

Study of Simulation Platform for BDS/INS Deep Integration Navigation

Tianhu Guo

School of Civil Engineering, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang Henan
Email: chenpo_chxy@126.com, chenruiran@126.com

Received: Apr. 8th, 2019; accepted: Apr. 22nd, 2019; published: Apr. 29th, 2019

Abstract

BDS/INS deep integration navigation systems can improve high precision navigation in the presence of high-dynamics, high-jamming environments, and is the focus of the current research. The design and implementation issues about constructing simulation platform for BDS/INS deep integration navigation are shown. The whole structure and information flow of the simulation platform is presented. The platform is convenient for evaluation and validation of BDS/INS deep integration navigation performance. Simulation shows that the deep integration system can improve the navigation accuracy greatly compared with tight integration system, with the position error less than 4 m and velocity error less than 0.2 m/s.

Keywords

BDS/INS, Deep Integration, Simulation Platform, Performance Analysis

BDS/INS深组合导航仿真平台研究

郭天虎

洛阳理工学院, 土木工程学院, 河南 洛阳
Email: chenpo_chxy@126.com, chenruiran@126.com

收稿日期: 2019年4月8日; 录用日期: 2019年4月22日; 发布日期: 2019年4月29日

摘要

BDS/INS深组合导航可以提高系统的导航精度、抗干扰性和动态性能, 是目前研究的重点和热点。本文给出了BDS/INS深组合导航仿真平台的设计及实现, 介绍了仿真平台的总体体系结构、信息流程及各分系统的组成。该平台便于进行深组合导航系统算法及性能验证分析, 仿真验证结果表明, 在高动态条

件下, BDS/INS深组合导航系统的位置误差稳定在4 m范围内, 速度误差稳定在0.2 m/s内。

关键词

BDS/INS, 深组合, 仿真平台, 性能分析

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

GNSS (Global Navigation Satellite System)和 INS (Inertial Navigation System)具有良好的优势互补性, 因此 GNSS/INS 组合导航被业内称之为“黄金组合” [1] [2] [3], 根据观测量的不同, 有松组合、紧组合和深组合三种组合模式[2] [3] [4]。GNSS/INS 深组合是一种深层次的、基于硬件层面的组合方式, 实现了 INS 导航参数与 GNSS 接收机相关器输出的 I/Q 信号的融合, 在高动态、强干扰、弱信号及遮挡环境中具有优越的导航性能, 是今后 GNSS/INS 组合导航应用的主要发展方向。目前, 我国的北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)已经在亚太大部分区域得到了广泛的应用, BDS/INS 深组合导航系统在民用领域可应用于无人驾驶、精密近飞机着陆、测绘、地图绘制等, 在军用领域可应用于导弹、制导炸弹、单兵导航、无人侦察机等。由于其优越的性能及广泛的应用前景, 得到国内外相关大学、研究机构高度重视[3]-[9]。

BDS/INS 深组合导航是 INS 信息与 BDS 接收机跟踪层面的融合, 涉及到 BDS 接收机内部编排, 在高动态、强干扰应用环境下进行物理或半物理仿真试验难度大, 考虑因素较多[10] [11]。而构建 BDS/INS 深组合导航仿真平台可以建立和提供接近实际的物理模型和工作参数, 从而为方案论证提供依据, 经济性和适应性强[12]。参照 GSNRx-ut™ 设计思想, 本文构建了 BDS/INS 深组合导航仿真平台, 给出了仿真平台的体系结构、信息流程及各分系统的组成, 该仿真平台可以同步输出 BDS 中频数据、INS 观测数据, 具备基带信号处理功能、INS 导航解算功能、组合导航滤波解算等功能, 可用于对 BDS/INS 深组合导航系统在高动态和弱信号环境下的导航性能进行仿真分析。此平台预留接口, 可以扩展到其它 GNSS/INS 深组合导航系统。

2. 深组合导航系统

深组合的概念源于学者 Spilker 提出的“矢量跟踪” [2], 其核心思想是利用相关器残差来更新导航参数, 利用更新后的导航参数预测 BDS 信号跟踪环路参数。目前通常有两种设计方案[7] [13] [14], 一种是级联式深组合导航系统, 其组合导航滤波器的量测值为经基带信号预处理滤波器处理后的基带 I/Q 信息; 另一种是集中式深组合导航系统, 其组合导航滤波器的量测值为基带 I/Q 信息与惯性导航估计的 I/Q 信息之差。从信息融合最优准则角度考虑, 集中式深组合导航系统在导航性能提升层面是最优的。这里以集中式深组合导航系统为例进行仿真分析。BDS/INS 深组合导航结构如图 1 所示。

从结构图中可以看出, 这种组合模式将导航参数估计与 BDS 信号跟踪融合在一起, 可同时跟踪处理所有可视北斗卫星信号。组合导航系统可以充分利用 INS 短时精度高的特点, 提供准确的动态信息, 增强 BDS 接收机对动态应力的适应性, 减小 BDS 信号跟踪环路的带宽; 同时利用导航滤波器输出信息修正 INS, 使 BDS 接收机跟踪环路仅跟踪由 INS 解算误差、BDS 接收机晶振、外部噪声等导致的多普勒移

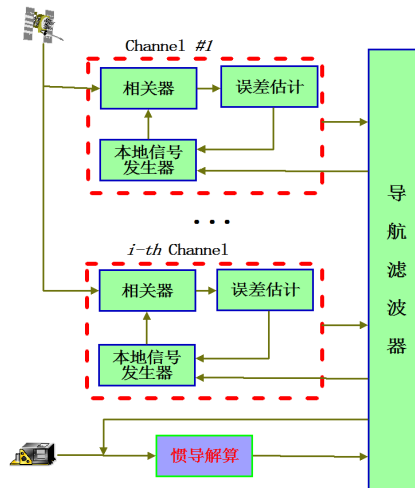


Figure 1. BDS/INS deep combined structure
图 1. BDS/INS 深组合结构图

移误差，有效提高 BDS 信号跟踪精度。当 BDS 信号受干扰或遮挡时，INS 测量值可以满足无缝导航，同时组合导航系统可以预测载体的动态信息，对 BDS 信号的 Doppler 和相位偏移信息进行连续预测，可显著减小 BDS 接收机重新捕获的时间。

3. BDS/INS 深组合导航仿真平台

BDS/INS 深组合导航仿真平台主要由以下几部分构成：运动轨迹发生器，BDS 中频信号仿真器，BDS 接收机基带信号处理，IMU 信号产生器，INS 力学编排、组合导航滤波器。平台总体结构如图 2 所示。

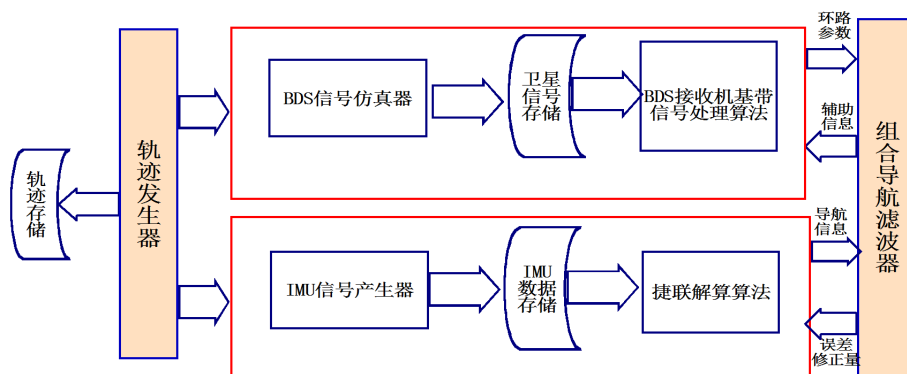


Figure 2. Overall structure of the deep combined simulation platform
图 2. 深组合仿真平台总体结构

3.1. 运动轨迹发生器

运动轨迹发生器是整个 BDS/INS 深组合导航仿真平台的基础和数据来源，可以模拟用户的各种运动(如静止、匀速、加速、拐弯、俯冲等)，其主要作用是：一是为仿真平台提出输入信息，包括用户的位置、速度、加速度、姿态等信息，用来仿真 IMU 输出、BDS 卫星导航电文、伪距信息及电离层、对流层延迟改正信息等；二是作为基准值和评判准则，对仿真结果进行误差分析，用来检验 BDS/INS 深组合导航理论模型、算法的正确性及优劣性。轨迹仿真中常用的方法是利用四阶龙格库塔法解算一组轨迹微分方程，具体仿真流程参考文献[9]。

3.2. IMU 信号产生器

基于 INS 元器件误差模型建立陀螺仪和加速度计仿真器，模拟输出的角加速度和线加速度信息，这里为了简化分析，假设初始对准已经完成并且对安装误差进行了有效补偿。

①陀螺仪仿真器

考虑到陀螺仪的误差信息，其输出为：

$$\tilde{\omega}_{ib}^b = \omega_{ib}^b + \boldsymbol{\varepsilon}_g^b \quad (1)$$

式中， $\boldsymbol{\varepsilon}_g^b$ 为陀螺元器件的误差， $\boldsymbol{\omega}_g^b$ 为载体相对于惯性坐标系在载体坐标系中的真实角加速度，表示为：

$$\boldsymbol{\omega}_{ib}^b = \mathbf{R}_L^b (\boldsymbol{\omega}_{ie}^L + \boldsymbol{\omega}_{eL}^L) + \boldsymbol{\omega}_{Lb}^b \quad (2)$$

式中，

$$\boldsymbol{\omega}_{Lb}^b = \begin{bmatrix} \cos r & 0 & \cos p \sin r \\ 0 & 1 & \sin p \\ \sin r & 0 & \cos p \cos r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{r} \\ \dot{y} \end{bmatrix} \quad (3)$$

②加速度计仿真器

加速度计的输出为：

$$\tilde{\mathbf{f}}^b = \mathbf{f}^b + \nabla_a^b \quad (4)$$

式中， ∇_a^b 为加速度计的误差， \mathbf{f}^b 为载体相对于惯性坐标系的加速度，表示为：

$$\mathbf{f}^b = \mathbf{R}_L^b \left[\dot{V}^L + (2\boldsymbol{\Omega}_e^L + \boldsymbol{\Omega}_{eL}^L) \times V^L - \mathbf{g}^L \right] \quad (5)$$

式中，相关参数参考文献[9] [15]。

3.3. BDS 中频信号仿真器

BDS 中频信号仿真器可以根据模拟的用户运动轨迹，结合 BDS 卫星星历，综合多种误差因素，模拟接收机接收到的 BDS 卫星中频信号。

①频信号数学模型

B1 信号由 I、Q 两个支路的“测距码 + 导航电文”正交调制在载波上构成[16] [17]，这里以 B1I 信号为例进行分析。第 j 颗可见 BDS 卫星发送的 B1I 信号经过空间环境传播后，其解析式为：

$$R_{B1Ij} = \sqrt{2PD_j} (t - T_p - \delta t_{iono} - \delta t_{tropo} + \delta t_{SV}) C_j (t - T_p - \delta t_{iono} - \delta t_{tropo} + \delta t_{SV}) \times \cos \left[\omega_{B1I} (t - T_p + \delta t_{iono} - \delta t_{tropo} + \delta t_{SV}) + \varphi_0 \right] + n(t) \quad (6)$$

式中， P 为接收机接收到的第 j 颗可见卫星信号的功率， T_p 为从卫星发射到接收机接收的传播延时， δt_{iono} 为电离层延时， δt_{tropo} 为对流层延时， δt_{SV} 为卫星钟差， φ_0 为初始相位， $n(t)$ 为接收到的噪声。为了便于后续基带信号处理，需要将接收到的 BDS 信号进行混频处理，将信号下变频为中频，然后进行采样处理。设本地信号为：

$$LO = 2 \cos(\omega_{LO} (t + \delta t_r)) \quad (7)$$

BDS 信号经过混频、低通滤波器后表示为：

$$S_{IFj} = \sqrt{2PD_j} (t - T_d - \delta t_{iono}) C_j (t - T_d - \delta t_{iono}) \times \cos \left[\omega_{B1I} (t - T_d + \delta t_{iono}) - \omega_{LO} (t + \delta t_r) + \varphi_0 \right] + n_j(t) \quad (8)$$

式中, δt_r 表示接收机的钟差。令:

$$\omega_{IF} = \omega_{B1I} - \omega_{LO} \tag{9}$$

$$t_s = T_d + \delta t_{ion} \tag{10}$$

$$\varphi = \varphi_0 - \omega_{B1I} (T_d - \delta t_{ion}) - \omega_{LO} \delta t_r \tag{11}$$

将式(8)进一步简化得到:

$$S_{IFj} = \sqrt{2PD_j} (t - t_s) C_j (t - t_s) \cos[\omega_{IF} t + \varphi] + n_j(t) \tag{12}$$

式中, ω_{IF} 为期望的中频信号角频率。当用户做高速运动时, 需要考虑多普勒频移引起的载波相位的变化, 因此包含所有可见卫星的中频信号表达式为:

$$S_{IF} = \sum_{j=1}^N \left\{ \sqrt{2PD_j} (t - t_s) C_j ((1 + \eta)(t - t_s)) \cos[(\omega_{IF} - \omega_d)t + \varphi] + n_j(t) \right\}_j \tag{13}$$

②仿真实现

BDS 中频信号系统仿真流程如图 3 所示, 主要包括以下功能模块: 一是 BDS 导航电文仿真模块, 基于 BDS 星历数据, 依靠 BDS-SIS-ICD-B1I-1.0 文件定义的导航电文编码格式及误差模型, 编制下行导航电文; 二是信号状态参数设置模块, 包含仿真时间、电离层延迟、对流层延迟等误差模型参数及中频信号参数的设置; 三是 BDS 中频信号生成模块, 根据仿真时间段内可视卫星数, 仿真多颗 BDS 卫星合成信号。该中频信号仿真器为 GPS、Galileo 星座预留接口, 依据相应的 ICD 文件就可以生成对应的导航电文, 结合不同星座的载波频率就可以扩展为对应星座下的中频信号。

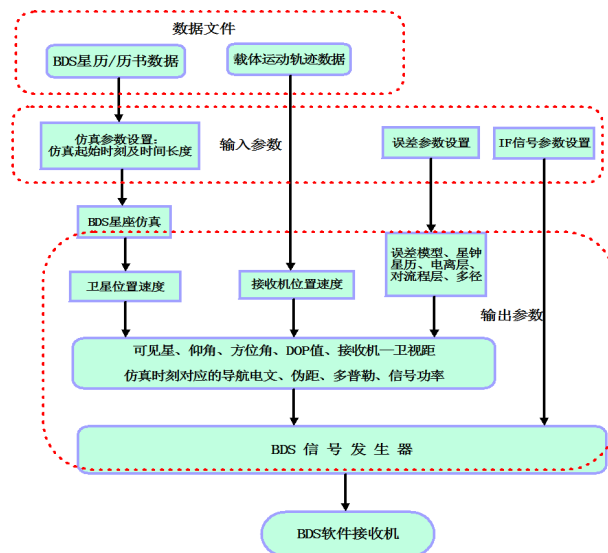


Figure 3. IF signal simulation flow chart
图 3. 中频信号仿真流程图

传输时间计算、各种误差仿真、信号采样和量化参考文献[12] [13], 与 GPS 信号 C/A 码不同, B1I 信号测距码(C_{B1I})码速率为 2.046 Mcps, 码长为 2046。C_{B1I} 码由两个线性序列 G1 和 G2 模二和产生平衡 Gold 码后截短 1 码片生成。G1 和 G2 序列分别由两个 11 级线性移位寄存器生成, 其生成多项式为:

$$\begin{aligned} G1(X) &= 1 + X + X^7 + X^8 + X^9 + X^{10} + X^{11} \\ G2(X) &= 1 + X + X^2 + X^3 + X^4 + X^5 + X^8 + X^9 + X^{11} \end{aligned} \tag{14}$$

采用一种自适应步长计算方法, 对多普勒信号进行精确的控制, 判定准则为:

$$\begin{cases} V_{\text{径向}} \leq 100 \text{ m/s} & t_{\text{step}} = 1 \text{ ms} \\ 100 \text{ m/s} < V_{\text{径向}} \leq 1000 \text{ m/s} & t_{\text{step}} = 100 \mu\text{s} \\ 1000 \text{ m/s} < V_{\text{径向}} \leq 10000 \text{ m/s} & t_{\text{step}} = 10 \mu\text{s} \end{cases} \quad (15)$$

BDS 接收机基带信号处理算法参考 GNSS 软件接收机的设计思路, 实现对 BDS 信号的捕获、跟踪、解调, 环路估计等信息直接输入导航滤波器进行后续组合解算, 这里不做详细介绍。

3.4. INS 力学编排

INS 力学编排是根据 INS 的观测信息选取适当的数学模型计算出载体的速度、位置及姿态信息等导航定位参数。具体为: 利用陀螺仪测得的载体相对于惯性坐标系的旋转角速度, 计算得到载体坐标系至导航坐标系的转换矩阵; 利用转换矩阵将加速度计测得的载体相对于惯性空间的加速度转换到导航坐标系, 并补偿掉重力和 Coriolis 加速度, 经积分得到导航定位信息[13]。相应的数据流程如图 4 所示。

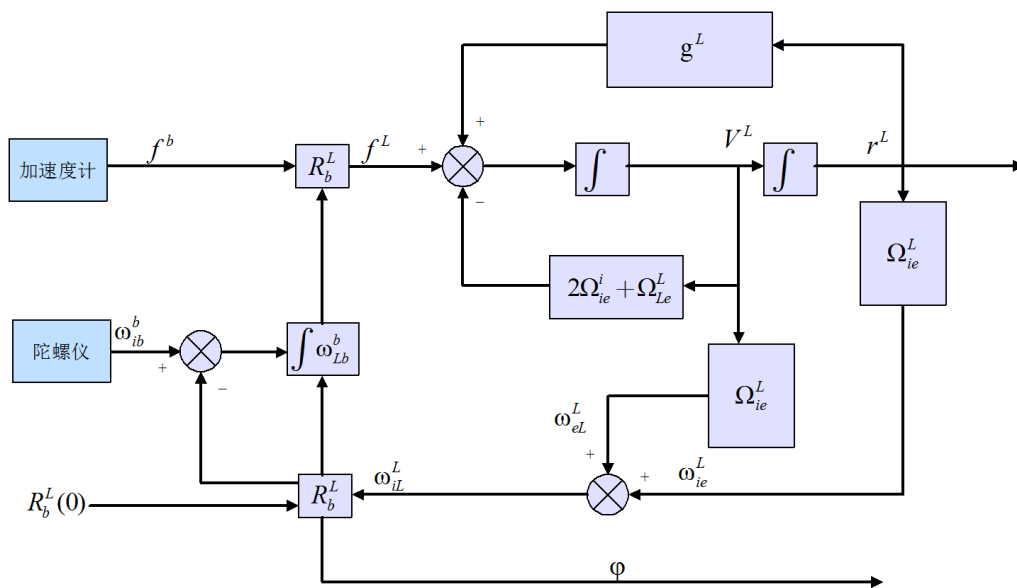


Figure 4. Flow chart of mechanical orchestration data in the local horizontal coordinate system
图 4. 当地水平坐标系下力学编排数据流程图

当地水平坐标系下的力学编排方程可以表达为:

$$\dot{X}^L = \begin{bmatrix} \dot{r}^L \\ \dot{V}^L \\ \dot{R}_b^L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D^{-1}V^L \\ R_b^L f^b - (2\Omega_{ie}^L + \Omega_{Le}^L)V^L + g^L \\ R_b^L (\Omega_{ib}^b - \Omega_{eL}^L) \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中, Ω 是角速度向量 ω 的反对称矩阵, $\Omega = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix}$, $\Omega_{ie}^L = [\omega_{ie}^L \times]$, $\Omega_{eL}^L = [\omega_{eL}^L \times]$,

$\Omega_{ib}^b = [\omega_{ib}^b \times]$, $\Omega_{Lb}^b = [\omega_{Lb}^b \times]$, $f^b = [f_x^b \ f_y^b \ f_z^b]^T$ 是加速度计量测信息, $\omega_{ib}^b = [\omega_{ibx}^b \ \omega_{iby}^b \ \omega_{ibz}^b]^T$ 是陀螺仪量测信息, $r = [\varphi \ \lambda \ h]^T$ 是位置向量信息, $V = [V_E \ V_N \ V_U]^T$ 是速度向量信息, $g^L = [0 \ 0 \ -g]^T$,

R_b^L 为姿态转换矩阵, $D^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{M+h} & 0 \\ \frac{1}{(N+h)\cos\varphi} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为转换矩阵, 更详细的参数信息参考文献[13]。

4. 性能仿真分析

为了验证 BDS/INS 深组合导航仿真平台性能, 选用的参考时刻为 2015 年 9 月 9 日 0 时 0 分 0 秒, 卫星高度截止角取 15 度, BDS 中频模拟信号的采样频率为 30 MHz, 中频频率为 7 MHz, 预检测积分为 1 ms, 组合周期为 1 s。模拟 INS 的器件特性参数见表 1, 其更新频率为 100Hz。模拟载体速度 1000 m/s, 加速度为 100 m/s², 姿态角均为 0°。初始位置信息为东经 108°, 北纬 39°, 高程为 200 m; 初始位置误差为 2 m, 初始速度误差为 0.1 m/s, 初始对准姿态角误差为 0.1°。仿真时间为 120 s, 以仿真的标称运动轨迹作为真值, 仿真结果与标称轨迹进行比较。位置误差和速度误差分别如图 5 和图 6 所示。

Table 1. INS device characteristic parameters
表 1. INS 器件特征参数

元器件	参数	量值	单位
陀螺仪	偏差稳定性	50	deg/h
	随机游走	1	deg/ \sqrt{h}
加速度计	偏差稳定性	1	mg
	随机游走	0.1	mg/ \sqrt{Hz}

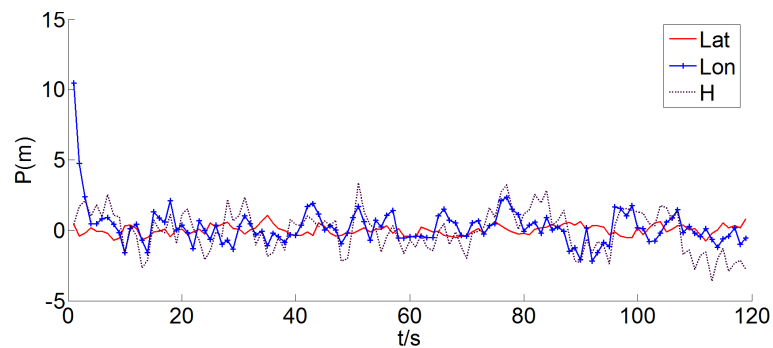


Figure 5. Position error curve

图 5. 位置误差曲线图

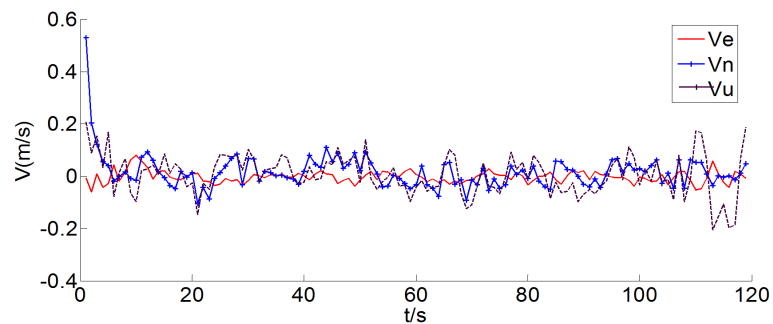


Figure 6. Speed error curve

图 6. 速度误差曲线图

从上面的仿真结果可以看出:

- 1、在高动态条件下,BDS/INS 深组合导航系统的位置、速度误差迅速收敛稳定在很小的误差范围内。位置方向的误差稳定在 4 m 范围内,速度误差稳定在 0.2 m/s 范围内。
- 2、经度方向位置误差及东向速度误差在仿真时出现较大偏差,是由于仿真时载体可观测性较差。

5. 结束语

BDS/INS 深组合导航具有广阔的应用前景,是目前研究的重点和热点。进行物理和半物理仿真试验,代价昂贵且试验难度大,而构建全数字仿真平台可以建立和提供接近实际的物理模型和工作参数,从而为方案论证提供依据,经济性和适应性强。本文给出 BDS/INS 深组合导航仿真平台的设计及实现方法,对系仿真平台的体系结构及信息流程进行详细的介绍。并以此平台为基础进行仿真分析,结果表明,高动态应用背景下,BDS/MEMS IMU 深组合导航系统的位置误差稳定在 4 m 范围内,速度误差稳定在 0.2 m/s 内,这也表明了本文构建的 BDS/INS 深组合导航平台的正确性及有效性。后续将开展干扰情况下 BDS/INS 深组合导航精度相关研究,本研究内容对下一步设计 BDS/INS 深组合导航样机具有指导意义。

参考文献

- [1] 贾超广,肖海霞.基于卫星信号模拟器的北斗接收机性能测试与分析[J].导航定位学报,2013,1(4):14-17.
- [2] 唐康华,吴美平,胡小平.MEMS IMU 辅助的高性能 GPS 接收机设计[J].测绘学报,2008,37(1):128-134.
- [3] 高鹏,闫立伟,富立,王玲玲.一种微惯性/软件接收机超紧组合方案研究[C]//中国科学院高技术研究与发展局,中国卫星导航定位应用管理中心.第一届中国卫星导航学术年会论文集.2010:316-323.
- [4] Jovancevic, A., Brown, A., Ganguly, S., Noronha, J. and Sirpatil, B. (2004) Ultra Tight Coupling Implementation Using Real Time Software Receiver. *Proceedings of ION GNSS 2004*, Long Beach, 21-24 September 2004, 1575-1586.
- [5] Babu, R. and Wang, J. (2005) Analysis of INS Derived Doppler Effects on Carrier Tracking Loop. *The Journal of Navigation*, **58**, 493-507. <https://doi.org/10.1017/S0373463305003309>
- [6] Babu, R. and Wang, J. (2006) Ultra-Tight Integration of Pseudolites with INS. *Proceedings of IEEE/ION PLANS 2006*, San Diego, 25-27 April 2006, 705-713.
- [7] Sun, D. (2010) Ultra-Tight GPS/Reduced IMU for Land Vehicle Navigation. Canada UCGE Reports 20305, the University of Calgary, Calgary.
- [8] Woessner, W. and Noronha, J. (2006) A Software Defined Real-Time Ultra-Tightly Coupled GNSS-INS Architecture. *ION GNSS 19th International Technical Meeting of the Satellite Division*, Fort Worth, 26-29 September 2006, 2695-2703.
- [9] 何晓峰.北斗/微惯性组合导航方法研究[D]:[博士学位论文].长沙:国防科学技术大学,2009.
- [10] 祖乘法.“北斗二号”民用软件接收机关键技术研究[D]:[博士学位论文].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010.
- [11] 董俊杰.基于 Matlab 的北斗二代 B1 频点软件接收机研究与实现[D]:[硕士学位论文].西安:长安大学,2014.
- [12] 罗正平.北斗二号民用软件接收机的算法研究与仿真[D]:[硕士学位论文].成都:电子科技大学,2012.
- [13] 陈坡.GNSS/INS 深组合导航理论与方法研究[D]:[博士学位论文].郑州:解放军信息工程大学,2013.
- [14] 文立,李荣冰,刘建业.基于北斗二代的多导航星座的惯性深组合算法研究[C]//中国科学院高技术研究与发展局,中国卫星导航定位应用管理中心.第一届中国卫星导航学术年会论文集.
- [15] 王新龙,于洁.SINS 辅助 GPS 软件接收机的设计与实现[C]//中国科学院高技术研究与发展局,中国卫星导航定位应用管理中心.第一届中国卫星导航学术年会论文集.
- [16] 中国卫星导航系统管理办公室.北斗卫星导航系统公开服务性能规范(1.0 版).2013.
- [17] 中国卫星导航系统管理办公室.北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件(1.0 版).2012.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2331-0235，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：jsta@hanspub.org