

北斗测距信号评估与精密单点定位应用研究*

张继海^{1,2}, 广伟^{1,2,3}, 袁海波^{1,2}, 董绍武^{1,2,4}, 武文俊^{1,2}

(1. 中国科学院国家授时中心 西安 710600; 2. 中国科学院时间频率基准重点实验室 西安 710600;
3. 中国科学院大学 北京 100039; 4. 中国科学院天文与空间科学学院 北京 100049)

摘要:随着全球导航系统的建设和发展应用,我国北斗导航系统也开始逐步向全球用户提供高质量的定位、导航和授时服务。基于我国时间基准 UTC(NTSC)系统,开展北斗导航系统测距信号评估与精密单点定位(PPP)应用研究。通过实测数据首先分析北斗测距 B1、B2 频点的信噪比以及周围观测环境所引起的多路径影响。同时,讨论了北斗精密单点算法,并利用实测数据以及 GNSS 服务中心 IGS 国际多模 GNSS 实验工程(MGEX)提供的精密轨道和钟差产品进行精密定位解算。结果表明,B2 频点信号接收性能优于 B1 频点,北斗精密单点定位计算的结果在 X、Y、Z 3 个方向上的误差基本保持在 cm 级,解算的本地时相对于 IGST 偏差的频率稳定度短稳达到了 10^{-14} 量级,与全球定位系统(GPS)精密单点定位性能基本相当,表明我国北斗系统可用于 ns 级高精度时间传递。

关键词:北斗导航系统;北斗信号质量;精密单点定位;时间传递

中图分类号: TH714 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 160.75

Study on range signal evaluation and precise point positioning application of Beidou navigation satellite system (BDS)

Zhang Jihai^{1,2}, Guang Wei^{1,2,3}, Yuan Haibo^{1,2}, Dong Shaowu^{1,2,4}, Wu Wenjun^{1,2}

(1. National Time Service Center, CAS, Xi'an 710600, China; 2. Key Lab of Time-frequency Standard of the Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 4. School of Astronomy and Space Science, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract: With the developing of global navigation system, the high quality of positioning navigation and time service are gradually provided by Beidou navigation satellite system (BDS) in China. In this paper, the data of BDS receiver operated in time keeping laboratory of national time service center (NTSC) are used, the BDS range signal evaluation and precise point positioning (PPP) are studied. Based on the measurements data, the signal-to-noise ratio and multipath effect of B1 and B2 frequencies are analyzed. And the algorithm of BDS PPP is discussed in detail. The precision positioning and timing information is calculated by using the data and the products of precise orbit and precise satellite clock from MGEX of IGS. The result show that reception performance of B2 frequency point is better than B1 frequency point, and the BDS PPP error of X, Y, Z kept at cm level. The short term frequency stability of time difference between local time and IGST is in 10^{-14} , and the performance is approximately the same as global positioning system (GPS). It is proved that the BDS can be used in ns level time transfer.

Keywords: Beidou navigation satellite system (BDS); quality of Beidou signal; precise point positioning (PPP); time transfer

0 引言

随着卫星导航定位与授时服务的广泛应用发展,全

球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)为全球陆、海、空、天等各类军民用用户提供全天候、高精度、连续的、实时的定位、测速与授时服务。目前,全球四大卫星导航系统中,美国的全球定位系统(global

positioning system, GPS) 由于其稳定可靠及高精度的特点, 成为广大用户首选的卫星导航系统。然而, 随着我国北斗卫星导航系统 (Beidou navigation satellite system, BDS) 的建设与走向全球化服务应用推广, 北斗卫星导航系统已经具备区域导航、定位、测速与授时服务能力。同时, 基于北斗卫星导航系统推广应用的相关研究也在积极开展。到 2020 年, 我国将建成为覆盖全球的卫星导航系统。届时, 其系统星座由 3 颗地球同步轨道 (geosynchronous earth orbit, GEO) 卫星、24 颗中地球轨道 (medium earth orbit, MEO) 卫星和 3 颗倾斜地球同步轨道 (Inclined geosynchronous satellite orbit, IGSO) 卫星组成, 可实现为全球用户提供实时的高精度导航与授时服务^[1-3]。

现阶段我国相关从事卫星导航系统的科研院所及高校也积极开展了基于北斗系统的相关科学研究, 并取得了重要的研究成果, 这些研究成果也积极推动了北斗卫星导航系统的建设与发展。但由于国内诸多研究所与高校的研究方向不同, 且大部分的研究重点集中在北斗系统定位、信号及测速等方面, 在基于北斗系统的远距离时间频率传递与比对方面研究较少。目前, GPS 精密单点定位 (precise point positioning, PPP) 时间传递技术仍然是国际权度局 (Bureau international des poids et mesures, BIPM) 进行国际原子时 (international atomic time, TAI) 归算主要采用的一种方法手段和技术^[4]。随着北斗卫星导航系统的建设和发展, 在 2017 年第 21 届国际时间频率咨询委员会 (consultative committee for time and frequency, CCTF) 工作组会议上, BIPM 的专家提出未来计划利用 BDS 时间传递技术用于 TAI 的计算。因此, 依托我国国家时间基准系统 UTC (NTSC) 的平台, 开展基于北斗 PPP 在定位与载波相位时间传递研究方面具有重要的意义, 这也将进一步增强我国北斗导航系统在国际导航领域中的影响力。

本文基于我国时间基准 UTC (NTSC) 系统, 利用守时实验室的授时型接收机获得的北斗观测数据, 开展我国北斗卫星导航系统测距信号评估与精密单点定位研究。通过对北斗 B1、B2 频点的测距信号信噪比以及伪距多路径效应分析评估北斗卫星观测数据的质量。同时, 利用北斗伪距与相位观测值对固定接收机天线进行非差精密单点定位研究, 对解算出的天线坐标偏差以及本地时 UTC (NTSC) 与 IGST 的偏差进行分析与评估。

1 北斗测距信号评估与 PPP 处理基本原理

1.1 信噪比

接收机天线将收到的北斗卫星所发射的电磁波信号转变成电压或电流信号, 以供接收机射频前端采集与处理。因此, 接收机用于定位的信息基本全部来自于天线

接收到的北斗卫星信号, 它对接收机的整体性能起着至关重要的作用。天线信号接收功率的强弱以及相对于噪声的强弱用以描述信号质量的好坏, 信号的质量通常用信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 来衡量, 它定义为信号功率 P_R 与噪声功率 N 之间的比率, 其表达式如下^[5]:

$$\begin{cases} SNR = \frac{P_R}{N} \\ N = kTB_n \end{cases} \quad (1)$$

式中: N 的单位为 W; T 为噪声温度, 单位为 K; B_n 为噪声带宽, 单位为 Hz; k 为玻耳兹曼常数, 其值为 1.38×10^{-23} J/K。

1.2 多路径效应

在北斗定位解算中, 接收机天线除了接收从卫星发射后的直线传播的电磁波信号外, 还可能接收到一个或多个由该电磁波经过周围物体反射后的信号, 这些经反射后的信号会经过一次或多次反射后到达天线与直射波信号叠加在一起到达接收机天线, 这样会引入接收机接收信号的噪声测量误差, 导致在伪距和载波相位等测量值中引入多径误差。

在多路径计算中, 可利用码伪距和相位观测值估计出多路径引入的误差, 其表达式如下^[5-6]:

$$\begin{cases} MP_1 = \rho_{B1} - \frac{f_{B1}^2 + f_{B2}^2}{f_{B1}^2 - f_{B2}^2} \cdot \phi_{B1} + \frac{2f_{B2}^2}{f_{B1}^2 - f_{B2}^2} \cdot \phi_{B2} - N_{\rho_1} \\ MP_2 = \rho_{B2} - \frac{2f_{B1}^2}{f_{B1}^2 - f_{B2}^2} \cdot \phi_{B1} + \frac{f_{B1}^2 + f_{B2}^2}{f_{B1}^2 - f_{B2}^2} \cdot \phi_{B2} - N_{\rho_2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: MP_1 和 MP_2 为不同频率信号测量的伪距多路径引起的误差, 单位为 m; f_{B1} 与 f_{B2} 为载波频率, ρ_{B1} 和 ρ_{B2} 为接收机伪距观测值, 单位为 m, ϕ_{B1} 和 ϕ_{B2} 分别为载波相位观测值, 单位为 m, N_{ρ_1} 、 N_{ρ_2} 为组合中的模糊度, 单位为 m。

1.3 北斗精密单点定位

以我国时间基准 UTC (NTSC) 为本地参考信号, 通过接收北斗空间信号开展北斗精密单点定位的研究, 其原理连接如图 1 所示^[7-10]。

数据采集单元实时存储北斗伪距和相位观测值, 其观测方程可表示为:

$$\begin{cases} \rho_i = P + cdt_r - cdT_s + d_{\text{trop}} + d_{\text{ion}/\rho_i} + d_{\text{mult}/\rho_i} + \varepsilon_{\rho_i} \\ L_i = P + cdt_r - cdT_s + d_{\text{trop}} - d_{\text{ion}/\phi_i} + d_{\text{mult}/\phi_i} + \lambda_i N_i + \varepsilon_{\phi_i} \end{cases} \quad (3)$$

式中: ρ_i 为 B_i 频率上的码伪距观测值, 单位为 m; L_i 为 B_i 频率上的相位观测值, 单位为 m; P 为站星距, 单位为 m; cdt_r 为接收机钟差改正项, 单位为 m, 为接收机时间与 BDS 系统时间之间的偏差; cdT_s 为卫星钟差改正项, 单位为 m, 为卫星时间与 BDS 系统时之间的偏差; d_{trop} 为对

流层延迟,单位为 m,这种延迟是由于信号通过对流层大气而引起的; d_{mult/ρ_i} 为不同载波信号上所引起的电离层以及多路径延迟,单位为 m; $\lambda_i N_i$ 为相位整周模糊度,单位为 m; ε_{ρ_i} 为伪距观测值引入的观测误差,单位为 m; ε_{ϕ_i} 为相位测值引入的观测误差,单位为 m。

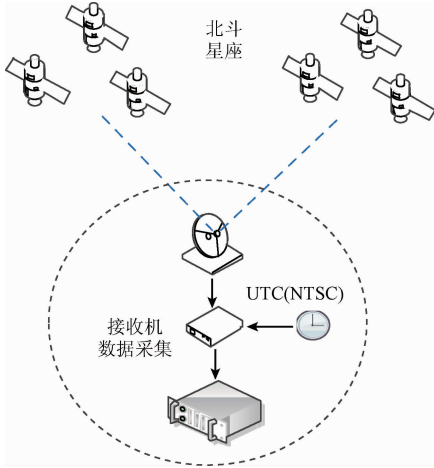


图 1 北斗接收空间信号法

Fig.1 The method of BDS space signal receiver

北斗测量型接收机外接我国时间基准 UTC (NTSC) 系统的标准时间频率信号,通过接收机与计算机采集的观测数据,以及利用 IGS 等国际权威机构发布的北斗卫星精密卫星轨道和钟差等产品,对接收机天线位置偏差以及本地时 UTC(NTSC)相对于 IGS 的偏差等参数进行估计。其数据处理流程如图 2 所示。

由图 2 可知,在精密单点定位中,利用相位平滑伪距来减少伪距中的观测噪声,以提高定位与授时服务。在相位平滑伪距前,需要确定观测数据中发生周跳的位置,周跳探测的好坏将直接影响相位平滑伪距的质量。本文采用以下方法对周跳进行探测^[11-15]。

1) 电离层残差法周跳探测

根据式(3)可得无几何关系的载波相位组合观测值 ϕ_l :

$$\phi_l = \lambda_1 \phi_1 - \lambda_2 \phi_2 = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 + \delta P_{l,B1} - \delta P_{l,B2} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 + \left(1 - \frac{f_{B1}^2}{f_{B2}^2}\right) \delta P_{l,B1} \quad (4)$$

式中: $\delta P_{l,B1}$ 和 $\delta P_{l,B2}$ 分别为北斗 B1 和 B2 频点所引入的电离层时延。如果不存在周跳,则在相邻历元求差得:

$$\phi_l(t_{i+1}) - \phi_l(t_i) = \left(1 - \frac{f_{B1}^2}{f_{B2}^2}\right) (\delta P_{l,B1}(t_{i+1}) - \delta P_{l,B1}(t_i)) \quad (5)$$

式(5)即为电离层残差,因为其数值仅与历元间电离层的变化以及载波相位观测值的噪声有关。由于相邻历元间计算出的电离层残差非差小,因此,任何异常的变化都可以表明在一个或两个频率的相位观测值中发生了周跳。

2) 双频码相组合 (Melbourne-Wübbena, MW) 法

根据任一历元的双频伪距和相位观测值,可以求得宽巷观测值的整周模糊度 N_Δ :

$$N_\Delta = \frac{f_1 P_1 + f_2 P_2}{f_1 + f_2} - (\phi_1 - \phi_2) \lambda_\Delta \quad (6)$$

式中:宽巷组合波长 $\lambda_\Delta = \frac{c}{f_1 - f_2}$ 。式(7)所示为从开始历元到第 i 个历元计算宽巷组合模糊度 N_Δ 和方差 σ^2 。

$$\begin{cases} \bar{N}_\Delta^i = \bar{N}_\Delta^{i-1} + \frac{1}{i} (N_\Delta^i - \bar{N}_\Delta^{i-1}) \\ \sigma_i^2 = \sigma_{i-1}^2 + \frac{1}{i} [(N_\Delta^i - \bar{N}_\Delta^{i-1})^2 - \sigma_{i-1}^2] \end{cases} \quad (7)$$

若根据第 i 个历元的双频观测结果求得的 N_Δ^i 与 \bar{N}_Δ^{i-1} 之差的绝对值 $|N_\Delta^i - \bar{N}_\Delta^{i-1}|$ 满足下列方程:

$$|N_\Delta^i - \bar{N}_\Delta^{i-1}| \geq 4\sigma_i \quad (8)$$

$$|N_\Delta^{i+1} - N_\Delta^i| \leq 1 \quad (9)$$

如果式(8)满足,但式(9)不满足,则认为在第 i 个历元发生了周跳;如果式(8)和(9)都满足,则认为在第 i 个历元出现了粗差。

3) 消电离层组合法

$$LP_l = \frac{f_1^2 \phi_1 - f_2^2 \phi_2}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{f_1^2 P_1 - f_2^2 P_2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (10)$$

消电离层组合观测值消除了几何距离、对流层、一阶电离层等影响。利用这种组合法可以剔除 MW 组合中没有剔除掉的质量较差的观测值。

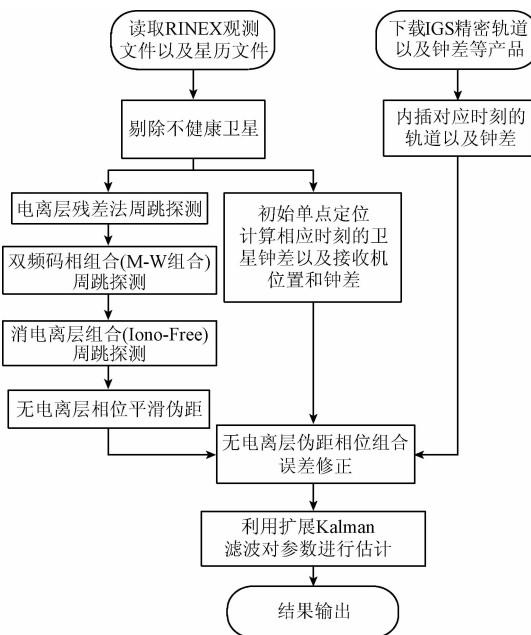


图 2 北斗 PPP 算法流程

Fig.2 The algorithmic framework of BDS PPP

通过上述周跳探测方法,利用无电离层伪距与相位观测值,取若干历元的平均值:

$$\lambda N_L = \frac{1}{i} \sum_{j=1}^i (P_3 - \lambda \phi_3) \quad (11)$$

式(11)用于计算获得相位平滑伪距 $\bar{P}_{3,i}$:

$$\begin{cases} \bar{P}_{3,i} = \lambda(\phi_{3,i} + N_L) \\ \langle \lambda N_L \rangle_i = \frac{i-1}{i} \langle \lambda N_L \rangle_{i-1} + \frac{1}{i} (P_i - \lambda \phi_i) \end{cases} \quad (12)$$

当连续观测时,用上述平滑方法能获得精度较高的伪距值,为精密单点定位提供了必要的条件。图3所示为相位平滑伪距前后历元间一次差分结果(采样间隔为30 s)。可以看出平滑后的结果相对于双频无电离层伪距组合结果具有更小的噪声,且曲线较光滑。图4所示为相位平滑伪距前后差分的结果在相同历元间残差值,可以看出双频无电离层伪距组合相对噪声基本保持在 ± 4 m,其残差均方根值为 1.270 4 m。

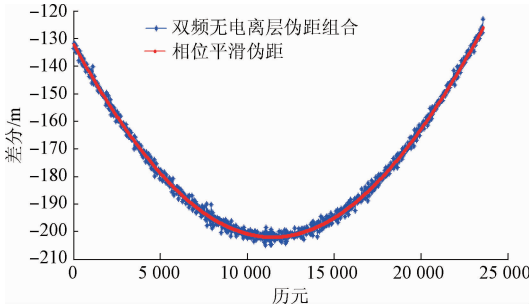


图3 经相位平滑伪距前后的伪距差分

Fig. 3 The differential of pseudo-range before and after phase smoothed pseudo-range

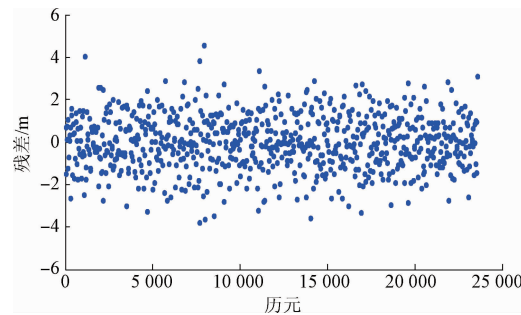


图4 残差值

Fig. 4 The residual

对于精密轨道与精密钟差产品,本文利用10阶拉格朗日插值法,内插到卫星发射时刻^[16]。

$$f(x) = \sum_{k=0}^n \prod_{i=0, i \neq k}^n \left(\frac{x - x_i}{x_k - x_i} \right) y_k \quad (13)$$

利用式(13)可知,函数 $y = f(x)$ 的 $n+1$ 个节点 $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$ 及其对应的函数值 $y_0, y_1, y_2, \dots, y_n$, 对插值区间内任一点 x , 可利用式(13)进行拉格朗日插值多项

式计算函数值。

在GNSS精密单点定位中常用的参数估计方法有扩展卡尔曼滤波、序贯最小二乘法和平方根信息滤波与平滑。本文采用扩展卡尔曼滤波方法对接收机天线坐标、接收机钟差、对流层顶端延迟、整周模糊度进行估计。如果接收机同时接收到 n 颗卫星,则未知参数的个数为 $n+5$,未知参数写成向量的形式,如式(14)所示^[17-20]。

$$\mathbf{X} = [x \ y \ z \ dt \ d_{trop} \ N_1 \ \dots \ N_n]^T \quad (14)$$

在精密单点定位中,观测方程是非线性的,将其在 $\mathbf{X}^* = \hat{\mathbf{X}}_{k/k-1}$ 处线性化,得到线性化后的观测方程为:

$$\mathbf{L}_k = H_k(\mathbf{X}_k^*) + \mathbf{B}_k(\mathbf{X}_k - \mathbf{X}_{k-1}^*) + \mathbf{W}_k + \boldsymbol{\eta}_k \quad (15)$$

式中: $E(\mathbf{X}_0) = \hat{\mathbf{X}}_{0,0}$, \mathbf{L}_k 为线性化的测量值, H_k 为 \mathbf{L}_k 与 \mathbf{X}_k 间的函数关系, \mathbf{B}_k 为观测方程系数矩阵, \mathbf{W}_k 为观测噪声向量, $\boldsymbol{\eta}_k$ 为非线性观测方程线性化引入的误差。

扩展卡尔曼滤波算法流程如下所示:

1) 计算预报值 \mathbf{X}_k 及其方差阵 \mathbf{P}_k :

$$\hat{\mathbf{X}}_{k/k-1} = \boldsymbol{\Phi}_{k/k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1/k-1} \quad (16)$$

$$\mathbf{P}_{k/k-1} = \boldsymbol{\Phi}_{k/k-1} \mathbf{P}_{k-1/k-1} \boldsymbol{\Phi}_{k/k-1}^T + \boldsymbol{\Gamma}_{k-1} \mathbf{Q}_{k-1} \boldsymbol{\Gamma}_{k-1}^T \quad (17)$$

2) 计算增益矩阵:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{B}_k^T [\mathbf{B}_k \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{B}_k^T + \mathbf{R}_k]^{-1} \quad (18)$$

3) 计算滤波值 $\hat{\mathbf{X}}_{k/k}$ 及其方差阵 $\mathbf{P}_{k/k}$:

$$\hat{\mathbf{X}}_{k/k} = \hat{\mathbf{X}}_{k/k-1} + \mathbf{K}_k [\mathbf{L}_k^* - \mathbf{B}_k \hat{\mathbf{X}}_{k/k-1}] \quad (19)$$

$$\mathbf{P}_{k/k} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{B}_k) \mathbf{P}_{k/k-1} \quad (20)$$

式中: $\boldsymbol{\Gamma}_k$ 为动态噪声矩阵, $\boldsymbol{\Phi}_k$ 为状态转移矩阵, \mathbf{Q}_k 和 \mathbf{R}_k 分别为系统动态噪声和观测噪声的方差矩阵。递推初值为 $\hat{\mathbf{X}}_{0,0} = E(\mathbf{X}_0)$, $\mathbf{P}_{0,0} = \text{var}(\mathbf{X}_0)$ 。

2 测试及分析评估

本文基于国家时间频率基准系统开展了北斗测距信号评估以及精密单点定位研究。北斗测量型接收机外接国家授时中心标准时间信号 1PPS 以及 10 MHz 频率信号,并放置于国家授时中心守时钟房,钟房环境适宜,温度常年保持在 $24 \pm 1^\circ\text{C}$,湿度保持在 55% ~ 60% 的环境中。利用第1节所介绍的基本原理及算法编制了相关的北斗数据处理软件,并利用此软件开展了北斗实验研究、数据处理和结果分析。

2.1 测距信号评估

利用2017年3月26日的北斗全天观测数据,采样间隔为30 s的B1和B2频点观测数据,以北斗1号星(GEO)以及6号星(IGSO)对接收机接收北斗观测信号的信噪比以及多路径进行分析。

图5和6所示为1号星全天B1和B2频点观测数据的信噪比随高度角的变化情况。可以看出由于GEO卫星相对于地面静止,卫星高度角在很小范围内变化,大小

为 3° 左右。B1 和 B2 基本维持在 40 和 46 dBHz 左右,且变化较小。B1 频点信号的信噪比与仰角变化关系不明显,而 B2 频点信噪比与仰角呈正相关。同时 B2 频点的信噪比优于 B1 频点约 6 dBHz。

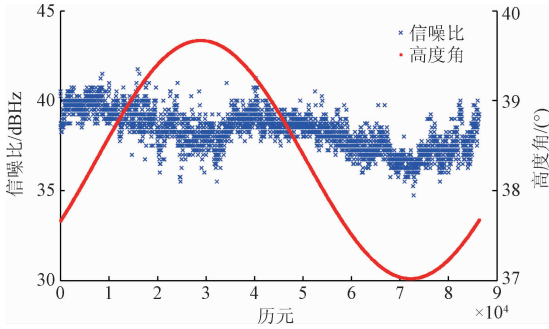


图 5 北斗 1 号星 B1 频点信噪比

Fig. 5 The SNR of Beidou-1 satellite at B1 frequency

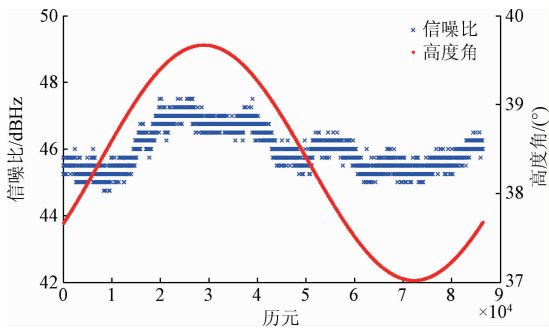


图 6 北斗 1 号星 B2 频点信噪比

Fig. 6 The SNR of Beidou-1 satellite at B2 frequency

图 7 和 8 所示为北斗 6 号星 B1 和 B2 频点的信噪比随高度角的变化情况。可以看出 IGSO 卫星信噪比随卫星高度角具有相同的变化趋势,卫星高度角越大,信噪比越大。

由北斗 1 号星和 6 号星分别在两个频率信噪比相比较可见,载波 B2 比 B1 的信号强度大。

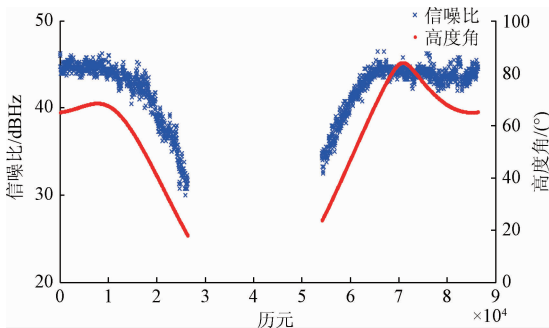


图 7 北斗 6 号星 B1 频点信噪比

Fig. 7 The SNR of Beidou-6 satellite at B1 frequency

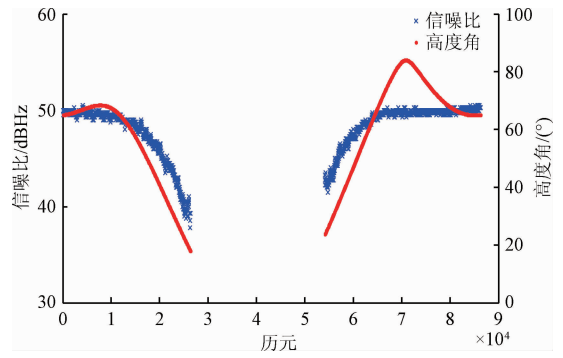


图 8 北斗 6 号星 B2 频点信噪比

Fig. 8 The SNR of Beidou-6 satellite at B2 frequency

图 9 和 10 所示为北斗 1 号卫星和 6 号卫星随卫星高度角变化所引起的多路径时延的变化情况。由此可见 1 号卫星的 B1 和 B2 伪距多路径由于高度角变化较小,其多路径的影响基本保持在 ± 1 m 左右。6 号卫星在 B1 频点和 B2 频点伪距多路径随着高度角的变化而变化,卫星高度角越大,其多路径影响越小。通过上述比较可以看出,码多径与信号的信噪比具有正相关的关系,同时在该测站 B2 频点信号的接收性能明显优于 B1 频点。造成该影响的原因需在后续研究中进一步分析。

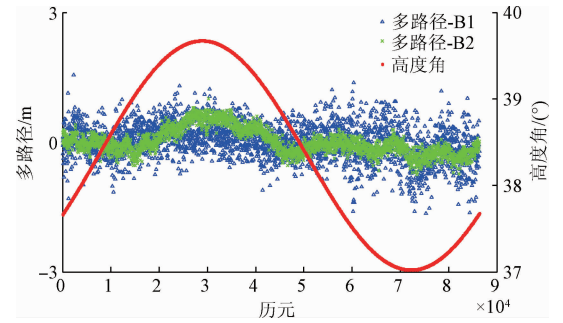


图 9 北斗 1 号星 B1、B2 频点多路径时延

Fig. 9 The multipath of Beidou-1 satellite at B1 and B2 frequency

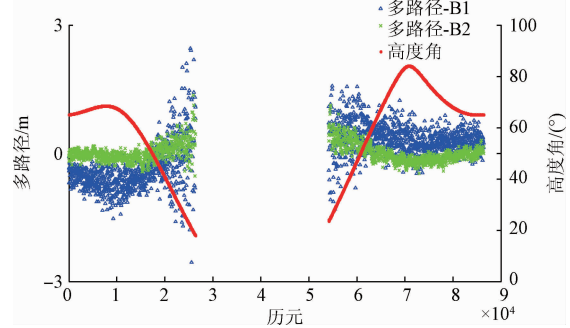


图 10 北斗 6 号星 B1、B2 频点多路径时延

Fig. 10 The multipath of Beidou-6 satellite at B1 and B2 frequency

2.2 北斗精密单点定位

利用2017年3月26日的北斗以及GPS观测数据,采样间隔为30 s,并使用国际多模GNSS实验工程(multi-GNSS experiment, MGEX)提供的精密轨道和精密钟差产品对接收机天线坐标开展精密单点定位试验,其定位结果如图11、12所示。

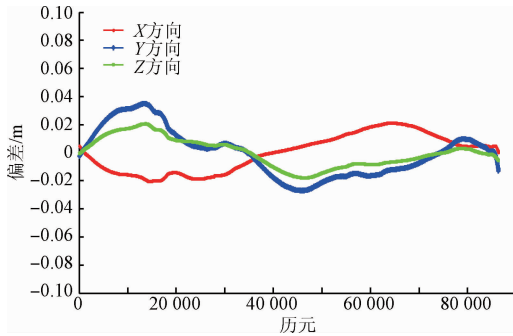


图11 北斗精密单点定位误差

Fig. 11 The error of BDS Precise point positioning

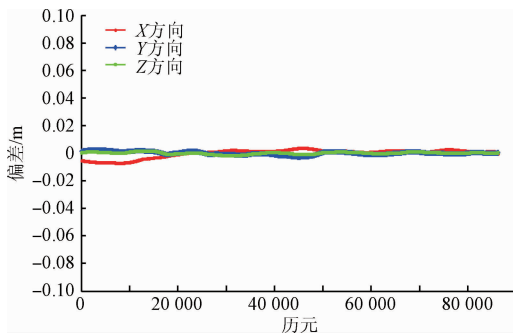


图12 GPS精密单点定位误差

Fig. 12 The error of GPS Precise point positioning

从图11可以看出北斗精密单点定位在X、Y、Z3个方向的误差在cm级,且X和Z方向上基本保持在 ± 2 cm, Y方向基本保持在 ± 4 cm以内。由图12可知, GPS精密单点定位在X、Y、Z3个方向上的定位误差,其基本保持在mm级。表1所示为不同系统定位误差的标准偏差(standard deviation, STDEV)值。

利用以上分析可知,虽然GPS系统由于其成熟的技术,在精密单点定位精度优于处于发展阶段的北斗系统,但北斗精密单点定位厘米级的定位误差现阶段能满足大部分用户的需求。

表1 GPS/BDS PPP定位误差STDEV值

Table 1 The STDEV of GPS/BDS PPP Position error

系统	X	Y	Z
GPS	0.003 0	0.001 2	0.000 7
BDS	0.013 3	0.017 0	0.010 2

图13所示为分别利用北斗PPP与GPS PPP估算出的本地时相对IGST偏差的频率稳定度。

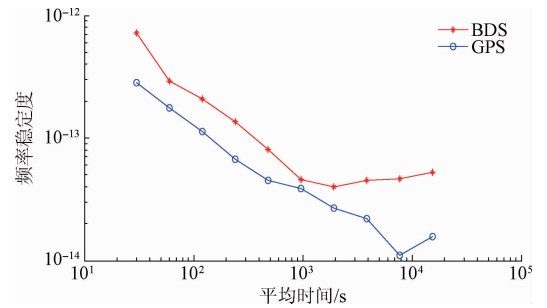


图13 UTC(NTSC)-IGST稳定度

Fig. 13 The frequency stability of UTC(NTSC)-IGST

表2所示为利用两种不同系统获得的本地时相对于IGST偏差稳定度的结果。

表2 UTC(NTSC)-IGST频率稳定度

Table 2 The allan Deviation of UTC(NTSC)-IGST

时间/s	BDS	GPS
30	7.25×10^{-13}	2.83×10^{-13}
60	2.91×10^{-13}	1.76×10^{-13}
120	2.08×10^{-13}	1.12×10^{-13}
240	1.36×10^{-13}	6.73×10^{-14}
480	8.08×10^{-14}	4.53×10^{-14}
960	4.60×10^{-14}	3.89×10^{-14}
1 920	4.00×10^{-14}	2.70×10^{-14}
3 840	4.48×10^{-14}	2.20×10^{-14}
7 680	4.63×10^{-14}	1.11×10^{-14}
15 360	5.25×10^{-14}	1.57×10^{-14}

根据图13以及表2可以看出,从480 s开始,经北斗链路计算得到的UTC(NTSC)-IGST的短期稳定度达到 10^{-14} 量级,该指标与目前GPS精密单点定位进行授时达到的指标基本相当。因此,北斗PPP也可用于两地高精度时间比对与授时服务。

3 结论

本文基于国家时间基准UTC(NTSC)系统,利用多模GNSS测量型接收机,通过使用实测数据,首先对北斗观测数据B1、B2频点的信噪比以及观测环境多路径效应进行了分析,结果表明B2频点信号接收性能要优于B1频点。最后利用北斗精密轨道和精密钟差,通过北斗PPP精密单点定位算法,对接收机天线位置以及本地时相对于IGST的偏差进行了估计,结果表明,3个方向上的定位误差在厘米级,其STDEV值优于2 cm,本

地时相对于 IGST 的偏差短期稳定度达到 10^{-14} 量级。结果表明利用北斗精密单点定位在进行高精度时间比对与授时上基本与 GPS 具有同等性能的能力,为进一步推动北斗系统在高精度时间传递中的应用奠定基础。

参考文献

- [1] HAN C H, YANG Y X, CAI Z W. BeiDou navigation satellite system and its time scales [J]. *Metrologia*, 2011, 48(4): 213-218.
- [2] ZHANG X H, WU M K, LIU W K et al. Initial assessment of the COMPASS/BeiDou-3: New-generation navigation signals [J]. *Journal of Geodesy*, 2017(1): 1-16.
- [3] 连远锋, 赵剡, 吴发林. 北斗二代卫星导航系统全球可用性分析[J]. *电子测量技术*, 2010, 33(2): 15-18.
- LIAN Y F, ZHAO Y, WU F L. Analysis of global availability for beidou 2nd generation navigation system[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2010, 33(2): 15-18.
- [4] PETET G, JIANG Z H. Precise point position for TAI computation [J]. *IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 21st European Frequency and Time Forum*, 2007:395-398.
- [5] 张小红, 丁乐乐. 北斗二代观测值质量分析及随机模型精化[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2013, 38(7): 832-836.
- ZHANG X H, DING L L. Quality analysis of the second generation compass observables and stochastic model refining [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(7): 832-836.
- [6] YEDUKONDALU K, SARMA A D, KUMAR A . Mitigation of GPS multipath error using recursive least squares adaptive filtering [J]. *IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS)*, 2010: 104-107.
- [7] YUAN H B, GUANG W, YANG F. Time service through BD GEO satellite [J]. *European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC)*, 2013: 496-500.
- [8] GUANG W, ZHANG P F, YUAN H B, et al. The research on carrier phase time transfer of BeiDou navigation satellite system [J]. *European Frequency and Time Forum (EFTF)*, 2014: 113-117.
- [9] GUANG W, YUAN H B, DONG S W, et al. The evaluation of BeiDou time transfer performance [J]. *IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS)*, 2016:1-4.
- [10] PETET G, KANJ A, LOYER S, et al. 1×10^{-16} Frequency transfer by GPS PPP with integer ambiguity resolution [J]. *Metrologia*, 2015, 52(2): 301-309.
- [11] ZHANG J H, YUAN H B, GUANG W, et al. The application of phase smoothed pseudo-range in beidou satellite clock evaluation [J]. *IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS)*, 2016:1-4.
- [12] YAO J, LEVINE J. A study of GPS Carrier-phase time transfer noise based on NIST GPS receivers [J]. *Journal of Research of NIST*, 2016: 372-388.
- [13] YAO J, LEVINE J. A new algorithm to eliminate GPS carrier-phase time transfer boundary discontinuity [J]. *ION Precise Time and Time Interval Meeting*, 2013: 292-303.
- [14] YAO J, SKAKUN I, JIANG Z H, et al. Comparison of two continuous GPS carrier-phase time transfer techniques [J]. *Frequency Control Symposium & the European Frequency and Time Forum*, 2015: 655-661.
- [15] 吴继忠, 施闯, 方荣新. TurboEdit 单站 GPS 数据周跳探测方法的改进[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2011, 36(1): 29-33.
- WU J ZH, SHI CH, FANG R X. Improving the single station data cycle slip detection approach turbocEdit [J]. *Geomatics Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(1): 29-33.
- [16] 涂俐兰, 黄丹. 插值法在数据修正中的应用[J]. *数学理论与应用*, 2012, 32(3): 110-116.
- TU L L, HUANG D. Application of interpolation in data correction [J]. *Mathematical Theory and Applications*, 2012, 32(3): 110-116.
- [17] 刘春, 马颖. 改进卡尔曼滤波在北斗伪距定位中的研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(5): 779-785.
- LIU CH, MA Y. Research on improved Kalman filter in Beidou pseudo ranges positioning [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(5): 779-785.
- [18] 薛明喜, 杨扬, 张晨睿, 等. 基于自适应 Kalman 滤波的 SAW 测温数据纠错方法[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(12): 2766-2773.
- XUE M X, YANG Y, ZHANG CH R, et al. Error correction method for SAW temperature measurement data based on adaptive Kalman filter[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(12): 2766-2773.
- [19] 韩萍, 桑威林, 石庆研. 一种新型非线性卡尔曼滤波

方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(3): 632-638.

HAN P, SANG W L, SHI Q Y. Novel nonlinear Kalman filtering method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(3):632-638.

[20] 蔡挺, 刘明雍, 黄博. 基于中心微分 Kalman 滤波的重力/惯性组合导航[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(1):22-24.

CAI T, LIU M Y, HUANG B. The gravity/inertial integrated navigation based on center differential Kalman filtering [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2013, 32(1):22-24.

作者简介



张继海, 2014 年于中国科学院国家授时中心获得硕士学位, 现为中国科学院国家授时中心助理研究员, 主要研究方向为高精度时间传递与 GNSS 时差监测。

E-mail: zhangntsc@126.com

Zhang Jihai received his M. Sc. degree from National Time Service Center, CAS, in 2014. Now he is a research assistant in National Time Service Center, CAS. His main research interests include high precision time transfer and GNSS time difference monitoring.



董绍武 (通讯作者), 2007 年于中国科学院国家授时中心获得博士学位, 现为中国科学院国家授时中心研究员、博士生导师, 主要研究方向为标准时间的产生与保持(守时)技术、GNSS 时间系统等。

E-mail: sdong@ntsc.ac.cn

Dong Shaowu (Corresponding author) received his Ph. D. degree from National Time Service Center, CAS, in 2007. Now he is a research fellow and doctoral supervisor in National Time Service Center, CAS. His main research interests include timekeeping techniques, GNSS time system, and etc.