

基于BD/GPS方位系统的机载测向标校系统设计

苗润苏¹ 肖旺² 苗建苏²

(1. 新乡市质量技术监督检验测试中心 新乡 453003; 2. 中国电波传播研究所 新乡 453003)

摘要: 随着BD/GPS系统定位精度的提高和姿态方位测量系统的普及,利用BD/GPS和姿态方位系统对机载测向系统进行实时标校提供了一种新的手段。为了提高机载测向系统标校的准确性,克服以往系统标校方法中遇到的问题,给出了基于BD/GPS方位系统的机载测向标校系统的基本原理和系统组成,实现了基于BD/GPS方位系统的机载标校系统的软、硬件设计方案,重点分析了详细的标校过程中方位参考数据的获取和处理方法,以及标校中需要注意的若干问题。该标校系统设计简单,不需要对测向设备进行改造,适应性强,可以为军事和民用机载测向系统标校提供一种有效手段。

关键词: 机载测向系统; 标校方法; BD/GPS; 姿态方位参考系统

中图分类号: U675.71 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1020

Design of airborne direction finding calibration system based on BD/GPS bearing system

Miao Runsu¹ Xiao Wang² Miao Jiansu²

(1. Quality Technology Supervision and Checking Testing Center of Xinxiang City, Xinxiang 453003, China;
2. China Research Institute of Radiowave Propagation, Xinxiang 453003, China)

Abstract: With the improvement of BD / GPS system positioning accuracy and the popularity of attitude azimuth measurement system, BD / GPS and attitude azimuth system are used to provide a new method for real-time calibration of airborne direction finding system. In order to improve the accuracy of the standard system of airborne direction finding system and overcome the problems encountered in the system calibration method, the basic principle and system composition of the airborne direction measurement system based on BD / GPS azimuth system are given. The hardware and software design scheme of the airborne calibration system based on BD / GPS azimuth system is realized. The method of obtaining and processing the azimuth reference data of the standard calibration process is analyzed, and some problems needing attention in the calibration school are analyzed. The calibration system is simple to design, does not need to carry on the transformation to the surveying equipment, the adaptability, may provide the military and the civil airborne direction measuring system to provide an effective means.

Keywords: airborne direction finding system; calibration method; BD/GPS; attitude azimuth measurement system

0 引言

机载测向系统用于目标搜索、定位,广泛应用于航空导航、应急信标定位、搜索救援和人员车辆定位等领域。机载测向系统的准确度是衡量系统性能的关键指标之一,同时是机载平台准确、快速完成搜索定位任务的前提。传统机载测向标校方法除要求具备一定的测试场地外,根据应用制定相应的飞行测试方案外,飞行测试过程中飞机相对于测试信标的方位信息和测向系统的方位指示信息很难做到同步采集,且飞机方位变化信息采集的准确度也很难保证,

测向系统标校的效果不太理想。为提高机载测向标校系统的准确性、有效性,寻求一种既方便快捷,又能达到一定精度要求,同时自动化程度高的测向系统标校方法很有必要。近年来,随着BD/GPS系统能力的提升,BD/GPS接收机得到广泛应用,位置定位精度能达到米级,为各类移动平台的位置识别和方位跟踪提供了极大的方便,BD/GPS和方位参考系统的应用发展已经成为一种必然的趋势。本文提出基于BD/GPS方位的机载测向系统的标校方法,研究实现一种方便快捷的机载测向系统自动标校方法的可行性。

1 BD/GPS 方位系统概述

BD/GPS 方位系统可以选用具有 BD/GPS 信息输入的 AHRS 姿态方位参考系统。AHRS 系统包括多个轴向传感器,能够为飞行器提供航向、横滚和侧翻信息,通过姿态和方位导航信息融合的数据^[1-2],这类系统为飞行器提供准确可靠的姿态与航行信息。姿态方位参考系统与惯性测量单元 IMU 的区别在于,姿态方位参考系统(AHRS)包含了嵌入式的姿态数据解算单元与航向信息,惯性测量单元(IMU)仅提供传感器数据,并不具有提供准确可靠的姿态数据的功能。目前常用的姿态方位参考系统(AHRS)内部采用的多传感器数据融合进行的姿态方位解算单元为卡尔曼滤波器^[3-4]。系统采用实时操作系统,在高性能数据处理芯片中嵌入特有的数据融合滤波算法,系统能在静态、动态以及冲击振动状态下,均有很好的响应,输出稳定的姿态数据。外部 GNSS 信号输入,外部位置、速度和航向输入等。外部的 GNSS 信息可以校正行驶过程中的加减速带来的角度误差,同时可以自动校正内部的全球磁场模型。系统中的 MEMS 陀螺和加速度计均经过温度补偿和校正,确保其在全温度范围内的精度。并对陀螺仪进行了 g 灵敏度校正和补偿,确保其在高动态环境下的性能。通过外部接口,该系统可输入系统具 BD/GPS 信号。航向来源可以选择使用速度航向,磁航向,或者输入外部航向,生成的航向数据起到稳定作用。其航向静态精度 0.5° ,航向动态精度 1.0° ,更新率 $<1\ 000\ \text{Hz}$ 。

BD/GPS 接收机可选用授时型 GPSBD/二代接收机,该接收机采用高精度授时型 GPSBD/二合一 OEM 模块和

精密时间同步技术,授时精度:30 ns RMS,定位精度:3 m RMS,速度精度:0.1 m/s。

通过 BD/GPS 方位系统,可以得到位置、时间,即大地坐标系下参考飞机位置、UTC 时间、对地航向(COG)、对地速度(SOG)等。基于以上位置时间等信息,标校中可以计算标校目标的距离和方位,并作为标校的基准与测向系统数据进行配准。

2 标校系统的方法

机载测向系统标校需要解决动态方位标定和方位修正两个问题。其中,最为关键的是动态方位标定。动态方位标定需要采集飞机的位置、航向和航速数据,根据这些数据可以得到相对固定信标机方位信息的变化。通常,按预先测试方案的航迹,飞机不容易做到匀速、方位变化均匀的飞行,因此需要将飞机飞行的航向、航速和方位变化信息进行修正,得到按均匀采样时间间隔飞机方位信息变化的值,并通过误差修正等到其真值。同时,在同一个 GPS 时标的条件下,采集机载测向设备的测向数据信息。将修正后飞机的飞机方位数据与测向系统方位数据在同一时标基准下进行数据配准,同时对测向方位数据进行统计平均得到按统一时标尺度下的方位测向方位数据的均方根值。然后,对处理后的飞机方位和测向方位数据进行联合误差的统计分析和卡尔曼滤波平滑,从而得到测向系统方位数据的标定结果。为确保数据的客观性,每次方位标定需飞机按同样飞行轨迹飞行至少 3 次,将每次方位标定的数据在进行线性拟合,即可得到机载测向系统的方位标定结果。有了可靠的方位标定数据,实现方位修正使用数据拟合的方法就很容易实现。图 1 所示为机载标校系统数据处理流程。

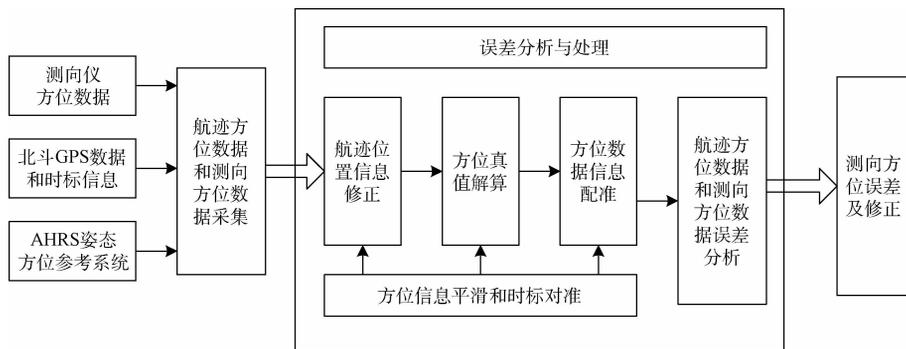


图 1 标校流程

3 标校系统的方案设计

3.1 系统组成

基于 BD/GPS 方位系统的机载测向系统标校由硬件和软件两部分组成。硬件部分主要由 BD/GPS 接收机, AHRS 姿态方位参考系统,嵌入式计算机和显控终端组成。软件部分主要系统控制和数据分析软件组成,系统控

制主要完成测试信息输入、预置系统参数等功能,数据分析包括飞机方位信息采集处理、测向系统数据采集处理和数据配准程序等。系统组成如图 2 所示。整个系统主要由 3 大部分组成:BD/GPS 方位信息接收子系统、测向子系统和综合数据处理子系统。BD/GPS 方位信息接收子系统接收飞机的位置信息和方位信息,通过数据采集接口将信息输入计算机。测向子系统将观测数据同时输入计算

机。综合数据处理子系统提供飞机方位信息、测向信息、误差处理模块和数据配准处理模块。各子系统间用同步串口通信进行联接。

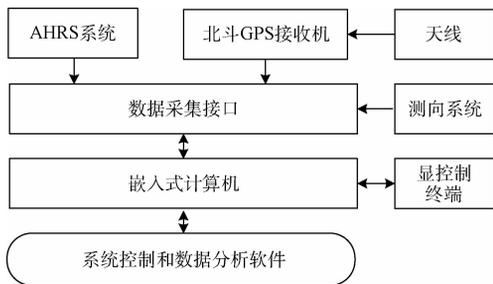


图2 标校系统组成

3.2 标校数据采集

标校数据的采集包括飞机定位数据、飞机航向数据和测向系统探测数据三方面。

1) 飞机定位:通过BD/GPS接收机接收定位数据,数据采集率的设定比较关键。为方便后续与测向系统数据进行时标对准,应尽量设定高的数据采集率,一般为0.5~1 s。

2) 飞机航向数据:由AHRS姿态方位参考系统输出飞机的航向信息。飞机航向信息的采集速率较高,可以设定为200 ms/次。飞机的航向变化信息结合飞机的位置信息,可以得到飞机相对于测试信标的方位变化。为保证飞机方位变化数据采集的数据分辨率足够高,飞机的航速、飞行半径或位置距离都应该有一定要求。如:要求保证方位采集的速率为 $2^\circ/\text{s}$,测飞机的飞行速度应在100 km/h,飞行半径大于800 m。

3) 测向系统数据采集:测向数据的采集速度需综合考虑数据的精度和飞机方位变化的速率。如果数据采集的过快,则测向数据的精度降低;如果数据采集的过慢,则测向数据将跟随飞机方位变化而变化,数据的准确性无法保证。为简便考虑,将测向方位数据的相应时间,可以将数据采样时间与飞机航向变化采样时间保持一致。由于飞机的航向变化速度与飞机飞行速度和飞行半径相关,因而测向系统的方位变化速度也不会均匀,再加上两者方位数据的误差,所以不能将采集的数据直接使用。

3.3 时统基准

标校系统的各组成部分之间要保持严格的时间同步。时间同步的精度直接影响标校的误差校正的准确度和最终的标校结果。由于各接收系统的数据输出速率不同,要使最终的标校结果优于 5° ,各接收系统间的时间同步精度应优于200 ms。

本系统采用BD/GPS时标作为时间同步基准实现各设备之间的时间同步采样^[5]。通用的GPS设备时间精度50 ns,时间同步稳定度在10 s内,平均随机小于15 ns,时间精度完全达到了标校系统的要求。但通常BD/GPS接

收机本身输出的时间基准为s,为实现精确的时间对准,需要在数据采集时将s为单位的时间基准,分频到100 ms。各接收系统以100 ms的时间基准采样,便可以满足后续的各采样数据的配准。时间基准的实现方法可采用BD/GPS接收机和高精度晶体振荡器共同构成一个稳定的定时器。

4 方位数据处理和分析

数据采集后的数据分析与处理决定了系统标校精度。综合分析处理主要包括飞机和测向方位信息处理、数据均匀采样处理、标校数据生成和校准处理。

4.1 飞机和测向方位信息处理

对于飞机方位信息的处理,可视为获取标校系统的参考方位变化。机载测向系统标校通常的做法是飞机在具测试信标一定距离和一定高度的位置悬停或围绕某一圆心做圆周飞行。为通用考虑,以飞机做圆周飞行为例。当飞机以匀速飞行时,通过飞机位置方位采集系统可以得到飞机的航速、航向和位置的实时变化数据。测向系统标校的关键是获得飞机方位变化的参考数据,该方位数据应该是按照均匀的时间采样间隔,方位数据均匀变化的。显然,利用位置方位采集系统直接采样得到的飞机方位的变化是不能满足该要求的。处理的方法是先将飞机的航向信息换算为以飞机机头方向为零方位的方位信息;再通过坐标变换将以信标为参考的飞机方位的变化数据,转化以飞机为参考的信标方位变化数据,得到类似标准的标校参考方位数据;最后将得到的方位参考数据进行滤波和平滑处理,便可实现标校系统的参考方位变化的获取。

对于测向系统方位信息的处理,可视为获取标校系统的测量方位变化。与获取参考方位变化的方法类似,机载测向系统的方位为信标相对机头方位的方位变化。该数据同样受到飞行速度和位置变化的影响。与上述处理方法相似,将测向方位的变化数据,通过坐标变化转化为以飞机为中心,信标方位的变化,从而得到标校测试数据。该测试数据同样需要进行数据滤波和平滑处理。

4.2 数据均匀采样处理

由于姿态方位参考系统、BD/时标系统和测向系统数据输出速率不同,所以要将接收到的各系统的数据进行时间比较和对准处理。在校对中,需将得到的标校参考数据和标校测试数据进行时间对准是关键,对准要求精度与需要的测量精度有关。为保证测量精度在 2° 以内,本文将BD/GPS系统时间基准调高后,由1 s提高到0.5 s,同时提高测向系统数据输出帧数到10 f/s,按统一的时基标准标识各系统读取的数据,然后来完成时间对准,从而保证了测向参考数据和测试数据的可比性。验证系统测量误差时,需将得到的测向校准系统参考和测量的方位数据,按均匀的时间间隔进行对比。这就需把按统一时基读取的位置和方位数据,将非均匀时间间隔采样的数据转换为均

匀时间间隔采样的数据。位置数据均匀采样可以采用拟合和插值的方法来处理。而方位数据的均匀采样,则没有那么简单。因为方位的数值变化存在 360° 的折返,数据变化不连续会存在跳变,不能直接使用拟合和插值的方法。考虑到飞机方位变化在小的时间间隔内的变化,即便不是线性的,最多会出现匀加速的变化,因而在数据处理时只需根据对应时间点及前后时间点的方位数据,通过一个二元的多项式函数,用分段逼近的方式便可实现需要时间点的方位数据估计值。

1) 距离数据均匀采样处理:围绕某一圆心飞行飞机的航迹位置数据是时间的连续闭合函数。位置数据的拟合逼近可以使用多项式拟合的方法^[6],如常用的切比雪夫多项式,能实现位置数据的最佳一致逼近。位置拟合函数按均匀时间间隔进行插值,便可以得到按均匀时间分布的飞机位置变化数据。在本标校系统的设计中,要求飞机飞行尽可能按匀速飞行,飞机位置数据采集的过程中,数据不会出现大的时间采样间隔,而且在秒级的数据采用时间内位置数据也不会出现大的跳跃,因而数据拟合和差值的精度是足够精确的。

2) 方位数据的均匀采样处理:在完成位置数据的均匀采样处理后,将原始的位置数据和插值后的位置数据放在一个数组内,并将按均匀时间采样得到的数据位置标识出来。按与未知数据同一均匀时间间隔的时间,从方位变化数据的数组中找出对应时间点的前后共 3 个方位变化数据。在飞机均加速的情况下,3 个方位变化数据可以用一个时间的二阶多项式来拟合,通过拟合得到的函数,将均匀采样对应的时间带入,便可以实现方位数据的均匀采样处理。设 t_i 为内插时刻,则方位角 $\theta(t_i)$ 有:

$$\theta(t_i) = a_2 t_i^2 + a_1 t_i + a_0 \quad (1)$$

其中待定系数由下式得到:

$$\begin{bmatrix} \theta(t_{i-2}) \\ \theta(t_{i-1}) \\ \theta(t_{i+1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{i-2}^2 & t_{i-2} & 1 \\ t_{i-1}^2 & t_{i-1} & 1 \\ t_{i+1}^2 & t_{i+1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_2 \\ a_1 \\ a_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

在方位数据处理过程中,需注意 $359^\circ \sim 0^\circ$ 的数据转换,处理的方法是将 $360^\circ (0^\circ)$ 附近的数据先变为连续数据,即过 0 数据加 360,或接近 360 的数据减 360,先求得插值数据,然后将插值数据再加或减 360 还原为合理的方位数据。

4.3 标校数据生成和校准处理

标校数据的生成分为标校方位参考数据和测向测量数据。在获取标校方位参考数据时,需考虑飞行轨迹数据和测向方位数据两者的归一化问题,即飞机轨迹方位数据与测向方位的参考方位同样以机头方位为零方位处理。通过归一化将飞机方位变化和飞机位置相对信标的方位变化,变换为可以与测向方位直接比较的方位参考数据,便可得到标校方位参考数据。获取标校参考数据是整个标校系统的关键。由于飞机飞行不会也没法严格按照规

定的圆形轨迹飞行,飞机位置相对信标方位变化也不会均匀变化,直接将获取的均匀采样后的位置和方位数据通过线性变换得到的方位变化参考数据,存在方位分布不均匀,个别方位数据密一些,有些数据可能疏一些,这会对最终的系统测量误差带来影响。为得到方位分布比较均匀的方位参考数据,需要将归一化处理的方位数据再按就尽量均匀分布的规则进行抽取,尽量降低系统的测量误差。数据抽取可以采用互相关的方法,首先设计一组理想的均匀分布的测量参考数据,然后将获取方位参考数据进行互相关,将相关系数最大的,也即是最接近理想数据的参考数据抽取出来,即可得到最终的测量方位参考数据。假定理想的方位参考数据序列为 $x(i), i = 1, \dots, M$, 测量参考方位数据序列为 $y(j), j = 1, \dots, N, M < N$, 两个数据序列按式(3)做互相关。

$$x'(i) \Big|_{i=1, M} = \left\{ \frac{x(i)y(j)}{[\sum_{j=1, N} x(i)^2 y(j)^2]^{1/2}} \right\} \quad (3)$$

对每一个 $x(i)$,求得相关系数最大的 $y(j)$,取 $x'(i) = y(i)$,当完成 M 个 $x(i)$ 的数据互相关后,便可完成对测量方位参考数据的 $y(j)$ 抽取,得到的新的方位参考数据序列即可用作标校的方位参考。

在得到了标校参考方位数据后,将测向方位数据按与参考方位数据同一时刻的值进行抽取,便可得到测向测量数据。把测向测量数据和方位参考数据进行统计平均,即可得到标校系统的测量误差。将测向测量数据与方位参考数据进行拟合处理,便得到标校系统的误差修正函数。对于测向误差修正,采用最小二乘法的多项式拟合方法,完全可以满足系统精度要求。按误差平方和最小的原则进行曲线拟合,设 $q(i)$ 为 n 节的多项式函数, $p(j)$ 为方位参考函数,则:

$$\min \sum_i \delta_i^2 = \sum_i (q(i) - p(i))^2 \quad (4)$$

多项式的阶数 n 与拟合的误差精度有关,具体的最小二乘拟合方法比较通用,就不再赘述。

5 测试中的减少误差的措施

在机载标校系统中,选择合适的飞行速度、距离和航高等至关重要,影响同时为提高标校精度和效率的因素,可以从以下几个方面考虑。

1) 选择目标距离适中,目标太远,测向系统的探测偏差增大。目标距离不能太近,测向系统的方位测量时测量的仰角变化过大,引入方位偏差过大。飞行参数的选择,应结合飞机的飞行速度,总体保证飞行测试距离小于 5 km,测试仰角变化小于 10% ^[7]。

2) 机载标校测除了要求信标机周围开阔无遮挡外,也需要考虑测试环境的问题。测试过程中,飞机和测试信标的中间应避免有高塔、楼房或铁塔等,这些物体的存在会使目标散射特性一般较为复杂,影响标校测试场区被测信

号波前特性的一致性,影响系统标校的结果^[8-9]。

3)GPS天线的架设也很重要。GPS的天线容易受无线电设备、电子设备和多路径效应的干扰,影响接收机的接收和解码。同时考虑机载设备较多,对GPS信号会产生遮挡,一般认为GPS精度会下降,且工作不可靠。所以应将GPS天线尽量架设到飞机无遮挡最高处,离开其他电子设备一段距离的位置。

4)还需要注意的是,在航测前需要将AHRS姿态方位参考系统的方位测量进行校准,即对AHRS系统方位罗盘进行校准^[10-11],测向系统的零位也必须校准。同时,为提高测向数据精度,需要尽可能多的飞行圈数,通过统计分析获取可靠的方位测量值^[12]。

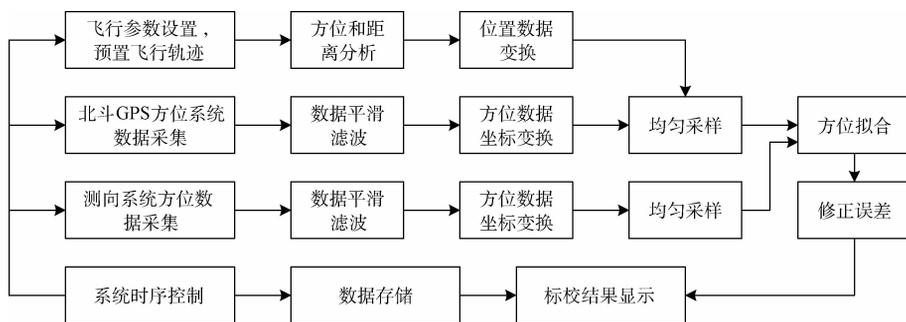


图3 标校软件数据流程

7 结 论

本文介绍了机载标校航向方位测量和测向系统标校的原理及功能,设计了利用BD/GPS位置信息和AHRS姿态方位参考系统组成的获取标校方位参考信息的实现方法,提出了自动获取标校参考方位数据获取的方法,并指出了使用中的应该考虑的若干问题,通过硬件和软件设计实现了标校的功能。该标校系统的设计和使用非常方便,应用环境要求简单,可以实现机载测向仪标校的自动化,一次测试即可完成整个测向系统的标校,大大提高了工作效率。但由于标校的特殊性,在实际标校过程中,仍然还会遇到其他的误差影响,其中动态标校时MEMS系统随机误差^[13]、方位角度测量误差^[14]和移动平台测向系统误差^[15]等诸多误差因素同样需要考虑研究,以进一步提高标校的精度。

参考文献

- [1] 张欣. 多旋翼无人机的姿态与导航信息融合算法研究[D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2015.
- [2] 薛远奎. 小型旋翼无人机姿态融合及导航方法[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.

6 标校系统软件实现

标校控制系统可以用嵌入式计算机实现。在嵌入式Windows CE操作系统下,根据标校系统设计的数据处理过程,采用QT语言设计标校软件和系统控制软件,同时将BD/GPS接收机和AHRS姿态方位参考系统的数据通过串口通信接入,测试前需要预置预定的航迹、信标位置和航高等参数。标校系统软件数据处理流程如图3所示。按照软件数据流程,将测试过程中的数据采集后,经过数据平滑、航迹坐标转换、数据均匀采样处理、参考方位数据生成和误差修正拟合等步骤,最后得出标校修正数据统计结果,最终标校结果与系统方位参考数据可以在进行显示。

- [3] 李鑫. 基于自适应滤波的MEMS姿态确定方法[J]. 传感技术学报, 2016, 29(12): 1853-1857.
- [4] 盛汉霖, 张天宏, 刘冬冬. 基于扩展卡尔曼滤波器的低成本航姿系统设计[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(10): 2158-2164.
- [5] 洪良剑, 刘洪, 熊善泉, 等. 基于北斗SOC的雷达数据采集系统设计[J]. 电子测量技术, 2015, 38(7): 79-83.
- [6] 孙斌, 于聪, 周王超, 等. NTC热敏电阻特性曲线的拟合方法研究[J]. 中国计量学院学报, 2012, 23(1): 75-79.
- [7] 李钢, 王玉林. 高仰角下相关干涉仪测向算法分析[J]. 计算机与网络, 2010, 36(11): 50-52.
- [8] 顾俊杰. 机载无线电测向布阵选择与误差源分析[J]. 通信对抗, 2011, 114(2): 16-18, 30.
- [9] 金克斯. 蒋盘林, 译. 小孔径无线电测向[M]. 嘉兴: 中国电子科技集团公司第三十六研究所通信对抗编辑部, 1995.
- [10] 唐原广, 贾彩惠, 徐春玲. 电子罗盘校准方法的设计与实现[J]. 海洋技术学报, 2016, 35(1): 46-50.
- [11] 晁敏, 蒋东方, 文彩虹. 磁罗盘误差分析与校准[J]. 传感技术学报, 2010, 23(4): 525-532.

- [12] 胡满玲. 机载电子侦察设备测向性能评估[J]. 电子测量技术, 2010, 33(8): 24-27, 34.
- [13] 孙伟, 文剑, 张远, 等. MEMS陀螺仪随机误差的辨识与降噪方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(1): 15-20.
- [14] 盖竹秋, 戴明, 程志峰, 等. 经纬仪角度测量系统的实时侦错[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(12): 1200-1205.
- [15] 陈华东, 陆堪, 徐志江. 车载无线电测向系统测向误差研究[J]. 浙江工业大学学报, 2011, 39(2): 174-176.

作者简介

苗润苏, 1967年出生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电子测量技术、仪器仪表和嵌入式计算机系统。

E-mail: miaoqingdao@vip. 163. com

肖旺, 1975年出生, 工学硕士, 高级工程师, 主要研究方向为短波通信、无源测向定位和嵌入式计算机系统。

苗建苏, 1966年出生, 工学硕士, 高级工程师, 主要研究方向为短波通信、无源测向定位、通信信号处理和短波电离层探测。