

一种新的卫星导航星间链路测距体制及其定轨性能分析*

王东会,徐博,刘文祥,孙广富

(国防科技大学电子科学与工程学院,湖南长沙 410073)

摘要:现有的GPS星间链路轮询时分测距体制未针对定轨性能进行优化。对轮询时分测距体制进行改进,提出了一种新的分组时分测距体制,通过对星座所有卫星进行分组测距来提高星间测距链路数量,从而提高星地星间联合定轨精度。以整星座平均定轨精度最优为目标,提出了两步优化算法,得到星间总测距链路数最多的卫星分组,使每组内卫星的星间测距DOP值最小。仿真结果表明,采用优化算法得到的最优分组时分测距方式对卫星定轨精度有明显改善。

关键词:卫星导航星间链路;星地星间联合定轨;星间测距体制;卫星分组

中图分类号: TN967.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2014)01-062-05

A novel navigation inter-satellite links ranging hierarchy and its orbit determination performance

WANG Donghui, XU Bo, LIU Wenxiang, SUN Guangfu

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The present polling time division duplex (PTDD) ranging hierarchy of GPS inter-satellite links (ISL) demands being optimized for satellite orbit determination. An improved ranging hierarchy named grouping time division duplex (GTDD) is presented. Satellite orbit determination precision based on inter-satellite and satellite-to-station ranges is able to be improved by the novel ranging hierarchy in respect of ISL ranging links increasing by grouping ranging of the whole constellation. Aiming at the optimal satellite orbit determination precision, a two-steps algorithm is presented to optimize the satellite grouping. Firstly, the optimal satellite groupings were obtained to achieve the most inter-satellite ranging links. Secondly, the ranging DOP was made the least in each satellite group. Simulation results show that the satellite orbit determination precision can be improved greatly from the two-steps algorithm.

Key words: navigation inter-satellite links; satellite orbit determination based on inter-satellite and satellite-to-station ranges; inter-satellite ranging hierarchy; satellite grouping

增加星间链路系统(Inter-satellite links, ISL)是卫星导航系统的发展趋势。GPS(Global Positioning System)Block II R以及Block II F卫星已采用UHF频段宽波束天线建立星间链路^[1],整个星座可以脱离地面站的支持而独立运行180天,大大提高了星座的战时生存能力^[2-3]。到GPS III阶段,星间链路可能采用Ka(23GHz)或V(60GHz)频段,星间链路天线实现点波束,可提高通信速率和抗干扰能力^[4]。研究者对GLONASS、GALILEO等全球卫星导航系统进行了相关研究论证^[3,5],国内外很多学者也对基于星间链路的卫星自主定轨算法进行了较为深入的研究^[6-7]。

对于地面监测站分布在局部地区的卫星导航系统,星间链路可以有效补充地面监测站观测弧

段的不足,从而提高卫星定轨精度,有利于卫星导航系统整体性能的提升。此类卫星导航系统更侧重于星间链路的测距功能,基于星地和星间测距的联合定轨是工作常态。

GPS Block II R卫星星间链路系统采用的是轮询时分测距方式^[2],此方式可建立的星间测距链路数量有限。文献[8]提出了一种同步时分测距方式,虽然可建立较多的测距链路,但适用范围有限。这两种星间测距方式均未从星座定轨性能的角度进行优化,不能完全满足利用星间链路辅助地面站提升定轨性能的需求。因此有必要对星间链路测距方式进行优化。本文提出了一种新的星间链路分组时分测距体制,轮询时分和同步时分方式均可看作分组时分测距的一种特例。分

* 收稿日期:2013-09-09

基金项目:国家部委资助项目

作者简介:王东会(1985—),男,黑龙江克山人,博士研究生,E-mail:wdhhawk@163.com;

孙广富(通信作者),男,研究员,博士,博士生导师,E-mail:gfsunmail@163.com

组时分测距具有可优化的特点,可根据实际星间链路系统参数对分组方式进行优化,从而得到最优的卫星分组方式,最大限度地提升定轨性能。对此,本文提出了一种两步优化算法,通过星间测距链路数量及精度衰减因子(Dilution of Precision, DOP)对卫星分组方式进行优化。最后以现有的GPS星间链路系统为例进行仿真实验,对比分析GPS轮询时分与组时分测距方式的星地星间联合定轨性能。

1 GPS星间链路工作原理

星间链路系统在导航卫星之间建立测距及通信链路,实现卫星间的测距及信息传输。GPS星间链路系统采用时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)结构协调各卫星之间的业务时序,其结构^[2]如图1所示。

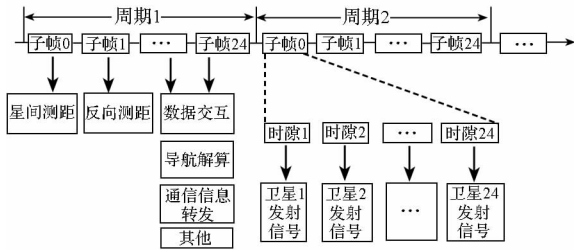


图1 GPS星间链路TDMA结构

Fig. 1 TDMA structure of GPS ISL

将整个时间序列划分为若干个等间隔的工作周期,周期长度为15min。每个工作周期划分为25个等间隔的子帧,按照系统需求在不同的子帧内完成星间测距、测距信息传输、自主定轨解算、通信信息转发等业务。每个周期内的业务操作时序相同。

GPS星间链路在子帧0内完成所有卫星的星间测距,在子帧1内完成所有卫星的反向测距,通过双向测距实现轨道与钟差的分离。在子帧0和子帧1内进一步划分24个工作时隙,时隙长度为1.5s,每颗卫星占用一个时隙,轮流发射测距信号,其他可视卫星接收信号实现测距。这种测距方式称为轮询时分测距^[9]。

采用轮询时分测距方式时,每个周期内每颗卫星仅发射一次信号,与其可视卫星间仅建立一次测距链路。按照每个时隙1.5s的持续时间以及测距接收机的工作特性,一般情况下,一个时隙内一对测距卫星间仅能获得一个有效测距值,因此整星座的测距数据量是不足的。而且在这种时隙固定分配方式下,星间测距方式已无优化空间。

2 组时分测距体制

2.1 体制描述

GPS的轮询时分测距方式未针对定轨性能进行优化,本文对轮询时分测距方式进行改进,提出了组时分测距体制。

主要思想是:对星座所有卫星进行分组。保持上述TDMA结构不变,在测距子帧的每个时隙中,不再只有1颗卫星发射信号,而是一组卫星同时发射信号,其他可视卫星进行测距。各卫星组轮流占据时隙发射信号,直到测距子帧结束。

假设导航星座卫星总数为 N ,星座卫星全集为 $A_C = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$,将整个星座卫星分为 m 组,每组最多 k 颗卫星。卫星组 n 包含的卫星集合为 $A_n = \{S_i | S_i \in A_C\}$ ($n = 1, 2, \dots, m$),某个时隙卫星组 n 发射信号时,组内某颗卫星 S_i 的星间测距可表示为

$$P_{S_j}^{S_i}(t) = G(X_{S_i}(t), X_{S_j}(t')) + d_s(t) + d_r(t') + d_i^{S_j}(t') - d_i^{S_i}(t) + \varepsilon(t) \quad (S_j \in L_i) \quad (1)$$

其中: S_j 为接收卫星 S_i 信号进行测距的卫星; G 为距离观测函数; t 为信号发射时刻; t' 为信号接收时刻; $X(t)$ 为卫星位置矢量; $d_s(t)$ 为发射零值; $d_r(t')$ 为接收零值; $d_i(t)$ 为钟差; $\varepsilon(t)$ 为随机误差; L_i 表示卫星 S_i 在测距时刻 t 的可测距卫星集合。卫星 S_j 属于该集合。

由于星间测距系统不能同时收发测距信号,因此同组卫星之间不可测距,可知必有如下关系:

$$L_i \cap A_n = \emptyset \quad (2)$$

$$L_i \subseteq A_C / A_n$$

即 L_i 与 A_n 的交集必为空集, L_i 属于 A_n 的补集。

于是可得到一个时隙内可建立的测距链路总数为:

$$\sum_{S_i \in A_n} \text{SUM}(L_i) \quad (3)$$

其中, $\text{SUM}(\cdot)$ 为求集合元素个数的函数。

在一个星间链路工作周期内,每个卫星组均可进行多次测距。假设卫星 S_i 所在组一个周期内可测距次数为 T_i ,则整个星座一个周期 T 内可建立的测距链路数量为:

$$F(m, T) = \sum_{i=1}^N Y_{S_i}(m, T) = \sum_{i=1}^N \sum_{t_i=1}^{T_i} \text{SUM}(L_i(t_i)) = \sum_{i=1}^N \sum_{t_i=1}^{T_i} V_{S_i}(t_i) - f_{S_i}(m, t_i) \quad (4)$$

其中, $Y_{S_i}(m, T)$ 表示卫星 S_i 在时序周期 T 内的所有测距链路数, 它由分组数量决定, 记为分组数 m 及周期 T 的函数; $V_{S_i}(t)$ 表示卫星 S_i 的可视卫星集合元素数量; $f_{S_i}(m, t)$ 表示在当前分组条件以及测距时刻下, 卫星 S_i 所在组与 $V_{S_i}(t)$ 的交集元素数量。

从上述论述可知, 分组时分测距体制具有如下特点:

(1) 卫星分组数是体制的关键, 直接决定了每个卫星组包含的卫星数量及每个卫星组可测距的次数。卫星分组数越少, 则每组内卫星数量越多, 卫星组测距次数越多, 但同时单次可测距的链路数量就减少。

(2) 每个卫星组的具体卫星分配方法也影响星间可建立的测距链路数量, 应该尽量保证组内卫星间相互不可视。

(3) 轮询时分测距方式是分组时分测距体制的一种特例。可视为分组数量为 24, 即每颗卫星一组。

分组时分测距体制的特点决定了测距次数与单次测距链路数是相互矛盾的, 不能同时提高。因此, 要想使式(3)最大从而提高定轨精度, 需要寻找最优的卫星分组方式。

2.2 分组优化算法

本文以定轨精度最优为目标对卫星分组方法进行优化, 提出了两步优化算法。

(1) 对卫星分组数进行优化, 使星间总的测距链路数最多。

根据式(4), 算法第一步即是寻找一个 m 使得 $F(m, T)$ 最大。由 $f_{S_i}(m, t)$ 的物理含义可知, 在求解式(4)时必须满足

$$\begin{cases} 0 \leq f_{S_i}(m, t) \leq k - 1 \\ f_{S_i}(m, t) \leq V_{S_i}(t) \\ k - 1 - f_{S_i}(m, t) \leq N - V_{S_i}(t) - 1 \end{cases} \quad (5)$$

对式(5)整理后得到

$$\begin{aligned} \max\{0, k + V_{S_i}(t) - N\} &\leq f_{S_i}(m) \\ &\leq \min\{k - 1, V_{S_i}(t)\} \end{aligned} \quad (6)$$

由上述分析可知, 最优分组问题实际上是一个条件极值问题, 结合式(4)和式(6)即可求得最优卫星分组数。

(2) 基于步骤(1)的最优卫星分组数, 对每组内卫星的具体分配方法进行优化, 使星间测距 DOP 值最小。

星间测距 DOP 值计算方法与地面 DOP 值计

算方法相同^[9]。由于星间链路工作体制是在卫星发射前预先固定的, 没有实时计算的需求, 因此本文采用穷举搜索的方法计算各种卫星配置组合的星间测距 DOP 值, 寻找使得星间测距 DOP 值最小的最优卫星分配方法。

在两步优化算法求解前, 需要根据星座形式以及星间天线形式等参数计算星间可视性 $V_{S_i}(t)$ 以及 $f_{S_i}(m, t)$, 作为算法的输入条件。

3 算例分析

以 GPS 星间链路系统为例, 通过基于星地测距值以及星间测距值的联合卫星定轨精度对分组时分测距方式与 GPS 轮询时分测距方式进行对比分析。

3.1 仿真条件

(1) 星座形式: 采用典型的 Walker24/3/2 中轨道卫星 (Middle Earth Orbit, MEO) 星座;

(2) 仿真时间: 起始时间为 2008 年 7 月 1 日 12:00, 时间长度为 1 天, 轨道积分步长为 5min;

(3) 星间链路天线形式: 采用 GPS 的 UHF 频段宽波束天线, 方位角全向, 仰角范围为 $30^\circ \sim 70^\circ$, 天线方向图如图 2 所示;

(4) 地面监测站: 地面采用 7 个 IGS 监测站, 分别为: bjfs、chan、kunm、lhaz、shao、tnml、urum;

(5) 测距误差模型: 采用均值 0.6m, 均方差为 0.3m 的随机噪声模型;

(6) 摄动力模型: 考虑 N 体引力、地球非球形摄动以及太阳光压等^[10]。

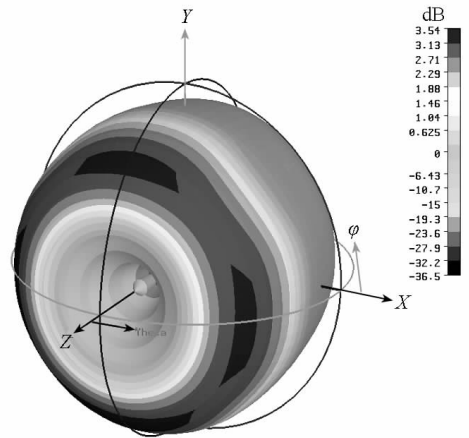


图 2 星间链路天线方向图

Fig. 2 ISL antenna pattern

3.2 仿真结果

(1) 最优分组仿真结果

按照本文仿真条件可计算得出星间具有良好的可视性, 24 颗卫星的可视卫星数量均可达到 14

~17 颗^[11]。为了简化分析,可统一认为每颗卫星的可视卫星集合始终是 14 颗卫星,即 $V_{S_i}(t) = 14$ 。由于 Walker 星座具有很好的对称性和周期性,因此,本文进行星间分组时仅考虑每组卫星数量相同的情况,即卫星分组数的值域为 $\{1, 2, 3, 4, 6, 8, 12, 24\}$ 。在此条件下,根据两步优化算法的第 1 步可计算得到满足条件的分组数为 2 组和 3 组。之所以会出现 2 个最优解是因为分组数必须为整数的限制。

按照算法第 2 步,寻找 DOP 值最小的卫星配置。经过搜索计算可得到,分 3 组时存在一种使得星座具有最小平均 DOP 值的卫星配置组合,小于分 2 组时的任意卫星组合。因此,最终得到最优星间分组方式为将所有卫星分为 3 组,具体卫星配置情况如下:

$$G1 = \{1, 3, 5, 7, 12, 16, 20, 24\}$$

$$G2 = \{2, 6, 9, 11, 13, 15, 18, 22\}$$

$$G3 = \{4, 8, 10, 14, 17, 19, 21, 23\}$$

(2)联合定轨仿真结果

根据最优分组仿真结果,对 GPS 轮询时分测距方式、最优分组时分方式以及普通分组时分方式(将所有卫星分成 4 组,每组卫星按照最小 DOP 值配置)三种场景进行星地星间联合定轨对比分析^[10,12]。

24 颗卫星的三维初始轨道误差仿真结果如图 3 所示。

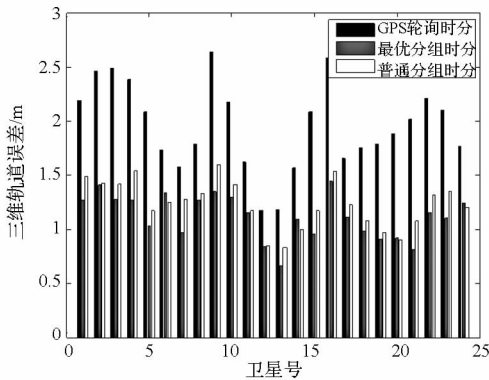


图 3 各卫星三维初始轨道误差仿真结果
Fig. 3 Initial orbit determination errors of the whole constellation

从图 3 可以得出,两种分组时分方式的定轨误差明显小于 GPS 轮询时分测距方式。大部分卫星在最佳分组时分方式下的定轨精度最优,但卫星 6、14、20 和 24 在普通分组时分方式下定轨误差反而最小,这是由于最优分组时分算法是考虑整个星座所有卫星的平均最优值。

整星座平均定轨结果如表 1 所示。

表 1 整星座平均定轨结果

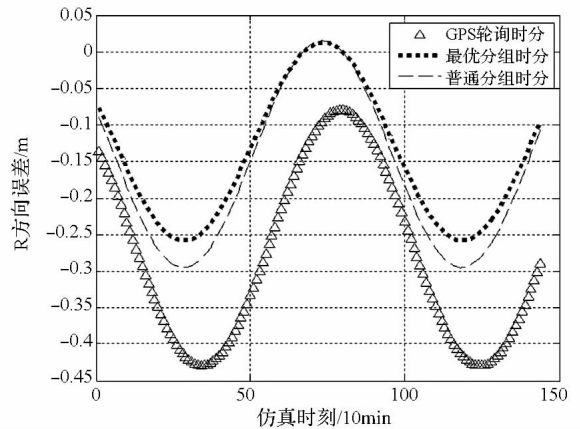
Tab. 1 Average orbit determination error of the whole constellation

场景	三维初始轨道误差/m	3 天轨道外推误差 RMS/m	预报 12h URE/m
GPS 轮询时分	2.448	4.946	0.342
最优分组时分	1.257	2.677	0.192
普通分组时分	1.386	2.945	0.210

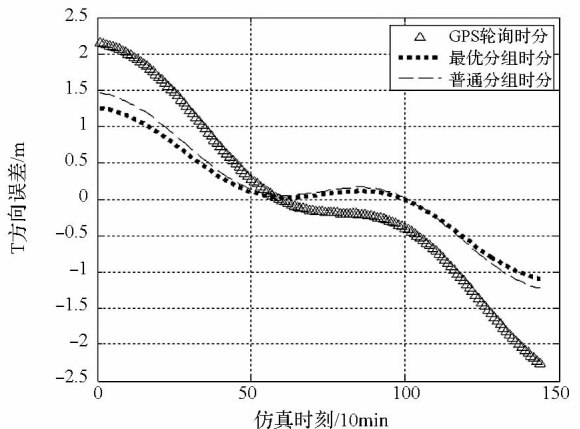
从表 1 可以得出,最优分组时分在整个星座的平均定轨精度上是最佳的。与 GPS 轮询时分相比,定轨精度从 2.448m 提高到了 1.257m;与普通分组时分相比,定轨精度从 1.386m 提高到了 1.257m。可见,星间采用分组时分测距方式时,对星地联合定轨精度的改善是很明显的。

以 MEO1 卫星为例,给出 1 天内的轨道 RTN 误差以及预报 2 天 URE 误差如图 4 所示。

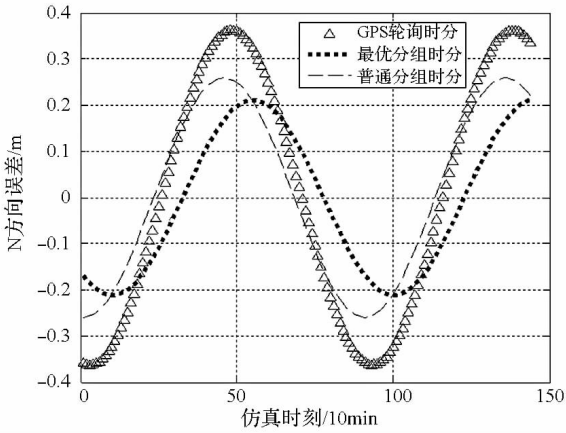
卫星定轨误差呈现类似正弦的周期波动,这是由摄动力误差引起的。从卫星 RTN 三个方向的定轨误差以及预报 URE 误差上可得出:轮询时分比普通分组时分的误差波动幅度小,其中最优分组时分具有最小的误差波动幅度。



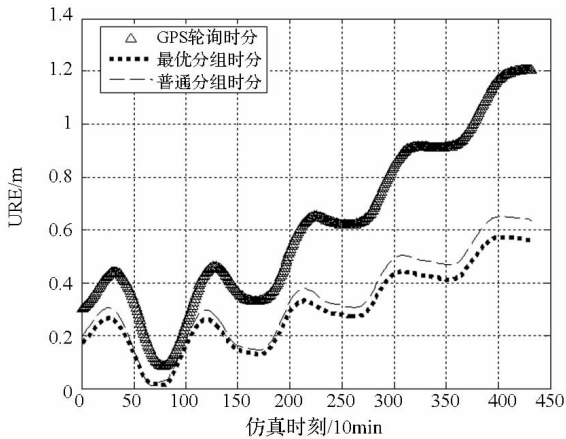
(a) R 方向误差



(b) T 方向误差



(c) N 方向误差



(d) 预报 2 天 URE 误差

图 4 1 天轨道 RTN 误差以及预报 2 天 URE 误差

Fig. 4 RTN orbit error for 1 day and URE error predicted for 2 days

4 结论

本文对 GPS 星间链路轮询时分测距体制进行优化,提出了一种新的分组时分测距体制。针对分组时分测距体制的最优分组问题提出了两步优化算法。分组时分测距体制具有灵活可优化的特点,适用于各类卫星导航系统。

仿真结果表明:保持 GPS 星间链路 TDMA 结构不变,仅将轮询时分测距方式改进为分组时分测距即可明显改善星地联合定轨性能,在本文仿真条件下,整星座平均定轨精度可从 2.448m 提高到 1.257m。两步优化算法从整星座平均定轨性能最优的角度对卫星分组方式进行优化,得到的最优分组方式定轨精度最佳。

本文的改进方法只需修改星间测距时序安排,不需要对星间链路系统做很大改动,因此具有工程可实现性。地面监测站分布在局部地区的卫星导航系统,需要依靠星间链路增加卫星观测弧段,提升定轨性能,本文的研究成果尤其适用于此

类卫星导航系统。

参考文献 (References)

- [1] Fisher S C, Ghassemi K. GPS IIF-the next generation [J]. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(1): 24-47.
- [2] Rajan J A. Highlights of GPS II-R autonomous navigation [C]//Proceedings of ION 58th Annual Meeting of the Institute of Navigation and CIGTF 21st Guidance Test Symposium, Albuquerque, NM, 2002; 354-363.
- [3] Francisco A F. Inter-satellite ranging and inter-satellite communication links for enhancing GNSS satellite broadcast navigation data[J]. Advances in Space Research, 2011, 47: 786-801.
- [4] Maine K, Anderson P, Bayuk F. Communication architecture for GPSIII [C]//Proceedings of IEEE Aerospace Conference, Aerospace Corporation, Los Angeles, CA, 2004: 124-129.
- [5] Sanchez M, Pulido J A. The ESA "GNSS+" project inter-satellite ranging and communication links in the frame of the GNSS infrastructure evolutions [C]//Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Savannah, GA, 2008; 2538-2546.
- [6] Jose F M, Pedro F S. GNSS sensor for autonomous orbit determination [C]//Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of The Satellite Division of The Institute of Navigation, Portland, OR, 2010; 2717-2731.
- [7] 王世练, 路军, 张尔扬. 基于星间无线电测距的卫星自主定轨与导航[J]. 宇航学报, 2002, 23(1): 69-72. WANG Shilian, LU Jun, ZHANG Eryang. Satellite autonomous orbit determination and navigation based on wireless distance measurement on-board [J]. Journal of Astronautics, 2002, 23(1): 69-72. (in Chinese)
- [8] 徐勇, 常青, 于志坚. GNSS 星间链路测量与通信新方法研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2012, 42(2): 230-240. XU Yong, CHANG Qing, YU Zhijian. On new measurement and communication techniques of GNSS inter-satellite links [J]. Science China: Technological Sciences, 2012, 42(2): 230-240. (in Chinese)
- [9] Kaplan E D. Understanding GPS principles and applications [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 181-200.
- [10] Zhou S S, Hu X G, Wu B. Analysis of orbit determination and prediction accuracy for a regional tracking network [J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2010, 40(6): 800-808.
- [11] 石磊玉, 欧钢, 顾青涛, 等. 基于星上天线仰角约束的星间可视卫星集解析算法[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(4): 97-101. SHI Leiyu, OU Gang, GU Qingtao, et al. An analytical algorithm for inter-satellite visibility calculation with restriction of satellite antenna's elevation [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, 33(4): 97-101. (in Chinese)
- [12] Wang D H, Ni S J, Liu W X, et al. Compass satellite orbit determination based on inter-satellite and satellite-to-station ranging [C]//Proceedings of 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Nashville, TN, 2012: 340-346.