

自动化学院

031~032 系

13

论文编辑清单

序号	作者姓名	职称	单位	论文题目	刊物名称	年卷期
1	熊智 刘建业 冷雪飞	副高正 高博士	0310 3103 1	景象匹配辅助导航系统中的精确图象 匹配算法研究	宇航学报	2006, 27(4):680- 685
2	段方 刘建业 李荣冰	博士正 高博士	0310 3103 1	小卫星多传感器融合滤波定姿算法	宇航学报	2006, 27(2):297- 300
3	冷雪飞 刘建业 熊邢广 华智	博士正 高副高 硕士	0310 3103 1031	加权Hausdorff距离算法在SAR/INS景 象匹配中的应用	控制与决策	2006, 21(1):42- 45
4	郁丰 刘建业 曾庆化	博士正 高讲师	0310 31	伽利略卫星定位系统三载波姿态确定 技术研究	宇航学报	2006, 27(6):1187 -1190
5	康国华 刘建业 赵伟 刘瑞华	博士正 高副高 副高	0310 3103 1外 校	基于基线延长的高精度北斗双星系统 快速定向算法研究	宇航学报	2006, 27(6):1192 -1195
6	段方 刘建业	博士正 高	0310 31	一类由星下点反算卫星近圆回归轨道 的方法	中国空间科学技 术	2006, (3):38-43
7	段方 刘建业 李荣冰	博士正 高博士	0310 3103 1	一种改进的星敏感器/陀螺卫星定姿 算法	系统工程与电子 技术	2006, 28(6):35- 37
8	周海波 刘建业 熊智 赖际舟	博士正 高副高 讲师	0310 3103 1031	基于BP神经网络的光纤陀螺仪温度建 模研究	光电工程	2006, 33(6):135- 144
9	康国华 刘建业 祝燕华 熊智	博士正 高博士 副高	0310 3103 1031	GPS/SST/SINS组合导航系统研究	应用科学学报	2006, 24(3):293- 297
10	杜亚玲 刘建业 姜涌 华冰	博士正 高博士	0310 3103 1	一种面向捷联航姿系统的模糊全阻尼 算法	应用科学学报	2006, 24(3):283- 287
11	刘建业 熊智 祝燕华	博士正 高副高 博士	0310 3103 1031	SINS/北斗/星敏感器组合导航系统研 究	应用科学学报	2006, 24(2):120- 124
12	赖际舟 刘建业 刘瑞华 华冰	讲师正 高博士 博士	0310 31外 校 031	基于联邦滤波的惯性导航姿态组合算 法	天津大学学报	2006, 39(3):349- 353
13	王直 刘建业 刘波	博士正 高未知	0310 31外 校	SINS/Two-Antenna GPS组合导航系统 设计及实现(英文)	南京航空航天大 学学报(英文版)	2006, 23(1):41- 46
14	曾庆化 刘建业 李荣冰	讲师正 高博士	0310 3103 1	基于恒定姿态误差的磁罗差偏差补偿 算法研究	传感器与微系统	2006, 25(4):31- 34
15	杜亚玲 刘建业 熊智 姜涌	博士正 高副高 博士	0310 3103 1031	GPS/SINS全组合导航系统的姿态组合 算法	中国空间科学技 术	2006, (1):53-58
16	彭春华 刘建业 赖际舟 周海波	博士正 高讲师 博士	0310 3103 1031	用于光纤陀螺温度补偿的传感器试验 研究	传感器与微系统	2006, 25(3):12- 14

论文编辑清单

17	钟敏 熊智 赖际舟 刘建业	硕士副 高讲师 正高	0310 3103 1031	干涉型光纤陀螺微小信号的检测与分析	传感器与微系统	2006, 25 (2): 21-26
18	冷雪飞 刘建业 熊智	博士正 高副高	0310 3103 1	SAR/INS/TAN组合导航系统中的滤波算法研究	系统工程与电子技术	2006, 28 (1): 23-25
19	康国华 刘建业 熊智 祝燕华	博士正 高副高 博士	0310 3103 1031	弹道导弹的GNSS/SST/SINS组合导航系统研究	武汉大学学报(信息科学版)	2006, 31 (2): 176-179
20	沈雪松 刘建业 孙永荣 陈武 鹿鸣	博士正 高副高 教授教 授	0310 3103 1外 外	基于多传感器信息融合城市车辆导航定位	传感器与微系统	2006, 25 (1): 85-88
21	赖际舟 刘建业 盛守照	讲师正 高讲师	0310 3103 1	用于干涉型光纤陀螺温度漂移辨识的RBF神经网络改进算法	东南大学学报	2006, 36(4): 537-541
22	曾庆化 刘建业 赵伟 熊智	讲师正 高副高 副高	0310 3103 1031	激光陀螺惯导系统硬件增强角速率输入圆锥算法	东南大学学报(自然科学版)	2006, 36(5): 747-750
23	李荣冰 刘建业 段方 牛新元	博士正 高博士 博士	0310 3103 1031	MEMS-INS微型飞行器姿态确定系统的实现研究	应用科学学报	2006, 24(6): 619-122
24	李雄伟 刘建业 康国华	硕士正 高博士	0310 3103 1	熵的地形信息分析在高程匹配中的应用	应用科学学报	2006, 24(6): 609-612
25	周海波 刘建业 赖际舟	博士正 高讲师	0310 3103 1	干涉型光纤陀螺随机噪声的分析研究	传感器与微系统	2006, 25(11): 73-76
26	孙永荣 刘建业 刘瑞华 杜亚玲	副高正 高副高 博士	0310 31外 校 031	微小导航系统中高精度导航计算机设计	传感器与微系统	2006, 25(10): 54~56
27	李荣冰 刘建业 熊智	博士正 高副高	0310 3103 1	基于视觉GPS/MEMS-SINS的微型飞行器姿态确定系统	上海交通大学学报	2006, 40(12): 2155-2158
28	李荣冰 刘建业 林雪原 华冰 刘瑞华	博士正 高博士 博士博 士	0310 3103 1031 外	梳状音叉MEMS陀螺非随机误差分析	电子科技大学学报	2006, 35(6): 928-931
29	郁丰 刘建业 熊智 段方	博士正 高副高 博士	0310 3103 1031	基于伪陀螺/磁强计/地球敏感器的微卫星姿态确定自适应确定方法	应用科学学报	2007, 1(25): 108~110
30	曾庆化 刘建业 赖际舟 杜亚玲	讲师正 高讲师 博士	0310 3103 1031	DSP硬件算法在捷联惯性AHRS系统中的实现研究	中国惯性技术学报	2006, 14(6): 1~4
31	边德飞 熊智 刘建业	硕士副 高正高	0310 3103 1	基于多传感器的组合导航接口子系统设计及实现	数据采集与处理	2006, 21(3): 363-366

论文编辑清单

32	曾庆化 刘建业 彭文明 于永军	讲师正 高硕十 硕十 硕十	0310 3103 1031	我国卫星导航系统相关技术发展分析	航天控制	2006, 24(100):91-96.
33	邱吉冰 赵伟	硕十副 高	0310 31	基于FPGA的可重新配置片上导航计算机设计	计测技术	2006, (26):45~47
34	杨燮磊 孙永荣 李荣冰	硕十副 高博士 1	0310 3103 1	导航计算机应用软件快速更新方法研究	航空计算技术	2006, 36 (1):36-38
35	钱伟行 赵伟	博士副 高	0310 31	基于MSP430多平台自适应监控系统的实现	机械与电子	2006, 158(2):12-14
36	山昆 刘建业 赵伟 祝燕华	硕十正 高副高 博士	0310 3103 1031	多通道同步采样数据采集系统研究	微处理机	2006, (4):20-22
37	李海洋 刘建业 赵伟	硕十正 高副高 1	0310 3103 1	基于FPGA的微小型导航计算机数据采集系统设计	微计算机应用	2006, 27 (1):94-97
38	李雄伟 刘建业 康国华	硕十正 高博士 1	0310 3103 1	TERCOM地形高程辅助导航系统发展及应用研究	中国惯性技术学报	2006, 14(1):34-40
39	刘鹏 孙永荣 刘建业 杜亚玲	硕十副 高正高 博士	0310 3103 1031	捷联惯导系统中新型控制显示器的研制	测控技术	2006, 25(1):52-59
40	刘云 赵伟 刘建业	硕十副 高正高 1	0310 3103 1	基于PowerPC硬核的片上组合导航计算机设计	航天控制	2006, 24(3):54-60
41	彭文明 刘建业 曾庆化	硕十正 高讲师 1	0310 3103 1	捷联惯性导航航空数字接口系统研究与应用	机械与电子	2006, (7):35-37
42	屈嵩 刘建业 梅劲松	博士正 高讲师 1	0310 3103 1	自主无人机导航及数字飞行控制系统的研制	中国制造业信息化	2006, 35 (3):48-50
43	刘云 赵伟 刘建业 杜亚玲	硕十副 高正高 博士	0310 3103 1031	基于Xilinx IP核的片上导航计算机设计	工业控制计算机	2006, 19 (1):51-52
44	曾庆化 刘建业 熊智郁 郁丰	讲师正 高副高 博士	0310 3103 1031	卫星导航系统相关技术发展动态	全球定位系统	2006, (1):35-40
45	曾庆化 刘建业 熊智郁 赵伟	讲师正 高副高 副高	0310 3103 1031	一种角速率激光陀螺惯导系统高精度姿态算法	上海交通大学学报	2006, 40(12):2160~2163
46	华冰刘 建业李 荣冰	博士 正高 博士	031 031 031	冗余配置下MEMS-IMU的系统数据耦合算法研究	2006年中国控制与决策学术年会	2006年7月28日天津
47	祝燕华 刘建业 杜亚玲	博士正 高博士 1	0310 3103 1	基于光纤陀螺的小型化捷联航姿系统算法和实现研究	中国航空学会控制与应用第十二届学术年会	2006年7月25日西安
48	李荣冰 刘建业 曾庆化 段方	博士正 高讲师 博士	0310 3103 1031	GPS/MEMS-INS微型组合导航系统实现研究	中国航空学会控制与应用第十二届学术年会	2006年7月25日西安

论文编辑清单

49	曾庆化 刘建业 赵伟 赖际舟	讲师正 高副高 讲师	0310 3103 1031	一种滤波角速率输入的圆锥误差补偿 算法研究	中国航空学会控 制与应用第十二 届学术年会	2006年7月西安
50	冷雪飞 刘建业 熊智	博士正 高副高	0310 3103 1	基于导航系统的抗变形图像匹配算法 研究	第十三届全国图 象图形学学术会 议	2006年11月6日南 京
51	边德飞 熊智 刘建业	硕士副 高正高	0310 3103 1	基于双CPU组合导航系统设计及实现	南京航空航天大 学第八届研究生 学术会议	39022
52	刘建业 李荣冰 牛新元 乔黎	正高博 士博士 博士	0310 3103 1031	MEMS-based inertial integrated navigation technology for micro air vehicles	2006 AIAA Guidance, Navigati on, and Control Conference	2006, AugKeystone , Colorado, USA,
53	许时磊 孙永荣 沈雪松	硕士 副高 博士	0310 3103 1	基于MapXtreme的车辆监控管理系统 的设计与研究	南京航空航天大 学第八届研究生 学术会议	39022
54	邱吉冰 赵伟	硕士 副高	0310 31	基于模拟光耦的电流隔离采集板的设 计与实现	南京航空航天大 学第八届研究生 学术会议	39022
55	王晶 潭清美 黄西川	讲师	031	科技服务业系统功能分析	科学学与科学技 术管理	2006. 6
56	王晶 于建宇 刘会宁 赵楠 张文利 郭玉明	讲师	031	南京科技服务业	科技进步与对策	2006. 3
57	程林 樊琼剑 杨忠 沈春林	硕士	031	基于虚拟现实的无人机飞控系统物理 仿真研究	中国航空信息 化	2006年33卷11期
58	Qiongji an Fan, Zhong Yang, Jiang Cui, Chunlin Shen	博士生	031	Design of a Smart Sensor for Load Insulation Failure Detection in DC Supply System of UAV	Proceedings of the 2006 1st International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics	January 19-21, 2006
59	樊琼剑 杨忠 王凤仙 沈春林	博士生	031	温度传感器在无人飞行器控制系统中的 应用	传感器与微系统	2006年第25卷第4 期
60	邢丽冬	讲师	032	三维远场涡流探头的设计与实验研究	仪器仪表	2006年第27卷第 11期VOL. 27 NO. 11
61	邢丽冬	讲师	032	立足基础, 面向学科构建电路理论课 程的立体化教学体系	电气电子教学学 报	2006年第28卷第3 期VOL. 28 NO. 3
62	陈东华 吴睿 谢少军 周波	博士 硕士 教授 教授	032	基于FPGA的三相四线有源滤波器的电 流控制方案	电力系统自动化	2006年 30卷 3 期
63	蔡鹏 谢少军	硕士 教授	032	基于简单拓扑的单相交流降压变换器 研究	通讯电源技术	2006年 23卷 1 期
64	杨海英 谢少军	硕士 教授	032	软开关半桥直流变压器研究	电力电子技术	2006年 40卷 2 期

论文编辑清单

65	吴睿 谢少军	硕士 教授	032	用FPGA实现abc坐标系的三维空间矢量调制算法	南京航空航天大学学报	2006年38卷3期
66	杨海英 谢少军	硕士 教授	032	对称PWM控制半桥变换器研究	电工技术学报	2006年21卷6期
67	阚加荣 谢少军	硕士 教授	032	Research on the power sharing of the parallel invereters without control interconnection basins on drop characteristic	IPEMC 2006	2006年8月
68	许爱国 谢少军	博士 教授	032	数字双闭环瞬时值控制逆变器外特性研究	南京航空航天大学学报	2006年38卷4期
69	肖华峰 谢少军	硕士 教授	032	一端稳压一端稳流型软开关双向DC/DC变换器(1)——电路原理和控制策略	电工技术学报	2006年21卷10期
70	肖华峰 谢少军	硕士 教授	032	一端稳压一端稳流型软开关双向DC/DC变换器(2)——设计原则和实验研究	电工技术学报	2006年21卷11期
71	邓甫华 韩锋 谢少军	硕士 硕士 教授	032	近正弦输入电流三相整流器研究	电力电子技术	2006年40卷6期
72	葛红娟 蒋华 王培强	副教授 硕士 硕士	0320 3203 2	基于内模原理的新型三相航空静止变频器闭环控制系统	电工技术学报	2006年21卷9期 pp83-91
73	葛红娟 张绍 穆新华 周波	副教授 硕士 副教授 教授	0320 3203 2032	矩阵变换器—永磁同步电机驱动系统中的共模电压抑制及试验分析	中国矿业大学学报	2006年35卷1期 pp79-83
74	张绍 葛红娟 穆新华	硕士 副教授 副教授	0320 3203 2	基于三相AC/AC直接变换的AC/DC变换器研究	电力电子技术	2006年40卷3期 pp42-44
75	蒋华 穆新华 周贵荣 葛红娟	硕士 副教授 研究员 副教授	0320 3203 2	瞬时值反馈控制三相航空静止变频器设计研究	电力电子技术	2006年40卷1期 pp43-46
76	廖颖熙 葛红娟 穆新华	硕士 副教授 副教授	0320 3203 2	三级无刷交流发电机调压系统的建模与仿真	电源世界	2006年第5期 pp47-49
77	葛红娟 刘海春	副教授 讲师	032	电工电子技术课程双语教学体系的研究与实践	电气电子教学学报	2006年28卷1期 pp51-53, 60
78	秦海鸿 赵志英 龚春英 严仰光	学生 学生 教授 教授	0320 3203 2032	analysis of working modes of hybrid excitation doubly salient motor	Transactions of NUAU	2006年23卷4期
79	王红梅 龚春英 马海啸 严仰光	学生 教授 学生 教授	0320 3203 2032	research on a novel interleaved flyback DC/DC converter	ICIEA'06国际会议	2006年5月新加坡
80	梁永春 孙林 龚春英 严仰光	学生 学生 教授 教授	0320 3203 2032	同步整流反激逆变器研究	中国电机工程学报	2006年26卷6期
81	孙林 梁永春 龚春英 严仰光	学生 学生 教授 教授	0320 3203 2032	基于反激变换器的单激式DC/AC逆变器	电工技术学报	2006年21卷3期
82	赵志英 秦海鸿 龚春英	学生 学生 教授	0320 3203 2	变压器分布电容对高频高压反激变换器的影响及其抑制措施	电工电能新技术	2006年25卷4期

论文编辑清单

83	马海啸 毛赛君 龚春英 严仰光 王红梅	学生 学生 教授 教授 学生	0320 3203 2032 0320	半桥双降压式逆变器电流检测及控制 方法改进	南京航空航天大 学学报	2006年38卷3期
84	马海啸 龚春英 王红梅	学生 教授 学生	3203 2 0320	交错并联反激变换器的研究	电力电子技术	2006年40卷3期
85	王红梅 龚春英	学生 教授	0320 32	零电压开关交错并联反激式DC/DC变 换器的研究	电源世界	2006年 卷1期
86	龚春英	教授	032	变压器双向磁化类变换器工作原理的 讲解方法	电气电子教学学 报	2006年40卷3期
87	孙林 梁永春 龚春英 严仰光	学生 学生 教授 教授	0320 3203 2032	research on the control strategies of single-stage flyback inverter	37th IEEE power electronics specialists conference	2006年6月韩国济 州岛
88	朱锋 龚春英	学生 教授	0320 32	一种新型的基于航空电网的高功率因 数校正器	通信电源技术	2006年23卷6期
89	吴赞 龚春英	学生 教授	0320 32	单周期控制的单相功率因数校正技术 现状与发展	电源世界	2006年10期
90	赵朝会 秦海鸿 严仰光	学生 学生 教授	0320 3203 2	切向结构永磁同步电机的非导磁寸套 研究	电工技术学报	2006年21卷17期
91	黄伟君 秦海鸿 严仰光	学生 学生 教授	0320 3203 2	双凸极永磁电机基本特性的研究	电力电子技术	2006年40卷3期
92	周增福 严仰光	学生 教授	0320 32	飞机专用电源系统的设计与仿真	微特电机	2006年6期
93	赵朝会 朱德明 严仰光	学生 学生 教授	0320 3203 2	切向结构永磁同步电机辅助磁极的流 化	南京航空航天大 学学报	2006年38卷1期
94	朱成花 严仰光	学生 教授	0320 32	一种改进的阻抗比判据	南京航空航天大 学学报	2006年38卷3期
95	周增福 严仰光	学生 教授	0320 32	电励磁双凸极发电机的非线性建模与 空载特性仿真	南京航空航天大 学学报	2006年38卷3期
96	朱德明 严仰光	学生 教授	0320 32	表贴式永磁电机的两种充磁方式	南京航空航天大 学学报	南京航空航天大 学学报
97	赵朝会 秦海鸿 严仰光	学生 学生 教授	0320 3203 2	混合励磁同步电机发展现状及应用前 景	电机与控制学报	2006年10卷2期
98	赵朝会 朱德明 秦海鸿 严仰光	学生 学生 学生 教授	0320 3203 2	切向结构永磁同步电机极对数的选择	南京航空航天大 学学报	2006年38卷3期

干涉型光纤陀螺随机噪声的分析研究

周海波^{1,2}, 刘建业¹, 赖际舟¹

(1. 南京航空航天大学 自动化学院导航研究中心, 江苏 南京 210016;

2. 空军飞行试验训练基地, 河北 沧州 061022)

摘要: 系统地分析了光纤陀螺所包含随机噪声的种类及其来源和特性, 介绍了分析光纤陀螺随机噪声的工具——Allan 方差法和国军标模型拟合法。对某型干涉型光纤陀螺的静态实验数据, 分别应用上述 2 种分析方法, 计算分析了光纤陀螺信号中的噪声分量。计算结果表明: 试验所用的光纤陀螺输出的静态信号中含有量化噪声、角随机游走噪声、角速率随机游走噪声、零偏不稳定性和速率斜坡噪声, 其中, 角速率随机游走噪声、零偏不稳定性和速率斜坡噪声含量较大。该分析研究对光纤陀螺的研究有很好的应用价值。

关键词: 干涉型光纤陀螺; 随机噪声; Allan 方差法; 模型拟合法

中图分类号: U666.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-9787(2006)11-0073-04

Research on IFOG random noise

ZHOU Hai-bo^{1,2}, LIU Jian-ye¹, LAI Ji-zhou¹

(1. College of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Flight Trial and Training Base of PLA Air Force, Cangzhou 061022, China)

Abstract: The source and characteristic of fiber-optic gyroscope (FOG) random noise is analyzed in theory. Two methods of analyzing the FOG random noise, Allan variance method and model fitting method using in the military standard of PRC, are introduced. And then the static data is used to calculate the noise contents in FOG's output by using these two methods. The result shows that the output signal contents quantization noise, angle random walk noise, rate random walk noise, bias instability and rate ramp noise, among which the last three noises are more important. The method is very useful to research FOG.

Key words: interference fiber-optic gyroscope (IFOG); random noise; Allan variance method; model fitting method

0 引言

陀螺漂移是影响捷联式惯导系统精度的主要因素。陀螺漂移可以分为确定性和随机性漂移(即随机漂移)2 种类型。确定性漂移可以通过建立较为精确的模型进行有效补偿, 而随机性漂移具有时变性和随机性, 不易消除。本文首先从理论上系统地分析了光纤陀螺所包含随机噪声的种类及其来源和特性, 介绍了分析光纤陀螺随机噪声的工具——Allan 方差法和国军标模型拟合法。并对某型光纤陀螺的静态实验数据, 分别应用上述 2 种分析方法计算光纤陀螺信号中的随机噪声。计算结果表明: 实验所用的光纤陀螺输出的静态信号中含有量化噪声、角随机游走噪声、角速率随机游走噪声、零偏不稳定性和速率斜坡噪声, 其中, 角速率随机游走噪声、零偏不稳定性和速率斜坡噪声含量较大。

1 光纤陀螺随机噪声分析^[1-4]

光纤陀螺的工作原理是通过光纤线圈产生 Sagnac 效应来敏感旋转角速度。由于受到构成光纤陀螺的各个元器件的噪声和各种寄生效应的影响, 在实际系统中, Sagnac 效应非常微弱。一般来讲, 陀螺仪主要的误差有角随机游走、零偏不稳定、量化噪声、角速率随机游走、速率斜坡、正弦分量噪声等。下面对影响光纤陀螺性能的几项基本的噪声进行分析。

1.1 量化噪声

量化噪声是由传感器输出的量化性质及光纤陀螺的数字输出特性引起, 代表了传感器的最低分辨力水平。主要是在采样时由 A/D 转换造成的。量化噪声的大小取决于数据采集系统的精度和初始采样时间的选取, 具有短的互相关时间, 相当于具有很宽的带宽, 在采样速度要求很快的

应用环境里,量化噪声会造成很大的噪声,需要采取措施抑制。为减小此项噪声,可提高采集系统的精度和缩短初始采样时间。

1.2 角度随机游走噪声

角度随机游走噪声是积分宽带速率功率谱密度的结果,是衡量光纤陀螺噪声水平的重要指标,体现了陀螺的极限精度。其主要源于光路,是由于光子的自发发散引起的,特别是光电探测器(散粒噪声、放大器噪声)、电子器件(热噪声)和一些相关时间比采样时间短的高频噪声。角度随机游走噪声的带宽一般小于 10 Hz,因此,在大部分姿态控制系统的带宽之内,如果不能精确确定角度随机游走,它将成为限制姿态控制系统性能的主要误差源。对于相关时间比采样时间短的高频噪声可以通过系统设计消除,而光源、光电探测器、电子器件噪声的消除有选用质量好的器件、保证环境温度的稳定等方法。

1.3 零偏不稳定性噪声

零偏不稳定性噪声主要是由角速率数据中的低频零偏波动引起,其来源有光纤陀螺中放电组件、等离子体放电、电路噪声、环境噪声以及其他可能产生随机闪烁的部件。可以对光纤陀螺进行稳定性设计和采取相应的滤波方法抑制此项噪声。

1.4 速率随机游走噪声

速率随机游走噪声是宽带角加速度功率谱密度积分的结果,目前,还没确定的来源,可能是具有长相关时间的指数相关噪声的极限情况,也可能是由于晶体振荡器的老化效应引起此类噪声。机械陀螺及速率偏频激光陀螺可能表现出这种噪声。

1.5 速率斜坡噪声

速率斜坡在本质上是一种确定误差,而不是随机误差。在陀螺仪输入-输出特性数据中出现可能是由于光纤陀螺光源强度呈现极慢的单调变化并持续很长时间,也可能是由于在同一方向上平台保持一个非常小的加速度,或者由于外界环境引起光纤陀螺的温度变化引起,表现为光纤陀螺的真实输入。可以采取建立数学模型,按确定误差补偿的方法进行补偿。

1.6 指数互相关噪声

指数互相关噪声是一个按照指数规律衰减的有限相关时间函数。如果 Allan 方差的相关时间远大于过程的相关时间,指数相关速率漂移就表现为角度随机游走;如果 Allan 方差的相关时间远小于过程的相关时间,指数相关速率漂移就表现为角速率随机游走,角速率随机游走与系统本身有很大关系。

1.7 正弦噪声

正弦噪声是一种系统性误差,其功率谱密度由几个不同频率表征。高频噪声是由于激光放电过程中等离子振荡而产生的,低频噪声是由于环境的周期性变化而引起测试平台的低速运动而引起的。当正弦噪声具有多峰值的正弦式波形时,功率谱密度图更容易表现出正弦噪声。

2 光纤陀螺随机噪声的分析方法

2.1 Allan 方差法

Allan 方差法是 IEEE 公认的光学陀螺参数分析的标准方法。它是一种时频分析技术,是在时域上对频域稳定性进行分析的一种方法,它不仅适用于分析激光陀螺和光纤陀螺的误差特性,而且,也适用于任何精密仪器的噪声研究,分析产生噪声的基本随机过程的特性,识别各种噪声。其主要特点是通过分析 Allan 均方差在双对数坐标图上各部分曲线的斜率来分离和辨识各项随机误差的模型及其参数^[5]。

IEEE 标准认为 IFOG 的随机噪声包括五项噪声:角度随机游走、速率随机游走、零偏不稳定性、量化噪声和速率斜坡噪声。在用 Allan 方差对数据进行分析时,假定测试数据的随机特性都是由特定的噪声源产生,如果这些噪声源在统计上相互独立,则可把这些噪声源的平方和表示为 Allan 方差的形式,即

$$\sigma^2(\tau) = \sum_{n=-2}^2 A_n \tau^n, \quad (1)$$

式中 A_n ($n = -2, -1, 0, 1, 2$) 分别对应与量化噪声、角度随机游走、零偏不稳定性、角速率随机游走、速率斜坡各项噪声相关的拟合多项式系数。

Allan 方差的计算过程为:

(1) 测得采样间隔时间为 t_0 的 n 个初始样本数据 Ω_i ($i = 1, \dots, n$)。

(2) 对 n 个初始样本的连续数据进行二次采样,采样时间为 $\tau = kt_0$ 。分别取 τ 等于 $t_0, 2t_0, \dots, kt_0$ ($k < n/2$),按下式求出每一时间长度为 τ 的数组平均值

$$\bar{\Omega}_p(\tau) = \frac{1}{k} \sum_{i=p}^{p+k-1} \Omega_i(t_0). \quad (2)$$

(3) 定义相邻数组平均值之差的随机变量集合

$$A = \{\Omega_{p+1}^-(\tau) - \Omega_p^-(\tau), \rho = 1, \dots, n-k\}.$$

(4) 求随机变量集合 A 的方差,得到

$$\sigma^2(\tau) = \frac{1}{2(n-k-1)} \sum_{p=1}^{n-k-1} [\bar{\Omega}_{p+2}(\tau) - 2\bar{\Omega}_{p+1}(\tau) + \bar{\Omega}_p(\tau)]^2. \quad (3)$$

分别取不同的 τ 得到 $\tau - \sigma(\tau)$ 的对应关系。

根据每种误差的功率谱密度,可以得到误差与 Allan 方差之间的关系如表 1 所示。

表 1 光纤陀螺随机噪声误差与 Allan 方差之间的关系

Tab 1 Relation between FOG random noise error and Allan variance

噪声类型	计算公式	Allan 方差	双对数图上的斜率
指数相关角度随机游走((°)/√h)	$\sqrt{A_{-1}}/60$	N/\sqrt{T}	-1/2
随机过程速率随机游走((°)/h/√h)	$60\sqrt{3A_1}$	$K/\sqrt{T/3}$	1/2
零偏不稳定((°)/h)	$\sqrt{A_0}/0.664$	$B/0.6648$	0
速率斜坡((°)/h/h)	$3600\sqrt{2A_2}$	$R/\sqrt{2}$	1
量化噪声(μrad)	$10^3\pi\sqrt{A_{-2}}/(18\times 36\sqrt{3})$	$\sqrt{3}Q/T$	-1

2.2 国军标模型拟合法

根据参考文献[6],国军标提供 2 种计算随机游走系数的方法:模型拟合法和归一化算法。本文用模拟归一化方法分析光纤陀螺随机噪声。其计算方法如下:

(1)在初始样本序列基础上,依次成倍加长采样间隔时间,如下式所示

$$\tau = \kappa\tau_1 \quad (\kappa = 1, 2, 4, 8, 16, 32), \quad (4)$$

式中 τ 为采样间隔时间,s; τ_1 为初始采样间隔时间,s。

由每相邻 2 个样本的均值组成新的样本序列,按照国军标提供的方法求陀螺仪零偏稳定性。

(2)由不同的采样间隔时间,获得的陀螺仪零偏稳定性,组成新的样本序列 $B_s(\tau)$ 。

(3)对 $B_s(\tau)$ 序列,按下式用最小二乘法拟合

$$B_s(\tau)^2 = a_0 + a_1\left(\frac{1}{\tau}\right) + a_2\left(\frac{1}{\tau}\right)^2, \quad (5)$$

式中 $B_s(\tau)$ 为采样间隔时间为 τ 时陀螺仪零偏稳定性,((°)/h); a_0, a_1, a_2 为模型系数。

(4)按下式求得陀螺仪随机游走系数

$$RWC = a_1^{1/2}, \quad (6)$$

式中 RWC 为随机游走系数,((°)/h^{1/2})。

尽管在此方法中没有说明另外 2 个系数 a_1, a_2 的物理含义,但是,从 Allan 方差法和模型拟合法的计算过程来看,其对应的系数具有相同的物理含义。

3 实验分析

本文的研究对象是某型中等精度的 IFOG,其精度范围在 0.3°/h ~ 1°/h 之间,所敏感的转速范围为 ±200°/s,所需实验设备有陀螺实验平台、光纤陀螺、温度控制箱和采集数据用的计算机。

在光纤陀螺接通电源后,充分预热,按照 Allan 方差法和国军标模型拟合法的实验要求,分别在环境温度为 20,40 和 60 °C 条件下,以 50 Hz 的采样频率采集 2 h 的陀螺静态数据,然后,用上述 2 种方法计算各种随机噪声大小,Allan 方差的双对数图如图 1 所示,并将 2 种方法的计算结果对比于表 2。

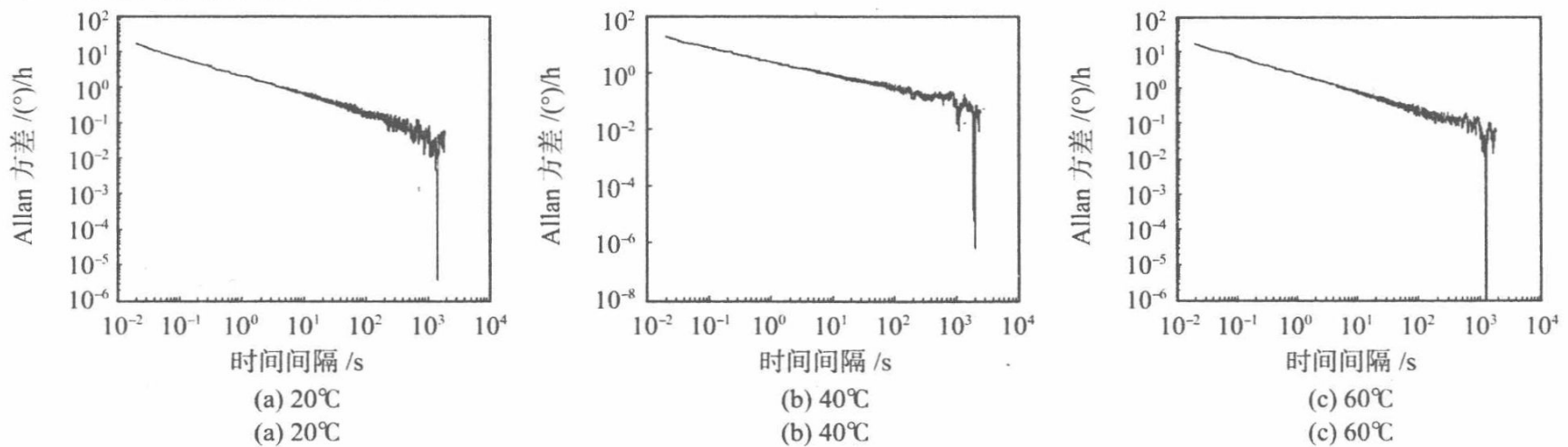


图 1 20,40,60 °C 条件下光纤陀螺数据的 Allan 方差双对数图

Fig 1 log-log figure of Allan variance method at 20,40,60 °C

表 2 国军标模型拟合法与 Allan 方差法拟合结果比较

Tab 2 Comparison of fitting result of model fitting method and Allan variance method

试验温度	拟合方法	速率斜坡系数 ((°)/h ²)	速率随机游走系数 ((°)/h ^{3/2})	量化噪声系数 (")	角度随机游走系数 ((°)/h ^{1/2})	零偏不稳定性系数 ((°)/h)
20 °C	Allan 方差法	1.98551	1.64933	0.31354	0.01614	0.74508
	模型拟合法	—	—	0.31680	0.01722	0.74492
40 °C	Allan 方差法	1.37485	1.40726	0.32926	0.01673	0.81399
	模型拟合法	—	—	0.32570	0.01766	0.80620
60 °C	Allan 方差法	1.71793	1.56941	0.35437	0.01769	0.81605
	模型拟合法	—	—	0.34980	0.01776	0.81720

从上述图表中可以看出:

(1)在不同的环境温度条件下,该 IFOG 性能具有良好的稳定性;

(2)国军标模型拟合法拟合出来系数和 Allan 方差法求出的角随机游走系数、量化噪声和零偏不稳定性系数非常近似,两者没有本质的区别。但是,Allan 方差法的计算结果物理概念更为清晰,更能准确反映陀螺精度的指标;

(3)随着环境温度的上升,该 IFOG 所含随机噪声的数值随之变大,陀螺性能下降。这是该型光纤陀螺随机噪声的温度特性。如何通过有效的办法抑制这种性能的恶化,是今后工作的一个研究重点。

4 结束语

本文较为系统地分析了光纤陀螺所包含随机噪声的种类及其来源和特性,介绍了分析光纤陀螺随机噪声的工具——Allan 方差法和国军标模型拟合法。对某 IFOG 的大量静态实验数据,运用 Allan 方差法和国军标方法分离出各项噪声系数,计算结果表明:实验所用的光纤陀螺输出的静态信号当中含有量化噪声、角随机游走噪声、角速率随机游走噪声、零偏不稳定性及速率斜坡噪声,为这些影响因素进行分析处理,提高光纤陀螺的性能提供了可靠的依据。

Allan 方差法和国军标方法尽管计算原理有差异,但都是从不同的角度计算光纤陀螺随机噪声的系数,具有较高的一致性,它们都是分析光纤陀螺性能的有效工具。

参考文献:

- [1] Hervé C. Lefèvre[法]. 光纤陀螺仪[M]. 北京:国防工业出版社,2002. 57-59.
- [2] 王海,陈家斌,黄威,等. 光纤陀螺随机漂移测试及分析[J]. 光学技术,2004,9,(5):623-624,627.
- [3] 刘巧光,许辅义,滕云鹤,等. 环形激光陀螺仪随机误差模型的研究[J]. 清华大学学报(自然科学版),1999,39(2):71-74.
- [4] 宋凝芳,张中刚,李立京,等. 光纤陀螺随机游走系数的分析研究[J]. 中国惯性技术学报,2004,12(4):34-38.
- [5] IEEE Std. 952-1997. IEEE Standard specification format guide and test procedure for single-axis interferometric fiber optic gyros[S].
- [6] GJB 2426-95. 光纤陀螺仪测试方法[S].

作者简介:

周海波(1972-),男,湖南邵东人,工程师,在读博士生,南京航空航天大学导航研究中心。现从事惯性技术与组合导航系统的研究。

(上接第72页)

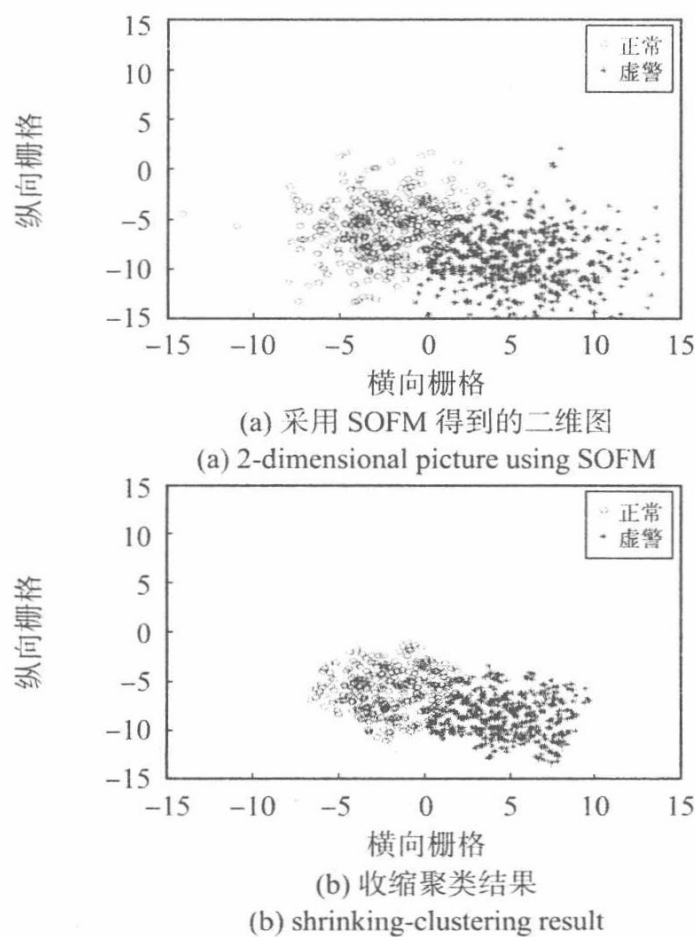


图4 采用 SOFM 收缩聚类结果

Fig 4 The result using SOFM shrinking-clustering method

参考文献:

- [1] 周宗才,张居仁,李应红. 航空发动机监控与诊断原理[D].

西安:空军工程大学工程学院,1988. 1-15.

- [2] 李珈,陶增元. 某型发动机性能衰退的统计分析和预测[J]. 航空动力学报,1992,7(2):173-176.
- [3] 王英俊,谢寿生. 航空发动机性能趋势监控量化的方法研究[J]. 航空动力学报,2003,18,(4):549-553.
- [4] Agrawal R, Gehrke J, Gunopulos D, et al. Automatic subspace clustering of high dimensional data for data mining applications[A]. Proc. ACM SIGMOD conf[C]. Management of data,1998. 94-105.
- [5] Duda R O, Hart P E, Stork D. Pattern Classification[M]. Wiley: [s. n.], 2000. 213-240.
- [6] Kohonen T. The selforganizing map[J]. Proceedings of The IEEE, 1990,78(9):137-139.
- [7] Shi Yong, Song Yuqing, Zhang Aidong. A shrinking-based clustering approach for multidimensional data[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2005,(10):28-36.
- [8] Halkidi M, Vazirgiannis M. A data set oriented approach for clustering algorithm selection[A]. Proc. fifth european conference on principles and practice of knowledge discovery in databases (PKDD'01)[C]. 2001. 15-18.

作者简介:

梁建海(1974-),男,江苏徐州人,博士生,从事故障诊断、统计模式识别在飞行参数处理中应用研究。

文章编号: 1003-501X(2006)06-0135-04

基于BP神经网络的光纤陀螺仪温度建模研究

周海波^{1,2}, 刘建业¹, 熊智¹, 赖际舟¹

(1. 南京航空航天大学 导航研究中心, 江苏 南京 210016;

2. 空军飞行试验训练基地, 河北 沧州 061022)

摘要: 目前光纤陀螺应用广泛, 但是其性能容易受到环境温度影响, 从而影响到惯性导航系统的性能。光纤陀螺的温度特性具有非常复杂的非线性特点, 而BP神经网络具有良好的逼近复杂非线性函数能力。使用BP神经网络建立光纤陀螺温度特性的黑箱模型, 不对零漂和标度因子进行补偿, 而直接对陀螺输出进行校正。经实际数据检验, 该建模补偿方法比未经补偿和经过传统工程补偿方法的精度提高了两个数量级。与传统的线性模型相比较, 本文基于BP神经网络建立的光纤陀螺温度模型具有补偿方法简单, 精度高, 通用性好等优点。

关键词: 光纤陀螺仪; 黑箱模型; BP神经网络; 温度补偿

中图分类号: V241.5

文献标识码: A

Temperature modeling study for FOG based on back-propagation neural network

ZHOU Hai-bo^{1,2}, LIU Jian-ye¹, XIONG Zhi¹, LAI Ji-zhou¹

(1. Navigation Research Center, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Flight Trial and Training Base of PLA Air Force, Cangzhou 061022, China)

Abstract: Fiber Optic Gyroscopes (FOG) is widely used, but is easily affected by the temperature around it, which affects the performance of the inertial navigation system. Its temperature model has a very complicated nonlinear characteristic. Back Propagation (BP) neural network has the advantage of approximating the nonlinear function. The black-box temperature model of FOG can be modeled by using BP network and directly correct the error of the output of FOG without compensating gyro drift and scale factor as the traditional method does. Tested by the experimental data, the accuracy of the black-box model based on BP neural network is improved by two orders of magnitude, compared to the uncorrected output and the traditional method. Compared to the traditional linear model, it has more advantages, such as easy to use, high precision, good applicability, etc.

Key words: Fiber optic gyroscopes; Black-box model; Back propagation neural network; Temperature compensation

引言

光纤陀螺因其具有全固态、可靠性高、动态范围广、重量轻等优点, 得到广泛的应用, 但是其性能容易受到环境温度影响。因此, 建立光纤陀螺的温度模型, 对提高在各种环境下的陀螺精度具有重大意义。在工程上常用的方法是建立陀螺温度漂移或者标度因数的线性模型, 如建立AR、ARMA线性模型或者多

收稿日期: 2005-08-01, 收到修改稿日期: 2006-02-15

作者简介: 周海波(1972-), 男(汉族), 湖南邵东人, 工程师, 博士生, 主要研究工作是惯性技术与组合导航系统的研究。

项式模型, 对其进行补偿。而光纤陀螺的温度特性受多种因素影响, 具有非常复杂的非线性特性, 使用传统的建模方法补偿, 效果并不理想。随着科学技术的发展, 一些新理论的出现为光纤陀螺的温度建模提供了新思路、新办法。BP神经网络具有良好的逼近复杂的非线性函数的能力^[1], 在非线性函数逼近领域内引起了广泛讨论和应用。本文在进行了大量光纤陀螺温度试验的基础上, 研究并建立了基于BP神经网络的光纤陀螺温度特性黑箱模型, 直接对陀螺输出进行补偿校正, 具有补偿方法简单、补偿精度高、模型通用性好、计算时间短等优点。

1 光纤陀螺温度特性模型分析

在系统辨识中, 根据先验知识的不同可分为白箱、灰箱和黑箱模型, 其中黑箱模型的建立不依赖于复杂的物理、化学模型解析, 容易实现, 可供选择的模型结构具有很大的灵活性, 并且能够达到较高的精度^[2]。光纤陀螺主要是由光源、偏振器、相位调制器、光纤耦合器和光纤线圈组成^[3]。当光纤陀螺工作温度发生变化时, 会在陀螺输出信号中产生热致非互易相位噪声, 加剧光纤陀螺的零位漂移, 恶化标度因子线性度, 致使光纤陀螺的温度特性呈现出非常复杂的非线性特点^[4], 难以得到具体的解析表达式。因此, 可以使用黑箱方法来建立光纤陀螺温度特性的非线性模型。

在建立光纤陀螺温度模型时, 工程上常用的办法是采用(分段)线性拟合或多项式拟合等方法, 分别对光纤陀螺的零偏和标度因子温度特性进行建模、补偿, 这种补偿方法难以准确描述其温度特性的非线性; 同时引入两次补偿误差, 导致补偿精度低。而BP神经网络具有良好的逼近复杂非线性函数的能力, 使用BP神经网络建立光纤陀螺温度特性的黑箱模型, 无需分别对零偏和标度因子进行建模, 温度补偿步骤得以简化, 补偿精度得到提高, 而且BP网络一旦训练达到要求, 就能够得出逼近光纤陀螺温度特性的非线性函数的表达式, 便于将训练好的BP网络应用在工程上。因此, BP神经网络能够起到“黑箱”的作用。

考虑到温度因素对光纤陀螺输出的影响, 光纤陀螺的工作过程可以简单描述为: 感受周围环境的温度和载体的角速率, 输出反映载体角速率的电压信号, 然后通过标度因子将该输出转换为角速率。该过程用函数可以简单表示为 $\omega=f(\omega_0, T)$, 其中 ω_0 表示载体角速率, T 表示温度, ω 为光纤陀螺的输出。对于使用者而言, 温度 T 和陀螺输出电压(或者经转换后的角速率 ω)都是可以准确观测(计算)得到的物理量, 而希望得到的载体角速率 ω_0 可以表示为 $\omega_0=h(\omega, T)$ 。实现这个函数关系的黑箱模型的简略表示如图1所示。

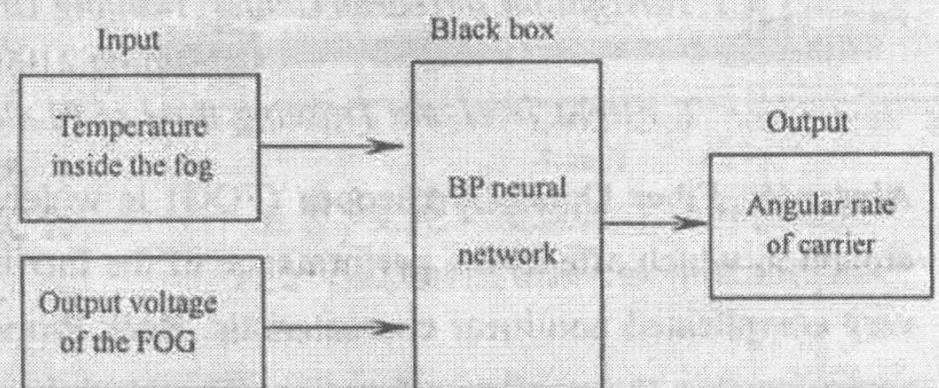


图1 基于BP神经网络的黑箱模型示意图

Fig.1 Black-box model based on BP neural network

2 BP神经网络模型

在人工神经网络的实际应用中, 绝大部分的神经网络模型是采用BP网络和它的变化形式, 它是前向网络的核心部分, 体现了人工神经网络最精华的部分^[1], 主要应用于函数逼近、模式识别、分类和数据压缩。其网络结构通常具有隐层和输出层, 其中各层的神经元个数和隐层的层数根据解决问题的复杂程度而不同, 隐层可以由一层或者多层组成, 其传递函数通常采用S型函数, 输出层通常采用线性传递函数。

根据对光纤陀螺温度建模的实际需要, 我们采用了3层BP神经网络, 其神经元个数分别是5个, 8个, 1个, 隐层、输出层传递函数采用双曲正切S型函数和线性函数。在网络算法的选择上, 为了加快网络训练的收敛速度, 采用Levenberg-Marquardt算法^[1]。

3 光纤陀螺温度补偿与分析

光纤陀螺温度试验系统由某型光纤陀螺、带高低温试验箱速率转台和计算机组成。该光纤陀螺在静态条件下其精度为 $0.3 \sim 1^\circ/\text{hr}$, 能够敏感的最大角速率为 $\pm 80^\circ/\text{s}$, 工作温度为 $-30^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$ 。高低温试验箱的温

度范围为 $-60^{\circ}\text{C}\sim+90^{\circ}\text{C}$, 速率转台的主轴速率范围为 $0.001\sim 400^{\circ}/\text{s}$ 。将光纤陀螺放于高低温试验箱中, 设置高低温试验箱温度为 -30°C ; 接通陀螺电源, 待陀螺内部温度保持稳定后, 按照国军标光纤陀螺仪测试方法中有关标度因数的试验方法^[5], 在陀螺敏感角速率范围内, 每隔 $10^{\circ}/\text{s}$ 调整角速率, 分别在各转速下采集陀螺输出数据(包括陀螺内部温度信号和代表转速的电压信号)。然后在 $-30^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$ 范围内, 每隔 10°C 重复上述试验, 获得光纤陀螺在全温度全速率范围内的3组数据。然后以MATLAB作为软件平台, 分别以温度、陀螺输出和转台角速率作为训练样本、网络的期望输出, 设置网络训练目标参数为0.001。网络经过33次学习, 网络性能参数为0.000989, 达到要求, 完成训练。

3.1 经过训练的BP神经网络的精度

为了检验BP神经网络的计算精度, 从第一组训练样本中取出在 20°C 温度点下的实验数据, 将剩余的实验数据作为网络的训练样本, 对BP网络进行训练。然后向训练好的BP网络输入在 20°C 采集的数据, 得到网络的输出, 即网络逼近的转台转速, 与转台的速率相比较, 其误差曲线如图2所示。

对 20°C 环境下采集的数据进行逼近, 误差绝对值在 $0.00078\sim 0.0286^{\circ}/\text{s}$ 之间, 误差的方差为 $0.01292^{\circ}/\text{s}$ 。这说明使用训练好的BP网络对未参加训练的数据进行计算, 逼近的误差非常小, 补偿效果好, 而且网络反应时间迅速, 对于每组数据计算时间仅为15ms。

3.2 经过训练的BP神经网络的通用性

为了考察训练好的BP神经网络的通用性, 以第一组数据为训练样本, 对BP神经网络进行训练, 然后将第二组、第三组数据输入到训练好的网络中, 获得经过补偿后的第二、第三组网络输出。将这三组输出数据与对应的转台转速相比较, 其误差范围和误差方差具有很好的一致性, 这说明经过第一组数据训练的BP网络适用于第二组和第三组数据, 网络的通用性很好。具体的数据见表1。

表1 经过训练的BP网络的对三组数据的补偿效果对比

Table 1 Comparison of outputs of the trained back propagation neural network by inputting the three teams of data

Data	Error range of the BP network ($^{\circ}/\text{s}$)	Error variance of the BP network ($^{\circ}/\text{s}$)
Team no.1	0.00033~0.13349	0.03121
Team no.2	0.00013~0.14986	0.03123
Team no.3	0.00035~0.17643	0.03563

3.3 BP神经网络的补偿精度

为了与BP神经网络对光纤陀螺进行温度建模补偿相比较, 首先采用传统工程的方法进行温度补偿, 分别对在不同温度下实验得到的陀螺零偏和标度因数等数据进行三次和二次多项式拟合, 得:

$$B_{0T} = -4.9 \times 10^{-6} \times T^3 + 0.0008 \times T^2 - 0.049 \times T - 4.74, \quad K_T = -4.04 \times 10^{-5} \times T^2 - 0.0068 \times T + 20.895$$

式中 T 表示陀螺温度, B_{0T} 表示温度 T 对应的陀螺零偏, K_T 表示温度 T 对应的标度因数。

根据拟合得到的多项式模型可以计算出不同温度下的陀螺零偏和标度因数, 然后根据国军标提供的陀螺输入输出关系线性模型 $\omega_0 = (\omega - B_{0T})/K_T$, 计算出经过温度补偿的陀螺敏感到的载体角速率。

图3是在未经补偿和经过零偏和标度因数补偿的两种情况下陀螺输出的误差曲线。在未补偿时, 陀螺的输出误差随着温度和转台转速的上升而增大, 如图3(a)所示; 经零偏和标度因数补偿, 在不同的温度下, 转台转速最大时误差最大, 在相同的温度下, 其误差不再随着转台转速的变化呈现单纯的递增或者递减趋势, 如图3(b)所示; 而经过BP神经网络补偿后, 误差明显减小, 如图4所示。具体的数值比较详见表2。

从下面的图、表可以看出, 经过BP神经网络补偿的精度非常高, 比未经补偿和经过传统工程补偿方

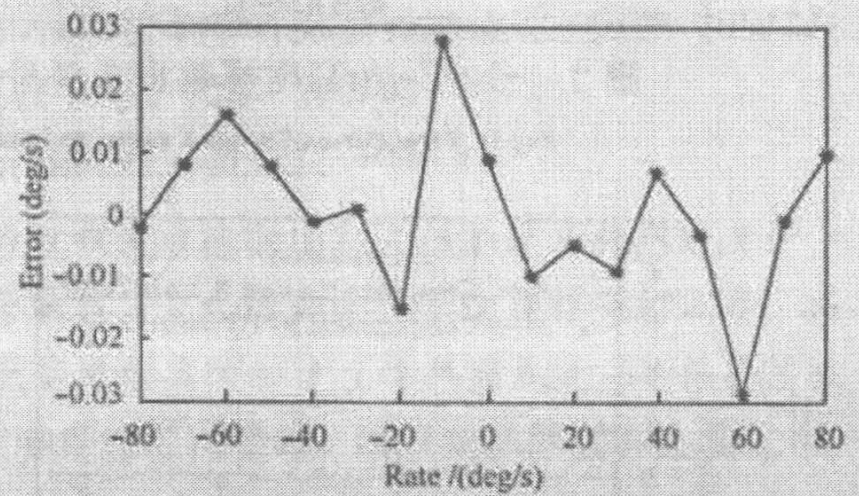


图2 环境温度为 20°C 时BP网络输出的误差

Fig.2 Error of BP neural network output under 20°C

在共振频率以下可作为加速度计,在共振频率以上可作为振动仪使用。从图上可知,两个水平分量的频谱特性和垂直分量频谱特性基本一致,说明实验样机的三个分量有较好的一致性,且交叉轴灵敏度近似为零。

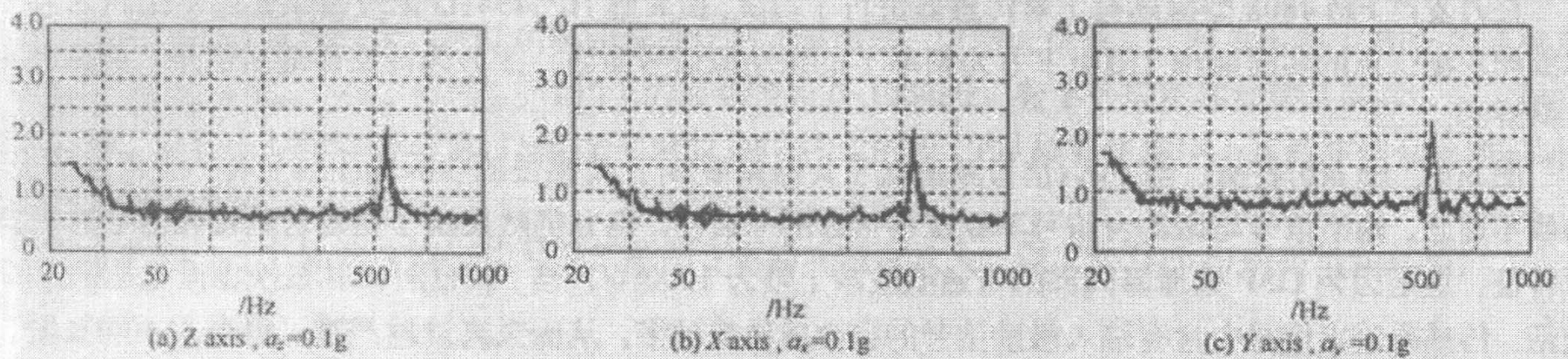


图9 传感器频谱响应曲线

Fig 9 Frequency characteristic of sensor

参考文献:

- [1] 丁桂兰,陈才和,张德龙,等.全光纤加速度地震检波器敏感元件横向振动限制的研究[J].光学技术,2001,27(3):278-280.
DING Gui-lan, CHEN Cai-he, ZHANG De-long, et al. Study on limited vibration in horizontal orientation of sensing element of All-fiber-optic Accelerometer [J]. *Optics Technology*, 2001, 27(3): 278-280.
- [2] 陈才和,郝永杰,张德龙,等.交流相位跟踪零差补偿技术在全光纤加速度地震检波器中的应用研究[J].地震工程与工程振动,2000,20(1):298.
CHEN Cai-he, HAO Yong-jie, ZHANG De-long, et al. Study on the application of alternate current phase tracking homodyne compensation technique in the all-fiber optic acceleration seismic geophone[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2000, 20(1): 298.
- [3] R.D. PECHSTEDT, D.A. JACKSON. Design of a compliant-cylinder-type fiber-optic accelerometer: theory and experiment [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(16): 3009.
- [4] R.D. PECHSTEDT, D.A. JACKSON. Performance analysis of a fiber optic accelerometer based on a compliant cylinder design [J]. *Rev. Sci. Instrum*, 1995, 66(1): 207.

(上接第138页)

4) 计算时间较快。由于BP神经网络通用性较好,每次计算时间均在15ms左右,因此在对计算时间要求不高的应用中,完全能够离线训练,在线应用。如果用C语言编程实现,计算速度还会有所提高。

参考文献:

- [1] Martin T. HAGAN, Howard B. DEMUTH, Mark BEALE. *Neural Network Design*[M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [2] 刘桂雄,李夏妮.传感器黑箱数学建模理论研究现状及应用[J].机电产品开发与创新,2004,17(5):11-14.
LIU Gui-xiong, LI Xia-ni. Research Actuality and Application of Box Integrated Modeling for Sensors [J]. *Development & Innovation of Machinery & Electrical Products*, 2004, 17(5): 11-14.
- [3] Hervé C. LEFÈVRE. 光纤陀螺仪[M].北京:国防工业出版社,2002.
Hervé C. LEFÈVRE. *The Fiber Optic Gyroscope* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002.
- [4] 卞鸿巍,金志华,杨艳娟,等.光纤陀螺温度漂移模型的PPLN辨识[J].上海交通大学学报,2004,38(10):1753-1756.
BIAN Hong-wei, JIN Zhi-hua, YANG Yan-juan, et al. Temperature Drift Modeling of Fiber Optical Gyroscope Based on Projection Pursuit Learning Network [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2004, 38(10): 1753-1756.

弹道导弹的 GNSS/SST/SINS 组合导航系统研究

康国华¹ 刘建业¹ 熊智¹ 祝燕华¹

(1 南京航空航天大学导航研究中心,南京市御道街 29 号,210016)

摘要:提出一种组合导航方案,该方案在硬件上采用全捷联的结构,在算法上将捷联星光跟踪仪(strapdown star tracker, SST)的姿态信息,高动态 GNSS 的位置、速度信息与捷联惯导进行组合滤波,全面提高导航精度。设计并实现了弹道导弹 GNSS/SST/SINS 组合导航系统实时仿真平台,仿真结果表明了该组合方案的稳定、可靠性。

关键词:组合导航;星光跟踪仪;弹道导弹;滤波算法

中图分类号:P228

弹道导弹命中精度与导航系统精度直接相关,因此如何提高导航系统的精度成为战略武器的关键技术之一^[1]。提高导航精度一般采用两种方法,一是提高器件本身精度,二是多种导航设备进行最优组合。单纯提高器件精度非常困难,国外弹道导弹,特别是远程弹道导弹一般采用综合制导技术^[2-4],将卫星导航、重力辅助、地形匹配、星光跟踪仪等与作为主导航系统的惯导进行组合,提高命中精度。

针对这一背景,考虑到卫星导航能提供准确的不随时间发散的位置和速度信息,星光跟踪仪可以提供不随时间发散的姿态信息,因此将卫星导航、星光与惯导进行全信息组合,无疑具有很强的互补性。本文以捷联惯导(SINS)、捷联星光跟踪仪(SST)和卫星导航系统(GNSS 或者无源北斗)为组合对象进行研究,通过对传统的集中滤波器进行改进,使各种组合状态“无缝”切换,保证了故障的隔离,同时又继承了集中滤波器结构简单、实时性好的特点。本文以工程实现为目标,设计了软硬件仿真平台,验证了该方案的可行性。

1 GNSS/SST/SINS 组合导航方案

图 1 显示了弹道导弹飞行轨迹。弹道导弹在横向运动很小的情况下,可以将飞行轨迹简化为一条平面弹道,一般分为主动段和被动段。主动

段飞行目的是保证导弹以设定的姿态和速度到达预订的关机点;被动段又分为自由段和再入段,再入段需要保证弹头的稳定性。因此整个过程需要导航系统提供精确的姿态、速度和位置信息。采用卫星/天文/惯导组合可以满足这样的要求^[5,6]。

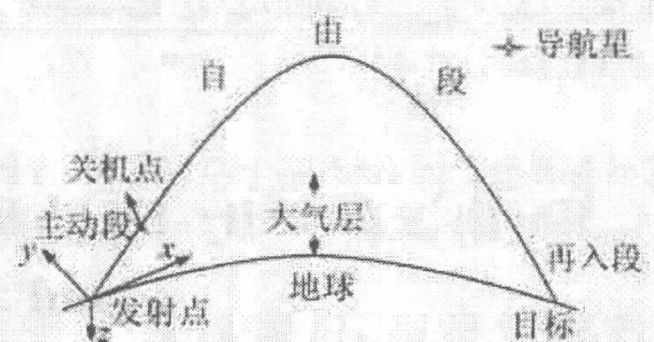


图 1 弹道导弹飞行轨迹示意图

Fig. 1 Ballistic Trajectory Representation

随着激光、光纤陀螺的出现,捷联惯导的精度和动态范围都得到了提高,目前已经在运载火箭和弹道导弹载体上得到广泛使用,如“神舟”系列飞船上就使用了捷联惯导。另外,随着 CCD 技术的发展^[7,8]以及计算机运算速度的提高,星光跟踪仪的捕星能力得到加强,响应速度也越来越快,捷联星光跟踪仪也可以满足高动态环境的需要。卫星导航系统目前常用的是美国的 GPS 和俄罗斯的 GLONASS(两者综合即 GNSS),同时我国北斗导航系统的无源化工作也取得进展^[9]。因此采用 GNSS/SST/SINS 组合方案就有了现实基础。