

# 基于捷联惯导的船载新型阵列雷达 阵面姿态测量系统设计

房新兵, 毛南平, 赵李健, 瞿元新  
(中国卫星海上测控部技术部 江阴 214431)

**摘要:** 针对大型船载新型阵列雷达需重新考虑捷联惯导安装设计问题, 简单介绍捷联惯导基本工作原理, 设计单轴旋转机构激光陀螺捷联惯导新型阵列雷达阵面姿态测量系统, 详细说明系统的组成结构, 并通过仿真试验给出在组合导航模式下姿态测量结果, 证明系统可满足船载新型阵列雷达阵面姿态的精确测量要求。

**关键词:** 捷联惯导; 阵列雷达; 姿态测量; 仿真

**中图分类号:** U666.1 **文献标识码:** A **文章编号:** CN11-1780(2021)02-0069-08

## Design of attitude measurement system for antenna array of shipborne phased-array radar based on SINS

FANG Xinbing, MAO Nanping, ZHAO Lijian, QU Yuanxin  
(Marine Department of Satellite Tracing and Metering, Jiangyin 214431, China)

**Abstract:** In view of the need to reconsider the installation design of strapdown inertial navigation system for large ship-borne new array radar, the basic working principle of strapdown inertial navigation system (SINS) is briefly introduced. The attitude measurement system for antenna array of phased-array radar based on single-axis rotation laser gyro SINS is designed. The composition of the system is explained in detail, and the attitude measurement results under integrated navigation are given by simulation test. It is proved that the system can meet the requirement of precise attitude measurement of shipborne phased-array radar.

**Key words:** SINS; Phased-array radar; Attitude measurement; Simulation

## 引 言

近年来, 对新型阵列雷达需求日益迫切, 特别是对大型船载新型阵列雷达需求尤为突出。按照常规船载雷达天线设计思路, 捷联惯导应安装在天线转台下方基座内<sup>[1]</sup>。为保证船平台高精度测量, 天线座需要加强刚度设计, 势必增加新型阵列天线系统重量, 过重的天线座重量限制了阵面规模, 从而限制了雷达作用距离<sup>[2]</sup>。为保证雷达精度指标要求, 此时需要重新考虑捷联惯导安装设计。

针对上述问题, 根据船载新型阵列雷达使用情况, 设计了一种基于捷联惯导的高精度惯导阵面姿态实时测量系统, 直接在阵面内部装入捷联惯导, 实时反馈阵面姿态, 以满足大型船载新型阵列雷达海上高精度测量要求。

## 1 捷联惯导介绍

捷联惯导主要由惯性测量单元 IMU (Inertial Measurement Unit) 和单轴旋转机构组成, 惯性测量单元主要包括激光陀螺和加速度计。惯性测量单元直接敏感, 用于测量惯性角速度、惯性加速度。近年来, 随着惯性测量单元精度进一步提高, 在航海、航天、武器制导、车体监控和其他一些民用领域中, 捷联惯导都有着十分广泛的应用<sup>[3-7]</sup>。捷联惯导系统结构简单, 误差传递链短, 可获得较高测量精度。

### 1.1 捷联惯导导航解算

捷联惯导导航解算基本原理如图 1 所示。运动过程中, 激光陀螺可直接测量惯性器件坐标系相对惯

性坐标系的运动角速度, 加速度计可直接测量惯性器件坐标系相对惯性坐标系的加速度。根据测量数据可计算出惯性器件坐标系至地理坐标系的姿态矩阵。通过矩阵变换, 可得惯性器件在地理坐标系中的速度和位置信息<sup>[8,9]</sup>。

### 1.2 组合导航下补偿机制

对于捷联惯导而言, 激光陀螺和加速度计的零偏/常值漂移对系统导航精度具有直接影响。组合导航状态下, 水平姿态角取决于等效东向、北向加表零偏的大小, 航向角取决于等效东向陀螺漂移的大小。在静态条件下, 与姿态精度直接相关的等效东向、北向加表零偏, 等效东向陀螺漂移均不可观测。采用单轴旋转方案, 旋转机构伺服惯性测量单元进行周期性转位, 陀螺和加表水平零偏完全可观测, 相应的姿态测量精度将会显著提高<sup>[10-12]</sup>。

假定单轴旋转机构以 5 min 为周期进行旋转, IMU 平放时的姿态测量误差、陀螺漂移和加表零偏仿真结果如图 2 所示。

IMU 斜 45° 安装时的姿态测量误差、陀螺漂移和加表零偏仿真结果如图 3 所示。

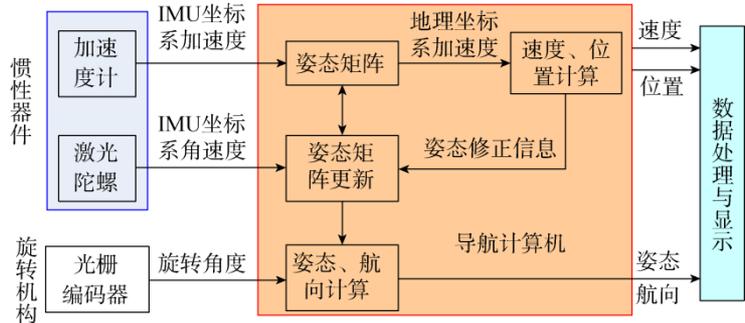


图 1 导航解算的基本原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the basic principles of navigation solution

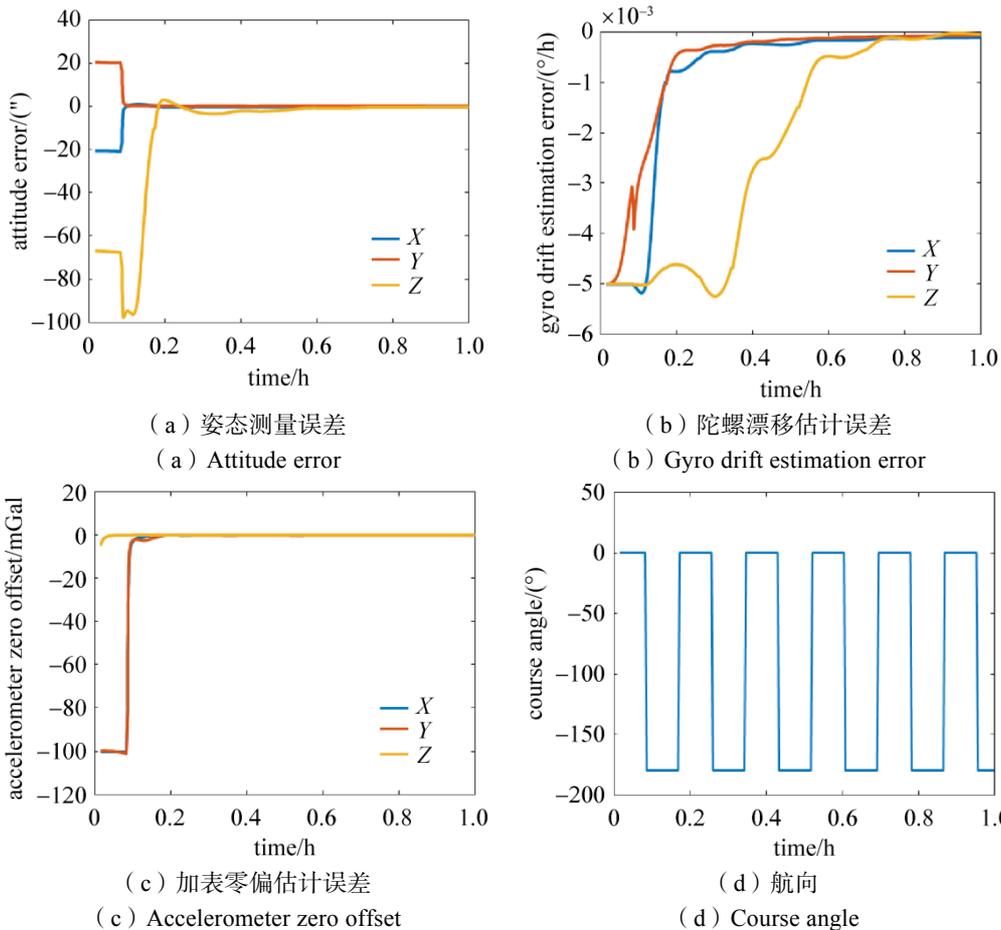


图 2 IMU 平放时仿真结果

Fig. 2 Simulation results of IMU laid flat

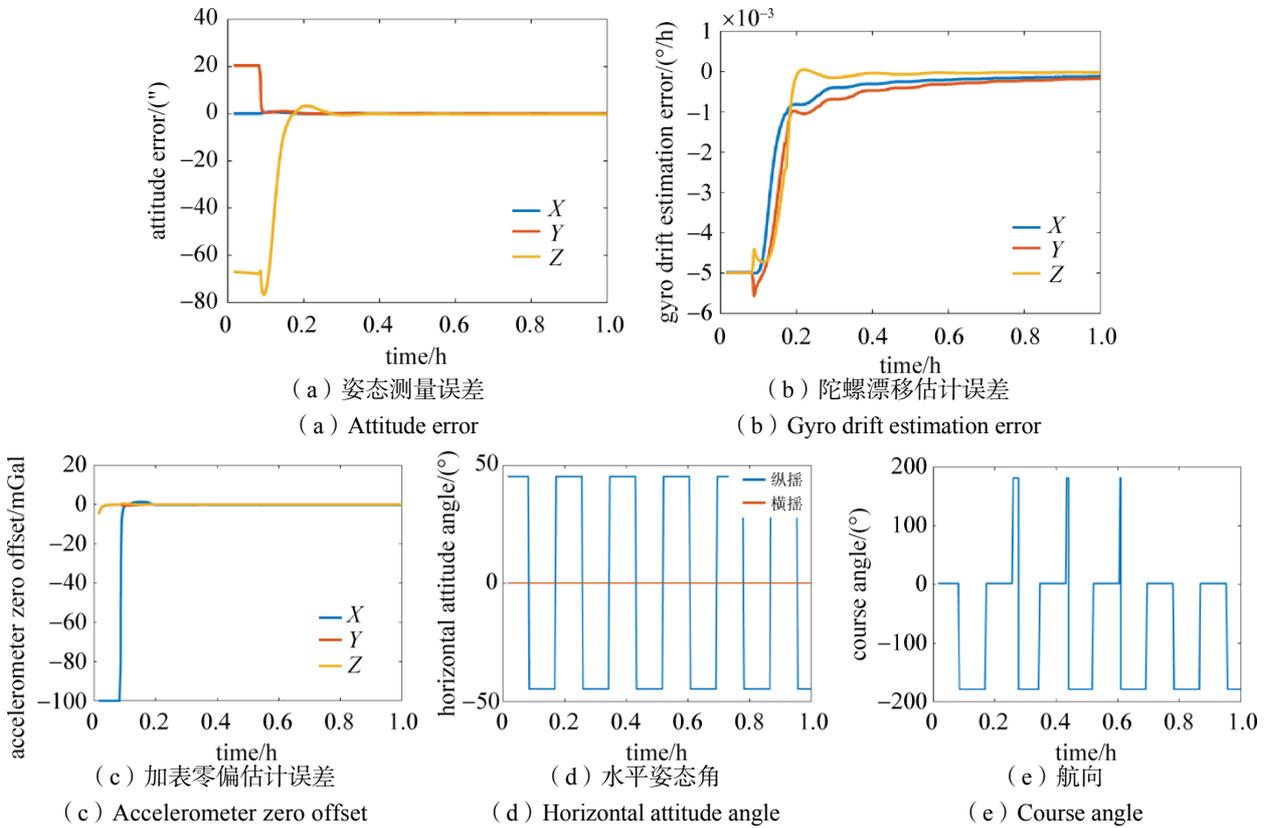


图3 IMU斜45°安装时仿真结果

Fig. 3 Simulation results of IMU laid in 45°

从仿真结果可见, 无论 IMU 平放还是斜装, 采用单轴旋转方案后, 突破了静态条件下航向精度取决于陀螺零偏的限制, 滤波稳定后, 姿态测量精度比较理想。

### 2 旋转矢量法系统总体设计

新型阵列雷达阵面姿态测量系统由激光陀螺捷联惯导、时统终端、显控计算机和 UPS 电源组成, 如图 4 所示。激光陀螺捷联惯导外形尺寸为 40 cm×40 cm×50 cm, 新型阵列雷达阵面设置两个安装接口, 分别在阵面左上角和右下角, 倾斜 45°安装在阵面内部, 根据需要选装 1 件或满装 2 件, 如图 5 所示。配套的时统终端、显控计算机、UPS 电源安装在控制机房。根据捷联惯导输出的姿态数据和旋转机构输出的旋转角度数据, 可计算出安装惯导的雷达阵面坐标系的实时姿态。显控计算机根据阵面实时姿态控制新型阵列雷达天线波束指向, 同时根据阵面实时姿态完成被测目标的坐标系转换, 进而完成弹道测量处理。

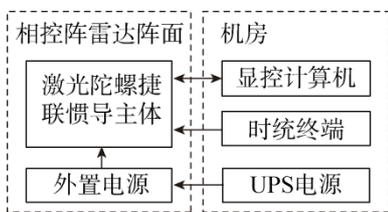


图4 雷达阵面姿态测量设备组成示意图  
Fig. 4 Schematic diagram of radar array attitude measuring equipment

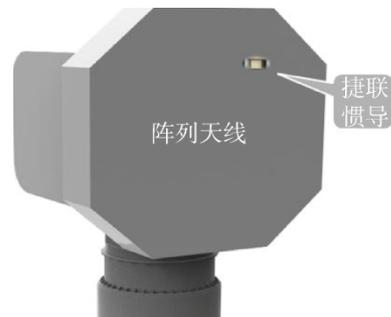


图5 捷联惯导阵面安装示意图  
Fig. 5 Installation diagram of SINS

### 2.1 捷联惯导主体

激光陀螺捷联惯导主体利用激光陀螺和加速度计的 outputs, 通过导航解算, 得到高精度的姿态 (航向、横摇和纵摇)、速度和位置等基准信息, 其主要由惯性测量单元、电路单元和单轴旋转机构组成。惯性测量单元直接安装在单轴旋转机构上, 结构如图 6 所示, 导航结果通过网络向外连续输出。

#### ① 惯性测量单元

激光陀螺捷联惯导的核心部分是惯性测量单元, 其主要结构如图 7 所示, 由惯性器件和安装装置构成。陀螺选用 DLG-90 型高精度机抖激光陀螺, 加速度计选用 JN-06 型高精度石英挠性加速度计。三个加速度计正交安装在加速度计安装架上, 三个激光陀螺正交安装在陀螺安装架上, 加速度计安装架安装在陀螺安装架内部, 并且使各陀螺敏感轴和相应的加速度计敏感轴尽量平行。陀螺安装架通过专用减振器安装在惯性测量单元的单元安装架上。

#### ② 电路单元

激光陀螺捷联惯导电路单元主要结构如图 8 所示, 由激光陀螺配套电路、加速度计配套电路、旋转机构配套电路、测温电路、信号处理电路、嵌入式计算机和二次电源等部分构成。

#### ③ 单轴旋转机构

单轴旋转机构的结构如图 9 所示, 由电机、编码器、转轴、轴承、导电滑环、转台面和台体构成。

### 2.2 其他设备

显控计算机是对新型阵列雷达及激光陀螺捷联惯导进行综合管理, 接收系统测量信息和状态信息, 实现对惯导状态监控、数据显示, 坐标系转换、雷达天线波束控制。时统终端为捷联惯导提供高精度位置、速度信息、秒脉冲、B 码信号, UPS 电源为设备提供可靠稳定的电源。

## 3 系统测试验证

为有效评估该单轴旋转激光陀螺捷联惯导系统阵面姿态测量精度, 对船载新型阵列雷达旋转次序进行规划。捷联惯导、新型阵列雷达、船舶连接示意如图 10 所示。

捷联惯导安装在雷达阵面内部, 雷达斜置时惯导  $z_{INS}$  轴朝天, 且雷达俯仰轴 ( $y_{radar}$  轴) 与阵面捷联惯导  $y_{INS}$  轴重合。雷达阵面可绕  $y_{radar}$  轴进行  $\pm 45^\circ$  俯仰运动以及绕  $z_{radar}$  轴进行  $360^\circ$  方位转动, 捷联惯导绕自身  $z_{INS}$  进行  $\pm 180^\circ$  周期性转动。惯性测量单元输出姿态受船舶机动、雷达转动以及自身旋转三者共同影响, 其姿态输出可表示为

$$C_n^{INS} = C_{radar}^{INS} C_{ship}^{radar} C_n^{ship} \quad (1)$$

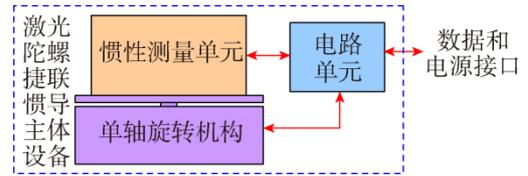


图 6 捷联惯导主体结构示意图

Fig. 6 Structure diagram of SINS

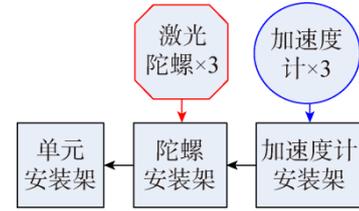


图 7 惯性测量单元结构示意图

Fig. 7 Structure diagram of IMU

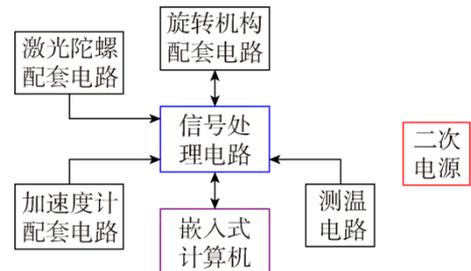


图 8 电路单元结构示意图

Fig. 8 Structure diagram of circuit unit

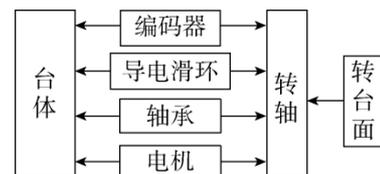


图 9 单轴旋转机构安装示意图

Fig. 9 Installation diagram of single axis rotating mechanism

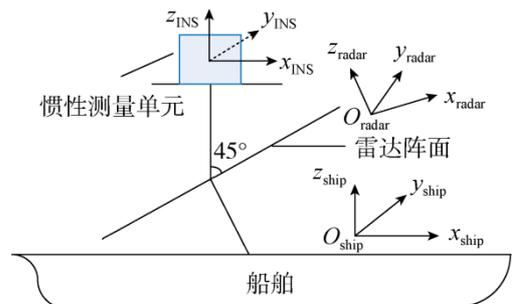


图 10 捷联惯导、新型阵列雷达、船舶连接示意图

Fig. 10 Schematic diagram of SINS, radar and ship connection

$C_n^{INS}$  为捷联惯导输出的实际姿态矩阵； $C_{radar}^{INS}$  为新型阵列雷达基座到惯导坐标系姿态变化矩阵，该矩阵可由惯性测量单元编码器输出计算得到； $C_{ship}^{radar}$  为船舶坐标系到雷达基座变化矩阵，可由雷达编码器输出得到； $C_n^{ship}$  为船舶地理坐标矩阵。

在生成仿真姿态时分为三步，先规划舰船航迹，再叠加雷达俯仰转动信息，然后结合单轴旋转编码器输出投影至惯导坐标系。

### 3.1 加表比例因子动态标定

生成仿真数据时，陀螺、加速度计误差按照 DLG-90 型激光陀螺惯导参数予以设置。由于陀螺比例因子影响相对较小且可事先予以精确标定，数据生成中忽略该因素，仅考虑加速度计比例因子影响。标定中新型阵列雷达运动规划如下：

- ① 初始位置为 (22°N, 122°E, 0 m)，并保持静止状态；
- ② 单轴旋转捷联惯导转动角速度 18°/s，中停时间 300 s；
- ③ 新型阵列雷达绕俯仰轴±45°转动，转动角速度 5°/s，中停时间 300 s。

总仿真时间为 1 h，捷联惯导仿真姿态如图 11 所示。

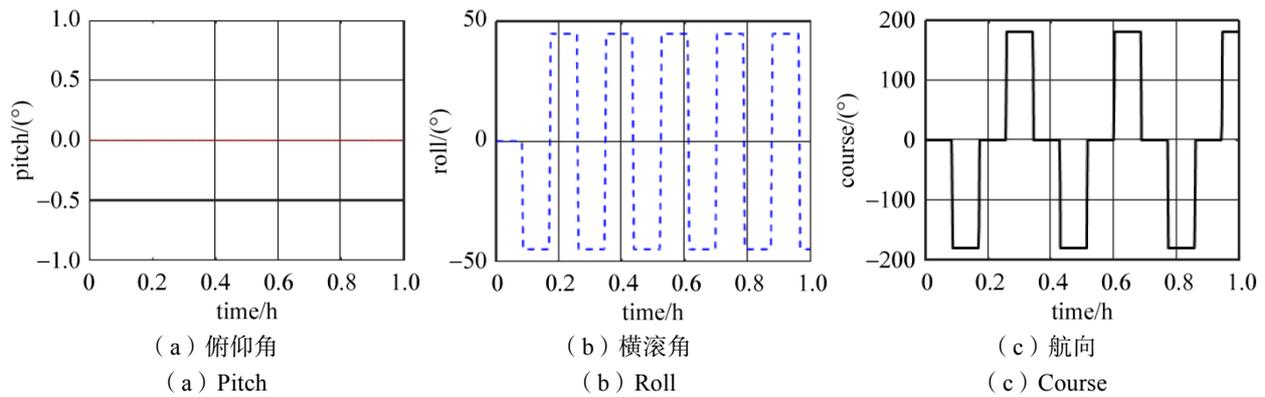


图 11 捷联惯导姿态仿真结果一

Fig. 11 Attitude simulation result 1 of SINS

将 15 维松组合卡尔曼滤波状态量增广至 18 维，即

$$\bar{X} = [\delta\bar{v}, \delta\bar{p}, \bar{\varphi}, \bar{\varepsilon}^b, \bar{V}^b, \bar{S}_a]$$

其中， $\delta\bar{v}$  为速度误差， $\delta\bar{p}$  为位置误差， $\bar{\varphi}$  为姿态误差， $\bar{\varepsilon}^b$  为陀螺常值漂移， $\bar{V}^b$  为加表零偏， $\bar{S}_a$  为加表比例因子误差。将比例因子建模为随机常值模型，对其予以估计。组合导航卡尔曼滤波器将速度作为观测量，直接装订位置至捷联惯导，速度观测噪声为 0.01 m/s，标定结果如图 12 所示。

由图可知，加速度计比例因子可在 1 h 内被部分估计，标定后加速度计比例因子估计残差不超过  $20 \times 10^{-6}$ 。加表零偏观测性较好，估计精度较高；而陀螺零偏由于组合时间较短，只能被部分估计。

### 3.2 组合导航模式下姿态测量精度评估

对单轴旋转捷联惯导组合导航模式下姿态精度予以评估，仿真时间为 40 h。前 8 h 雷达静置且惯导 Z 轴朝天，而后进行 24 h，以±45°俯仰转动模拟目标跟踪。后 8 h 继续静置，保持惯导 Z 轴朝天。跟踪目标时转动时间为 10 min，斜置时间为 20 min。加速度计比例因子估计残差设置为  $100 \times 10^{-6}$ 。捷联惯导仿真姿态如图 13 所示。

组合导航时，状态量为 15 维，且不考虑比例因子影响。观测量为速度误差，观测噪声为 0.01 m/s，位置实时装订至惯性测量单元。组合导航仿真结果如图 14 所示。

由于加速度计比例因子存在，以及雷达俯仰转动影响，横滚误差超过 10"，俯仰、航向姿态估计精度较高。

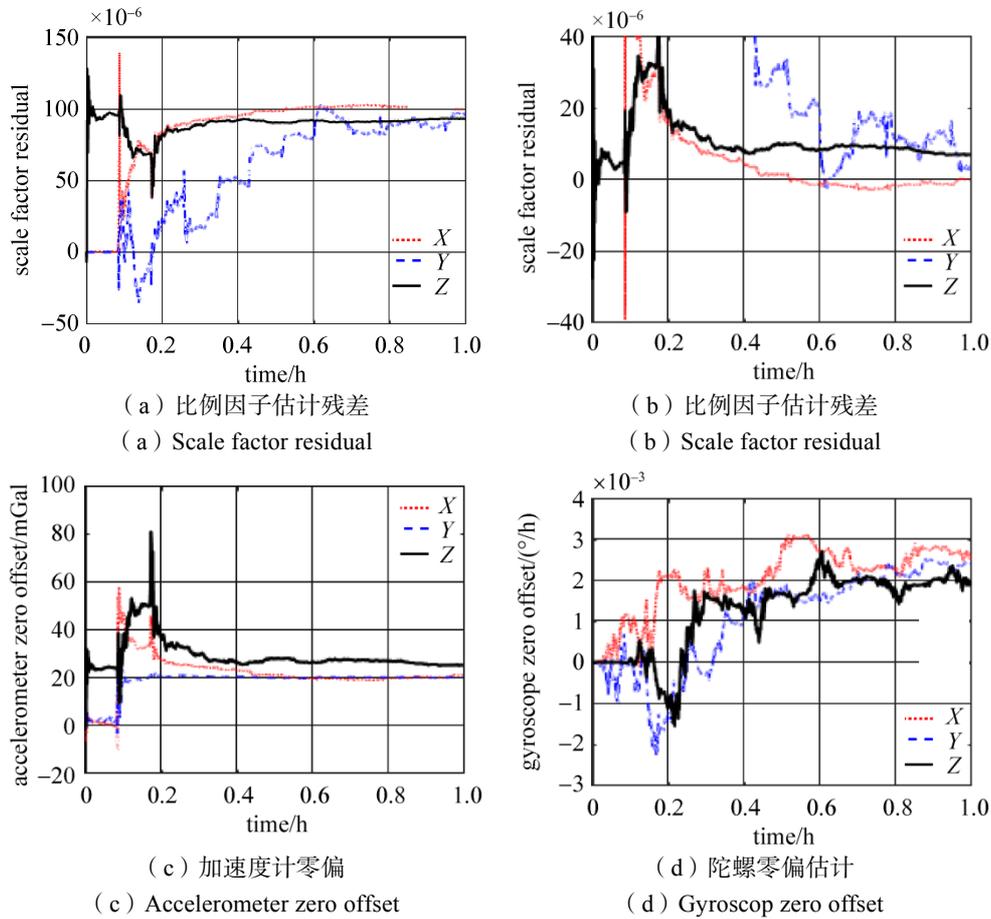


图 12 捷联惯导标定结果  
Fig. 12 Calibration results of SINS

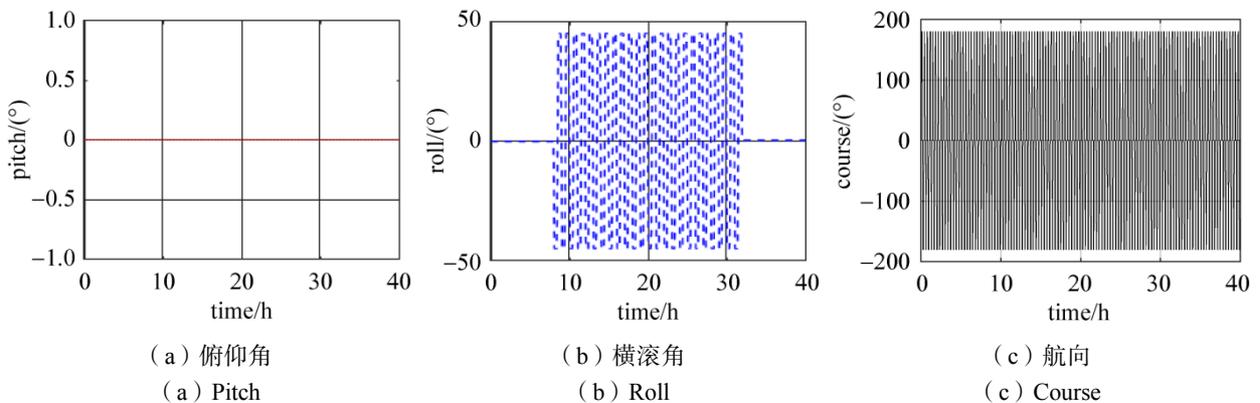


图 13 捷联惯导姿态仿真结果二  
Fig. 13 Attitude simulation result 2 of SINS

假定加速度计比例因子已被部分标定, 加速度计比例因子估计残差为  $20 \times 10^{-6}$ 。在该仿真条件下, 组合导航姿态测量结果如图 15 所示。

由表 1、表 2 可知, 加速度计比例因子估计残差由  $100 \times 10^{-6}$  减少至  $20 \times 10^{-6}$  后, 横滚估计误差由  $10.66''$  减少至  $2.21''$ , 姿态测量精度明显提升, 俯仰、航向姿态测量精度基本不变。

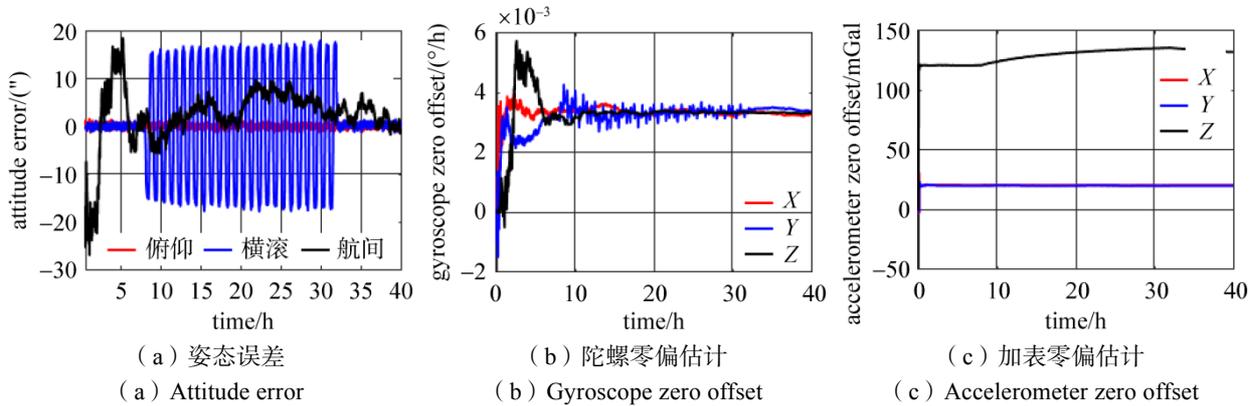


图 14 组合导航仿真结果一

Fig. 14 Simulation result 1 of integrated navigation

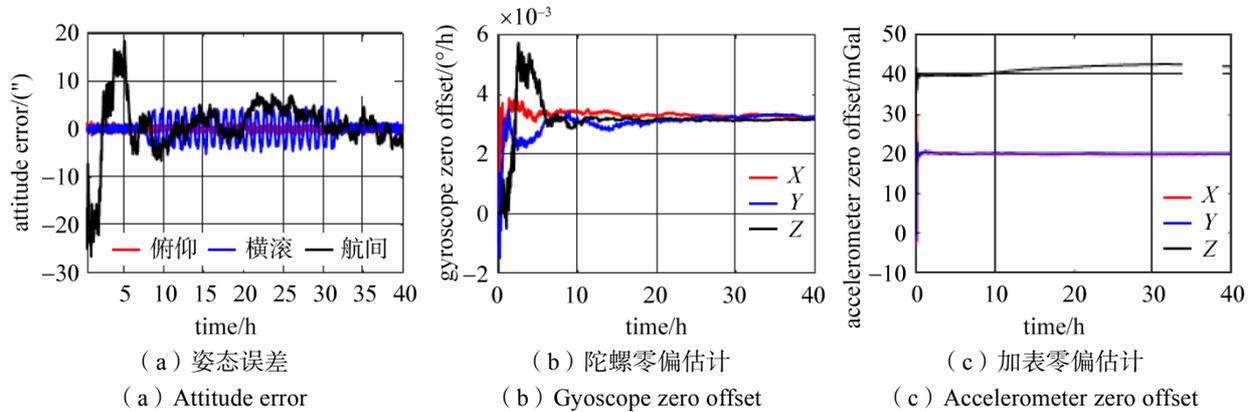


图 15 组合导航仿真结果二

Fig. 15 Simulation result 2 of integrated navigation

表 1 组合导航模式姿态误差估计一 (均方根值)

Table 1 Attitude error estimation 1 of integrated navigation mode

俯仰误差	横滚误差	航向误差
0.49"	10.66"	8.04"

表 2 组合导航模式姿态误差估计二 (均方根值)

Table 2 Attitude error estimation 2 of integrated navigation mode

俯仰误差	横滚误差	航向误差
0.48"	2.21"	7.53"

#### 4 结束语

捷联惯导是雷达在海上动态条件下的基准测量设备,为雷达测量连续提供高精度的船舶航向、横摇、纵摇、速度和位置等基准信息。目前,以激光陀螺为主的捷联惯导系统在国内测量船上已有成熟应用,并积累了各类远洋海况和工作条件下高精度船姿船位测量的宝贵经验。

本文提出了一种船载新型阵列雷达阵面姿态实时测量系统,简单分析了捷联惯导的工作原理,并设计出激光陀螺捷联惯导雷达阵面姿态测量的具体系统。通过仿真测试,验证了该系统工作在组合导航模式下新型阵列雷达阵面姿态精度鉴定情况。测试结果表明,该系统满足船载新型阵列雷达姿态精度指标要求,可以有效改善因雷达天线减重、刚度降低带来的测量误差影响。

### 参考文献

- [1] 简仕龙, 费加兵. 航天测量船海上测控技术概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [2] 钱萱, 孙为民, 方红梅. 机载有源相控阵雷达天线阵面结构设计[J]. 现代雷达, 2012, 34(9): 66–68.  
QIAN Xuan, SUN Weimin, FANG Hongmei. Structural design of airborne active phased-array antenna[J]. Modern Radar, 2012, 34(9): 66–68.
- [3] 齐文军. 捷联惯性技术在水中兵器制导与测试中的应用探讨[J]. 电子世界, 2013(16): 77.
- [4] 郭健宾, 丁志刚. 捷联式惯导系统在车辆监控中的实现与应用[J]. 计算机应用与软件, 2012, 29(12): 81–83.  
GUO Jianbin, DING Zhigang. Implementation and application of strapdown inertial navigation system in vehicle monitoring[J]. Computer Applications and Software, 2012, 29(12): 81–83.
- [5] 王巍. 惯性技术研究现状及发展趋势[J]. 自动化学报, 2013, 39(6): 723–729.  
WANG Wei. Status and development trend of inertial technology[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(6): 723–729.
- [6] 张炎华, 王立端, 战兴群, 等. 惯性导航技术的新进展及发展趋势[J]. 中国造船, 2008, 49(s1): 134–144.  
ZHANG Yanhua, WANG Liduan, ZHAN Xingqun, et al. The new advancement and trend of inertial navigation technology[J]. Shipbuilding of China, 2008, 49(s1): 134–144.
- [7] 薛连莉, 陈少春, 陈效真. 2016 年国外惯性技术发展及回顾[J]. 导航与控制, 2017, 16(3): 105–112.  
XUE Lianli, CHEN Shaochun, CHEN Xiaozhen. Development and review of foreign inertial technology in 2016[J]. Navigation and Control, 2017, 16(3): 105–112.
- [8] 张鹏, 吴睿, 居闽. 捷联惯性技术在相控阵雷达中的应用[J]. 现代雷达, 2014, 36(8): 1–5.  
ZHANG Peng, WU Rui, JU Min. Application of strap-down inertial technology in phased-array radar[J]. Modern Radar, 2014, 36(8): 1–5.
- [9] 程龙, 周海渊, 吴旭贤, 等. 航天测量船组合导航系统在某型号测控任务中的应用[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(12): 2902–2906.  
CHENG Long, ZHOU Haiyuan, WU Xuxian, et al. Application of INS/ESGM/GNSS integrated navigation system of ST&C ship in one model ST&C task[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(12): 2902–2906.
- [10] 尚松田, 付梦印, 刘彤. 单轴旋转式捷联惯导系统转位方案[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(11): 1318–1321.  
SHANG Songtian, FU Mengyin, LIU Tong. Single-axis rotation modulation SINS indexing scheme[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2011, 31(11): 1318–1321.
- [11] 张伦东, 练军想, 吴美平, 等. 单轴旋转惯导系统载体航向隔离方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(6): 1248–1253.  
ZHANG Lundong, LIAN Junxiang, WU Meiping, et al. Research on yaw angle isolation method of inertial navigation system based on single-axis rotation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(6): 1248–1253.
- [12] 许江宁, 查峰, 李京书, 等. 单轴旋转惯导系统“航向耦合效应”分析与补偿[J]. 中国惯性技术学报, 2013, 21(1): 26–30.  
XU Jiangning, ZHA Feng, LI Jingshu, et al. Analysis and compensation for heading-coupling effect of single-axis rotating INS[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2013, 21(1): 26–30.

### [作者简介]

- 房新兵 1974 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为海上测控。  
毛南平 1970 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为海上测控。  
赵李健 1980 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为导航定位。  
瞿元新 1970 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为海上测控。