

# 地球静止轨道粗定位的北斗系统接收机快速定位方法\*

靖守让, 李柏渝, 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:**传统全球导航卫星系统信号发射时间的整毫秒恢复算法,在接收机概略位置未知时存在计算量剧增而无法应用的问题。利用北斗系统混合星座中 GEO 卫星电文速率高的这一特点,提出一种基于 GEO 粗定位的北斗接收机快速定位的方法。在接收机概略位置完全未知的情况下,使用已获取完整信号发射时刻的纯 GEO 星座进行粗定位,根据解算获得的概略位置对非 GEO 卫星发射时刻毫秒整数时间进行恢复,利用所有可见卫星进行精确定位。使用国际全球连续监测评估系统测站观测伪距对算法进行验证,国内测站可 100% 实现伪距恢复,完成快速定位。仿真遍历中国区域用户,在仿真伪距增加均值为 0, 标准差为 6m 噪声,截止仰角为 0° 时,中国附近区域实现快速定位概率均大于 98.68%, 其中约 80% 的中国附近区域可以 100% 实现卫星信号传输时间恢复并完成快速定位。

**关键词:**北斗卫星导航系统;地球静止轨道星座;信号传输时间恢复;首次定位时间

**中图分类号:**TN967.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2015)04-077-05

## A quick location method for BDS receiver based on coarse positioning by GEO constellation

JING Shourang, LI Baiyu, LIU Wenxiang, SUN Guangfu

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

**Abstract:** Without knowing the approximate position of the receiver, the millisecond recovery algorithm of traditional global navigation satellite system signal-radiation existed problem of increasing computation, but unable to be applied. A fast positioning method for BDS receiver was proposed according to the high navigation data rate of GEO(Geosynchronous Earth Orbit) satellites in BeiDou Navigation Satellite System. Firstly, an approximate position was got by coarse positioning using GEO constellation. Then the signal transmission time recovery of MEO/IGSO satellite was made according to the approximate position. Finally, all the visible satellites were used for precise positioning. Using iGMAS stations observation pseudorange to verify the proposed algorithm. The stations in China can 100% got full-pseudorange and obtained fast positioning. By using BDS broadcast ephemeris data, a simulation environment was built. The white noise with 6 meters standard deviation is added to satellites pseudorang. And the cut-off angle of elevation is 0°. The success rate of the quick location method is bigger than 98.68%. And about 80% of Chinese surrounding area can 100% guarantee a complete satellite signal emission time restoration and obtain an accurate position.

**Key words:** BeiDou navigation satellite system; geosynchronous earth orbit constellation; signal transmission time recovery; time to first fix

首次定位时间(Time To First Fix, TTFF)是导航接收机的重要性能指标,而影响首次定位时间的因素包括卫星星历获取时间和观测伪距获取时间。通过接收机存储广播星历、扩充式星历或者接收机端自主生成扩充式星历等方法可以缩短卫星星历的获取时间<sup>[1-4]</sup>。在传统的导航接收机定位中,接收机通过依次完成码相位测量、电文同步获取卫星信号发射时间,结合接收机时钟生成伪距实现后续定位解算。因此在星历信息已知条件下,制约首次定位时间的主要因素为卫星完整观测伪距的获取时间。

辅助 GPS(A-GPS)技术可以在完成码相位测量后实现快速定位,缩短首次定位时间。文献[5]提出一种包含 5 个状态变量的免时定位算法,文献[6]提出了一种利用至少 6 颗卫星 GPS C/A 码相位测量进行定位的方法。但上述方法对用户概略位置均有所约束,即只有在接收机的概略位置估计误差不超过 150km 时,才能快速恢复出卫星毫秒整数时间,在概略位置未知的情况下搜索计算量会急剧增加<sup>[7-8]</sup>。文献[9]从信号传输时间维度给出了一种快速搜索方法,但需要高精度的接收机时钟辅助。

\* 收稿日期:2014-09-17

基金项目:教育部新世纪人才支持计划资助项目(NCET-08-0144)

作者简介:靖守让(1987—),男,江苏徐州人,博士研究生,E-mail:hanchongjsr@163.com;

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

# 1 概略位置未知时的 BDS 接收机快速定位方法

中国北斗卫星导航系统 (BeiDou Navigation Satellite System, BDS), 在轨工作卫星包括 5 颗地球静止轨道 (Geosynchronous Earth Orbit, GEO) 卫星、4 颗中地球轨道 (Medium Earth Orbit, MEO) 卫星和 5 颗倾斜地球同步轨道 (Inclined Geosynchronous Satellite Orbit, IGSO) 卫星<sup>[10]</sup>。GEO 卫星采取 500bps 的电文速率, 一帧电文持续时间仅为 0.6s, 而 MEO/IGSO 卫星采取 50bps 的电文速率, 一帧电文持续时间为 6s。因此, 在信号捕获后, 相比于 MEO/IGSO 卫星, GEO 卫星能够快速地完成电文帧同步, 获取完整的信号发射时间, 所消耗帧同步时间约为 MEO/IGSO 完成帧同步时间的十分之一。同时, 北斗导航系统中有 5 颗 GEO 卫星, 满足传统定位解算中至少 4 颗卫星的需求。本文尝试提出一种在星历已知条件下基于 GEO 粗定位的 BDS 接收机快速定位方法, 流程示意图如图 1 所示。

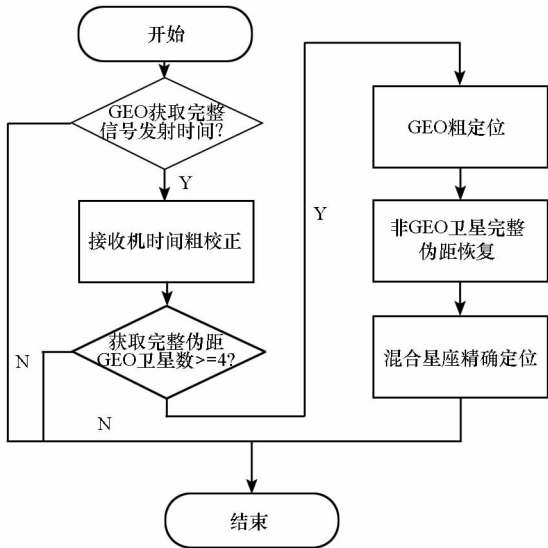


图 1 基于 GEO 粗定位的快速定位方法流程图  
Fig. 1 Flow chart of the quick location method based on coarse positioning by GEO constellation

## 1.1 GEO 星座粗定位可行性分析

北斗系统包含 5 颗 GEO 卫星, 分别位于东经 58.75°, 80°, 110.5°, 140° 和 160°, 如表 1 所示。

表 1 北斗 GEO 卫星经度分布

Tab. 1 Longitude of BDS GEO satellites

卫星	G1	G2	G3	G4	G5
东经	140°	80°	110.5°	160°	58.75°

假设用户高程为 0m, 以 1° 为间隔遍历经纬度范围为北纬 5° ~ 55°、东经 70° ~ 140° 区域中用户观测 GEO 星座的可见性。当观测截止仰角为 0° 时, 用户观测 GEO 卫星可见数如图 2 所示。

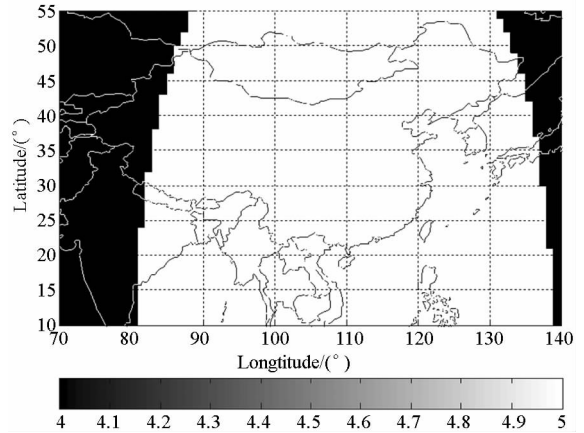


图 2 中国附近区域内可见 GEO 卫星数  
Fig. 2 Visual satellite number of GEO in Chinese surrounding area

由图 2 可知在中国及周边地区, 大部分区域能观测到 5 颗 GEO 卫星、部分边界区域能观测到 4 颗 GEO 卫星, 满足传统定位解算中卫星数需求。

在 GEO 完成帧同步后可以对本地图时间进行校正, 保证本地时间精度优于 10ms。而在本地时间较为精确的情况下, 伪距修复对概略位置的约束为 0.5 个码周期, 即误差小于 150km<sup>[5-6]</sup>。理想的 GEO 卫星轨道为赤道面上单点, 轨道倾角为 0°。用户观测理想 GEO 星座卫星的几何构型太差, 导致使用理想 GEO 星座定位会使定位结果发散从而严重偏离用户真实位置。而实际卫星轨道中, 虽然 GEO 卫星轨道倾角很小, 但并不为零。通过长时间收集北斗系统广播星历, 图 3 给出了 2014 年 3 月 17 日至 2014 年 3 月 23 日北斗 GEO 卫星纬度变化情况。图 4 给出某一时刻中国附近区域用户使用可见 GEO 卫星进行定位的位置精度衰减因子 (Position Dilution Of Precision, PDOP) 情况。

由图 4 可知, 在这一时刻仅使用 GEO 星座进行定位中国附近大部分区域 PDOP 值在 100 左右。GPS 标准定位服务中单频接收机典型伪距测量误差约为 6m<sup>[11]</sup>, 其中主要的误差项为电离层延迟修正残差。文献[12]通过长时间的数据统计比较各个系统空间信号测距误差 (Signal-In-Space Ranging Errors, SISREs) 精度, 指出北斗系统 SISRE 的均方根 (Root Mean Square, RMS) 值为 1.5 ± 0.1m。文献[13]指出北斗系统公开服务空间信号用户测距误差 (User Range Error, URE) 精

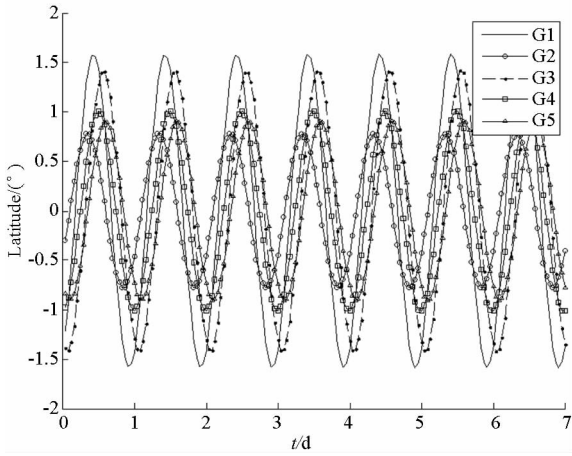


图3 北斗系统 GEO 卫星纬度变化

Fig. 3 Changes in latitude of BDS GEO satellite

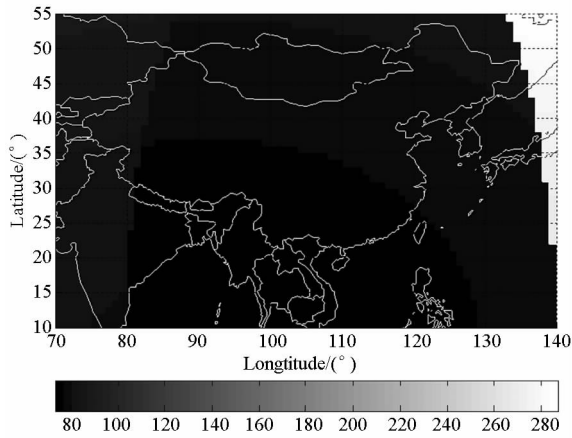


图4 某一时刻中国区域 GEO 定位的 PDOP

Fig. 4 PDOP of GEO constellation in Chinese surrounding area at a given time

度指标优于 2.5m(95%置信度)。文献[14-15]分析了北斗系统码相位测量的多径问题,但此问题对标准单点定位服务影响不大,主要影响精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)等高精密应用。文献[16]对北斗卫星导航系统电离层Klobuchar模型参数性能进行了精度评估,指出其修正精度一般在70%以上。因此,在北斗系统伪距测量误差与GPS伪距测量误差精度相当条件下,在PDOP值为数百时,获得的概略位置精度可满足伪距修复的约束条件。

### 1.2 非 GEO 卫星发射时间恢复

在接收机中卫星*i*的伪距可表示为

$$\begin{aligned} \rho_i &= c(t^r - t_i^s) = c(t^r - t_i^{ms,s} - t_i^{chip,s}) \\ &= r_i(t_i^s, t^r) + ct_d^r + \varepsilon_i(t^r) \\ &= N_i \cdot c/1e^3 + \rho_i^{frea} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $t_i^s$ 为信号发射时间, $t^r$ 为本地时间, $c$ 为光速, $t_i^{ms,s}$ 表示整数信号发射时刻的毫秒整数部分,

$t_i^{chip,s}$ 表示信号发射时刻的毫秒小数部分, $r_i(t_i^s, t^r)$ 表示 $t_i^s$ 时刻的卫星*i*在 $t^r$ 时刻与用户的空间距离, $t_d^r$ 为接收机本地钟差, $\varepsilon_i(t^r)$ 表示修正误差, $N_i$ 表示伪距整毫秒数, $\rho_i^{frea}$ 表示毫秒以下伪距。

当通过伪码相位测量获取 $t_i^{chip,s}$ 值后,即可根据 $\rho_i^{frea} = c \times \text{mod}((t^r - t_i^{chip,s}), 1e^{-3})$ 获得毫秒以下伪距值,其中 $\text{mod}$ 为取模操作。因此对完成帧同步和仅完成码相位测量的伪距观测量可以分别写为如下形式:

$$\begin{cases} \rho_i = r_i(t_i^s, t^r) + ct_d^r + \varepsilon_i(t^r) \\ N_j \cdot c/1e^3 + \rho_j^{frea} = r_j(t_j^s, t^r) + ct_d^r + \varepsilon_j(t^r) \end{cases} \quad (2)$$

伪距星间单差后可以得到卫星*j*的伪距毫秒数的计算公式为:

$$N_j \approx (\rho_i - r_i(t_i^s, t^r) + r_j(t_j^s, t^r) - \rho_j^{frea}) \cdot 1e^3/c \quad (3)$$

因此,在获取用户概略位置后,MEO/IGSO卫星的完整伪距可以通过图5流程进行恢复。

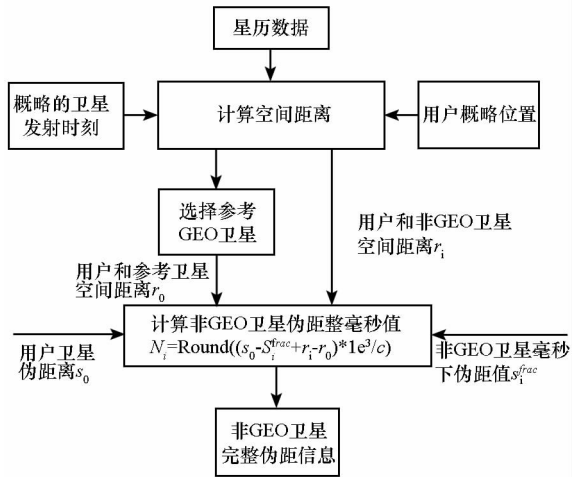


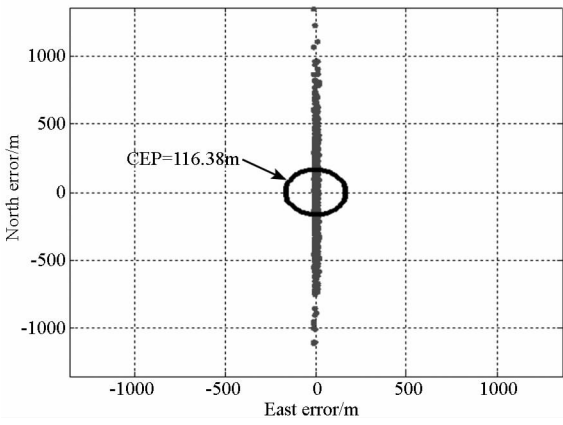
图5 非 GEO 卫星伪距恢复

Fig. 5 Pseudorange recovery of non-GEO satellites

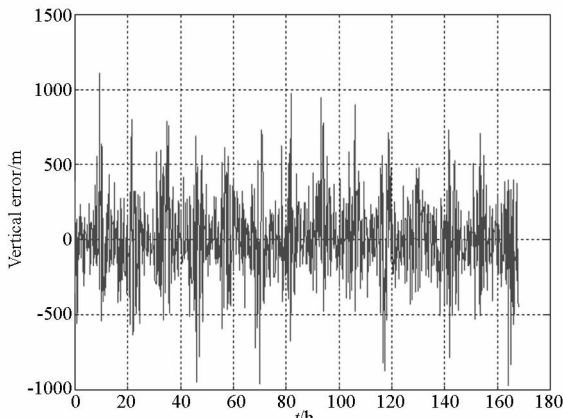
## 2 仿真与分析

使用2014年3月17日至2014年3月24日北斗广播星历进行仿真试验。在各卫星生成伪距加入均值为0、标准差为6m的噪声进行仿真实验。用户坐标为北纬39°东经116°高程为0m时,使用所有几何可见GEO进行定位,结果如图6所示,其中CEP为50%可能性的圆误差。由图6可知,在用户坐标为(39°N, 116°E, 0m)时使用所有可见GEO卫星进行定位的定位误差最大仅为千米量级,远小于伪距毫秒恢复对概略位置精度150km的约束。

国际全球连续监测评估系统(international GNSS Monitoring and Assessment System, iGMAS)



(a) 水平误差  
(a) Horizontal error



(b) 高程误差  
(b) Altitude error

图 6 北斗 GEO 星座粗定位结果

Fig. 6 Coarse positioning results using GEO constellation

通过利用多系统全球导航卫星系统 (Global Navigation satellite System, GNSS) 高精度接收机和高增益全向天线, 建立一个全球分布的 GNSS 信号跟踪网络, 监测 GNSS 系统的服务性能和信号质量<sup>[17]</sup>。使用 iGMAS 部分测站 B1 观测数据验证本文算法有效性, 结果如表 2 所示。共使用了 7 天的测站观测数据, 观测数据频率为 30s。

表 2 iGMAS 测站算法成功率

Tab. 2 Algorithm success rate of iGMAS stations

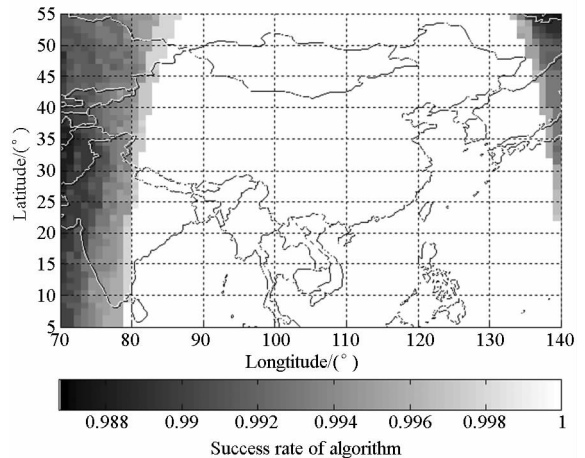
测站	成功率/%
bjfl	100
kunl	100
shal	100
wuhl	100
xial	100
zhon	54.3
cnvr	0

由表 2 统计结果可知: 国内测站定位成功率

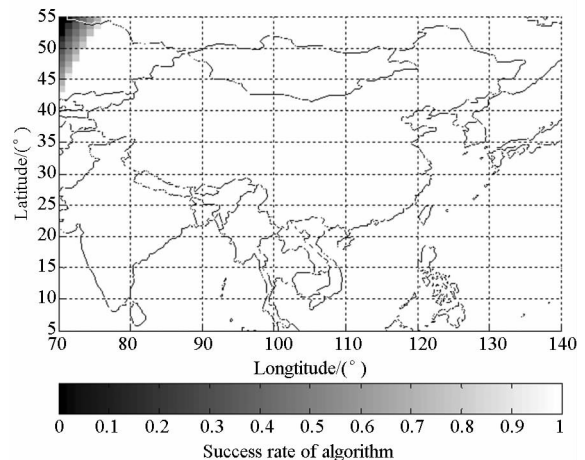
均为 100%; zhon 测站成功率仅为 54.3% 是由于测站概略坐标为 (69.4°S, 76.4°E), 位于南极附近, 出现长时间观测 GEO 卫星数少于 4 颗, 无法完成 GEO 星座粗定位; cnvr 测站概略坐标为 (78.9°N, 11.9°E), 位于北极附近, 无法观测到 GEO 卫星, 从而导致本文算法成功率为 0。

以 1° 为间隔遍历中国附近区域用户, 在伪距加入均值为 0、标准差为 6m 噪声的情况下进行 7 天长时的仿真, 分别以截止仰角 0° 和 5° 进行仿真, 统计中国附近区域基于 GEO 粗定位的 BDS 接收机快速定位方法成功率, 如图 7 所示。

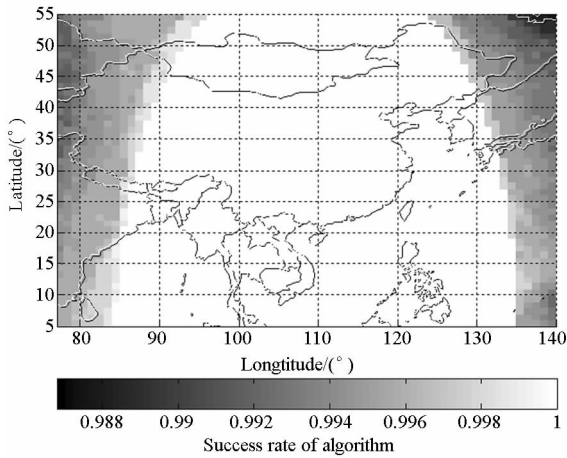
当截止仰角取 0° 时, 中国附近区域使用快速定位方法恢复卫星发射时刻成功率均大于 98.19%; 79.07% 的区域进行快速定位成功率可以达到 100%; 对比 0° 截止角时中国附近区域可见 GEO 卫星数可知, 未达到 100% 成功率的用户坐标与卫星可见数为 4 颗区域基本重叠。可见 GEO 卫星数为 4 颗时, 粗定位误差可能出现超出伪距恢复约束的情况, 从而导致快速定位失败。



(a) 截止角 0° 时成功率  
(a) Success rate with 0° cut-off elevation



(b) 截止角 5° 时成功率  
(b) Success rate with 5° cut-off elevation



(c) 图(b)的局部放大

(c) Partial enlarged picture of figure (b)

图7 中国区域分布快速算法成功率

Fig. 7 Success rate of quick location method in Chinese area

当截止仰角取 $5^\circ$ 时,中国附近区域算法成功率出现为0的情况,原因为可见GEO卫星数少于4颗,不满足粗定位最小二乘解可见卫星数要求;相比于截止角为 $0^\circ$ ,仅有61.75%的区域可实现100%成功率。

### 3 结论

本文提出了基于GEO卫星粗定位的北斗接收机快速定位方法,该方法在星历已知情况下,根据北斗混合星座中GEO卫星电文速率快的特点,无须等待所有卫星完成帧同步,从而提高首次定位时间。使用iGMAS测站实际观测的B1数据对快速定位算法进行了验证,结果表明,在观测到4颗及其以上GEO卫星时,可以实现快速定位。使用广播星历搭建仿真场景,在生成伪距上增加均值为0,标准差为6m的噪声。当截止仰角为 $0^\circ$ 时,中国附近区域实现快速定位概率均大于98.68%,其中约80%的区域可以100%实现快速定位。同时,对比分析了截止仰角为 $5^\circ$ 时的情况。结果表明,在实际使用本算法时,粗定位阶段应该减小截止仰角门限,尽可能地使用多的GEO卫星进行粗定位。在非GEO卫星伪距恢复后进行混合星座精确定位时,可参照传统定位方法设置合理截止仰角门限。

### 参考文献 (References)

[1] Lundgren D, Van Diggelen F. Assistance when there's no assistance[J]. GPS World, 2005, 16(10): 32-36.  
 [2] Mattos P. Self-assisted GPS[J]. GPS World, 2008, 19(9): 50-56.  
 [3] Ahn J, Song H Y, Sung S, et al. An efficient GPS parameter prediction method using GPS ephemeris patterns for self-

assisted GPS[C]//Proceedings of International Conference on Control, Automation and Systems, 2010: 2431-2434.  
 [4] Kaplan E D, Hegarty C J. Understanding GPS: principles and applications[M]. 2nd ed. USA: Artech House, 2006.  
 [5] Van Diggelen F. Method and apparatus for time-free processing of GPS signals[P]. US Patent 6417801, 2002.  
 [6] Sirola N, Syrj arinne J. GPS position can be computed without the navigation data[C]//Proceedings of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2002: 1613-1619.  
 [7] Sirola N. Exhaustive global grid search in computing receiver position from modular satellite range measurements[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2006, 52(1): 73-82.  
 [8] 曹卉,袁洪. 辅助式GPS接收机信号发射时间恢复算法研究[J]. 空间科学学报, 2012, 32(4): 585-591.  
 CAO Hui, YUAN Hong. Method for time-of-transmission recovery based on assisted-GPS positioning[J]. Chinese Journal of Space Science, 2012, 32(4): 585-591. (in Chinese)  
 [9] Wu P, Jing S R, Liu W X, et al. A quick location method for high dynamic GNSS receiver based on time assistance[J]. International Journal of Computers Communications & Control, 2013, 8(5): 768-773.  
 [10] 北斗卫星导航系统空间接口控制文件公开服务信号(2.0版)[EB/OL]. [2013-12]. <http://www.beidou.gov.cn>. BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document Open Service Signal (Version 2.0)[EB/OL]. [2013-12]. <http://www.beidou.gov.cn>. (in Chinese)  
 [11] Misra P, Enge P. Global positioning system, signal, measurements, and performance[M]. 2nd ed. USA: Ganga-Jamuna Press, 2006.  
 [12] Montenbruck O, Steigenberger P, Hauschild A. Broadcast versus precise ephemerides; a multi-GNSS perspective[J]. GPS Solutions, 2015, 19(2): 321-333.  
 [13] 北斗卫星导航系统公开服务性能规范(1.0版)[EB/OL]. [2013-12]. <http://www.beidou.gov.cn>. BeiDou Navigation Satellite System Open Service Performance Standard (Version 1.0)[EB/OL]. [2013-12]. <http://www.beidou.gov.cn>. (in Chinese)  
 [14] Wanniner L, Beer S. BeiDou satellite-induced code pseudorange variations; diagnosis and therapy[J/OL]. GPS Solution. 12 November 2014. [2015-01-10]. <http://link.springer.com/article/10.1007/s10291-014-0423-3>.  
 [15] Wang G X, De Jong K, Zhao Q L, et al. Multipath analysis of code measurements for BeiDou geostationary satellites[J]. GPS Solution, 2015, 19(1): 129-139.  
 [16] 张强,赵齐乐,章红平,等. 北斗卫星导航系统Klobuchar模型精度评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(2): 142-146.  
 ZHANG Qiang, ZHAO Qile, ZHANG Hongping, et al. Evaluation on the precision of Klobuchar model for BeiDou navigation satellite system[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(2): 142-146. (in Chinese)  
 [17] 焦文海,丁群,李建文,等. GNSS开放服务的检测评估[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2011, 41(5): 521-527.  
 JIAO Wenhai, DING Qun, LI Jianwen, et al. Monitoring and assessment of GNSS open services[J]. SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy, 2011, 41(5): 521-527. (in Chinese)