



BDS/GPS 融合定位中系统偏差 补偿模型及其性能分析

曾安敏^{1,2,3} 杨元喜^{2,3} 景一帆¹ 明锋¹

1 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州, 450052

2 地理信息工程国家重点实验室,陕西 西安, 710054

3 西安测绘研究所,陕西 西安, 710054

摘要: 多系统的融合定位可有效提高用户导航定位的连续性、可靠性及定位精度。针对 BDS、GPS 观测量间存在系统间偏差的实际情况,建立了顾及系统误差的 BDS/GPS 融合定位模型,即在函数模型中增加附加参数来吸收系统间偏差,构造了新的顾及先验信息的融合定位模型,分析了这种新融合模型的特点及其对定位结果的影响。利用不同品牌接收机在中国不同地域对新的融合模型进行试验,试验结果表明:BDS、GPS 观测量存在系统间偏差,且不同接收机的系统间偏差量值并不一样;增加系统参数的融合定位模型能较好地吸收 BDS、GPS 观测量的系统间偏差的影响,改善其融合导航定位性能;在观测卫星数不足、单系统不能定位的情况下,考虑先验信息的融合定位模型仍能获得较好的定位结果。

关键词: 卫星导航系统;融合定位;系统间偏差;贝叶斯估计

中图法分类号:P228.41

文献标志码:A

多卫星导航系统显著增加了可见卫星观测量,为提高用户的多 GNSS 组合导航定位授时精度和可靠性提供了重要支撑,多系统观测量的融合处理已成为 GNSS 应用的主要方向^[1]。由于各导航卫星系统的时间系统和坐标系统定义各不相同^[2,3],这种时间系统、坐标系统的不统一将会给组合导航定位带来一定影响。此外,由于多卫星系统体制的不尽相同,给用户接收机的制造也带来了一定困难,通常不同系统的信号使用不同信号通道,造成不同系统间信号通道存在硬件延迟偏差,这种硬件延迟的系统间偏差也会给导航定位带来影响^[4]。在 BDS/GPS 的单点融合定位中,由于这些系统间偏差对数据处理的影响是系统性的^[5],如果不合理控制这些系统间偏差的影响,势必会影响融合定位精度。

近年来,BDS/GPS 组合相对定位算法研究方面获得了广泛研究^[6-10],分别从几米、几公里到十几公里基线进行了 BDS/GPS 差分定位试验。通过构造无电离层的宽巷观测量建立了 BDS/GPS 组合的动态定位模型,模拟计算表明,百公里基线其定位精度达到分米级^[10];通过同时估计

位置参数和大气参数建立非组合观测量处理模型,在 98 km 基线获得了 1 cm 精度的 BDS/GPS 定位结果^[8,9];在随机模型方面,通过方差分量估计调整不同导航系统间的随机误差影响^[11]。上述定位方式一般都是相对(差分)定位融合,在单卫星系统内构建双差观测模型消除(或削弱)了路径共性误差、时空基准差以及通道延迟等系统间偏差的影响。在多 GNSS 系统的单点融合定位方面,可以通过分别估计不同卫星系统“接收机钟差”的方式进行融合定位^[12,13],也可以通过构造不同卫星系统间偏差的虚拟观测来进行融合定位^[14,15],它们都能明显改善单点融合定位效果。

本文主要从系统误差的角度,讨论 BDS、GPS 伪距融合导航定位中系统间偏差的补偿问题,对其性能进行了理论探讨,并利用多台不同接收机厂商的 BDS/GPS 接收机数据进行了分析。

1 BDS/GPS 融合定位模型

设 BDS、GPS 的伪距观测模型 P_i 为:

$$\begin{aligned} P_l^B &= \rho_l^B + c\delta t_l - c\delta t^B + I_l + \Delta\rho_{trop} + \Delta\rho_{rel} + \Delta\rho_{mult} + D^B + \epsilon^B \\ P_l^G &= \rho_l^G + c\delta t_l - c\delta t^G + I_l + \Delta\rho_{trop} + \Delta\rho_{rel} + \Delta\rho_{mult} + D_+^G \epsilon^G \end{aligned} \quad (1)$$

式中, ρ_l^B 、 ρ_l^G 为 BDS、GPS 卫星到接收机之间的几何距离; I^l 、 $\Delta\rho_{trop}$ 为电离层和对流层延迟; c 为光速; δt_l 为接收机钟差; δt^B 、 δt^G 为 BDS 和 GPS 卫星钟差; $\Delta\rho_{rel}$ 为相对论效应引起的误差; $\Delta\rho_{mult}$ 为接收机多路径误差; D^B 、 D^G 为 BDS、GPS 硬件延迟误差; ϵ^B 、 ϵ^G 为 BDS、GPS 伪距观测噪声。

卫星钟差可通过卫星星历获得, 同时假定观测量中大气层延迟、相对论效应等误差已通过模型得以改正,BDS 和 GPS 间的系统间偏差已经改算, 即各类模型误差理论上基本消除, 如此, 观测方程中仅包含测站位置和接收机钟差未知参数, 则观测模型可简写为:

$$\begin{cases} \mathbf{L}_G = \mathbf{A}_G \mathbf{X} + \boldsymbol{\epsilon}_G \\ \mathbf{L}_B = \mathbf{A}_B \mathbf{X} + \boldsymbol{\epsilon}_B \end{cases} \quad (2)$$

式中, \mathbf{L}_G 、 \mathbf{L}_B 为 GPS、BDS 卫星经过各项改正后的观测向量; \mathbf{X} 为测站位置和接收机钟差参数向量; \mathbf{A}_G 、 \mathbf{A}_B 为 GPS、BDS 卫星的设计矩阵; $\boldsymbol{\epsilon}_G$ 、 $\boldsymbol{\epsilon}_B$ 为 GPS、BDS 伪距观测噪声。

由于基于原始观测的融合相对于导出结果的融合具有众多的优势^[16], 这里仅探求原始观测量的融合模型。若考虑 BDS 的权 P_B 和 GPS 的权 P_G , 则 BDS/GPS 融合定位的最小二乘解为:

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{N}_G + \mathbf{N}_B)^{-1} (\mathbf{U}_G + \mathbf{U}_B) \quad (3)$$

式中, $\mathbf{N}_X = \mathbf{N}_G + \mathbf{N}_B$, $\mathbf{N}_G = \mathbf{A}_G^\top \mathbf{P}_G \mathbf{A}_G$, $\mathbf{N}_B = \mathbf{A}_B^\top \mathbf{P}_B \mathbf{A}_B$, $\mathbf{U}_G = \mathbf{A}_G^\top \mathbf{P}_G \mathbf{L}_G$, $\mathbf{U}_B = \mathbf{A}_B^\top \mathbf{P}_B \mathbf{L}_B$ 。

相应的协因素阵为:

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{X}}} = \mathbf{N}_X^{-1} = (\mathbf{N}_G + \mathbf{N}_B)^{-1} \quad (4)$$

其精度衰减因子 DOP 为:

$$DOP_I = \sqrt{\text{tr}(\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{X}}})} \quad (5)$$

显然, 相对于单一的 GPS 和 BDS 定位的精度衰减因子, 有:

$$DOP_I < \sqrt{\text{tr}(\mathbf{N}_G^{-1})} \quad (6)$$

$$DOP_I < \sqrt{\text{tr}(\mathbf{N}_B^{-1})} \quad (7)$$

可以看出, 双系统融合定位的几何观测强度得以加强, 且只要满足多系统互操作要求, 则融合定位精度一定优于单一系统的定位精度。关于 BDS 导航系统对 GNSS 的贡献已有系统论述^[17]。

2 顾及系统间偏差的融合模型

多卫星系统的融合首先必须满足互操作要求, 即坐标基准和时间基准偏差定义一致, 偏差基本可消除(或预报)。关于坐标系统的差异,

CGCS2000 与 WGS84 在定义上是一致的, 其实现也仅存在厘米级差异, 对导航用户而言, 可认为是一致的^[6,7], 只要用户使用 ICD 文件中定义的椭球常数值, 则可认为其坐标框架是统一的^[18]。由于 GPST 和 BDT 起始历元不同, BDT 与 GPST 间除存在 14 s 整秒差外, 还存在秒以下的微小偏差 $d\tau_{sys}$ ^[9], 这种时间系统间偏差应由导航系统播发, 但用户接收机往往无法获得, 第三方的监测结果又往往滞后, 即使能够获得, 其精度也偏低。此外, 由于接收机设计原因, 不同信号的通道硬件延迟常常是不同的, 不同频率间的通道误差也可能不同, 且无法精确标定(或标定精度并不高); 此外, 电离层改正、对流层改正等都是通过模型进行改正的, 改正后仍存在残余误差。如此, BDS、GPS 观测量间包含 3 类系统偏差, 即时间系统偏差 $d\tau_{sys}$ 、通道硬件延迟偏差 $D^B - D^G$ 和其他误差改正后的系统间偏差 dS , 由于它们无法分离, 常把它们作为一个整体, 即有:

$$S = c \cdot d\tau_{sys} + (D^B - D^G) + dS \quad (8)$$

因此, 可考虑在 BDS/GPS 融合模型中附加“系统参数”来对其进行补偿, 式(2)可改写为:

$$\begin{cases} \mathbf{L}_G = \mathbf{A}_G \mathbf{X} + \boldsymbol{\epsilon}_G \\ \mathbf{L}_B = \mathbf{A}_B \mathbf{X} + \mathbf{C}S + \boldsymbol{\epsilon}_B \end{cases} \quad (9)$$

式中, S 为 BDS 相对于 GPS 的系统间偏差; \mathbf{C} 为设计矩阵。

设 BDS 的 GEO、IGSO、MEO 相对于 GPS 系统间偏差分别为 s_G 、 s_I 、 s_M , 即有 $S = (s_G \ s_I \ s_M)^T$, 则式(9)的设计矩阵 \mathbf{C} 为:

$$\mathbf{C}^T = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \underbrace{0 \ 0 \ 0}_{n_{BG}} & \underbrace{0 \ 0 \ 0}_{n_{BI}} & \underbrace{0 \ 0 \ 0}_{n_{BM}} & & & \underbrace{1 \ \dots \ 1}_{n_{BM}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, n_{BG} 为观测到的 GEO 卫星数; n_{BI} 为观测到的 IGSO 卫星数; n_{BM} 为观测到的 MEO 卫星数。

如果不区分卫星类型, 则 BDS 卫星相对于 GPS 只有一个系统间偏差, 即式(9)的设计矩阵 \mathbf{C} 为:

$$\mathbf{C} = \underbrace{(1 \ 1 \ \dots \ 1)}_{n_B} {}^T \quad (11)$$

式中, n_B 为 BDS 可见卫星数。

进一步, 式(9)可写成误差方程:

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}} + \mathbf{B}\hat{S} - \mathbf{L} \quad (12)$$

式中, $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_G \\ \mathbf{A}_B \end{bmatrix}$, $\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_G \\ \mathbf{L}_B \end{bmatrix}$, $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{C} \end{bmatrix}$, $\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_G & 0 \\ 0 & \mathbf{P}_B \end{bmatrix}$ 。

显然, 系统间偏差 \mathbf{S} 对参数估值 $\hat{\mathbf{X}}$ 的影响可用近似公式表示:

$$\mathbf{IF} = -(\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{S} \quad (13)$$

系统间偏差 \mathbf{S} 越大, 对参数估值 $\hat{\mathbf{X}}$ 的影响越大。

对式(9), 可以采用附加系统参数的观测模型进行解算, 其解为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{X}} \\ \hat{\mathbf{S}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{N}_X & \mathbf{N}_{XS} \\ \mathbf{N}_{SX} & \mathbf{N}_S \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{PL} \\ \mathbf{B}^T \mathbf{PL} \end{pmatrix} \\ \mathbf{Q}(\hat{\mathbf{x}}) = \begin{pmatrix} \mathbf{Q}_X & \mathbf{Q}_{XS} \\ \mathbf{Q}_{SX} & \mathbf{Q}_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{N}_X & \mathbf{N}_{XS} \\ \mathbf{N}_{SX} & \mathbf{N}_S \end{pmatrix}^{-1} \end{array} \right. \quad (14)$$

式中, $\mathbf{N}_S = \mathbf{B}^T \mathbf{PB}$, $\mathbf{N}_{XS} = \mathbf{A}^T \mathbf{PB} = \mathbf{N}_{SX}^T$, $\mathbf{N}_S = \mathbf{B}^T \mathbf{PA}$ 。

若系统误差参数具有先验信息 $\bar{\mathbf{S}}$, 其相应权为 $\mathbf{P}_S = \Sigma_S^{-1}$, 则依据 Bayes 原理有^[19]:

$$\begin{pmatrix} \hat{\mathbf{X}} \\ \hat{\mathbf{S}} \end{pmatrix} = (\mathbf{N}_{\begin{bmatrix} X \\ S \end{bmatrix}} + \mathbf{N}_S)^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{PL} \\ \mathbf{B}^T \mathbf{PL} + \mathbf{P}_S \bar{\mathbf{S}} \end{pmatrix} \quad (15)$$

式中, $\mathbf{N}_{\begin{bmatrix} X \\ S \end{bmatrix}} = \begin{pmatrix} \mathbf{N}_X & \mathbf{N}_{XS} \\ \mathbf{N}_{SX} & \mathbf{N}_S \end{pmatrix}$, $\mathbf{N}_S = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{P}_S \end{pmatrix}$ 。

考虑系统误差参数先验信息后的位置和钟差参数的协因数为:

$$\mathbf{Q}_X = \mathbf{N}_X^{-1} + \mathbf{N}_{XS}^{-1} \mathbf{Z}_2^{-1} \mathbf{N}_{SX} \mathbf{N}_X^{-1} \quad (16)$$

其中, $\mathbf{Z}_2 = (\mathbf{N}_S + \mathbf{P}_S) - \mathbf{N}_{SX} \mathbf{N}_X^{-1} \mathbf{N}_{XS}$, 其逆矩阵为:

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_2^{-1} &= ((\mathbf{N}_S + \mathbf{P}_S) - \mathbf{N}_{SX} \mathbf{N}_X^{-1} \mathbf{N}_{XS})^{-1} = \\ &= (\mathbf{Z}_1 + \mathbf{P}_S)^{-1} = \mathbf{Z}_1^{-1} - \mathbf{Z}_1^{-1} (\mathbf{Z}_1^{-1} + \mathbf{P}_S^{-1})^{-1} \mathbf{Z}_1^{-1} \end{aligned} \quad (17)$$

通过上面的推导, 可以得出以下结论。

1) 当卫星导航系统间不满足兼容性与互操作要求时, 即卫星导航系统观测量间存在系统间偏差, 需要在函数模型中增加额外的系统参数来补偿其影响。增加系统参数一般会降低观测几何强度。若系统间偏差参数设置合理, 则能改善数据处理的函数模型, 如此, 导航定位精度仅与测量精度有关, 则导航定位精度会有明显改善。

2) 考虑系统间偏差的 BDS/GPS 观测量融合定位模型, 除了估计位置、钟差参数外, 还要估计系统间偏差参数, 要求观测到的卫星总数至少 5 颗(仅增加一个系统参数情况)。若系统间偏差具有可靠的先验信息, 则可见卫星数可减少到 4 颗, 并不要求是同一卫星系统; 而基于结果的融合要

求每个系统都应能解算出参数, 需要每个系统至少观测 4 颗卫星。显然, 基于附加系统参数的观测融合模型明显比基于定位结果的融合要求的卫星数要少, 这对困难观测条件下卫星观测数不足的导航用户具有较明显优势。

3) 当获得了系统参数的先验值 $\bar{\mathbf{S}}$ 时(如以前的计算值、用户标定、厂家标定等), 则会在一定程度上改善观测几何强度。当 $\bar{\mathbf{S}}$ 精度较高时, 即可直接用来修正观测量, 减少一个待估参数。由于系统间偏差参数具有先验信息, 在极端情况下, 考虑先验信息的融合定位模型仍可给出定位结果, 如 GPS 和 BDS 可见卫星均只有 2 颗, 或者 GPS 可见卫星有 3 颗, BDS 可见卫星只有 1 颗。

3 计算与分析

利用多家接收机厂商生产的 BDS/GPS 双模接收机在中国多地进行观测试验(不同的地方使用不同厂商的接收机, 观测情况见表 1), 数据采样率为 30 s, 三亚、桂林、宜昌、呼和浩特、乌兰浩特站的观测时间为 2014 年 8 月 14~16 日, 天津站的观测时间为 2013 年 11 月 3 日。试验中, 卫星截止高度角为 10°, 对流层延迟误差采用 Saastamoinen 模型进行改正, 电离层模型采用 Klobuchar 模型进行改正。BDS/GPS 观测量间的权比, 经过试验不同定权方法对结果影响不大, 试验中采用高度角定权。

3.1 系统间偏差的短期稳定性分析

关于 BDS 相对于 GPS 的系统间偏差的特征分析, 本文作者已有初步研究, 研究表明: 系统间偏差性质与接收机相关, 不同的接收机有不同大小的系统间偏差, 但同一接收机的系统间偏差在短期内是较稳定的^[20]。利用式(9)计算了连续 3 d 的系统间偏差, 见图 1, 对应天的尺度均值和标准偏差见表 1, 从表 1 可以得出以下结论。

1) 不同测站(即不同接收机)计算的 BDS/GPS 的系统间偏差是不同的, 其大小存在明显的分群, 三亚、桂林站所使用的接收机为 Trimble R9, 这 3 d 系统间偏差分别在 100 ns、110 ns 附近, 单历元系统间偏差呈现明显系统性特征, 在 8 月 14 日、15 日、16 日这两站的系统间偏差相差 10.7 ns、10.6 ns、7.5 ns; 宜昌、呼和浩特、乌兰浩特站所使用接收机为国产接收机, 其系统间偏差分别为 26 ns、24 ns、25 ns, 其站间差异小于 10 ns。这说明系统间偏差大小与接收机类型有关。

表1 不同测站(仪器)系统间偏差的精度统计

Tab. 1 Statistics of Estimated Inter-system Bias in Different Stations with Different Type Receivers

测站	站号	仪器	天气	系统间偏差/ns		
				2014-08-14	2014-08-15	2014-08-16
三亚	C	Trimble R9	晴	99.33±2.17	98.14±3.06	97.60±2.99
桂林	D	Trimble R9	阴转雨	110.24±3.26	108.76±4.038	105.05±3.12
宜昌	E	UR370-CORS	夜雨	26.13±3.17	28.96±7.09	28.96±7.09
呼和浩特	F	HC N71	晴	24.39±5.04	18.85±4.69	20.47±5.41
乌兰浩特	G	M300U	暴雨	25.53±3.31	21.37±4.99	22.64±5.65

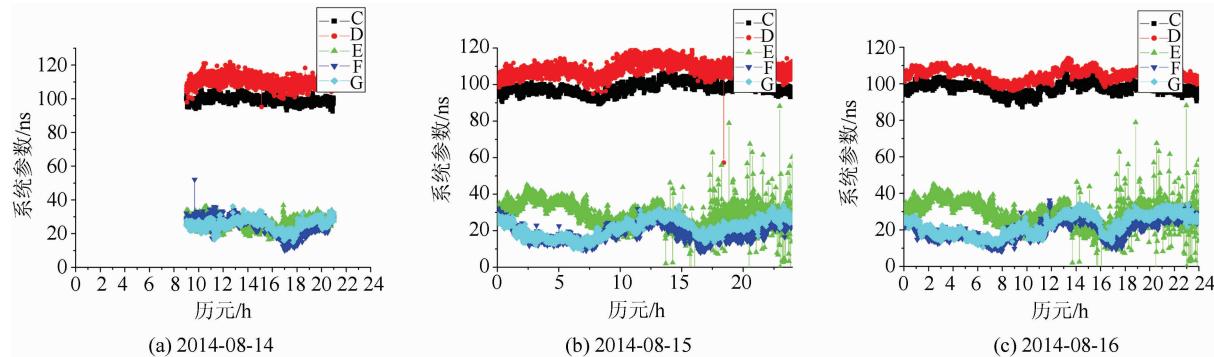


图1 不同测站(仪器)系统参数

Fig. 1 Inter-System Bias of the Different Stations or Different Type Receivers

2)从连续3 d观测结果看,三亚站的系统间偏差分别为99 ns、98 ns、97 ns,其标准差分别为2.17 ns、3.06 ns和2.99 ns,利用这3 d统计值,采用假设检验方法进行差异化分析,检验表明这3 d系统间偏差没有显著性差异,其他站的检验结果也没有显著性差异,说明同一接收机的系统间偏差在3 d范围内是稳定的。

3)在15日、16日这两天,宜昌站的单历元系统间偏差的天统计精度为7.09 ns,明显低于其他测站。从图1也发现15日、16日下午13点后的系统间偏差存在较明显的波动。当时天气为不间断中雨,经验模型不能完全消除大气改正的影响,造成观测数据精度偏低。

3.2 系统间偏差对定位结果的影响分析

为了分析BDS/GPS融合定位中系统间偏差对定位结果的影响,设计了如下3种验证方案。

方案1假定BDS、GPS间系统间偏差已统一(或者不存在),按式(2)进行融合定位,估计参数为测站位置和接收机钟差;

方案2考虑BDS、GPS间系统间偏差的影响,按式(14)进行融合定位,估计参数为测站位置、接收机钟差和系统间偏差;

方案3利用前一天估计的系统间偏差作为先验信息,其先验方差分别取3 ns和0.1 ns,按式(15)进行融合定位,估计参数为测站位置、接收机钟差和系统间偏差。

计算数据为8月16日数据,系统间偏差采用

15日数据计算值,表2~4给出了不同计算方案定位结果的精度统计,图2给出了天津站的DOP值。

1)GPS、BDS单独定位结果的平面分量精度约为2 m,高程分量精度约为4 m,从5个站统计看GPS单独定位结果精度略优于BDS,BDS定位结果存在明显的系统偏差,天津站BDS定位结

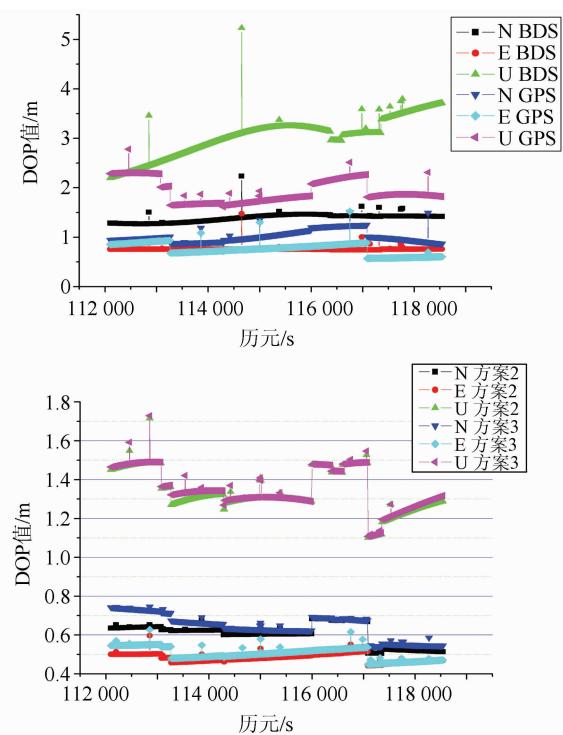


图2 天津站GPS/BDS的DOP值

Fig. 2 DOP Values of Different Schemes

果精度在 N、E、U 方向分别为 2.8 m、1.4 m、6.7 m, 这可能与当前 BDS 卫星系统星座以 GEO、IGSO 卫星为主、卫星星历以及其多径效应较大有关。

表 2 单系统定位精度统计/m

Tab. 2 Statistical Results of Estimated Position by Using GPS or BDS/m

测站	GPS			BDS		
	N	E	U	N	E	U
三亚	±1.06	±1.37	±3.09	±1.39	±1.22	±3.78
桂林	±1.06	±1.28	±2.88	±1.53	±1.31	±4.15
宜昌	±1.82	±1.78	±4.02	±1.59	±1.96	±4.57
呼和浩特	±1.62	±1.55	±2.83	±2.28	±1.45	±3.52
乌兰浩特	±1.51	±1.69	±2.71	±2.87	±2.04	±4.17
天津	±2.56	±2.23	±4.22	±2.87	±1.44	±6.72

表 3 考虑系统间偏差前后的融合定位结果精度统计/m

Tab. 3 Statistical Results of Different Schemes/m

测站	GPS			BDS		
	N	E	U	N	E	U
三亚	±2.86	±3.52	±12.05	±0.69	±0.94	±2.09
桂林	±3.14	±3.47	±12.02	±0.69	±0.87	±2.04
宜昌	±1.60	±2.41	±5.20	±1.46	±2.36	±4.50
呼和浩特	±1.27	±1.26	±3.07	±1.07	±1.1	±1.90
乌兰浩特	±1.46	±1.48	±3.35	±1.04	±1.19	±1.88
天津	±48.87	±69.90	±151.72	±1.44	±1.44	±3.83

表 4 系统间偏差不同约束的融合定位结果精度统计/m

Tab. 4 Statistical Results of Different Constraints/m

测站	先验约束为 0.1 ns			先验约束为 3 ns		
	N	E	U	N	E	U
三亚	±0.70	±0.96	±1.89	±0.69	±0.94	±2.05
桂林	±0.74	±0.96	±1.96	±0.69	±0.88	±2.02
宜昌	±1.43	±2.43	±3.87	±1.43	±2.37	±4.40
呼和浩特	±0.99	±1.13	±1.91	±1.02	±1.10	±1.89
乌兰浩特	±1.11	±1.25	±1.95	±1.01	±1.19	±1.87
天津	±1.38	±1.37	±3.40	±1.54	±1.44	±3.39

2) 采用式(2)进行 BDS/GPS 融合定位的 DOP 值明显改善。以天津站为例, 相对于 BDS, GPS/BDS 融合的 DOP 值在 N、E、U 方向分别改善 40%、35%、30%。理论上, DOP 值变小定位结果精度应有较大改善, 但实际情况是其定位结果的精度不仅没有明显改善, 反而变差了。这说明采用式(2)的融合定位模型并不适合 BDS/GPS 组合定位。因为式(2)并未考虑系统偏差, 而实测资料表明 BDS、GPS 数据间存在系统间偏差, 即 BDS/GPS 融合定位的函数模型与观测数据不相匹配。

3) 结合表 1、表 3 分析, 有些站的系统间偏差较大, 如天津站的系统间偏差达到 2 613 ns, 采用式(2)的定位结果的精度也差; 有些站的系统间偏

差相对较小, 如宜昌、呼和浩特、乌兰浩特站, 式(2)的定位精度相对要好的多。由式(13)可知, 系统间偏差越大, 对结果的影响越大。这说明 BDS/GPS 融合模型式(2)的定位精度与其系统间偏差的大小有关。

4) 通过增加系统参数补偿 BDS、GPS 的系统间偏差的影响, 采用式(14)较式(2)计算的位置参数精度明显提高, 特别是平面位置精度。系统间偏差较大的天津站 N、E、U 方向的精度分别由 48.87 m、69.90 m、151.72 m 提高到 1.44 m、1.44 m、3.83 m, 提高超过 90%; 系统间偏差较小的呼和浩特站融合后 N、E、U 方向的精度分别由 1.27 m、1.26 m、3.07 m 提高到 1.07 m、1.10 m、1.90 m, 提高了约 20%。

5) 将先前历元估计的系统间偏差值作为先验信息, 并进行强约束(其先验方差取 0.1 ns), 按式(15)进行融合计算, 其精度较不考虑系统间偏差的融合模型式(2)有明显提高, 天津站 N、E、U 方向的精度分别由 48.87 m、69.90 m、151.72 m 提高到 1.38 m、1.37 m、3.40 m, 提高超过 90%, 其他站也有不同程度的提高; 较不考虑先验信息的融合模型式(14)其精度也略有改善, 其 N、E、U 方向的精度由 1.44 m、1.44 m、3.83 m 提高到 1.38 m、1.37 m、3.40 m, 提高约 5%。

6) 采用顾及先验信息的式(15)进行融合定位(其先验方差取 3 ns), 较不考虑系统间偏差的融合模型式(2)有明显的精度改善, 但这种考虑系统参数先验信息与未考虑系统参数先验信息的融合定位式(15)、式(14)的结果差异较小, 天津站考虑系统间偏差与否的融合定位 N、E、U 方向的平均偏差为 0.07 m、0.07 m、-0.06 m。这说明在可见卫星足够的情况下, 系统间偏差先验信息对融合定位的贡献并不太明显。

7) 通过增加系统参数的融合定位模型式(14)、式(15)较 BDS、GPS 单独定位结果, 其定位精度具有明显提高。以三亚站为例, 融合定位模型定位结果 N、E、U 方向分别为 0.7 m、0.94 m、2.05 m, GPS 定位结果相应为 1.06 m、1.37 m、3.09 m, 提高约 33%、31%、33%; BDS 定位结果精度为 1.39 m、1.22 m、3.78 m, 提高约 49%、22%、34%。其他站也有不同程度的提高。

3.3 系统间偏差在卫星数有限条件下的应用

在城市、峡谷等特殊地区, 天上可见卫星数有限, 单系统定位精度往往很差, 融合定位结果也差。为了讨论在卫星数较少观测条件下系统间偏差对融合定位结果精度的影响, 分别模拟了特殊

环境下的融合定位:(1)观测卫星为3颗GPS卫星和3颗BDS卫星;(2)观测卫星为3颗GPS卫星和2颗BDS卫星。由于当前BDS、GPS观测卫星都小于4颗,使用单独BDS或者单独GPS都

无法定位及基于结果的融合。表5给出了考虑系统间偏差各种情况的融合定位结果的精度统计情况,图3给出了顾及先验信息的融合定位结果。

表5 可见卫星有限条件下GPS/BDS融合定位结果精度统计/m

Tab. 5 Statistical Results of BDS/GPS Fusion Positioning with Limited Satellite Visibility/m

卫星数	N			E			U		
	均值	标准值	均方根	均值	标准值	均方根	均值	标准值	均方根
6颗	估计	9.50	±8.24	12.57	-11.07	±1.95	11.24	-2.01	±6.54
	强约束	8.31	±2.99	8.82	-4.48	±1.84	4.84	-10.09	±6.67
	松约束	4.27	±2.83	5.12	-6.11	±1.67	6.33	-8.16	±6.52
5颗	估计	1.08	±18.73	18.73	-8.46	±4.32	9.50	-8.91	±13.06
	强约束	13.21	±4.07	13.83	-4.10	±1.89	4.52	-15.82	±8.05
	松约束	10.86	±4.76	11.85	-5.10	±1.81	5.41	14.46	±8.23
									16.63

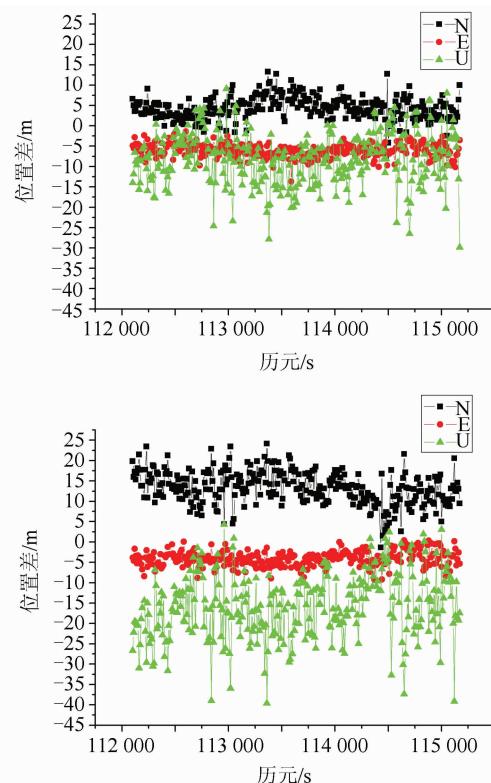


图3 可见卫星有限条件下GPS/BDS

融合定位结果与参考值的位置差

Fig. 3 Positioning Discrepancies Using GPS/BDS Fusion Model with Limited Satellite Visibility

1)在3颗GPS卫星和3颗BDS卫星情况下,不考虑系统间偏差先验信息的融合模型仍然能定位,但定位精度相对较差,N、E、U方向的精度分别为8.24 m、1.95 m、6.54 m,而系统间偏差强约束下的融合定位精度仍然能达到2.99 m、1.84 m、6.67 m,系统间偏差较松约束下的融合定位精度仍然能达到2.83 m、1.67 m、6.52 m。

2)在3颗GPS卫星和2颗BDS卫星情况下,不考虑系统间偏差先验信息的融合定位式(14),在N、E、U方向的精度分别为18.73 m、4.32 m、

13.06 m,相对于6颗卫星时的定位,在N、U方向精度降幅超过100%,而系统间偏差强约束下的融合定位精度仍然能达到4.07 m、1.89 m、8.05 m,较松约束下的融合定位精度仍然能够达到4.76 m、1.81 m、8.23 m。

3)在卫星数较少的情况下,不考虑系统间偏差先验信息的融合定位精度明显低于考虑系统间偏差先验信息的融合定位。这说明在卫星数较少的情况下,顾及先验信息的融合定位效果更好,系统间偏差先验信息对融合定位的精度提高具有支持作用。

4 结语

本文从包含各项误差改正的原始观测方程出发,建立了顾及系统误差的BDS/GPS融合定位模型,利用实测数据分析了系统间偏差的短期稳定性、不同融合模型的定位效果以及系统间偏差在卫星数不足时的应用。

(1)多卫星导航系统显著增加了用户可用观测量,但由于BDS/GPS间存在时空基准差异、硬件延迟等系统间偏差,导致不同系统间的观测量自洽性变差。若这类系统误差得到很好的控制,融合定位将能显著提高定位精度;否则,多系统的融合导航将不但不会提高定位精度,甚至可能会降低定位精度。

(2)不同接收机间,BDS、GPS观测量的系统间偏差量值并不一致;利用4种品牌接收机5个测站连续3 d的实测数据分析后表明,同一接收机的系统间偏差在短期内是稳定的。

(3)引入模型补偿参数的融合定位模型,尽管表面上减弱了观测几何强度,但明显抑制了系统间偏差的影响。

(4) 在空间卫星较少的情况下,若系统误差补偿参数具有先验信息,则应充分利用先验信息改善观测几何强度,提高导航定位精度,提升导航系统的组合性能指标,在城市、峡谷等特殊情况具有广阔前景。

参 考 文 献

- [1] Yang Yuanxi. Progress, Contribution and Challenges of Compass/Beidou Satellite Navigation System [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(1):1-6(杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[J]. 测绘学报,2010,39(1):1-6)
- [2] National Imagery and Mapping. Department of Defense World Geodetic System 1984 [S]. NIMA TR8350.2, Third edition, 1997
- [3] China Satellite Navigation Office. Report on the Development of BeiDou Navigation Satellite System (Version 2.0)[R]. May 2012 (Ch)(中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统发展报告(2.0 版)[R]. 2012 年 5 月)
- [4] Cai Changsheng, Li Zhenghang, Zhang Xiaohong. A Study of Calibration method of GPS Satellite and Receiver Instrumental Biases [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2002(4):15-16(蔡昌盛,李征航,张小红. GPS 系统硬件延迟修正方法的探讨[J]. 测绘通报,2002(4):15-16)
- [5] Yang Yuanxi, Li Jinlong, Xu Junyi, et al. Generalized DOPs with Consideration of the Influence Function of Signal-in-Space Errors [J]. *The Journal of Navigation*, 2011, 64: 3-18
- [6] Gao Xinwei, Guo Jinjun, Chen Pengfei, et al. Fusion Positioning of BeiDou/GPS Based on Spatio-Temporal System Unification [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(5):743-748,755(高星伟,过静珺,程鹏飞,等. 基于时空系统统一的北斗与 GPS 融合定位[J]. 测绘学报,2012,41(5):743-758,755)
- [7] Wang Shijin, Bei Jinzhong, Li Dehai, et al. Real-Time Kinematic Positioning Algorithm of GPS/BDS [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(5):621-625(王世进,秘金钟,李得海,等. GPS/BDS 的 RTK 定位算法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2014,39(5): 621-625)
- [8] He Haibo, Li Jinlong, Yang Yuanxi, et al. Performance Assessment of Single-and Dual-frequency BeiDou/GPS Single-epoch Kinematic Positioning[J]. *GPS Solution*, 2014, 18(3):393-403
- [9] Li Jinlong. BDS/GPS Multi-frequency Real-Time Kinematic Positioning Theory and Algorithms [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2014(李金龙. 北斗/GPS 多频实时精密定位理论与算法[D]. 郑州:信息工程大学,2014)
- [10] Guo Hairong, He Haibo, Li Jinlong, et al. Estimation and Mitigation of the Main Errors for Centimetre-level Compass RTK Solutions over Medium-long Baselines [J]. *The Journal of Navigation*, 2011, 64, S113-S126
- [11] Jin Yifan, Zeng Anmin. Fusion Positioning of BDS/GPS Based on Variance Component Estimation and Its Application for Geodetic Control Network[C]. Lecture Note in Electrical Engineering, V1, Springer, 2014
- [12] Gao Xingwei, Ge Maorong. Data Processing for Pseudo-range Positioning of GPS/GLONASS [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 1999(4):8-9, 13(高星伟,葛茂荣. GPS/GLONASS 单点定位的数据处理[J]. 测绘通报,1999(4):8-9,13)
- [13] Cai C, Gao Y. A Combined GPS/GLONASS Navigation Algorithm for use with Limited Satellite Visibility [J]. *The Journal of Navigation*, 2009(62): 671-685
- [14] Angrisano A, Gaglione S, Gioia C. Performance Assessment of GPS/GLONASS Single Point Positioning in an Urban Environment[J]. *Acta Geod Geophys*, 2013(48): 149-161
- [15] Montenbruck O, Hauschild A, Hessels U Characterization of GPS/GIOVE Sensor Stations in the CONGO Network[J]. *GPS Solutions*, 2011, 15:193-205
- [16] Yang Yuanxi, Zeng Anmin. Fusion Modes of Various Geodetic Observations and Their Analysis [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(8):1-4(杨元喜,曾安敏. 大地测量数据融合模式及其分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2008,33(8):1-4)
- [17] Yang Yuanxi, Li Jinlong, Xu Junyi, et al. Contribution of the COMPASS Satellite Navigation System to Global PNT Users[J]. *Chin Sci Bull*, 2011, 56(21): 1 734-1 740(杨元喜,李金龙,徐君毅,等. 中国北斗卫星导航系统对全球 PNT 用户的贡献[J]. 科学通报,2011,56(21):1 734-1 740)
- [18] Cheng Pengfei, Wen Hanjiang, Cheng Yingyan, et al. Para Meters of the CGCS2000 Ellipsoid and Comparisons with GRS80 and WGS84[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2009, 38(3):189-194(程鹏飞,文汉江,成英燕,等. 2000 国家大地坐标系椭球参数与 GRS80 和 WGS84 的比较[J]. 测绘学报,2009,38(3):189-194)
- [19] Koch K R. Bayesian Inference with Geodetic Applications[M]. Heidelberg: Springer, 1990
- [20] Zeng Anmin, Yang Yuanxi, Ming Feng, et al. BDS-GPS Inter-system Bias of Code Observation and Its Preliminary Analysis[J]. *GPS Solutions*, DOI: 10.1007/S10291-017-0636-3

Systematic Bias Compensation Model of Inter-system Bias and Its Performance Analysis for BDS/GPS Fusion Positioning

ZENG Anmin^{1,2,3} YANG Yuanxi^{2,3} JING Yifan¹ MING Feng¹

(1) Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou, 450052, China

2 State Key Laboratory of Geo-information Engineering, Xi'an, 710054, China

3 Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an, 710054, China

Abstract: Navigation users will significantly benefit from BDS and GPS positioning fusion in terms of availability, accuracy and reliability. However, for single point positioning, systematic biases between multi-GNSS systems cannot be eliminated completely, thus the accuracy of positioning and navigation is not always improved with the un-difference measurements of multi-GNSS systems. In this paper, an integrated BDS/GPS positioning model with unknown systematic parameters that compensates for systematic bias is proposed. Furthermore, a Bayesian estimation of fusion positioning model is specifically investigated in which the priori information of the additional parameters is taken into account. Real data collected from different areas with different types of receivers are used to verify those new algorithms. The results show that (a) receiver-dependent inter-system biases are quite evident, while the size of the system bias varies with the receiver type; (b) the precision of fusion positioning is improved significantly by introducing additional parameters into the functional model; and (c) Bayesian estimation of fusion positioning model can still obtain ideal position solution when the number of visible satellites is not enough.

Key words: navigation satellite system; inter-system bias; fusion positioning; Bayesian estimation

First author: ZENG Anmin, PhD candidate, assistant researcher, specializes in data processing for dynamic geodetic measurement and terrestrial reference frame. E-mail: Zeng_anmin@163.com

Foundation support: The National Program on Key Basic Research Project, No. 2016YFB0501700; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 41474015, 41374019, 41374003, 41274040.