激光与红外, 2023, 53(3) : 323 - 331.
- [23] Ulrich K Schreiber, Clive H Rowe, Douglas N Wright, et al. Precision stabilization of the optical frequency in a large ring laser gyroscope[J]. Appl. Opt. , 1998, 37: 8371 - 8381.
- [24] Xu Xuedong, Guo Wenge, Wang Fei, et al. Characteristics of geodesic laser gyroscope mode and control[J]. Electro-Optic Technology Application, 2022, 37(1) : 58 - 61. (in Chinese)
- 徐学东, 郭文阁, 王飞, 等. 测地激光陀螺模式特性及控制[J]. 光电技术应用, 2022, 37(1) : 58 - 61.
- [25] Ciminelli, C. , Brunetti, G. Laser gyroscope precisely tracks the Earth's rotation [J]. Nat. Photon. , 2023, 17 : 1023 - 1024.
- [26] K U Schreiber, A Gebauer, J -P R Wells. Long-term frequency stabilization of a 16 m² ring laser gyroscope [J]. Opt. Lett. , 2012, 37 : 1925 - 1927.
- [27] Gebauer A, Schreiber U K, Klügel T, et al. High-frequency noise caused by wind in large ring laser gyroscope data [J]. Journal of Seismology, 2012, 16(4) .
- [28] A Gebauer. The impact of topographic and geological features on deformations of the upper crust [J]. Jena, 2009.
- [29] DTM-25 Digital Terrain Model 1 : 25000. Federal agency of cartography and geodesy [EB/OL]. [http://www. geodatenzentrum. de](http://www.geodatenzentrum.de).
- [30] Basis-DLM Digital LAND use Model 1 : 25000 Federal Agency of Cartography and Geodesy [EB/OL]. [http://www. geodatenzentrum. de](http://www.geodatenzentrum.de).
- [31] Spudich P, Steck LK, Hellweg M, et al. Transient stresses at Parkfield, California, produced by the M 7. 4 Landers earthquake of June 28, 1992; observations from the UP-SAR dense seismograph array [J]. J Geophys Res, 1995, 100(B1) : 675 - 690.