

GPS/BDS/INS 紧组合测量系统实现以及性能分析

李智强¹, 王青江²

(1. 石家庄市公路管理处, 河北 石家庄 050000; 2. 武威市土地规划勘测院, 甘肃 武威 733000)

摘要: 推导了 GPS/BDS/SINS 紧组合 Kalman 滤波模型, 并且使用 C 语言编制了相应的紧组合程序, 通过跑车试验验证算法的可靠性。跑车结果表明 GPS/BDS/INS 紧组合能够增加可观测卫星的数量, 并且能够有效改善单系统的观测精度。跑车实测结果表明 GPS/BDS/INS 紧组合的结果在北东天 3 个方向 RMS 为 2.7, 2.1, 2.1 m, 试验结果验证了算法的正确性。

关键词: GNSS; 北斗卫星导航系统; 多模紧组合; 接收机钟差

中图分类号: TU198 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2018)03-0081-05

0 引言

GNSS(Global Navigation Satellite System) 全球卫星导航系统能够为全球用户提供实时、全天候的高精度定位结果, 目前已经广泛应用于测绘、交通等领域^[1-2]。然而信号容易受到遮挡而影响定位结果。INS(Inertial Navigation System) 是一种自主性强、短时精度高的导航系统, 但是导航定位误差会随时间积累, 难以满足长时间独立导航需求。GNSS/INS 组合导航系统目前已广泛应用于车载导航、桥梁形变监测, 以及轨道不平顺性检测等领域, GNSS/INS 组合系统在工程应用中具有广阔的应用前景。按照组合方式划分, GNSS/INS 组合导航系统可以划分为松组合、紧组合以及深组合 3 种组合方式。松组合利用接收机的定位测速信息与惯导系统进行组合, 因此必须要求可见星数量大于 4 颗; 而紧组合是基于伪距、伪距率层面的组合, 在卫星可见星数少于 4 颗时仍可以维持较长时间的导航结果, 因此研究目标是紧组合方式。

北斗卫星导航系统是中国自主建设的新一代卫星导航系统, 目前正在不断完善。2017 年 11 月 5 日, 北斗三号的首批组网卫星开始发射, 拉开了北斗三号建设的序幕。GPS 在全球卫星导航市场中占有主导地位, 但是美国为了保障其国家安全, 对 GPS 采取选择性开放的限制。因此 GPS 定位的可用性和可靠性得不到保障。研究 GPS/BDS/INS 组合导航算法一方面可以增加可观测卫星的数量提高系统的可靠性, 另一方面可以摆脱对 GPS 系统的依赖, 对民用和军用两方面都有重要的意义。GNSS/INS 组合导航系统能够充分利用各子系统的信息实现信息融合与互补, 提高系统的整体导航精度和可靠性^[3]。

本文详细介绍了 GPS/BDS 坐标系统和时间系统的统一方法, 推导并建立了 GPS/BDS/INS 紧组合卡尔曼量测方程和状态方程, 最终实现了 GPS/BDS/INS 紧组合算法。通过跑车实验验证了算法的正确性, 实验结果表明 GPS、BDS 双系统与惯导进行组合能够有效提高系统的精度和可靠性。

1 多系统紧组合定位原理与方法

1.1 GPS、BDS 时间系统和坐标系统的统一

GPS 系统采用的时间基准是 GPS 时(GPST), GPST 以国际原子时(TAI) 作为时间基准, 原点定义在 UTC(USNO) 1980 年 1 月 6 日零时^[4]。北斗系统的时间基准为北斗时(BDT), BDT 采用国际单位制(SI) 秒为基本单位连续累计, 不闰秒, 起始历元为 UTC(NTSC) 2006 年 1 月 1 日零时, 采用周和周内秒计数^[5]。从 1980 年 1 月 1 日到 2006 年 1 月 1 日期间 UTC 共经过 14 次跳秒。因此 GPST 与 BDT 在时间原点上相

收稿日期: 2018-02-01 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxb.2018.03.13

作者简介: 李智强(1984—), 男, 工程师, 主要从事桥梁设计以及道路测量方向的研究工作。E-mail: 417397061@qq.com

李智强, 王青江. GPS/BDS/INS 紧组合测量系统实现以及性能分析[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2018, 31(3): 81-85.

差 1 356 周外还相差 14 s。除了整秒的差别, BDT 与 UTC 之间还存在微小的偏差, 此偏差在 100 ns 以内(模 1 s)。因此 GSPT 与 BDT 的转换关系如下

$$GPST = BDT + 14 + T_1 + T_0 \quad (1)$$

式中 T_1 代表 GPST 与 BDT 定义的原点间时间差(1 356 周加上 14 s); T_0 代表不足 1s 的微小差别。在实际解算当中, 北斗的导航电文中有可能以北斗周及周内秒表示, 也有可能以 GPS 周及周内秒表示。当为前者时需要加上 1 356 周以及 14 s, 而当为后者时只需要加上 14 s 即可将 BDT 统一到 GPS 时间系统下。

在坐标系统上, GPS 采用的是 WGS84 坐标系系统, 而 BDS 系统采用的是 CGCS2000 坐标系统。在定义上 WGS84 与 CGCS2000 关于坐标系原点、尺度、定向以及定向的演变都是相同的。两个坐标系统采用的参考椭球的 4 个椭球常数(a, f, CM, ω) 唯有扁率 f 有微小的差异^[6]。相同的点在两个坐标系统下的差异不超过几厘米。本文中采用基于伪距的组合, 精度在米级, 坐标系统的差异对定位造成的影响可以忽略, 因此本文在算法实现过程中没有考虑坐标系统的差异。

1.2 紧组合 Kalman 滤波模型

紧组合 Kalman 滤波的状态方程如下:

$$\dot{X}(t) = F(t)X(t) + G(t)w(t) \quad (2)$$

式中 $X(t)$ 为状态参数阵; $F(t)$ 为系统状态的转移矩阵; $w(t)$ 为系统状态的白噪声过程; $G(t)$ 为系统状态噪声的驱动阵。可以表示为

$$X(t) = (\delta r_N \quad \delta r_E \quad \delta r_D \quad \delta v_N \quad \delta v_E \quad \delta v_D \quad \psi_N \quad \psi_E \quad \psi_D \quad b_{g_x} \quad b_{g_y} \quad b_{g_z} \quad b_{a_x} \quad b_{a_y} \quad b_{a_z} \quad \delta t_{u_{gps}} \quad \delta t_{u_{rugs}} \quad \delta t_{u_{bds}} \quad \delta t_{u_{rubs}})^T \quad (3)$$

式中 δr_i 代表位置修正量; δv_i 代表速度修正量; ψ_i 代表姿态角改正量; b_{g_i} 代表陀螺零偏误差; b_{a_i} 代表加表零偏误差; $\delta t_{u_{gps}}$ $\delta t_{u_{rugs}}$ 依次代表 GPS 接收机钟差等效距离和钟漂等效速度; $\delta t_{u_{bds}}$ $\delta t_{u_{rubs}}$ 依次代表 BDS 接收机钟差等效距离和钟漂等效速度。

建立状态方程时陀螺和加速度计零偏被建模成一阶高斯马尔科夫过程: $b = -b/T + w$, 其中 T 是一阶高斯马尔科夫过程的相关时间, 其值可以通过阿兰方差分析的方法来获得, 具体可以参考文献[9]; w 代表一阶高斯马尔科夫过程的驱动白噪声。

接收机钟差建立的模型为: $b_{clk} = f + \eta_b$, $f = \eta_f$ 。其中 b 和 f 分别代表接收机钟差和接收机钟漂。其中 η_b η_f 分别代表接收机钟差和钟漂的驱动白噪声。

GPS/BDS/INS 紧组合算法中涉及到两组接收机钟差参数, 造成这个现象的原因在于 GPS 和 BDS 时间系统的定义不一致, 即两个系统除了整数秒的改正还存在微小的偏差(即公式(1)中的 T_0), 另一方面在于 GPS 系统和 BDS 各自系统内部对测量伪距改正不完全, 而接收机误差吸收了这些误差, 此外因为两个系统所用的信号频率不同因此信号的硬件延迟时间不一样。因此在建立状态模型中必须设定两组接收机钟差和钟漂参数。

在实际工程应用中, 为了便于计算机滤波处理, 通常需要将连续系统方程离散化处理, 按离散系统的滤波方程来计算。将式(2)离散化后可得

$$X_k = \Phi_{k,k-1}X_{k-1} + \Gamma_{k-1}W_{k-1} \quad (4)$$

式中 X_k X_{k-1} 分别为 k 和 $k-1$ 时刻的状态向量; $\Phi_{k,k-1}$ 为离散后的状态转移矩阵; Γ_{k-1} 为系统噪声驱动阵; W_{k-1} 为状态的噪声向量。

1.3 量测方程

GPS/INS 紧组合导航系统伪距量测方程为: $Z_r = H_r X + V_r$ 。

假定在某个观测历元中有 m 颗可用的 GPS 卫星 n 颗可用的 BDS 卫星, 可用卫星总数为 $l = m + n$ 。

$Z_r = [dr_1 \quad dr_2 \quad \cdots \quad dr_l]^T$, $\delta \rho_i$ 为天线至第 i 颗卫星的几何距离与伪距量测量的差值 $V_r = [v_{r1} \quad v_{r2} \quad \cdots \quad v_{rl}]^T$, $v_{ri} = [CV_{t_i} + CV_{tr} - (V_{ion})_i - (V_{trop})_i]$ 为卫星钟差、接收机钟差、电离层以及对流层改正项。

$$H_e = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 $H_1 = [(A_p C_1)_{m \times 3} \quad O_{m \times 3} \quad (A_p C_1 C_2)_{m \times 3} \quad O_{m \times 12} \quad (I_p)_{m \times 1} \quad O_{m \times 3}]_{m \times 25}$; $H_2 = [(A_p C_1)_{n \times 3} \quad O_{n \times 3} \quad (A_p C_1 C_2)_{n \times 3} \quad O_{n \times 14} \quad (I_p)_{n \times 1} \quad O_{n \times 1}]_{n \times 25}$ 。 H_1 与 H_2 的区别在于最后 4 列, 分别与 GPS、BDS 系统的接收机钟差与钟漂相对应, 其中

$$A_p = \begin{bmatrix} \frac{x-x_{s1}}{r_1} & \frac{y-y_{s1}}{r_1} & \frac{z-z_{s1}}{r_1} \\ \frac{x-x_{s2}}{r_2} & \frac{y-y_{s2}}{r_2} & \frac{z-z_{s2}}{r_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x-x_{sl}}{r_l} & \frac{y-y_{sl}}{r_l} & \frac{z-z_{sl}}{r_l} \end{bmatrix} \quad C_1 = \begin{bmatrix} \frac{-(R_N+h)\cos\lambda\sin\varphi}{R_M+h} & -\sin\lambda & -\cos\varphi\cos\lambda \\ \frac{-(R_N+h)\sin\varphi\sin\lambda}{R_M+h} & \cos\lambda & -\cos\varphi\cos\lambda \\ \frac{-[R_N(1-e^2)+h]\cos\varphi}{R_M+h} & 0 & -\sin\varphi \end{bmatrix} \quad (6)$$

使用 GPS/BDS 双系统与惯导进行组合的另一个关键问题是定权问题。对于 GPS 与 BDS 系统内部的卫星观测量的定权通常采用高度角定权模型, 即

$$\sigma_i^2 = \begin{cases} \sigma^2/\sin^2 E & E < 30 \\ \sigma^2 & E \geq 30^\circ \end{cases} \quad (7)$$

而 GPS 与 BDS 系统因为伪距观测噪声的不同, 系统间的权值存在一个比例, 很多学者对此问题进行过研究, 具体可参考文献 [7]。根据前人经验选取 GPS 与 BDS 权重比为 1: 0.8。

1.4 卡尔曼滤波方程

卡尔曼滤波方程分为预测和更新两个过程, 其中预测过程方程如下

$$\begin{cases} X_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} X_{k-1} \\ P_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \Gamma_{k,k-1} Q_{k-1} \Gamma_{k,k-1}^T \end{cases} \quad (8)$$

更新过程方程如下

$$\begin{cases} K_k = P_{k,k-1} H_k^T [H_k P_{k,k-1} H_k^T + R_k]^{-1} \\ X_k = X_{k,k-1} + K_k [Z_k - H_k X_{k,k-1}] \\ P_k = [1 - K_k H_k] P_{k,k-1} [1 - K_k H_k]^T + K_k R_k K_k^T \end{cases} \quad (9)$$

图 1 给出了紧组合算法的结构图。

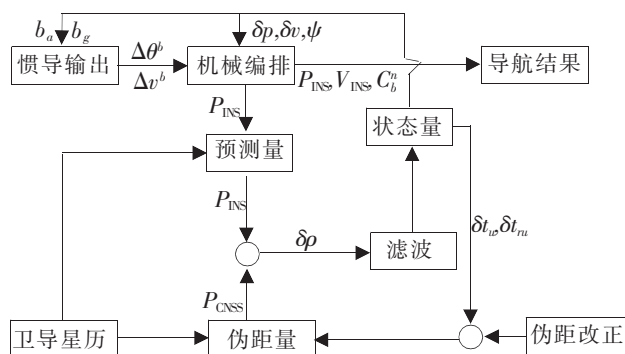


图 1 紧组合算法结构图

2 算例和结果分析

为了验证算法的正确性, 进行了跑车测试, 跑车时长约为 2 h, 跑车过程中搭载了天宝 Net R9 接收机, 此款接收机能够接收 GPS、BDS、GLONASS 等多个卫星导航系统信号。惯导选用了德国 iMAR 公司生产的 FSAS, FSAS 是战术级的惯导, 其陀螺零偏不稳定性为 $0.1^\circ/\text{h}$, 加速度计零偏不稳定性为 1.0 mg 。

实验开始前在楼顶架设基站, 通过后处理, 能够得到精度为厘米级的 GPS RTK 结果。后处理得到 GPS RTK 与 FSAS 松组合的结果精度为厘米级, 因此可以当作基于伪距的紧组合的参考真值。图 2 显示

了跑车的真实轨迹。

紧组合处理了 3 种模式的数据,分别是 GPS/INS、BDS/INS、GPS/BDS/INS。图 2 显示了跑车测试过程可观测的卫星数量。从图 3 可以看出 GPS 单系统可观测星的数量为 4~8 颗, BDS 单系统的可观测星的数量为 6~10 颗,双系统可观测星的数量为 12~17 颗与单系统相比大大增加了可观测星的数量。

图 4 显示了 GPS 系统以及 BDS 系统的接收机钟差等效距离和接收机钟漂等效速度。从图中可以看出 GPS 系统的接收机钟差等效距离约为 -20 m,而 BDS 系统的接收机钟差等效距离约为 20 m,钟差量级为 10^{-7} ,因此在建立状态方程时必须区分对待。

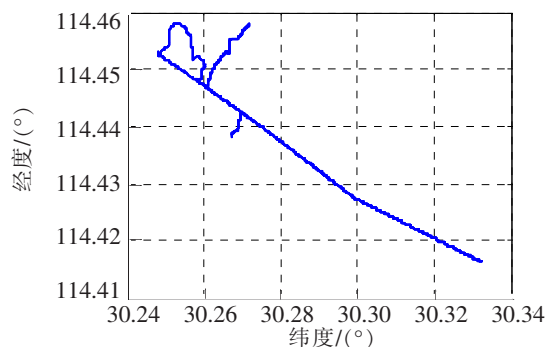


图 2 跑车测试轨迹

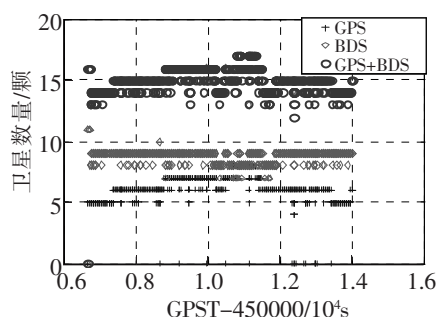


图 3 GPS 与 BDS 系统可见卫星数量

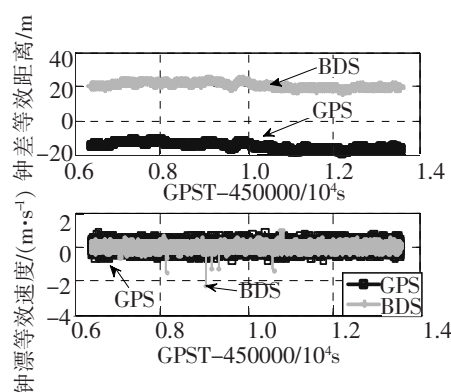


图 4 GPS 与 BDS 的接收机钟差与钟漂

以 GPS RTK 与 FSAS 松组合的结果作为参考真值得到 3 种模式的误差。图 5 显示了北方向、东方向 and 天方向 3 个分量的误差。通过图 5 可以看出 BDS/INS 的组合结果误差一般不超过 10 m,与 BDS/INS 紧组合模式相比 GPS/INS、GPS/BDS/INS 组合结果较好。

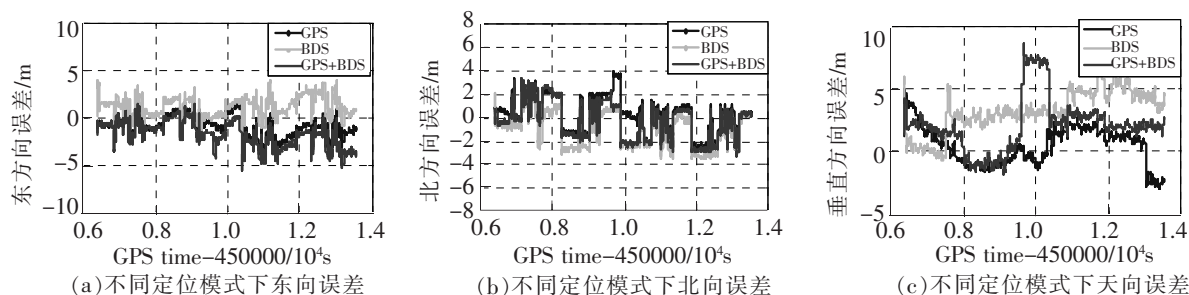


图 5 3 种组合模式的位置误差

为了进一步对比 3 种组合模式的精度,计算了 3 种组合模式下误差的统计值。表 1 显示了北、东、天 3 个分量上误差的均方根、均值以及最大值。通过表 1 可以看出 GPS/BDS/INS 组合模式相对于其它两种组合模式均有所改善,但是相比于 GPS/INS 紧组合改善不多,其原因在于 GPS/INS 紧组合模式本来精度已经较高,而且所选的路径观测条件比较好, GPS 单系统可用的卫星数量较多,因此多系统组合的优势未体现出来。

表 1 导航误差统计结果									m
组合模式	RMS			Mean			Max		
	北	东	天	北	东	天	北	东	天
GPS/INS	2.8	2.5	2.6	-0.5	1.6	2.2	8.7	5.8	6.2
BDS/INS	3.7	6.9	3.3	-2.7	6.6	1.6	8.7	11.4	9.7
GPS/BDS/INS	2.7	2.1	2.1	-0.2	0.6	1.4	8.7	5.5	5.7

3 结论

本文推导并建立了 GPS/BDS/INS 紧组合卡尔曼滤波方程。在建立观测方程时需要分别考虑 GPS、BDS 两个系统的接收机钟差、钟漂。跑车结果显示在观测条件较好的情况下 GPS/BDS/INS 紧组合的结果在北东天 3 个方向的 RMS 均在 3 m 以内,统计结果验证了算法的正确性。GPS/BDS/INS 紧组合相对于 GPS/INS、BDS/INS 紧组合模式能够增加可观测的卫星数,北、东、天 3 个分量误差的 RMS 为 2.7,2.1,2.1 m,优于后两者的统计结果 2.8,2.5,2.6 m 与 3.7,6.9,3.3 m,这说明多系统组合能够有效提高导航定位的精度。

参 考 文 献

[1]梁建昌,李卫国. GPS 在青银高速公路线路控制测量中的应用[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版,2003,16(2): 47-49.

[2]段恩新. 复杂测区条件下精密三角高程测量技术的研究[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版,2012,25(3): 98-102.

[3]Cox Jr, D B. Integration of gps with inertial navigation systems[J]. Navigation, Journal of the Institute of Navigation 1978, 25, 206-245.

[4]金彪,杨少文,刘万科. GPS/BDS 组合单点定位算法及结果分析[J]. 海洋测绘,2013,33(4): 39-41.

[5]薛冬,黄国荣,彭兴钊,等. SINS/GPS/BDS 紧耦合系统研究[J]. 计算机测量与控制,2012,20(9): 250-253 + 256.

[6]张晓东. 光电测距仪实现线路横断面快速测量[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版,2001,14(3): 92-94.

[7]李鹤峰,党亚民,秘金钟,等. BDS/GPS/GLONASS 融合定位模型及性能分析[J]. 测绘通报,2014(9): 1-5.

Implementation of GPS/BDS/INS Tightly Coupled Measurement System and Its Performance Analysis

Li Zhiqiang¹, Wang Qingjiang²

(1. Shijiazhuang Highway Management Office, Shijiazhuang 050000, China;
2. Wuwei Surveying and Designing Institute, Wuwei 733000, China)

Abstract: In this paper, the tightly coupled GPS/BDS/SINS Kalman filter model was deduced and established. The Kalman filter was realized by using C programming language and the algorithm was tested with real van test data. Test results show that the number of visible satellite can significantly increase with GPS/BDS/INS system and the navigation accuracy can be significantly improved. The measured results show that the RMS of positioning error of GPS/BDS/INS system is 2.7, 2.1 and 2.1m, which verifies the correctness of the algorithm.

Key words: GNSS; BDS; multiple tight-coupled system; receiver clock error