

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.06.008

GPS+BDS 组合的实时定轨技术

姜洋¹ 张和芬¹ 汪精华¹ 于龙江¹ 张国斌¹ 李化义²

(1. 北京空间飞行器总体设计部, 北京, 100094; 2. 哈尔滨工业大学卫星技术研究所, 哈尔滨, 150080)

摘要:为了改善卫星几何分布,提高低轨(Low earth orbit, LEO)卫星实时定轨的精度与可靠性,提出了北斗卫星导航系统(Beidou navigation satellite system, BDS)与全球定位导航系统(Global positioning system, GPS)组合模型。组合模型基于加权最小二乘法(Weighted least square, WLS),利用伪距观测量建立观测模型,实时估计 LEO 卫星位置。目前,LEO 卫星尚未装备星载 BDS+GPS 双模接收机,为验证算法可行性,利用 GPS/BDS 卫星星历文件与 STK 软件仿真生成实验数据。实验结果表明,BDS+GPS 组合模型较 GPS 系统模型精度至少提高 26%。

关键词:实时定轨;GPS;BDS;加权最小二乘法

中图分类号:V249.32

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2015)06-0842-06

Real-Time Orbit Determination Using Combined GPS+BDS Systems

Jiang Yang¹, Zhang Hefen¹, Wang Jinghua¹, Yu Longjiang¹, Zhang Guobin¹, Li Huayi²

(1. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing, 100094, China;

2. Institute of Satellite Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150080, China)

Abstract: A method that combined global positioning system with Beidou navigation satellite (GPS+BDS) systems for real-time orbit determination is presented. There has been significant improvement in the satellites' geometric distribution and the accuracy of real-time low earth orbit (LEO) determination. A weighted least square (WLS) based algorithm using the pseudorange observations is developed to estimate position of LEO satellites for the combined systems. No LEO satellite operates with BDS+GPS receivers at present. Hence the combined algorithm is required to be tested and verified by simulation through GPS/BDS broadcast ephemeris and STK software. Results show that the accuracy of the proposed combined algorithm is improved by over 26% compared with GPS-only algorithms.

Key words: real-time orbit determination; GPS; BDS; weighted least square algorithm

高精度轨道的确定是遂行空间任务的有效保证,是实现高精度轨道控制的前提和基础。传统基于地面站或 GPS 导航系统的轨道确定方法,难以适用于越来越高的定轨精度要求。

全球导航卫星系统(GNSS)凭借全天候、全天时及连续实时提供用户三维位置的优势,在低轨卫星领域得到了广泛的应用。1986 年 Yunck 等科学

家提出基于 GPS 观测值的非动力轨道确定方法,又称几何法定轨^[1-2],利用 GPS 卫星星座为空间运载器提供全天候、连续实时的定轨信息。北斗卫星导航系统(BDS)作为新一代 GNSS,拥有与 GPS 相媲美的定位精度,势必在空间领域发挥作用。

由于低轨卫星运行在 400~800 km 的高度,且具有高动态性,不能保证实时跟踪多于 4 颗

基金项目:国家自然科学基金青年基金(11302127;61304237)资助项目;中央高校基本科研业务费(HEUCFD1406)资助项目;国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)(2013AA122904)资助项目;哈尔滨市青年科技创新人才基金(RC2013QN001007)资助项目;黑龙江省自然科学基金(F2015032)资助项目。

收稿日期:2015-08-22;**修订日期:**2015-10-23

通信作者:姜洋,女,工程师,E-mail:jiangyangxwz@sina.com。

GPS 导航卫星完成定轨任务。BDS 作为 GNSS 重要的组成部分,在 2012 年已经实现亚太区域 PNT (定位、导航与授时)服务,包括 5 颗 GEO 卫星,5 颗 IGSO 卫星,5 颗 MEO 卫星,预计在 2020 年建立由 5GEOs+3IGSOs+27GEOs 组合的全球导航系统体系,实现全球 PNT 服务^[3]。低轨卫星采用 GPS+BDS 组合导航系统,势必增加低轨卫星的卫星可见数目,改善卫星几何分布,提高定轨精度与可靠性^[4]。

本文提出了 BDS+GPS 组合算法,采用伪距观测建立观测模型,利用加权最小二乘法(WLS)进行状态估计,得到定轨结果。因目前低轨卫星尚未装备星载 BDS+GPS 双模接收机,为验证算法可行性,由 STK 软件产生低轨卫星参考轨道,利用 GPS/BDS 的实时星历文件与轨道数据生成仿真实验数据,实验结果表明,BDS+GPS 组合模型较 GPS 系统精度至少提高 26%。

1 定轨算法

1.1 GPS+BDS 组合模型

非差非组合的伪距观测方程可表示为

$$\bar{p}_{r,i}^s = \rho_{r,i}^s + T_{r,i}^s + dt_{r,i} - d\tau^s + I_{r,i}^s + \epsilon_{p,i} \quad (1)$$

式中: s, r, i 分别表示卫星、接收机和历元; $\bar{p}_{r,i}^s$ 表示伪距观测量(单位:m); $\rho_{r,i}^s$ 表示卫星至用户的几何距离; $T_{r,i}^s$ 表示卫星至用户接收机的斜向对流层延迟,由于对流层处于地面向上 50 km 以内,低轨卫星运行在 400~800 km,不存在对流层误差项,因而在低轨定位处理时,不需要考虑对流层延迟; $dt_{r,i}$ 和 $d\tau^s$ 分别表示接收机和卫星钟差,接收机钟差作为未知参数直接估计,卫星钟差采用卫星星历修正参数进行修正; $I_{r,i}^s$ 为 GNSS 卫星到用户接收机的电离层群延迟,采用 Klobuchar 模型^[5] 进行建模估计,能够消除 60% 的电离层延迟误差; $\epsilon_{p,i}$ 表示伪距及若干类非模型化误差。

由于各卫星的信号因传播路径不同,受外界干扰影响,导致观测误差也不相同,考虑采用高度角加权模型^[6], $\bar{p}_{r,i}^s$ 的标准差 σ_p 一般表示为

$$\sigma_p = \frac{\sigma_p^u}{\sin(E_r^s)} \quad (2)$$

式中: E_r^s 为卫星高度角; σ_p^u 为天顶方向伪距的标准差,本文取 $\sigma_p^u = 0.3 \text{ m}^{[7]}$ 。

GPS+BDS 的组的函数模型可以表示为

$$\begin{cases} \bar{p}_{r,i}^{s,G} = \rho_{r,i}^{s,G} + t_{r,i} - \tau^{s,G} \\ \bar{p}_{r,i}^{s,B} = \rho_{r,i}^{s,B} + t_{r,i} - \tau^{s,B} \end{cases} \quad (3)$$

式中:上标 G, B 分别表示 GPS 和 BDS 系统。

1.2 WLS 估计

对于 GPS+BDS 组合模型,采用 WLS 估计算法得到定轨信息。

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (4)$$

$$\mathbf{V}^T \cdot \mathbf{Q}^{-1} \cdot \mathbf{V} = \min \quad (5)$$

式中: \mathbf{Y} 为观测量; \mathbf{A} 为转换矩阵; \mathbf{X} 为状态量; \mathbf{Q} 为状态的协方差矩阵; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为观测噪声; $\mathbf{V} = (\mathbf{Y} - \mathbf{A} \cdot \tilde{\mathbf{X}})$ 为观测量残差。为保证式(5)为最小,有

$$\frac{\partial \mathbf{V}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{V}}{\partial \mathbf{X}} = 0 \quad (6)$$

由此,可得 $\tilde{\mathbf{X}}$ 的最终形式

$$\tilde{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{Y} \quad (7)$$

针对此组合算法,选择未知状态向量为

$$\mathbf{x} = [dr_r^T, dt_r^G, dt_r^{\Delta GB}] \quad (8)$$

式中: dr_r^T 为接收机的位置增量; $dt_r^{\Delta GB} = dt_r^G - dt_r^B$, dt_r^G, dt_r^B 为 GPS 和 BDS 的接收机钟差。

假设导航卫星轨道和钟差已知,通过上述方程可以给出函数模型

$$\Delta \bar{p}_{r,i}^s = -\mu_{r,i}^s \cdot dx_{r,i} + dt_{r,i} \quad (9)$$

式中: $\Delta \bar{p}_{r,i}^s = \bar{p}_{r,i}^s - \rho_{r,i}^s + d\tau_{r,i}^s$ 为线性化伪距残差; $\mu_{r,i}^s$ 为接收机三维位置分量 dx 的线性化系数。

新息向量 \mathbf{Y} 由伪距残差量构成

$$\mathbf{Y} = (\Delta \bar{p}_{r,i}^{s,G}, \Delta \bar{p}_{r,i}^{s,B})^T = (\Delta \bar{p}_{r,i}^{1,G}, \Delta \bar{p}_{r,i}^{2,G}, \dots, \Delta \bar{p}_{r,i}^{m,G}, \Delta \bar{p}_{r,i}^{1,B}, \Delta \bar{p}_{r,i}^{2,B}, \dots, \Delta \bar{p}_{r,i}^{n,B})^T \quad (10)$$

通过式(10),转换矩阵 \mathbf{A} 可以表示为(可见卫星数:GPS- n , BDS- m)

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -\mu_{r,i}^{1,G}, 1, 0 \\ -\mu_{r,i}^{2,G}, 1, 0 \\ \vdots \\ -\mu_{r,i}^{m,G}, 1, 0 \\ -\mu_{r,i}^{1,B}, 1, 1 \\ -\mu_{r,i}^{2,B}, 1, 1 \\ \vdots \\ -\mu_{r,i}^{n,B}, 1, 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

依据式(3),量测噪声方差表示为

$$\mathbf{Q} = \text{diag}(\sigma_p^{1,G}, \sigma_p^{2,G}, \dots, \sigma_p^{m,G}, \sigma_p^{1,B}, \sigma_p^{2,B}, \dots, \sigma_p^{n,B}) \quad (12)$$

通过式(5~12),可以实时估算出接收机的位置与钟差。

本文提出的 GPS+BDS 算法的执行主要分为以下几部分,由图 1 所示。利用 STK 软件生成低轨卫星运行轨道信息与 GPS/BDS 卫星星历文件生成伪距观测,通过 GPS/BDS 卫星星历文件包

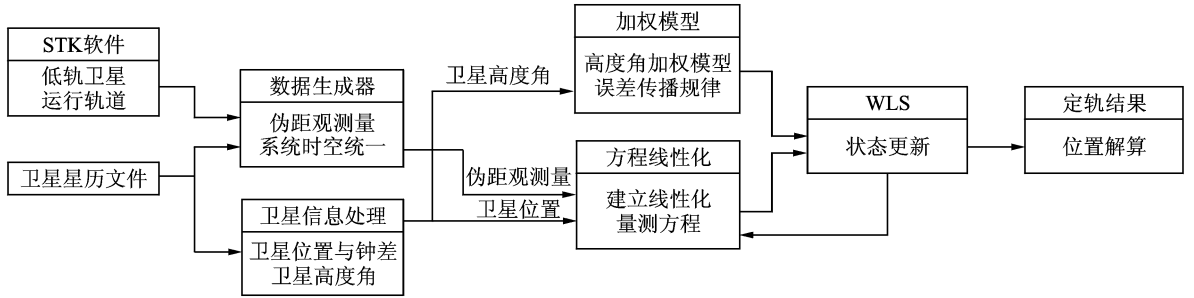


图1 GPS+BDS组合算法流程图

Fig. 1 Combined GPS+BDS algorithm implementation

含的轨道参数计算卫星位置及卫星钟差,并获得相应的高度角与方位角信息。其次,利用接收机上一时刻位置与卫星当前位置预测的伪距值,对非线性量测方程进行线性化处理,建立高度角加权模型,并对其进行WLS估计,得到当前时刻的状态估计;最终得到位置估值。

2 仿真数据生成算法

2.1 伪距观测量

伪距观测量生成的相关模型主要包括卫星轨道模型、卫星钟差模型、大气延迟模型以及接收机钟差模型等,由于星载接收机接收的信号不经过对流层,故对流层延迟不予考虑。

(1) 卫星轨道模型

由STK(Satellite tool kit)采用高精度轨道外推(High-precision orbit propagator, HPOP)仿真得到GRACE(Gravity recovery and climate experiment)重力卫星在2015年1月1日0~2时轨道运行数据。GPS/BDS卫星星历文件在CDDIS(Crustal dynamics data information system)数据源下载相应日期文件。

现已知LEO卫星位置和GPS/BDS卫星位置(卫星星历得到),可反算出 t_i 时刻LEO相对GPS/BDS可见卫星的几何观测量

$$\rho_{c,i}^n = |\mathbf{R}^n - \mathbf{r}|_i + \delta\rho_{\text{rotation}} \quad (13)$$

式中: \mathbf{R}^n 为 t_i 时刻不同可见卫星的位置矢量; \mathbf{r} 为 t_i 时刻LEO卫星位置矢量; $\delta\rho_{\text{rotation}}$ 为地球自转引起的距离改正值。

(2) 电离层延迟模型

电离层误差是由电离层效应改变信号的传播速度和方向引起的观测误差。采用Klobuchar电离层模型,能够补偿电离层效应60%左右。

(3) 钟差模型

钟差模型可以描述成常值多项式与随机项的组合^[8]

$$clk(t_i) = a_{fm} \cdot (t_i - t_0)^m + \dots + a_{f1} \cdot (t_i - t_0) +$$

$$a_{j0} + \epsilon(t_i) \quad (14)$$

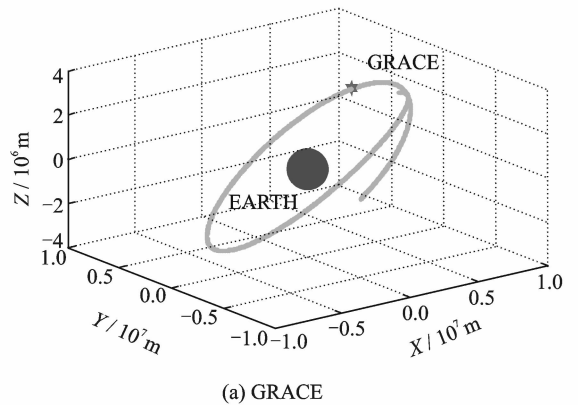
式中: $clk(t_i)$ 表示历元 i 的钟差量; $a_{fm}, \dots, a_{f1}, a_{j0}$ 为多项式系数; $\epsilon(t_i)$ 为历元 i 的钟差随机项。

卫星时钟采用铷/铯原子钟,相应的多项式系数由GPS/BDS卫星星历文件提供。

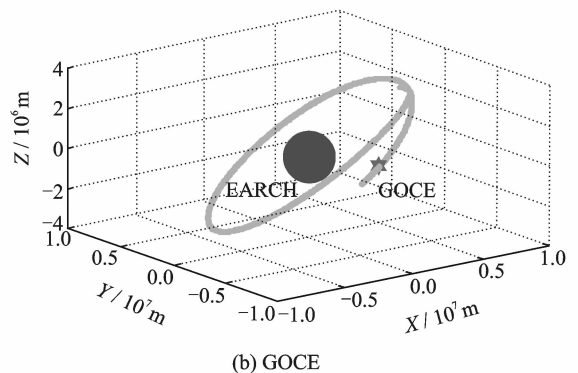
接收机时钟采用TCXO,根据文献[9]提供的不同时钟的特性,本文假设接收机的多项式系数分别为: $a_{j0} = 10^{-4}, a_{f1} = 10^{-9}, a_{jj} = 0(j \geq 2)$ 。

2.2 仿真数据分析

由STK软件仿真得到GRACE卫星(轨道高度 ≈ 500 km)和GOCE卫星(轨道高度 ≈ 300 km)在2015年1月1日0~2时的运行轨道如图2所示。



(a) GRACE



(b) GOCE

图2 卫星运行轨迹三维显示

Fig. 2 Display of satellite 3D trajectory

结合 GPS/BDS 卫星星历文件,仿真生成接收机导航数据,图 3(a,b)分别给出了 GRACE 和 GOCE 卫星仿真数据中的可见卫星数及对应的位置精度因子(PDOP)。

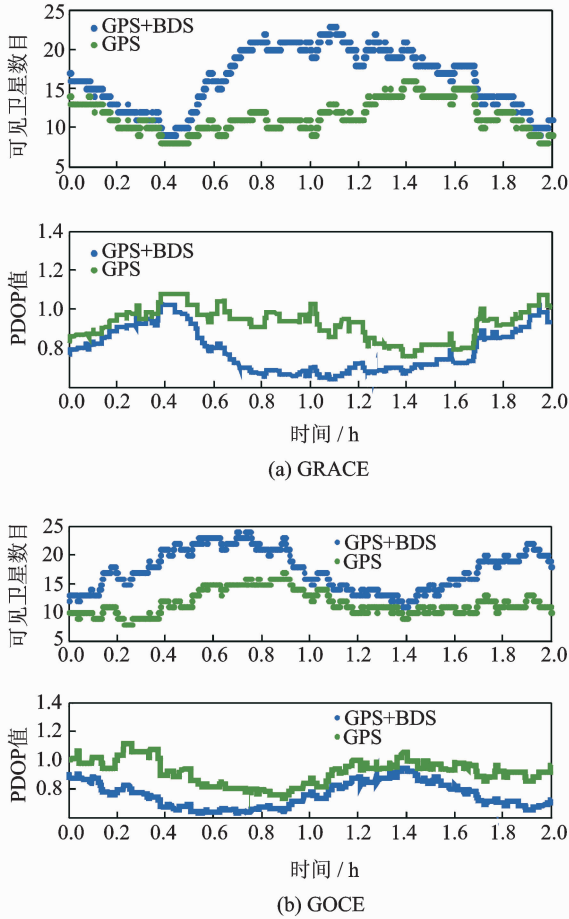


图 3 可见卫星数和 PDOP 值

Fig. 3 Value of PDOP and number of visible satellites

由图 3(a)可知,GRACE 卫星所观测 GPS+BDS 组合系统的可见卫星数平均较 GPS 单系统增加了 5 颗。图 3(b)说明了 GOCE 卫星所观测 GPS+BDS 组合系统的可见卫星数较 GPS 单系统增多。由图 3(a,b)中 PDOP 值来分析,可知组合系统由于可见卫星数的增多,改善了卫星的几何分布,PDOP 值相对较小,一定程度下提高了定轨精度。

由图 4(a,b)中可以定量地看到,在观测时间内所有可见卫星数消电离层伪距残差。其中图 4(a)中显示 GRACE 卫星下,GPS 单独系统的消电离层伪距残差的均值方差分别为:0.13,15.37 m,GPS+BDS 系统的消电离层伪距残差的均值方差分别为:0.15,15.45 m。其中图 4(b)中显示

GOCE 卫星下,GPS 单独系统的消电离层伪距残差的均值方差分别为:0.13,15.86 m,GPS+BDS 系统的消电离层伪距残差的均值方差分别为:0.14,15.87 m。由于电离层可以通过消电离层组合或模型修正的方式消除或减弱,所以影响定位精度的是消电离层所残存的误差项。值得注意的是,图 4(a)中 BDS 存在观测死区,其原因是由于 GRACE 卫星相对较高,BDS 仅具有局部覆盖能力,现阶段没有实现全球覆盖能力,导致其此时间段内无法观测 BDS 卫星,其现象可由图 3(a)中卫星数一栏说明。

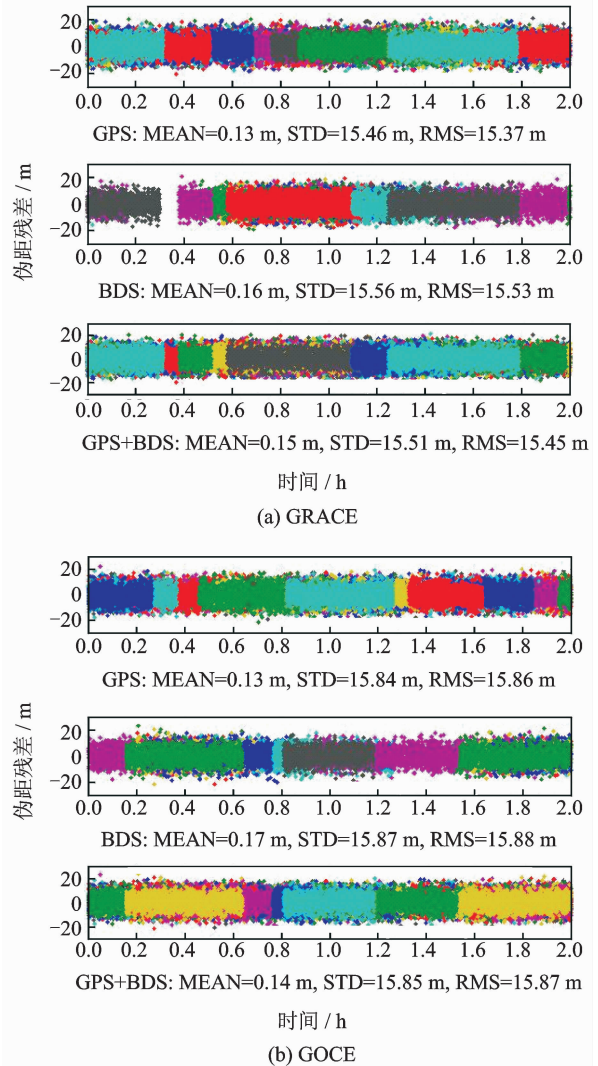


图 4 不同定位算法的伪距观测残差

Fig. 4 Residuals of pseudo-range observations of different algorithms

3 实验设计与结果分析

利用仿真数据生成的伪距观测量,通过不同定位算法得到 GRACE,GOCE 卫星的运行轨迹。本

文将 STK 软件生成的轨道数据作为参考轨道,与 GPS+BDS 组合系统、GPS 单系统进行比较,验证了组合算法能够提高低轨卫星的定轨精度。

根据图 5 与表 1 的对 GRACE 卫星定轨结果统计,可知 GPS+BDS 组合算法在 X,Y,Z 及 3D 位置定轨精度较 GPS 单系统算法分别提高了 27.3%,26.1%,26.7%和 26.7%。根据图 6 与表 2 的对 GOCE 卫星定轨结果统计,可知 GPS+BDS 组合算法在 X,Y,Z 及 3D 位置定轨精度较 GPS 单系统算法分别提高了 26.8%,28.1%,27.4%和 27.5%。GRACE 卫星的定轨精度较 GOCE 卫星的定轨精度略有提高,其原因可能由于 GOCE 的

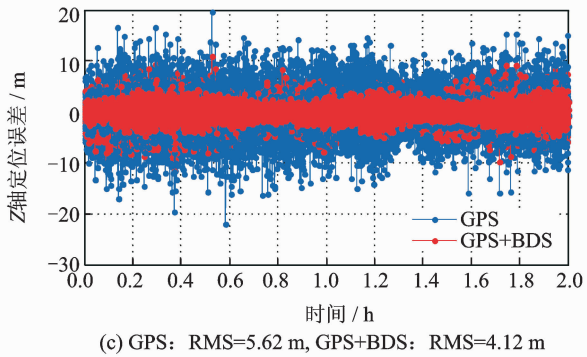
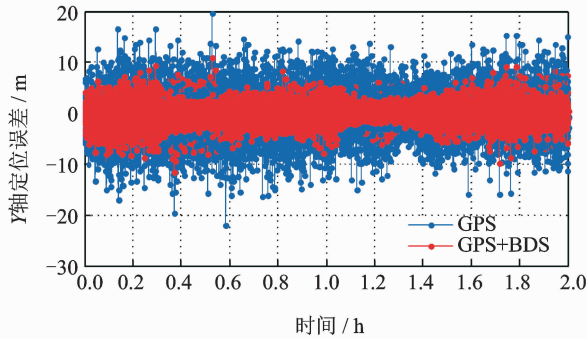
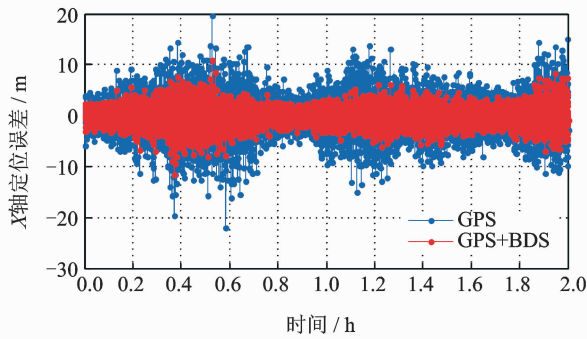


图 5 两种算法定位结果与 STK 生成轨道的差异 (GRACE)

Fig. 5 Position difference of two algorithms and STK simulated trajectory (GRACE)

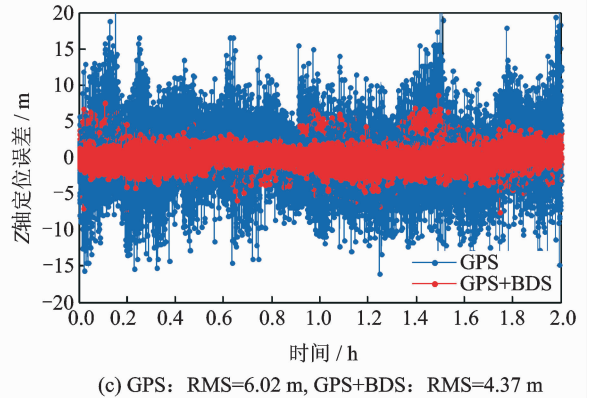
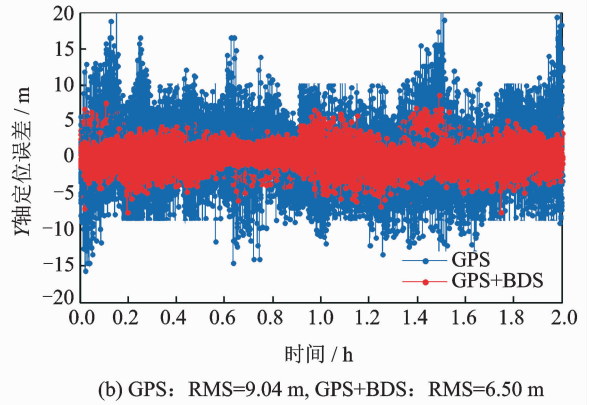
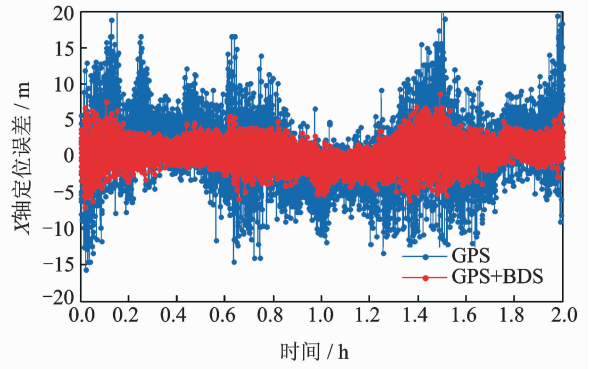


图 6 两种算法定位结果与 STK 生成轨道的差异 (GOCE)

Fig. 6 Position difference of two algorithms and STK simulated trajectory (GOCE)

轨道较低,其运行速度更快及近地干扰明显,导致 GNSS 的观测量质量略有下降,在图 4 电离层伪距残差中也能体现出来。综上所述,通过两组实验结果,可以初步验证多星座组合方式对提高定轨精度是可行的。

表 1 两种算法定位误差结果统计 (GRACE)

Tab. 1 Position error statistics of two algorithms (GRACE)

定位算法	X 轴	Y 轴	Z 轴	3D 位置
(GPS+BDS)/m	5.80	6.35	4.12	9.54
GPS/m	7.98	8.59	5.62	13.01
幅度提升/%	27.3	26.1	26.7	26.7

注:幅度提升/%:(GPS/m-(GPS+BDS)/m)/(GPS/m)*100%

表2 两种算法定位误差结果统计(GOCE)

Tab.2 Position error statistics of two algorithms(GOCE)

定位算法	X轴	Y轴	Z轴	3D位置
GPS+BDS/m	5.98	6.50	4.37	9.85
GPS/m	8.17	9.04	6.02	13.59
幅度提升/%	26.8	28.1	27.4	27.5

4 结 论

本文为提高低轨卫星在实时定轨任务的定位精度,提出了一种GPS+BDS组合定轨算法,增加了可见卫星数,提高系统冗余度,改善了卫星几何分布。基于STK软件与GPS/BDS卫星星历文件仿真生成GRACE、GOCE卫星的观测实验数据,通过GPS+BDS与GPS定轨结果的对比,初步得到如下结论:

(1)GPS+BDS组合系统提高系统的可见卫星数至少5颗,改善了卫星几何分布,降低了PDOP值至少20%;

(2)选取不同轨道运行高度的GRACE、GOCE卫星的实验数据,通过两种算法误差对比,GPS+BDS算法的各轴精度达6m左右,GPS算法的各轴精度为8m左右,通过数值计算,初步验证了GPS+BDS算法较GPS算法的定轨精度至少可以提高26%。

参考文献:

- [1] Yunck T P, Wu S C, Wu J T. Strategies for sub-decimeter satellite tracking with GPS[C]//PLANS'86-Position Location and Navigation Symposium, USA: NASA, 1986:122-128.
- [2] Bisnath S B, Langley R B. Precise orbit determination of low Earth orbiters with GPS point positioning

[C]//Proceedings of ION National Technical Meeting, USA: ION, 2001:22-24.

- [3] Li Xingxing, Ge Maorong, Dai Xiaolei, et al. Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo[J]. Journal of Geodesy, 2015,89(6):607-635.
- [4] Yang Yang, Yue Xiaokui, Tang Geshi, et al. Orbit determination using combined GPS+ beidou observations for low earth cubesats: Software validation in ground testbed[C]//China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2015 Proceedings: Volume III. China: Springer Berlin Heidelberg, 2015:321-334.
- [5] Klobuchar J. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users[J]. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, 1987(3): 325-331.
- [6] Jin S G, Wang J, Park P H. An improvement of GPS height estimations: Stochastic modeling[J]. Earth, Planets and Space, 2005,57(4):253-259.
- [7] 熊智,潘加亮,林爱军,等.发射系下SINS/GPS/CNS组合导航系统联邦粒子滤波算法[J].南京航空航天大学学报,2015,47(3):319-323.
- Xiong Zhi, Pan Jialiang, Lin Aijun, et al. SINS/GPS/CNS integrated navigation system federal PE algorithm in launch inertial coordinate system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015,47(3):319-323.
- [8] Yang Y, Yue X K, Yuan J, et al. Enhancing the kinematic precise orbit determination of low earth orbiters using GPS receiver clock modelling[J]. Advances in Space Research, 2014,54(9):1901-1912.
- [9] Zhou Hui, Nicholls C, Kunz T, et al. Frequency accuracy & stability dependencies of crystal oscillators[R]. Carleton University, Systems and Computer Engineering, Technical Report SCE-08-12, 2008:1-15.

