

doi: 10.7690/bgzd.2014.12.012

北斗/INS 组合导航在某型装备中的应用设计

张颖¹, 王钤¹, 兰光武², 姚沅立³

(1. 中国兵器工业第五八研究所军品部, 四川 绵阳 621000; 2. 国营第一五七厂, 成都 611930;
3. 总装重庆军代局驻绵阳地区军代室, 四川 绵阳 621000)

摘要: 通过分析北斗卫星定位导航系统和惯性导航系统的优缺点, 设计一种基于北斗/INS 组合导航的系统数学模型。将北斗卫星定位导航系统和 INS 的信息进行组合互补, 以卡尔曼滤波作为信息融合算法, 选择间接法反馈校正模式设计组合系统, 推导出组合导航系统的状态方程和量测方程, 并根据组合导航系统的数学模型, 对组合系统进行了跑车试验。试验结果表明, 北斗/INS 组合后的导航系统相对独立导航系统具有更高的精度。

关键词: 北斗; INS; 组合导航; 信息融合; 卡尔曼滤波

中图分类号: TJ86 **文献标志码:** A

Application and Design of BeiDou/INS Integrated Navigation System in Certain Type Weaponry Equipment

Zhang Ying¹, Wang Qian¹, Lan Guangwu², Yao Yuanli³

(1. Department of Military Products, No. 58 Research Institute of China Ordnance Industry, Mianyang 621000, China;
2. No. 157 State-Owned Factory, Chengdu 611930, China; 3. PLA Presentation Office in Mianyang District, PLA Military Representation Bureau of General Equipment Headquarters in Chongqing, Mianyang 621000, China)

Abstract: According to analysis advantages and disadvantages of BeiDou satellite positioning navigation system and INS system, design system mathematical model based on BeiDou/INS integrated navigation system. Carry out composition complementary of BeiDou satellite positioning navigation system and INS information, use Kalman filter as information blend algorithm, choose indirect method to feedback correct mode and design integration system, deduce state equation and measurement equation of integrated navigation system. According to mathematical model of integrated navigation system, carry out running test of navigation system. The test results show that the BeiDou/INS integrated navigation is higher precision than independent navigation system.

Keywords: BeiDou; INS; integrate navigation; information blend; Kalman filter

0 引言

我国自行研制的北斗卫星定位导航系统, 是一种快速定位的新型卫星导航定位系统^[1], 具有全天候、高精度、三维定位等优点, 但也存在一些不足之处, 例如其可靠性在动态环境中会变差, 采集数据的频率还不够高, 在受到遮挡时定位会中断。惯性导航系统 (inertia navigation system, INS) 通过采用惯性元件测量运动载体的角速度和加速度, 从而计算出导航参数, 具有不受外界环境的影响, 不会丢失信号, 高数据更新率等优点, 但是其导航精度会随时间的增加而有所下降。若将北斗定位导航系统与惯性导航系统两者的信息进行组合互补, 不但可以提高系统的定位精度, 还可以提高系统抗干扰性能。为了实时准确地对装备进行精确导航, 提供精确和可靠的位置、速度和姿态等信息, 笔者在某武器系统中采用北斗/INS 组合导航进行了应用研究,

使得系统的定位精度和可靠性都有了很大的提高。

1 北斗卫星定位导航系统工作原理

北斗卫星定位导航系统是一种被动的导航定位系统, 由分布在不同轨道的卫星向地面发射信号, 用户通过接收机收到卫星的信号, 经过处理就能够得出卫星的距离等信息, 接收机如果同时能收到 4 颗以上的卫星就可以对当前位置进行定位。设用户坐标为 (x, y, z) , 第 i 颗卫星的坐标为 (x_i, y_i, z_i) , 则用户和第 i 颗卫星之间的距离为:

$$R_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}$$

在工程实践中, 实际测得的距离包含各种误差, 被称为“伪距”, 用 ρ 表示, 其中主要的误差是由接收机与卫星原子钟之间的时间差造成的。每测量到一颗卫星的伪距就得到一个方程, 每个方程中包

收稿日期: 2014-07-02; 修回日期: 2014-08-11

作者简介: 张颖(1975—), 男, 四川人, 本科, 高级工程师, 从事软件设计及系统集成研究。

含 4 个未知数, 即接收机当前位置的坐标 (x, y, z) 和时钟偏差 ct , 联立这 4 个方程就可以解算出接收机当前的位置, 如下式:

$$\begin{cases} \rho_1 = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} + ct \\ \rho_2 = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} + ct \\ \rho_3 = \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2} + ct \\ \rho_4 = \sqrt{(x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2 + (z_4 - z)^2} + ct \end{cases} \quad (1)$$

利用式 (1) 并通过迭代运算就可以求出接收机当前的位置。在实际使用中, 如果可以同时接收十几颗卫星的信号, 那么也就可以得到十几个方程, 通过数据处理方法如最小二乘法, 就可以得到接收机较为精确的当前位置信息。

2 惯性导航系统 (INS) 工作原理

惯性导航系统是通过加速度和角速度进行数学推算来进行定位导航的。它的工作原理建立在牛顿运动定律之上^[2], 通过惯性导航系统内部的陀螺仪和加速度计, 可以测得运动的角速度和线加速度, 对以上 2 个变量进行积分运算, 计算出惯性导航系统的速度、位置和姿态。惯性导航系统既不需要外界的信息辅助, 又不会受到外界其他因素的影响。根据构造方式的不同, 惯性导航系统分为平台式惯性导航系统和捷联式惯性导航系统 2 种, 文中采用平台式惯性导航系统。惯性导航系统位置的经度、纬度及高度的微分方程如下式:

$$\begin{cases} \dot{L} = \frac{V_x}{R_n + h} \\ \dot{\lambda} = \frac{V_y \sec L}{R_e + h} \\ \dot{h} = V_z \end{cases} \quad (2)$$

对式 (2) 积分, 并由惯性导航系统的初始位置参数 L_0, λ_0, h_0 , 得到惯性导航系统的位置更新公式如下式:

$$\begin{cases} L = \int \dot{L} dt + L_0 \\ \lambda = \int \dot{\lambda} dt + \lambda_0 \\ h = \int \dot{h} dt + h_0 \end{cases} \quad (3)$$

其中: L, λ, h 分别代表惯性导航系统的经度、纬度和高度值; R_n, R_e 分别代表地球上惯性导航系统所在位置处的子午圈和卯酉圈的曲率半径。

3 北斗/INS组合导航系统的设计

3.1 系统组成

该北斗/INS 组合导航系统主要由惯性导航装置、北斗差分用户机、信息处理计算机组成, 其中惯性导航装置主要由惯性平台、陀螺仪、加速度计、里程计、高程计以及控制电路组成。通过陀螺仪的测量轴测量地球自转角速度, 通过加速度计测量陀螺仪测量轴与水平面的夹角, 通过转换计算出方位角。通过初始位置、实时方位角、里程计和高程计, 推算出炮车当前位置的经度、纬度及高程信息。北斗差分用户机是北斗二代卫星导航定位系统的用户终端, 主要由信号接收模块、电子抗干扰模块、RNSS 定位模块、信号加注模块等组成, 能够实时解算炮车当前位置的经、纬度及高程信息。信息处理计算机由 PC104 架构的嵌入式计算机组成, 主要实现北斗/INS 组合导航的信息融合算法及计算结果显示。它通过 CAN 总线接收惯性导航装置发送的位置、速度、姿态等信息, 刷新频率为 100 Hz。通过 RS232 接口接收北斗差分用户机发送的位置、速度等信息, 刷新频率为 1 Hz。则组合导航误差数据输出频率为 1 Hz。其中惯性导航装置安装在火炮上架上, 北斗差分用户机安装在摇架上。2 种安装位置可认为在同一位置点。该组合导航系统组成图如图 1 所示。

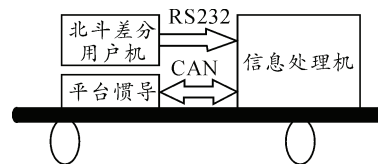


图 1 北斗/INS 组合导航组成

3.2 信息融合算法

本组合定位导航信息融合采用间接式信息融合卡尔曼滤波方式^[3], 该融合系统不参与惯导 (INS) 和北斗系统的计算流程, 融合估计过程是与北斗系统和 INS 定位解算无关的独立计算过程, 利用卡尔曼滤波算法估计出惯性导航系统各部分的误差来校正组合惯导系统的定位值^[4]。其核心是利用北斗系统对惯性导航系统进行辅助, 抑制惯导系统的误差积累。对定位导航系统而言, 除接收经融合算法的误差估计值的校正外, 定位导航系统能够保持其工作的独立性。因此, 一旦某一定位导航子系统由于某种原因提供的定位导航数据中断, 另一子系统仍然能够独立工作, 继续提供定位导航信息。

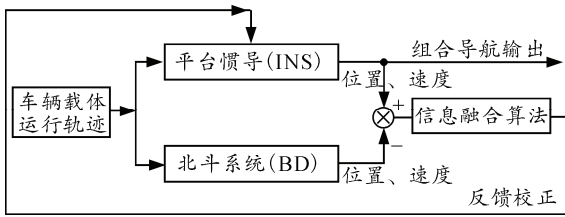


图 2 北斗/INS 组合导航信息融合

间接式信息融合算法使用 INS 提供的短时间高精度的数据,北斗系统提供长时间高稳定性的数据,利用两类观测信息差值作为组合滤波器的量测值,推算 INS 的误差估计值,并利用该估计值校正 INS

$$\mathbf{X}(t) = \begin{bmatrix} \phi_x & \phi_y & \phi_z & \delta_{v_x} & \delta_{v_y} & \delta_{v_z} & \delta L & \delta \lambda & \delta h & \varepsilon_x & \varepsilon_y & \varepsilon_z & \nabla_x & \nabla_y & \nabla_z \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

其中: ϕ_x, ϕ_y, ϕ_z 为 3 个平台失准角; $\delta_{v_x}, \delta_{v_y}, \delta_{v_z}, \delta L, \delta \lambda, \delta h$ 分别为 3 个轴上的速度误差和位置误差; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ 为 3 个陀螺仪随机漂移, $\nabla_x, \nabla_y, \nabla_z$ 为 3 个加速度计随机零位偏置。

系统白噪声转移矩阵 $\mathbf{G}(t)$ 为

$$\mathbf{G}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_b^n & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{C}_b^n \\ \mathbf{0}_{9 \times 3} & \mathbf{0}_{9 \times 3} \end{bmatrix}_{15 \times 6} \quad (6)$$

系统白噪声矢量由陀螺仪和加速度计的随机误差组成,表达式为

$$\mathbf{W}(t) = \begin{bmatrix} w_{\varepsilon_x} & w_{\varepsilon_y} & w_{\varepsilon_z} & w_{\nabla_x} & w_{\nabla_y} & w_{\nabla_z} \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

系统的状态转移阵 $\mathbf{F}(t)$ 为

$$\mathbf{F}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_N & \mathbf{F}_S \\ \mathbf{0}_{6 \times 9} & \mathbf{F}_M \end{bmatrix} \quad (8)$$

系统误差的统计特性为

$$E \{ \mathbf{W}(t) \mathbf{W}^T(j) \} = \mathbf{Q}(t) \delta(tj) \quad (9)$$

2) 建立系统量测方程。

位置、速度组合系统的位置量测信息为惯性导航系统输出的地理坐标系下的经度、纬度及高度和北斗差分用户机输出的经度、纬度及高度间的差值。速度量测信息为惯性导航系统输出的地理坐标系下三维速度和北斗差分用户机接收的地理坐标系下的三维速度的差值。

量测值为惯性导航系统与北斗差分用户机相应的位置和速度差:

的定位信息,实现限制 INS 数据长时间漂移的目的。北斗/INS 信息融合系统组成如图 2 所示。

3.3 组合导航系统的数学模型及解算步骤

1) 建立系统状态方程。

系统的状态方程为 INS 的力学编排方程。其状态方程为:

$$\mathbf{X}(t+1) = \mathbf{F}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{G}(t)\mathbf{W}(t) \quad (4)$$

其中: $\mathbf{F}(t)$ 为惯性导航系统误差方程所对应的系统状态转移矩阵; $\mathbf{G}(t)$ 为白噪声转移矩阵; $\mathbf{W}(t)$ 为系统误差白噪声矢量。系统状态变量选为

$$\mathbf{Z}(t) = \begin{bmatrix} p_1(t) - p_G(t) \\ v_1(t) - v_G(t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\text{量测方程为: } \mathbf{Z}(t) = \mathbf{H}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{V}(t) \quad (11)$$

量测矩阵 $\mathbf{H}(t)$ 为

$$\mathbf{H}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \text{diag}(1 \ 1 \ 1) & \mathbf{0}_{3 \times 9} \\ \mathbf{0}_{3 \times 6} & \text{diag}(R_m \ R_n \ \cos L \ 1) & \mathbf{0}_{3 \times 6} \end{bmatrix}^T \quad (12)$$

量测误差的统计特性为:

$$E \{ \mathbf{V}(t) \mathbf{V}^T(j) \} = \mathbf{R}(t) \delta(tj) \quad (13)$$

根据选用的状态方程,能够充分表征惯性导航系统的系统误差,因此利用经融合算法估计得到的惯性导航系统误差,去修正惯性导航系统的定位信息,不但能够有效校正定位位置、速度,而且能够及时修正平台误差,补偿惯性导航系统陀螺仪随机漂移、加速度计随机零位偏置^[5],从而实现定位精度的显著提高。此外,利用惯性导航系统的定位信息激励滤波更新状态,即惯性导航系统每解算一次即进行一次系统误差估计和定位校正,赋予北斗/惯性组合定位导航系统很强的实时定位特性。

3) 信息融合算法滤波过程。

本信息融合系统采用滤波算法去除噪声,求出其中有用的信号。在该系统中拟采用在定位导航领域应用最为广泛的卡尔曼(Kalman)滤波算法。其滤波过程如下:

设定初始值: $\hat{\mathbf{X}}(0), P(0)$ 。

计算状态一步预测:

$$\hat{\mathbf{X}}(t+1/t) = \mathbf{F}(t)\hat{\mathbf{X}}(t/t) \quad (14)$$

计算预测误差协方差:

$$P(t/t-1) = \mathbf{F}(t/t-1)P(t-1)\mathbf{F}^T(t/t-1) + \mathbf{G}(t)\mathbf{Q}(t)\mathbf{G}^T(t) \quad (15)$$

计算滤波增益:

$$\mathbf{K}(t) = P(t/t-1)\mathbf{H}^T(t)(\mathbf{H}(t)P(t/t-1)\mathbf{H}^T(t) + \mathbf{R})^{-1} \quad (16)$$

计算滤波估计值:

$$\hat{\mathbf{X}}(t) = \hat{\mathbf{X}}(t/t-1) + \mathbf{K}(t)(\mathbf{Z}(t) - \mathbf{H}(t)\hat{\mathbf{X}}(t/t-1)) \quad (17)$$

计算估计误差协方差阵:

$$\mathbf{P}(t) = (\mathbf{I} - \mathbf{K}(t)\mathbf{H}(t))P(t/t-1)(\mathbf{I} - \mathbf{K}(t)\mathbf{H}(t))^T + \mathbf{K}(t)\mathbf{R}(t)\mathbf{K}^T(t) \quad (18)$$

其中: $\mathbf{Q}(t)$ 、 $\mathbf{R}(t)$ 分别为系统误差协方差阵和量测误差协方差阵。

滤波的每次估计更新主要对系统状态量进行时间预测, 将预测的状态量和观测量一起作为输入对系统状态量进行最小二乘估计, 而得到的估计又作为下一时刻系统更新的起点。

4 组合试验及结果分析

4.1 北斗/惯性组合导航系统静态定位误差试验

静态试验时组合导航系统固定不动, 分别采集惯性导航系统和北斗差分用户机的定位数据, 采样时间为 60 min。其中陀螺仪的零位漂移 $0.5 (^{\circ})/h$, 随机漂移为 $1 (^{\circ})/h$, 加速度计的零位漂移 $1 \times 10^{-4} g$, 随机漂移为 $5 \times 10^{-4} g$, 采样纯惯性导航系统、纯北斗差分用户机和融合算法处理后的经度、纬度定位误差如图 3 所示。由图 3 不难看出, 经过融合算法处理后, 定位精度得以大大提高。

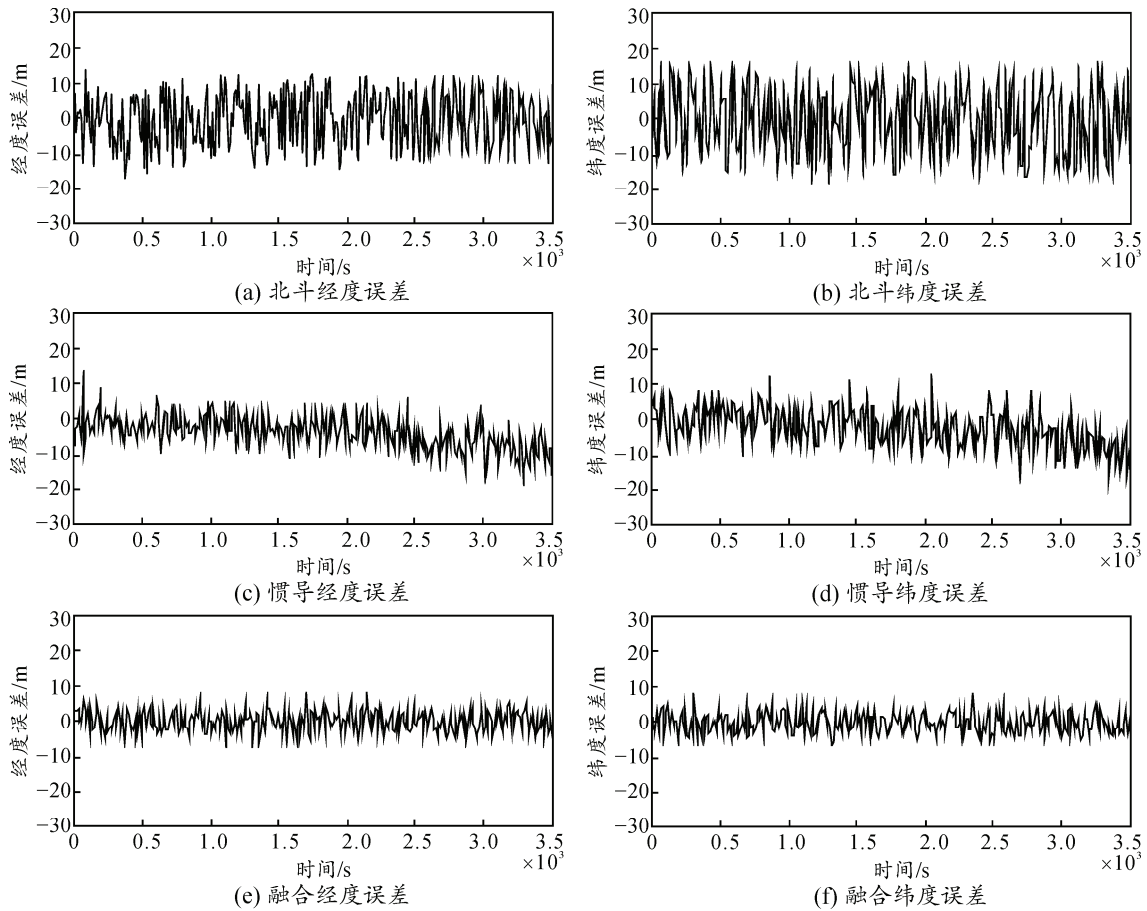


图 3 静态试验误差

4.2 北斗/INS组合导航系统动态定位误差试验

动态试验时组合导航系统在一段公路上进行, 试验设备与静态试验一致。采样纯惯性导航系统、纯北斗差分用户机和采样融合算法处理后的经度、

纬度定位误差如图 4 所示。在图 4 中可以看出: 北斗在 400~600 s 时, 由于遮挡等原因导致信号丢失而带来较大的误差, 在经过和惯导信号进行融合后, 该误差得到了显著的抑制, 且在北斗和惯导都

正常工作的情况下, 经融合输出的经度和纬度值在精度上都有所提升; 因此, 北斗系统与惯性导航系统组合后进行信息融合处理, 能有效提高导航定位

精度, 克服惯性导航系统定位误差随时间累积的缺点。当卫星信号出现异常时, 仍能提供实时的定位信息^[6]。

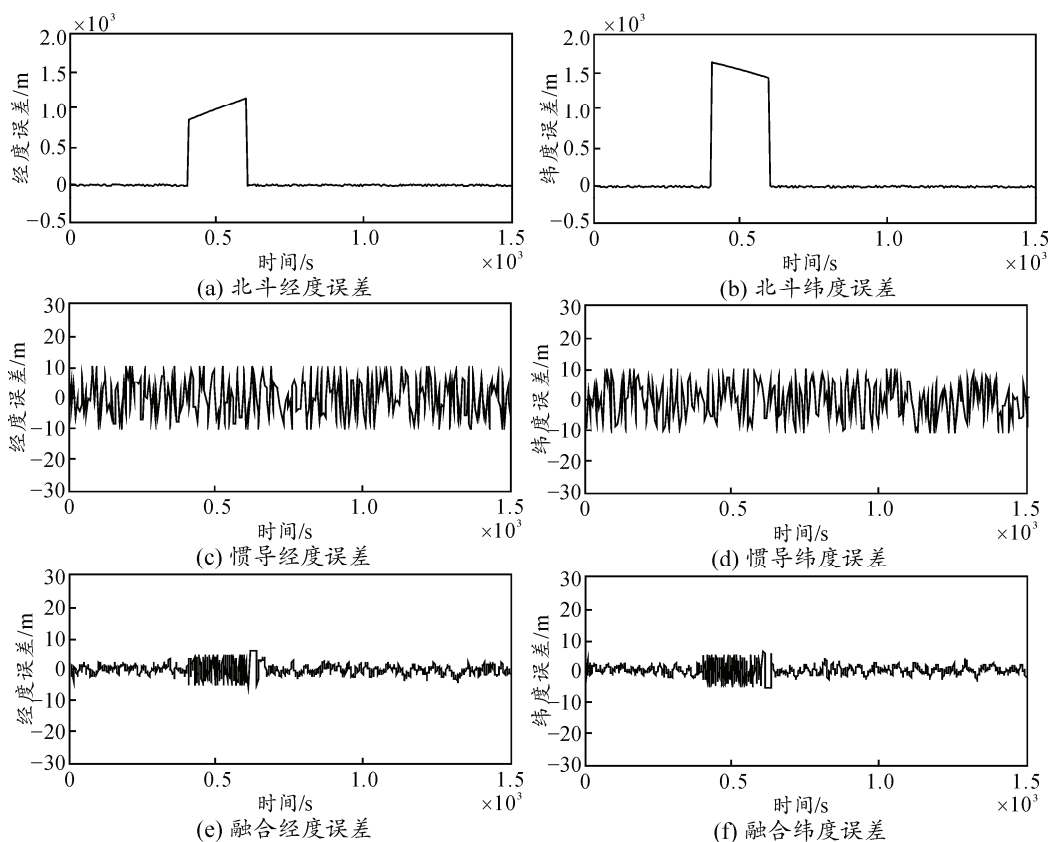


图4 动态试验误差

5 结论

根据北斗/INS 系统的互补性较强的特点, 建立了北斗/INS 速度、位置匹配的松组合模型。设计了用于北斗/INS 组合系统信息融合的卡尔曼滤波器, 利用文中信息融合解算出速度、位置信息, 并进行了试验验证。试验结果表明: 相比采用单一北斗或 INS 系统, 在该武器系统中采用北斗/INS 组合导航的定位精度和可靠性得到了明显的提高。

参考文献:

[1] 范龙, 柴洪洲. 北斗二代卫星导航系统定位精度分析方

法研究[J]. 海洋测绘, 2009, 29(1): 25-28.

- [2] 秦永元. 惯性导航[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 327-331.
- [3] 付梦引, 邓志红, 张继伟. Kalman 滤波理论及其在导航系统中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 184-196.
- [4] 秦永元, 张洪钺, 汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998: 239-242.
- [5] 刘次华. 随机过程及其应用[M]. 北京: 北京高等教育出版社, 2004: 171-204.
- [6] 王维锋, 徐万里, 聂挥宇. 基于 UKF 的北斗/INS 组合导航[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(8): 96-99.