

用于深海作业的激光陀螺高精度定位定向系统的仿真与实验

胡春生¹, 秦石乔², 王省书¹, 黄宗升¹

(1. 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 国防科学技术大学理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 定位定向技术是深海作业系统的主要关键技术之一。本文基于激光陀螺提出了一种用于深海作业的高精度定位定向系统研究方案, 建立了一套相应的系统分析方法, 对该方案的姿态、速度、位置误差进行了详细的仿真分析。进行了 72h 静态定位定向实验, 结果表明系统的俯仰角和横滚角误差小于 0.006° , 航向角误差小于 0.035° , 速度误差小于 $0.9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 定位误差小于 29.9km。实验结果与仿真分析结果基本一致, 验证了该研究方案的可行性。和采用动力调谐陀螺的定位定向系统相比, 本系统具有精度高和可靠性好等优点。

关键词: 定位定向; 深海作业; 激光陀螺; 加速度计

中图分类号: P715.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5470(2009)04-0022-06

Simulation and experiment of precise position and azimuth determining system based on ring laser gyro for deep ocean work

HU Chun-sheng¹, QIN Shi-qiao², WANG Xing-shu¹, HUANG Zong-sheng¹

(1. College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, 410073;

2. College of Science, National University of Defense Technology, Changsha, 410073)

Abstract: Position and azimuth determining technology is one of the main technologies for deep ocean work. The authors propose a research method based on ring laser gyros, which can determine position and azimuth of deep-sea submersibles. According to the method, a set of analysis programs are designed, with which the attitude, velocity and position error are simulated and analyzed in detail. A 72-hour position and azimuth determining experiment has been carried out, which shows that the error of pitch and roll angle is below 0.006° , the azimuth error is below 0.035° , the velocity error is below $0.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, and the position error is below 29.9 km. The experiment results agree with the analysis results, which indicate that the research method is valid. Compared with position and azimuth determining system based on dynamically tuned gyroscopes, this new system has higher precision and better reliability.

Key words: position and azimuth determining; deep ocean work; ring laser gyro; accelerometer

海洋蕴藏着丰富的生物资源和矿产资源, 随着陆地资源的开发殆尽, 海洋资源的开发和利用对经济增长的推动作用将越趋明显^[1]。海洋资源特别是深海资源的开发利用是我国向海洋拓展延伸发展战略的重要内容。目前用于水下勘探和开发的主要工具有载人潜水器和无人潜水器 (Unmanned Under-sea Vehicle, UUV)。无人潜水器又称水下机器人,

它又分为无人遥控潜水器 (Remotely Operated Vehicle, ROV) 和自治水下机器人 (Autonomous Underwater Vehicle, AUV)^[2]。

随着对海洋资源开发和利用的发展以及军事战略的需要, 美英等发达国家纷纷研制成功深海定位定向技术^[1-3]。20 世纪末美国就研制成功深海陀螺罗经 Ostan3000, 该系统由 3 个捷联安装的光学陀

收稿日期: 2008-10-22; 修订日期: 2009-01-17。卢冰编辑

基金项目: 国家“863”项目 (2006AA09Z208)

作者简介: 胡春生 (1976—), 男, 湖北省浠水县人, 博士, 副教授, 主要从事高精度姿态测量系统和三维成像激光雷达。

E-mail: trenthon@163.com

螺构成，能实时提供系统的航向角、俯仰角和横滚角，工作水深超过 3 000m，航向测量精度为 $\pm 0.1^\circ$ ，俯仰角和横滚角测量精度为 0.01° ，该系统已广泛用在各种水下作业系统中。英国研制的 MAHRS 工作水深也超过 3 000m，航向角测量精度优于 0.1° ，俯仰角和横滚角测量精度优于 0.03° 。国外深海定位定向系统正向工作水深更深、精度更高的趋势发展。

随着 20 世纪 80 年代中后期激光陀螺 (Ring Laser Gyro, RLG) 技术的成熟和推广应用，以激光陀螺^[4-5]为主构成的自主导航系统在军事领域中水面舰艇和水下潜艇的导航中得到广泛应用，如 Sperry 公司在 20 世纪 90 年代开始研制的 MK39、MK49 等系列激光陀螺导航系统已占全球航海导航系统 80% 以上的份额。在深海资源勘探方面，以美国 Honeywell 公司生产的 GG1320 和 GG1342 激光陀螺为主，已应用到多种型号的 ROV 和 AUV 中。

在潜水器方面，我国经过近 30 年的研究，已取得一些成就^[6-7]。国内中船重工 702 所、中国科学院沈阳自动化研究所、上海交通大学、哈尔滨工程大学等单位先后研制成功了可实现人员和物资转移的载人潜水器、无人遥控潜水器、自治水下机器人等多种潜水器，在潜水器研制方面积累

了丰富经验。但由于种种原因，在深海定位定向的装备方面，国内主要依赖进口，所以研究具有自主知识产权的定位定向系统对我国的深海作业领域具有重要的现实意义。

1 定位定向原理

激光陀螺定位定向系统 (Ring Laser Gyro Position and Azimuth Determining System, RLGPADS) 以高精度激光陀螺和加速度计为核心，其工作原理如图 1 所示。由 3 个激光陀螺和 3 个加速度计组成的惯性测量单元 (Inertial Measurement Unit, IMU) 直接安装在载体上，惯性元件的敏感轴分别与载体坐标系的 3 个坐标轴对应。运动过程中，通过激光陀螺测定载体相对惯性坐标系的运动角速度，并由此计算出载体坐标系至导航坐标系的坐标变换矩阵^[8]。通过此矩阵，把加速度计测得的加速度信息变换至导航坐标系，然后进行导航解算，得到深海作业设备的三维姿态数据 (俯仰角、横滚角、航向角)、三维速度数据 (东向速度、北向速度、天向速度) 和三维坐标数据 (经度、纬度、高度)。在进行导航计算时采用多种方法进行补偿，可以提高测量精度。

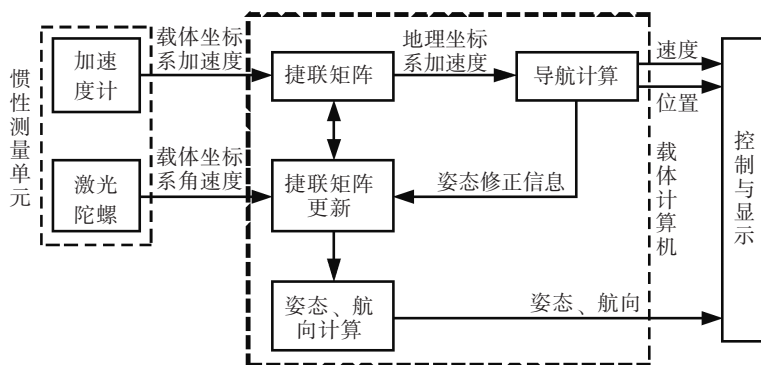


图1 激光陀螺定位定向系统的基本原理

Fig.1 Basic principle of RLG position and azimuth determining system

激光陀螺定位定向系统以其精度高、可靠性高、动态性能好等独特优点，是实现深海作业定位定向的一种比较理想的方式。激光陀螺是一种光学陀螺，通过光波频率差测量角速度，是一种新型的惯性器件，排除了普通机电陀螺的许多误差源，如 g 和 g^2 效应、交叉耦合效应等，具有精度高、启动时间短、动态范围大、比例因子线性度好、随机游动误差小、可靠性高、直接数字量输出等诸多优点，可完全自主实现对深海作业设备姿态和位置的精确测量，较适合在深海定位定向系统中应用。

2 理论仿真

影响定位定向系统的测量精度的误差因素有很多，大致可以分为 4 类：惯性器件误差、电路误差、机械误差和计算误差。

1) 惯性器件误差。惯性器件误差是指惯性器件本身的误差，即激光陀螺和加速度计的误差，主要是零偏、比例因子误差和随机噪声。惯性器件误差通常是定位定向系统的主要误差源，是系统误差分析及仿真的重点。

2) 电路误差。电路误差主要包括两个方面, 一方面是陀螺电路和加表电路的随机噪声引起的误差, 可近似当成白噪声; 另一方面是信号处理电路进行量化处理产生的量化误差, 该误差不随时间累积。

3) 机械误差。机械误差主要包括惯性器件的安装误差。激光陀螺安装误差是指系统标定后, 标定得到的激光陀螺敏感轴夹角和实际的敏感轴夹角之间的误差。加速度计安装误差是指系统标定后, 标定得到的加速度计敏感轴夹角和实际的敏感轴夹角之间的误差。

4) 计算误差。计算误差主要包括计算机有限字长引起的舍入误差和姿态解算的算法误差。由于计算机在计算过程中的字长都是有限的, 导致姿态解算产生一定的舍入误差。由于常用 PC104 的浮点数位宽为 64 位, 相对与系统的总误差而言舍入误差较小。实际的姿态解算算法都存在一定的截断误差, 可以通过优化算法尽量减小算法误差。相对于系统总误差而言, 计算误差 (舍入误差和算法误差) 通常相对较小, 一般小于 10%。

以上 4 类误差均会影响整个系统的定位定向精度, 若仅考虑单个误差源对系统的测量精度进行分析, 难以全面准确分析得到系统的实际精度。为了更加准确地对系统的实际精度进行分析, 采用文献^[8]介绍的误差传播模型和姿态、速度、位置解算方法建立了一套系统仿真分析程序。利用该仿真程序对系统的定位定向精度进行全面分析, 在仿真分析时综合考虑了以上 4 类误差, 各种误差因素的大小尽量按实际大小设置。

当各陀螺的零偏为 $0.003^{\circ} \cdot \text{h}^{-1}$ 、随机噪声为 $0.001^{\circ} \cdot \text{h}^{-1}$ 、比例因子误差为 3ppm、安装误差为 $2''$ 、量化误差为 $0.46''$, 各加表的零偏为 $50\mu\text{g}$ 、随机噪声为 $10\mu\text{g}$ 、比例因子误差为 5ppm、安装误差为 $5''$ 、量化误差为 $5.8 \times 10^{-4} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、初始姿态为 $(0^{\circ}, 0^{\circ}, 334.7^{\circ})$ 、纬度为 28.2218° 、经度为 112.9924° 时, 静态仿真 72h 的姿态、速度和位置数据如图 2—图 7 所示。

由以上仿真结果可知, 激光陀螺定位定向系统静态工作 72 小时的俯仰角和横滚角误差小于 0.005° , 航向角误差小于 0.02° , 速度误差峰峰值为 $0.7 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 定位误差小于 19.3km; 6h 的定位误差小于 1.2km。以上是静态条件下的仿真结果, 在实际的动态条件下的测量误差会有所增加, 这主要是由于惯性器件的比例因子误差和安装误差等误差因素在动态条件下的影响会有所增加, 增加的幅度与具体的动态条件有关。

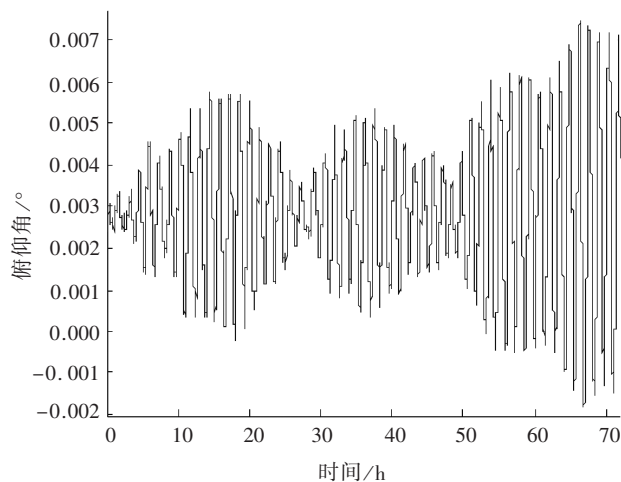


图 2 激光陀螺定位定向系统 72h 仿真的俯仰角

Fig.2 Pitch of 72-hour simulation based on RLG position and azimuth determining system

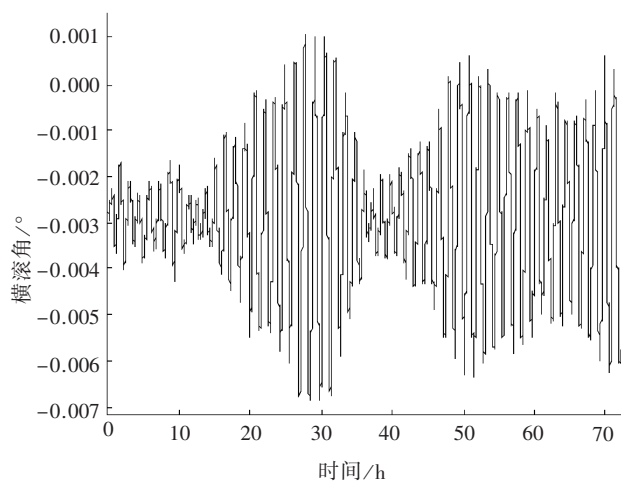


图 3 激光陀螺定位定向系统 72h 仿真的横滚角

Fig.3 Roll of 72-hour simulation based on RLG position and azimuth determining system

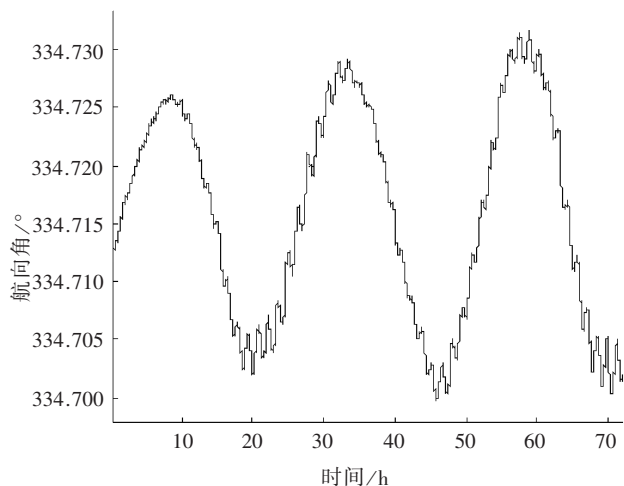


图 4 激光陀螺定位定向系统 72h 仿真的航向角

Fig.4 Head of 72-hour simulation based on RLG position and azimuth determining system

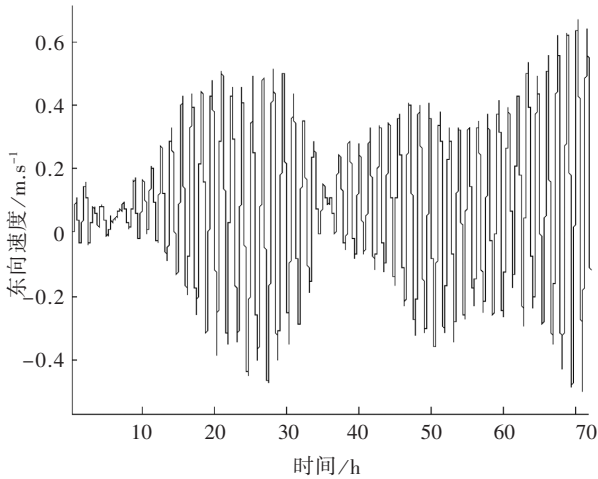


图5 激光陀螺定位定向系统 72h 仿真的东向速度

Fig.5 Eastward velocity of 72-hour simulation based on RLG position and azimuth determining system

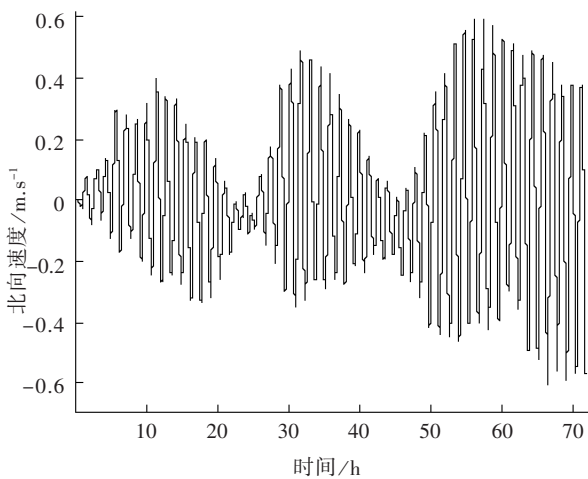


图6 激光陀螺定位定向系统 72h 仿真的北向速度

Fig.6 Northward velocity of 72-hour simulation based on RLG position and azimuth determining system

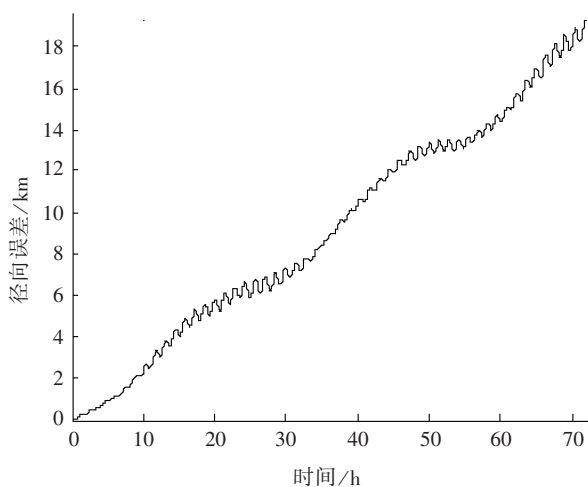


图7 激光陀螺定位定向系统 72h 仿真的径向误差

Fig.7 Radial error of 72-hour simulation based on RLG position and azimuth determining system

3 实验结果

我们按本文的研究方案顺利研制了一套激光陀螺定位定向系统原理样机。为了测试样机的系统性能和验证仿真分析的可靠性,进行了长时间静态实验测试。实验时将激光陀螺定位定向系统固定在室内的光学平台上,2008年5月30日至6月2日在静态条件下连续工作72h。实验过程中的姿态、速度和位置数据如图8—图13所示。

由以上实验结果可知,激光陀螺定位定向系统静态工作72h的俯仰角和横滚角误差小于 0.006° ,航向角误差小于 0.035° ,速度误差小于 $0.9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,定位误差小于29.9km;6h的定位误差小于3.4km。实验结果与理论仿真结果基本相符。采用前面介绍

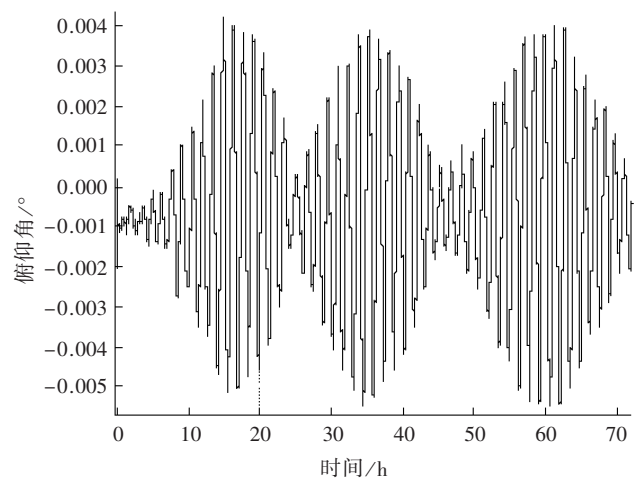


图8 激光陀螺定位定向系统 72h 实验的俯仰角

Fig.8 Pitch of 72-hour experiment based on RLG position and azimuth determining system

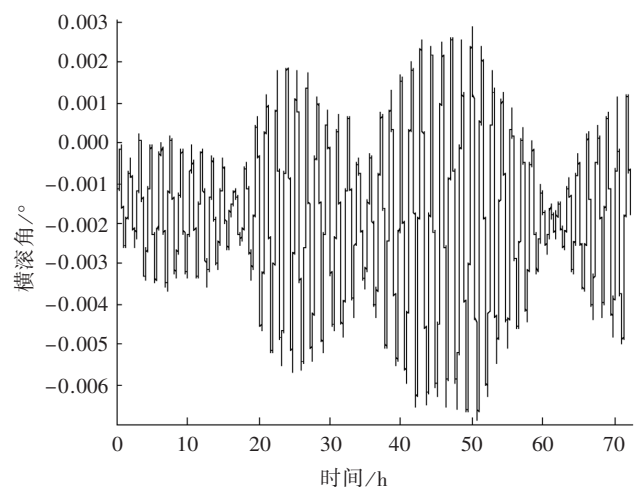


图9 激光陀螺定位定向系统 72h 实验的横滚角

Fig.9 Roll of 72-hour experiment based on RLG position and azimuth determining system

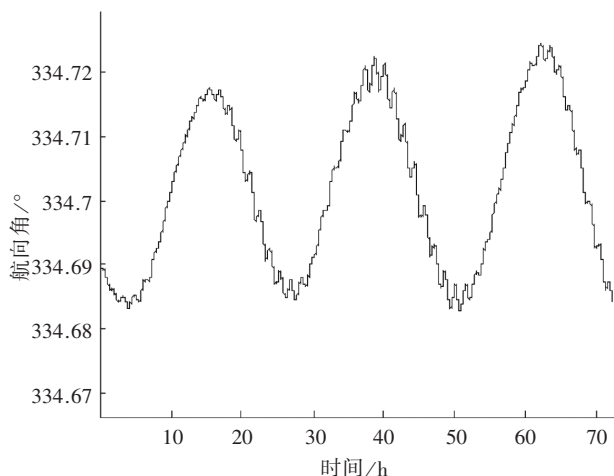


图 10 激光陀螺定位定向系统 72h 实验的航向角

Fig.10 Head of 72-hour experiment based on RLG position and azimuth determining system

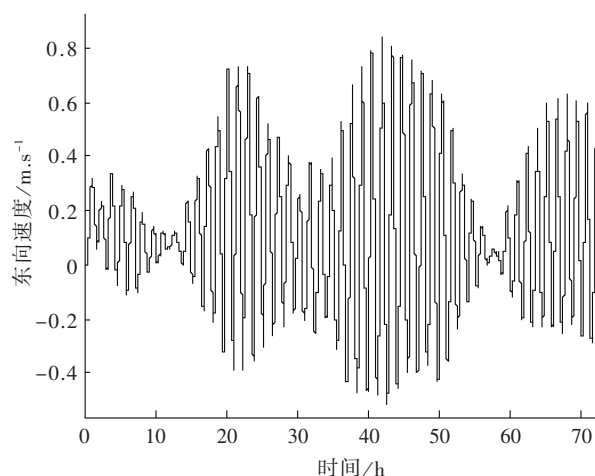


图 11 激光陀螺定位定向系统 72h 实验的东向速度

Fig.11 Eastward velocity of 72-hour experiment based on RLG position and azimuth determining system

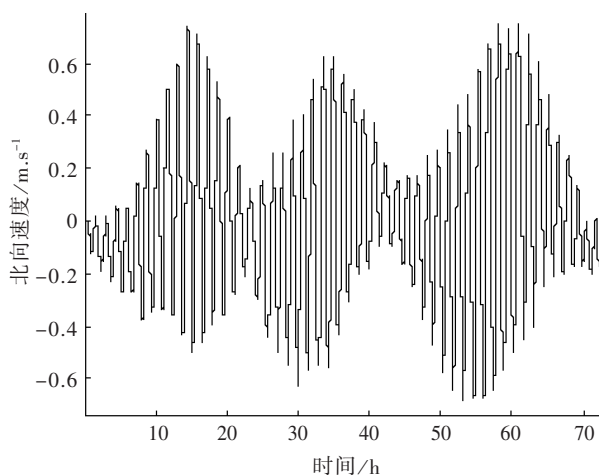


图 12 激光陀螺定位定向系统 72h 实验的北向速度

Fig.12 Northward velocity of 72-hour experiment based on RLG position and azimuth determining system

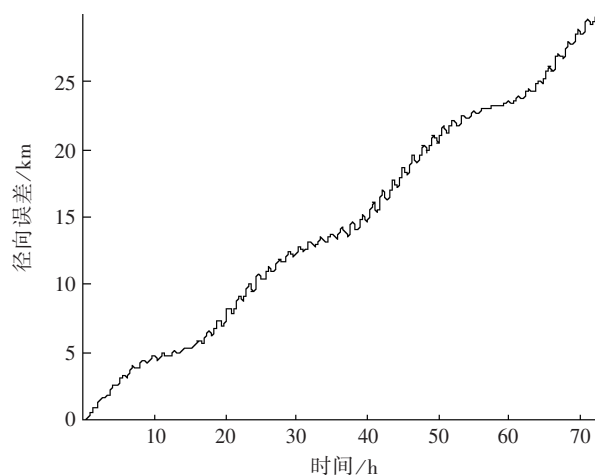


图 13 激光陀螺定位定向系统 72h 实验的径向误差

Fig.13 Radial error of 72-hour experiment based on RLG position and azimuth determining system

的仿真分析方法, 改变各种误差因素的大小进行仿真, 可以得到不同误差因素条件下系统的姿态、速度和位置误差曲线。将这些误差曲线和实验中相应误差曲线进行对比可知, 该定位定向实验的测量误差主要由激光陀螺和加速度计的零偏产生。以上实验是在室内的静态试验, 在实际工作的动态条件下测量误差会有所增加。

4 结论

由以上讨论可知, 该激光陀螺定位定向系统研究方案切实可行, 实验结果证实了仿真分析方法的有效性, 可为研究更高精度的定位定向系统提供参考。系统可以用于完全自主实时测量出水下装备的姿态、位置和速度等多种运动信息, 对水下装备的

运动控制与导航以及其上仪器设备的动作决策都有重要价值。

通过进一步的仿真分析可知, 在深海作业的特殊应用环境中, 在以上基础上, 可以采用以下两种方法显著提高系统定位定向精度。

(1) 采用单轴旋转方法进行自动误差补偿。采用类似与美国 MK39 MOD3C 系统类似的单轴旋转方法可以有效自动补偿两个水平激光陀螺和两个水平加速度计的零偏, 从而可以显著提高系统的定位定向精度, 有望达到 24 小时 1.85km 甚至更高的定位精度。

(2) 和深度计、多普勒测速仪进行组合导航。在深海环境下可以采用深度计、多普勒测速仪与现有的定位定向系统进行组合导航, 并提高建模对重力加速度进行深海修正, 可以显著降低定位误差。

参考文献：

- [1] 阳 宁, 夏建新. 国际海底资源开发技术及其发展趋势[J]. 矿冶工程, 2000, 20 (1): 1—4.
- [2] 冯正平. 国外自治水下机器人发展现状综述[J]. 鱼雷技术, 2005, 13 (1): 5—9.
- [3] 李 俊, 徐德民, 宋保维, 等. 自主式水下潜器导航技术发展现状与展望[J]. 中国造船, 2004, 45 (3): 70—77.
- [4] 高伯龙, 李树棠. 激光陀螺[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1984: 10—12.
- [5] 姜亚南. 环形激光陀螺[M]. 北京: 清华大学出版社, 1985: 7—8.
- [6] 燕奎臣, 李一平, 袁学庆. 远程自治水下机器人研究[J]. 机器人, 2002, 24 (2): 299—303.
- [7] 严卫生, 徐德民, 李 俊, 张福斌. 自主水下航行器导航技术[J]. 火力与指挥控制, 2004, 29 (6): 11—16.
- [8] 秦永元. 惯性导航[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 287—289.