0254-6124/2019/39(1)-118–11 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LIU Ruihua, WANG Ying, WANG Jian. Evaluation on UERE and positioning accuracy of BDS (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2019, **39**(1): 118-128. DOI:10.11728/cjss2019.01.118

北斗系统 UERE 及定位精度评估*

刘瑞华 王 莹 王 剑

(中国民航大学电子信息与自动化学院 天津 300300)

摘 要 用户测距误差 (URE) 与用户设备误差 (UEE) 是影响定位精度的主要因素. 民航是北斗系统的高端用户, 监测其对民航机场的覆盖性和服务性能十分必要. 本文根据华东、华南、华北、西北地区 4 个民航机场观测站的北斗实测数据, 分析了各机场卫星的可见性. 根据 URE 的解算方法、电离层修正模型、对流层修正模型以及定位精度的评估方法, 给出了对应的性能评估结果. 研究发现: 可见星数均在 6~14 颗, 满足定位要求; 95% 置信度下, 电离层延迟优于 7.50 m, 对流层延迟优于 13.28 m, 地球静止轨道卫星 (GEO)、倾斜地球同步轨道卫星 (IGSO)、中圆轨道卫星 (MEO) 卫星的 URE 值分别优于 2.36 m, 1.72 m, 2.59 m, 满足北斗规范的要求; 95% 置信度下, 定位精度水平方向优于 3.63 m, 垂直方向优于 6.98 m. 结果表明北斗系统在民航机场监测站的覆盖性及服务性能良好.

关键词 北斗卫星导航系统, 电离层延迟, 对流层延迟, 用户测距误差, 定位精度

中图分类号 V 448, TN 967.1

Evaluation on UERE and Positioning Accuracy of BDS

LIU Ruihua WANG Ying WANG Jian

(*College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin* 300300)

Abstract User Ranging Error (URE) and User Equipment Error (UEE) are the main factors affecting the positioning accuracy. Civil aviation is the high-end user of BeiDou Navigation Satellite System (BDS). It is necessary to monitor the coverage and service performance of BDS at civil aviation airports. Based on the measured data of BDS at four civil aviation airport observatories, this paper introduces the satellites visibility of each airport, URE solution method, ionospheric delay correction model, tropospheric delay correction model and the evaluation of positioning accuracy. The results show that the number of visible satellites is from 6 to 14, which meets the positioning requirements. At 95% confidence level, the ionospheric delay is better than 7.50 m, the tropospheric delay is better than 13.28 m, and the URE values of Geostationary Earth Orbit (GEO) satellites, Inclined Geosynchronous Orbit (IGSO) satellites and Medium Earth Orbit (MEO) satellites are better than 2.36 m, 1.72 m and 2.59 m respectively, which meet the requirements of Beidou open service performance specifications. At 95% confidence level, the positioning accuracy is better than

* 国家重点研究发展计划项目 (2016YFB0502402) 和民航安全能力建设项目 (AADSA0007) 共同资助

2018-01-24 收到原稿, 2018-10-28 收到修定稿

E-mail: ywang0808@163.com

3.63 m in the horizontal direction and better than 6.98 m in the vertical direction. The coverage and service performance of BDS at the civil airport monitoring stations are good.

Key words Beidou Navigation Satellite System (BNSS), Ionospheric delay, Tropospheric delay, User Ranging Error (URE), Positioning accuracy

0 引言

北斗是中国正在建设的独立自主的卫星导航系统, 其基本功能是向地面和近地空间的用户提供全天时、全天候、高精度的定位、导航和授时服务. 卫星系统性能评估是系统初期设计、研发、部署以及升级的重要依据, 也为系统的连续运营提供了重要保障 [1]. 民用航空是北斗系统的最高端用户, 但在起飞及接近着陆阶段容易发生事故, 所以评估民航机场的北斗系统性能十分必要.

北斗系统与 GPS, GLONASS, Galileo 等卫星导航系统最大的区别是北斗系统空间星座由 GEO, IGSO, MEO 三种不同轨道性质的卫星组成. 在其他条件相同时, 由 GEO 卫星星历引入的测距误差为 MEO 的两倍. 而 IGSO 卫星在局部地区的测距精度是三者中最好的, 但其轨道高度与 GEO 卫星相同, 受到的光压影响也较大 [2,3]. 本文利用华东、华南、华北、西北 4 个民航机场观测站的北斗系统实测数据, 分别对机场的覆盖性能、三类卫星的 URE、电离层延迟、对流层延迟及用户定位精度进行了分析.

1 卫星可见性分析

为了准确评估北斗区域系统在民航机场的服务性能, 根据国土分布、海拔、气候差异, 分别在华东、华南、华北、西北地区选取一处有代表性的民航机场作为监测站, 采用 FlexPak6 型多系统 GNSS 接收机监测北斗导航卫星, 存储实测数据并进行性能分析. 从四个监测站长期观测数据来看, 各站点卫星星下点轨迹基本一致. 这里仅选取北京时间 2017 年 12 月 23 日一天的数据对四个机场监测站的卫星可见性进行分析. 设置卫星高度截止角为 5 度, 采样间隔为 2 s. 根据卫星的高度角和方位角信息得出卫星星下点轨迹 [4], 如图 1 所示, 其中 (a) (b) (c) (d) 分别代表华东、华南、华北、西北的机场监测站. 四个监测站的可见星个数分布如图 2 所示.

图 1 为极坐标下各可见星的星下点轨迹. 图 1 中标号① ~ ⑤代表 GEO 卫星相对地球静止, 其运行轨迹基本为一个点; 标号⑥ ~ ⑩及 ⑬ 代表 IGSO 卫星回归周期为 1 天, 星下点轨迹为 8 字形, 在服务区内南北来回运动; 标号 ⑪~⑫ 及 ⑭ 的 MEO 卫星, 回归周期约为 12 h. 4 个监测站中, 华南地区的纬度最小, 能一直监测到 IGSO 卫星, 而其他 3 个监测站的纬度相对较大, 会发生卫星不在接收机视野范围内的情况. 这也证明了文献 [5] 的观点: 在地球北半球, 纬度越小, 能全天监测到 IGSO 卫星的概率就越大.

图 2 为 4 个站点的可见星数目随历元的变化趋势. 由图 2 可以看出, 华东、华南、华北、西北地区 4 个监测站可见星个数均在 6~14 颗之间, 可见星平均值分别为 10.88, 11.97, 10.59, 10.64, 满足导航定位大于 4 颗的基本要求.

2 UERE 分析

UERE 包括空间段误差、传播段误差和用户段误差. 可以根据空间段 URE 的计算方法, 利用实测数据对 UERE 进行评估, 进而分析评估传播段的电离层和对流层误差. 国际民用航空公约附件 10 规定无故障接收机是假定一个有一般准确性和告警时间性能的接收机, 该接收机没有影响完好性, 可用性和连续性性能的故障. 利用无故障接收机评估系统性能, 即忽略接收机本身的误差.

本文所用数据采用 NovAtel FlexPak6 型接收机采集, 技术指标为水平定位精度 1.5 m (rms), 时间精度 20 ns, 测速精度 0.03 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$. 输出结果的可靠性较高, 为评估结果提供了可信度. 在安装接收机的天线时, 选择各机场附近的空旷楼顶, 避免高层建筑和树木遮挡, 将环境及人为因素带来的误差降至最低. 这里不考虑用户段误差, 只对空间段误差及可传播段误差进行分析评估.

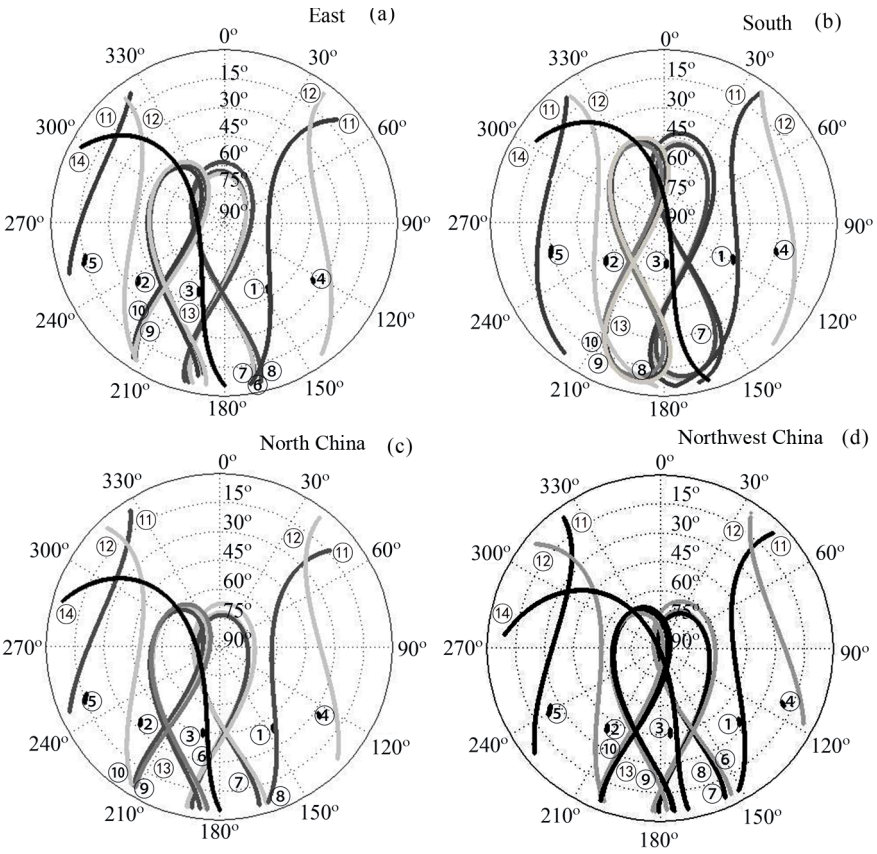

图 1 4 个监测站得到的极坐标下各可见星星下点轨迹 (① ~ ⑤表示 GEO 卫星, ⑥ ~ ⑩及 ⑬ 代表 IGSO 卫星, ⑪~⑫ 及 ⑭ 代表 MEO 卫星)

Fig. 1 Ground tracks of visible stars in polar coordinates obtained at the four monitoring stations (① ~ ⑤: GEO. ⑥ ~ ⑩, and ⑬: IGSO. ⑪~⑫ and ⑭: MEO)

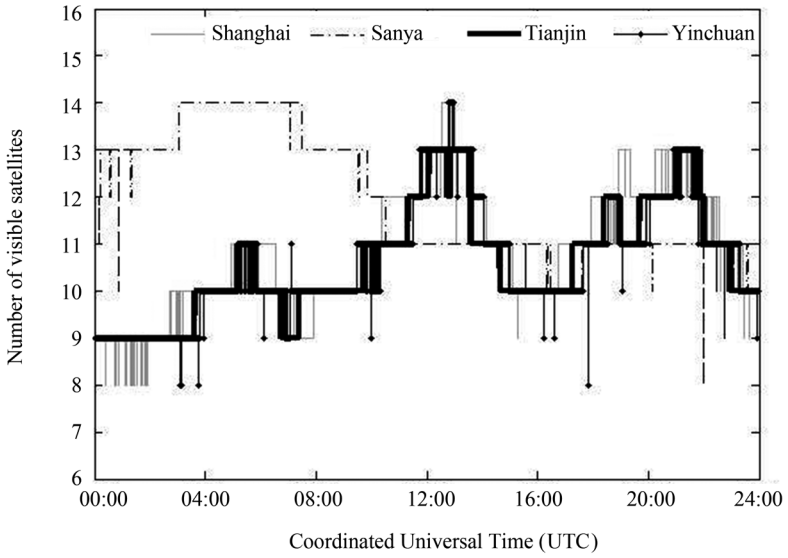

图 2 4 个监测站的可见卫星数

Fig. 2 Number of visible satellites at the four monitoring stations

2.1 URE 分析

用户测距误差是卫星轨道误差与钟差在用户到卫星视线的投影, 其反映了卫星的系统性能以及空间段与控制段对精度的影响 [6]. 瞬时 URE (IURE) 是指接收机钟差校准到北斗时后, 接收机测得的伪距值 (此伪距值不包含电离层延迟、对流层延迟等 UEE) 与导航信息给出的星站几何距离之差 [7]. IURE 的计算方法见图 3[8−10].

如图 3 所示, 假设地球是一个理想球体, O 为圆心, S 为卫星, 建立 $Oxyz$ 坐标系. 其中 z 轴为地心与卫星 S 质心的连线方向 (径向), x 轴为卫星飞行运动方向 (切向), y 轴为右手定则确定的方向 (法向). 描述卫星运动的坐标系一般为 RNT 坐标系, 即卫星运动的径向、法向和切向. 这里的 $Oxyz$ 坐标系为 RNT 坐标系由卫星质心向地球质心平移得到. Φ 为卫星覆盖面内的方位角, $\mathrm{d}\boldsymbol{s} = [\mathrm{d}a\ \mathrm{d}c\ -\mathrm{d}r]^{\mathrm{T}}$ 为任意时刻卫星真实位置与用星历计算位置产生的误差, 其中 $\mathrm{d}a$ 为切向误差, $\mathrm{d}c$ 为法向误差, $-\mathrm{d}r$ 为径向误差. 卫星覆盖的地球表面任取一个用户点记为 A, 其在 xyz 面的投影为 A', $\boldsymbol{l}_{\mathrm{SA}}$ 为卫星 S 到用户 A 的距离. 则 $\boldsymbol{l}_{\mathrm{SA}}$ 方向的单位矢量为

$$\boldsymbol{l} = \frac{\boldsymbol{l}_{\mathrm{SA}}}{|l_{\mathrm{SA}}|} = [\partial(\phi,\theta) \quad \beta(\phi,\theta) \quad -\gamma(\phi,\theta)]^{\mathrm{T}}. \tag{1}$$

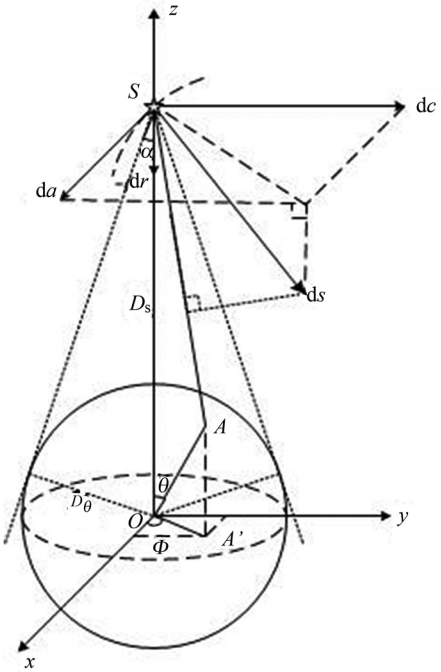

图 3 IURE 计算

Fig. 3 IURE calculation diagram

其中, $\partial(\phi,\theta)$, $\beta(\phi,\theta)$, $\gamma(\phi,\theta)$ 为卫星 S 到用户 A 的方向余弦. $\partial(\phi,\theta) = \dfrac{D_{\mathrm{e}}\sin\theta\cos\phi}{|l_{\mathrm{SA}}|}$, 这里 D_{e} 为地球半径, $\boldsymbol{l}_{\mathrm{SA}}$ 的模表示为

$$|l_{\mathrm{SA}}| = \sqrt{(D_{\mathrm{s}} - D_{\mathrm{e}}\cos\theta)^2 + (D_{\mathrm{e}}\sin\theta)^2} = \sqrt{D_{\mathrm{s}}^2 + D_{\mathrm{e}}^2 - 2D_{\mathrm{s}}D_{\mathrm{e}}\cos\theta}. \tag{2}$$

其中, D_{s} 为卫星质心与地球质心之间的距离, 即地球平均半径与卫星轨道高度之和.

式 (1) 中的方向余弦可以进一步表示为

$$\partial(\phi,\theta) = \frac{D_{\mathrm{e}}\sin\theta\cos\phi}{\sqrt{D_{\mathrm{s}}^2 + D_{\mathrm{e}}^2 - 2D_{\mathrm{s}}D_{\mathrm{e}}\cos\theta}}. \tag{3}$$

同理,

$$\beta(\phi,\theta) = \frac{D_{\mathrm{e}}\sin\theta\sin\phi}{\sqrt{D_{\mathrm{s}}^2 + D_{\mathrm{e}}^2 - 2D_{\mathrm{s}}D_{\mathrm{e}}\cos\theta}},$$

$$\gamma(\phi,\theta) = \frac{D_{\mathrm{s}} - D_{\mathrm{e}}\cos\theta}{\sqrt{D_{\mathrm{s}}^2 + D_{\mathrm{e}}^2 - 2D_{\mathrm{s}}D_{\mathrm{e}}\cos\theta}}. \tag{4}$$

卫星到用户 l_{SA} 方向的单位向量与用户到卫星方向的单位向量相反. 因此后者可表示为 $-\boldsymbol{l}$, 用户 A 的预报星历轨道误差为 $-\boldsymbol{l}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{s}$. 卫星钟差 $v\cdot\mathrm{d}t$, 是大小相同的全向误差. 根据瞬时用户测距误差的定义, 有

$$E_{\mathrm{IURE}} = -\boldsymbol{l}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{s} - v\cdot\mathrm{d}t = -[\partial(\phi,\theta) \quad \beta(\phi,\theta) \quad -\gamma(\phi,\theta)]\begin{bmatrix}\mathrm{d}a\\ \mathrm{d}c\\ -\mathrm{d}r\end{bmatrix} - v\cdot\mathrm{d}t = \zeta_A A + \zeta_B C + \zeta_C R + \zeta_T T. \tag{5}$$

其中, $A = \mathrm{d}a$, $C = \mathrm{d}c$, $R = \mathrm{d}r$, $T = \mathrm{d}t$, ζ_A, ζ_C, ζ_R, ζ_T 分别为 A, C, R, T 的系数, 即

$$\zeta_A = -\partial(\phi,\theta), \quad \zeta_C = -\beta(\phi,\theta),$$
$$\zeta_R = -\gamma(\phi,\theta), \quad \zeta_T = -v. \tag{6}$$

上述计算需用到接收机的经度、纬度、地球平均半径 D_{e} (6371.393 km) 和卫星轨道半径 D_{s}, 其中 D_{s} 是地球平均半径与卫星轨道高度之和. 对北斗卫星而言, 不同类型的轨道高度不同 (GEO 和 IGSO 轨道高度为 35 786 km, MEO 轨道高度为 21 528 km), 因此产生的 IURE 也不同. 由式 (5) 可知, 计算 IURE 的关键是获取卫星的轨道误差和钟差. 其计算需要采用广播星历和精密星历, BDS 的广播星历更新频率为 1 h. 根据文献 [11] 可求解预报卫星坐标和卫

星钟差. 事后精密星历更新周期为 15 min, 包含精密卫星坐标和卫星钟差, 采用拉格朗日内插法可得任意时刻精密星历和钟差 [12]. 将预报星历和精密星历的坐标转换至 RTN 坐标系后作差, 即可得出卫星的切法径向误差及钟差. IGS MGEX 给出 BDS-2 GEO/IGSO/MEO 卫星天线相位中心偏差分别为, x 轴 0.55 m, y 轴 2.0~2.5 m, z 轴 3~4 m[13]. 因此, 本文评估 URE 时对天线相位中心偏差做了修正, 即把三个轴向坐标偏差转换至 RNT 坐标, 然后加至预报星历和精密星历作差后的切向法向径向误差, 进而计算 IURE 值.

实际测试求 IURE 时, 点 A 即接收机位置, 当其经度为 a, 纬度为 b, 高程为 0 时, 点 A 的天顶距和方位角分别为

$$\theta = \pi/2 - a, \quad \phi = b. \tag{7}$$

求出 ϕ, θ 之后, 根据式 (6) 即可得到 A, C, R, T 的系数, 然后带入式 (5), 即可得出该点的 IURE 值.

为评估民航机场北斗系统各类卫星的 URE 性能, 在 4 个机场附近远离高大建筑的空旷楼顶安装测试接收机. 本文选取 2017 年 11 月 24 至 30 日的实测数据 (电离层延迟、对流层延迟、定位精度分析均用此数据) 进行分析, 并利用这一时段北斗系统精密星历 whs19765.sp3~whs19774.sp3*进行计算, 得到卫星的 URE 值, 结果如图 4 所示.

北斗公开服务性能规范规定, 95% 置信度下, 忽略单频电离层延迟模型误差, GEO, IGSO, MEO 卫星的 URE $\leqslant$ 2.5 m. 图 4 是 95% 置信度下 4 个监测站一周内每天的 URE 统计值, 表 1 是 4 个监测站 URE 值 $\leqslant$ 2.5 m 所占比例. 由图 4 和表 1 可以看出, GEO, IGSO, MEO 卫星的 URE 值 $\leqslant$ 2.5 m 的比例在华北监测站最高, 分别是 100%, 99.14% 和 99.08%;

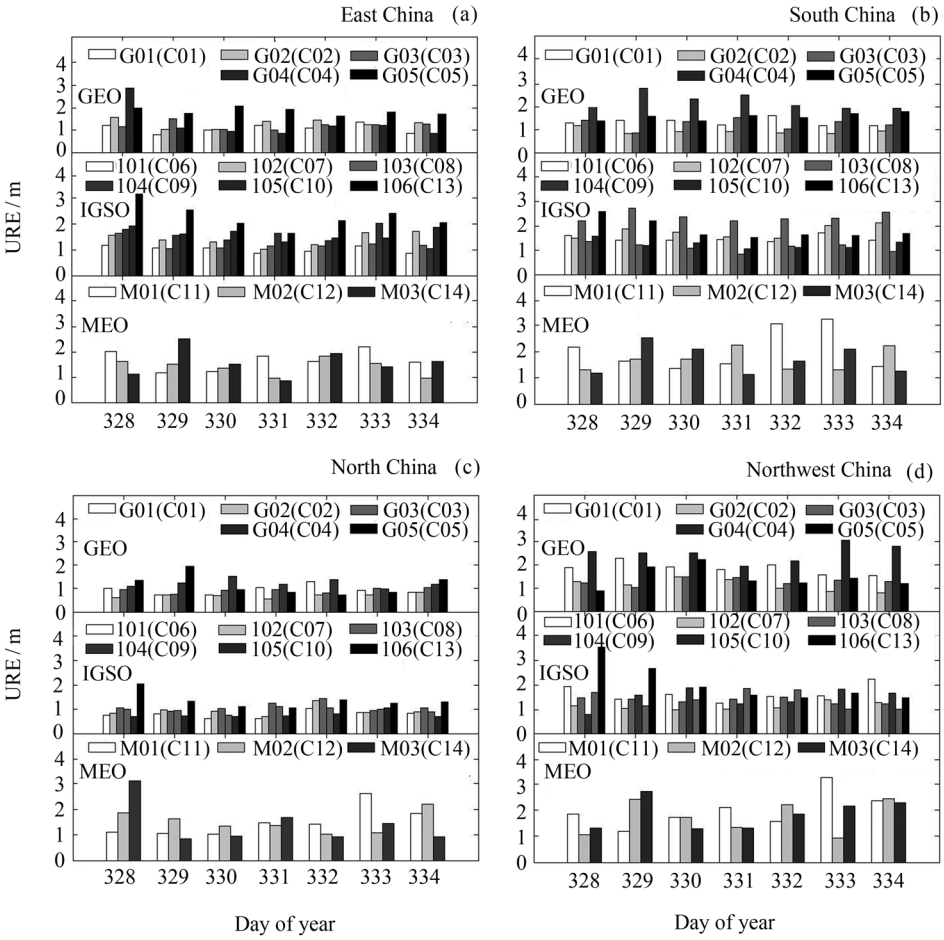

图 4 4 个监测站一周内每天的用户测距误差统计 (95% 置信度)

Fig. 4 URE statistics for each day of a week at the four monitoring stations (95% confidence level)

*ftp://igs.gnsswhu.cn/pub/whu/MGEX/

95% 置信度下, 华东、华南、华北、西北地区 4 个监测站的 URE 均 $\leqslant 2.5$ m, 符合北斗规范的要求 [14].

2.2 电离层延迟分析

电离层是距地面 60~1000 km 的大气层, 在太阳紫外线辐射下, 部分中性气体分子被电离分解成大量的自由电子和离子. 卫星信号穿越电离层时传播速度发生改变, 产生电离层延迟误差 [15]. 中低纬地区一般采用克罗布歇 (Klobuchar) 模型进行修正. 中国地处北半球的中纬地区, 可采用此模型进行电离层误差修正 [16].

Klobuchar 修正模型如图 5 所示, 设 P 为用户所在地, Q' 为卫星到用户连线与电离层的信号穿刺点, Q 为穿刺点的星下点, ψ 为地心角, Z 为测距信号传播方向 ($Q'P$ 方向) 与 $Q'Q$ 方向的差角, R 为地球半径.

地心角可表示为 $\psi = 90^\circ - h - Z$, 其中 $Z = \arcsin[R\cos h/(R+H)]$.

星下点 Q 的地理经度 λ_Q、地理维度 φ_Q 可表示为 [17]

$$\begin{cases} \lambda_Q = \lambda_P + \arcsin(\sin\psi \sin A/\cos\varphi_Q), \\ \varphi_Q = \arcsin(\sin\varphi_P \cos\psi + \cos\varphi_P \sin\psi \cos A). \end{cases} \tag{8}$$

其中, A 为卫星相对于用户的方位角.

地磁场直接影响电离层中带电粒子的多少, 所以地磁纬度能准确的表达电子密度的纬度变化. 地理北磁极的地理经度 φ_S、地理纬度 λ_S 分别为 78.3°N, 69°W, 因此星下点 Q 的地磁纬度可表示为

$$\varphi_{QC} = \arcsin[\sin\varphi_Q \sin\varphi_S + \cos\varphi_Q \cos\varphi_S \cos(\lambda_Q - \lambda_S)]. \tag{9}$$

单频信号的电离层天顶延迟 T' 可表示为

$$T' = 5\times 10^{-9} + \cos\left\{2\pi(3600 t_Q - 50\,400)\Big/ \sum[\beta_n(\varphi_{QC}/180)n]\right\} \cdot \sum[\alpha_n(\varphi_{QC}/180)n]. \tag{10}$$

其中, α_n, β_n $(n = 0,1,2,3)$ 为广播星历中导航电文提供的电离层改正参数, t_Q 为星下点 Q 的地方时, $t_Q = (\lambda_Q/15) + C$, 单位为 h, C 为 UTC 时刻, φ_{QC} 的单位为 (°), 因此 T' 的单位为 s.

测距信号的实际传播方向与 $Q'Q$ 方向存在差角 Z, 将其正割定义为倾斜因子 F, 那么实际电离层延时可表示为

$$T = FT' = \sec Z(T'). \tag{11}$$

此模型不能反映电离层干扰的变化, 所以仅能改正 50%~60% 的电离层延迟, 理想情况下可能达到 70%. 根据一周的实测数据, 北斗区域卫星导航系统下, 所选 4 个典型民航机场的电离层延迟如图 6 所示. 其中卫星不可见的时刻, 电离层延迟记为零.

表 1 4 个监测站 URE $\leqslant 2.5$ m 占比 (%)

Table 1 Proportion of URE $\leqslant 2.5$ m at the airports in east, south, north and northwest of China (%)

卫星类型	华东	华南	华北	西北
GEO	99.13	98.62	100	95.48
IGSO	98.64	96.87	99.14	97.85
MEO	98.85	98.17	99.08	98.09

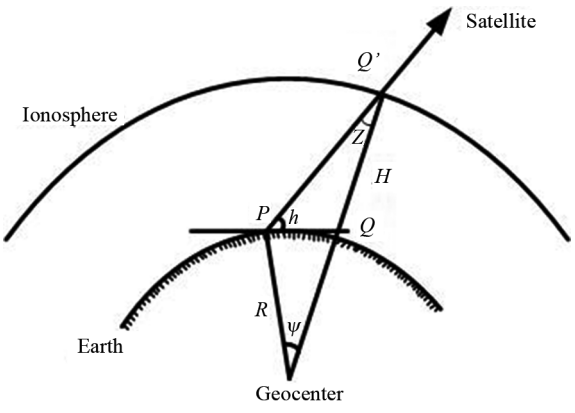

图 5 电离层延迟

Fig. 5 Ionospheric delay diagram

表 2 三类卫星的电离层延迟均值 (单位 m)

Table 2 Ionospheric delay of three types satellite (unit m)

卫星类型	华东	华南	华北	西北
GEO (C01)	6.46	3.32	1.70	6.05
IGSO (C06)	6.64	4.37	2.05	6.42
MEO (C11)	6.10	4.12	1.91	6.09

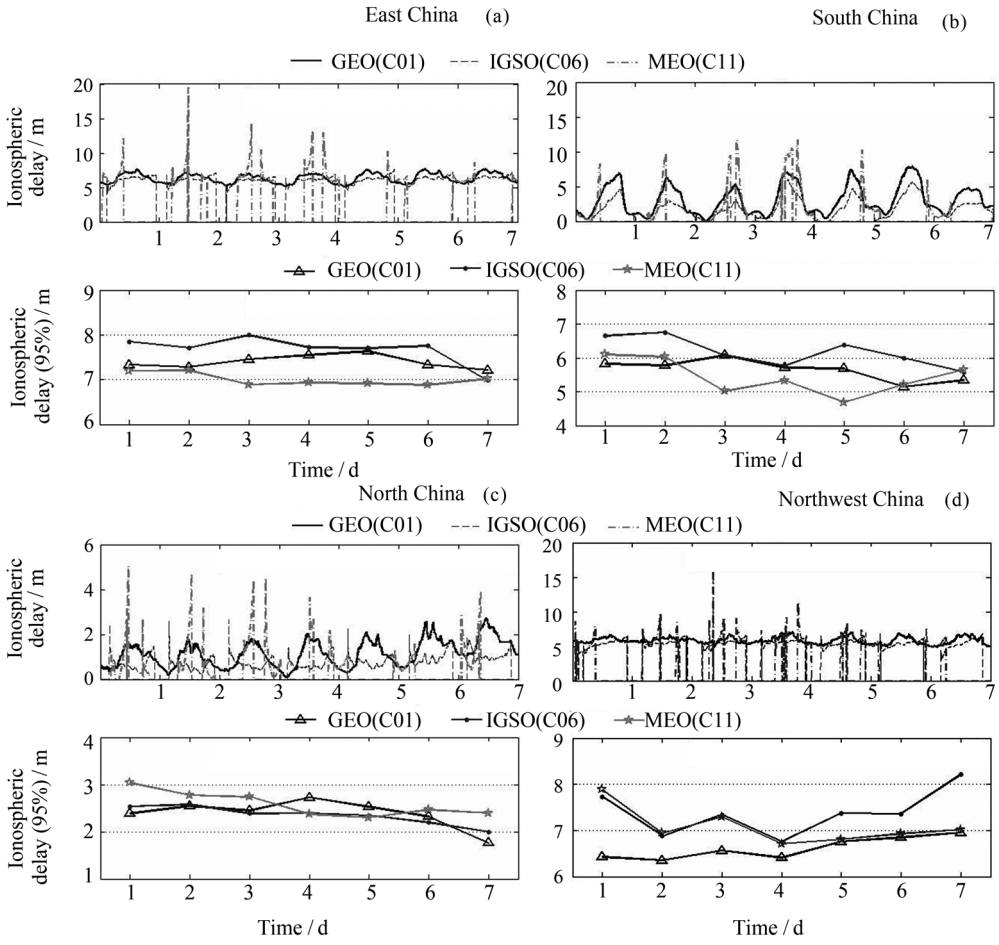

图 6 4 个监测站一周的电离层延迟及每天 95% 置信度下的值

Fig. 6 Ionospheric delay in one-week and 95% confidence level per day at the four monitoring stations

图 6 为 4 个民航机场监测站一周的电离层延迟及每天的 95% 置信度下的值. 表 2 为 3 类卫星的电离层延迟均值. 由图 6 及表 2 可以看出, 卫星在白天的电离层延迟明显小于夜间, 且每天的浮动较小, 验证了文献 [16] 的观点: 电离层闪烁一般发生在夜间, 白天发生的可能性不大; 4 个监测站 3 类卫星的电离层延迟均值都是华东地区最大, 西北和华南地区次之, 华北地区最小; 95% 置信度下, 华东、华南、华北、西北各机场监测站的电离层延迟分别为 7.50 m, 6.10 m, 2.53 m, 7.09 m.

2.3 对流层延迟分析

对流层是距地面 50 km 以下的大气层, 雨雪等天气现象均出现在该层. 水滴、冰晶等杂质对电磁波的传播影响很大, 故卫星导航信号穿越该层时速度和方向均可能发生改变, 从而导致对流层延迟误差 [17−19]. 目前精度相对较高的对流层误差修正模型是 Saastamoinen 模型, 其将对流层分成两层, 地表至 12 km 左右高度的称为对流层, 对流层顶到 50 km 左右高度的称为平流层顶. 前者气体温度随高度变化递减率为 $6.5\,\mathrm{K\cdot km^{-1}}$, 后者的大气温度可假设为常数. 其计算如下 [20]:

$$\delta^z = \delta^z_{\mathrm{d}} + \delta^z_{\mathrm{w}}. \tag{12}$$

其中, δ^z_{d}, δ^z_{w} 分别为干分量与湿分量. 对应的延迟可表示为

$$\delta^z_{\mathrm{d}} = 10^{-6}\frac{k_1 R_{\mathrm{d}}}{g_{\mathrm{m}}} = P_{\mathrm{s}} = 0.002\,277P,$$

$$\delta^z_{\mathrm{w}} = 0.002\,277\Big(\frac{1255}{T} + 0.05\Big)e_{\mathrm{w}}. \tag{13}$$

其中, e_{w} 为水气压, P 为大气压力. 将监测站的位置与高度作为参数时, 上式可以表示为

$$\delta^z = \frac{0.002\,277}{f(B,H)}\Big[P + \Big(\frac{1255}{T} + 0.05\Big)e_{\mathrm{w}}\Big]. \tag{14}$$

参数

$$f(B,H)=1-0.002\,66\cos 2\phi-0.000\,28H,$$

这里 ϕ 为监测站的纬度, H 为监测站的高度.

$$\delta^z=\frac{0.002\,277}{\cos z}\Big[P+\Big(\frac{1255}{T}+0.05\Big)e_{\rm w}-B\tan^2 z\Big]+\delta R,$$
$$e_{\rm w}=\varphi_{\rm RH}\cdot\exp(-37.2465+0.213\,166T-0.000\,256\,908T^2). \tag{15}$$

其中: T 为监测站温度, 单位为 K; z 为卫星的天顶距. P, $e_{\rm w}$ 分别为大气压、水气压, 单位 MPa. 相对气压、温度、湿度、高度可以从经验中获得, 即

$$P=P_0[1-0.000\,226(H-H_0)]^{5.225},$$
$$T=T_0-0.0065(H-H_0)m$$
$$\varphi_{\rm RH}=\varphi_{{\rm RH}_0}\cdot\exp[-0.000\,639\,6(H-H_0)]. \tag{16}$$

其中, P_0, T_0, $\varphi_{{\rm RH}_0}$ 分别是标准大气压, 温度以及相对湿度的缺省值, 分别为

$$P_0=10.13.25\,{\rm MPa},\quad T_0=18^\circ{\rm C},$$
$$H_0=0\,{\rm m},\quad \varphi_{{\rm RH}_0}=50\%. \tag{17}$$

选取北斗区域卫星导航系统在民航机场监测站测得的一周实测数据, 根据上述方法对机场的对流层延迟情况进行分析, 结果如图 7 所示. 其中卫星不可见的时刻, 对流层延迟记为零.

图 7 为 4 个民航机场监测站一周的对流层延迟及每天 95% 置信度下的值, 表 3 为三类卫星的对流层延迟均值. 由图 7 和表 3 可以看出: GEO 卫星白天和夜晚的延迟情况基本一致, IGSO 卫星的对流层延迟情况在白天小于夜晚, MEO 卫星每天的延迟浮动较大; 95% 置信度下, 华东、华南、华北、西北各机场监测站的电离层延迟分别为 10.96 m, 13.28 m, 10.92 m, 9.26 m.

表 3 三类卫星对流层延迟 (单位 m)

Table 3 Tropospheric delay of three types satellite (unit m)

卫星类型	华东	华南	华北	西北
GEO (C01)	3.29	3.38	3.85	3.81
IGSO (C06)	4.45	5.05	4.40	3.82
MEO (C11)	6.46	6.85	6.63	5.59

3 定位精度分析

定位精度表征用户真实位置与系统实时为用户提供位置间的接近程度, 是测量点位与真值点位之差的概率统计平均值 [21]. 本文采用均方根 (RMS) 误差表示. 在概率与数理统计学中, RMS 称为标准差 (σ). 本文采用内符合精度评估方法 [22], 采集 4 个机场观测站约一年的数据, 对定位结果求均值, 近似认为该均值为真实位置. 为证明此方法的可行性, 根据北斗、GPS 以及和北斗 + GPS + GLONASS 组合系统在机场长达一年的数据, 分析定位结果均值, 结果证明北斗系统误差极小, 不会对定位结果造成较大的影响. 因此, 将利用长期数据求得的坐标均值作为观测站点的真值坐标是可行的.

三维导航定位精度指标 ($1\,\sigma$) 可表示为

$$\sigma_{\rm RMS,3D}=\sqrt{\sigma_{\rm e}^2+\sigma_n^2+\sigma_\mu^2}. \tag{18}$$

其中, $\sigma_{\rm e}$, σ_n, σ_μ 分别表示位置坐标分量东、北、天向的均方根误差.

选取北斗区域卫星导航系统在民航机场监测站测得的一周实测数据, 以均方根误差统计方法进行分析, 结果如图 8 所示.

北斗公开服务性能规范规定: 95% 置信度下, 水平、垂直方向定位精度均小于等于 10 m. 图 8 是 4 个监测站一周的定位误差趋势, 表 4 是 4 个监测站东、北、天、水平和三维的 95% 分位值、均值和最大值统计结果. 由图 8 和表 4 可以看出, 95% 置信度下, 4 个监测站水平和垂直方向的定位精度都小于 10 m, 其中西北监测站的定位误差最大, 水平方向为 3.63 m, 垂直方向为 6.98 m, 但都满足北斗规范的规定.

4 结语

通过对北斗系统覆盖性及服务性能指标的分析, 结合 4 个机场观测站连续一周的实测数据, 分析其实际性能指标, 并与北斗公开服务性能规范规定的性能指标进行对比, 得到如下结论.

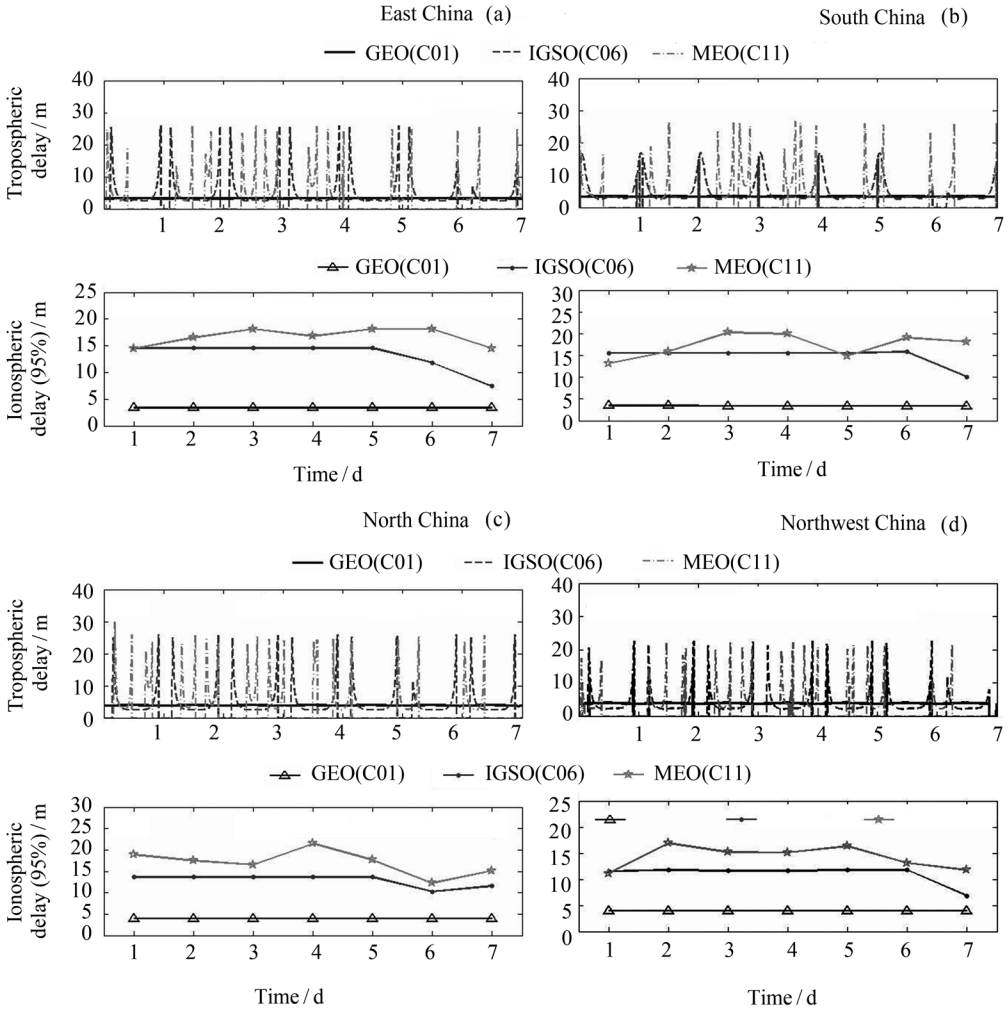

图 7 4 个监测站一周对流层延迟及每天 95% 置信度下的值

Fig. 7 Tropospheric delay in one-week and 95% confidence level per day at the four monitoring stations

表 4 4 个监测站北斗系统定位误差 (单位 m)

Table 4 Positioning accuracy of BDS at the four monitoring stations (unit m)

方向	华东			华南			华北			西北		
	95% 分位	均值	最大	95% 分位	均值	最大	95% 分位	均值	最大	95% 分位	均值	最大
东向	0.82	0.49	3.83	1.29	0.62	3.60	0.84	0.42	2.83	2.14	0.84	3.99
北向	1.64	0.73	5.68	1.44	0.57	3.27	1.62	0.69	4.81	3.25	1.38	8.63
天向	2.59	1.85	14.26	2.71	1.21	5.25	2.61	1.13	8.84	6.15	2.47	16.41
水平	2.25	0.93	5.74	1.69	0.84	3.91	1.85	0.83	4.91	3.63	1.62	23.03
三维	5.06	2.26	15.27	3.04	1.55	5.34	3.05	1.35	9.42	6.98	3.02	46.92

(1) 4 个监测站可见星数目均为 6~14 颗, 覆盖性良好, 满足定位要求.

(2) 95% 置信度下, 电离层延迟优于 7.50 m, 对流层延迟优于 13.28 m, 4 个观测站的 GEO, IGSO, MEO 卫星的 URE 值分别优于 2.36 m, 1.72 m, 2.59 m, 满足北斗公开服务性能规范的要求.

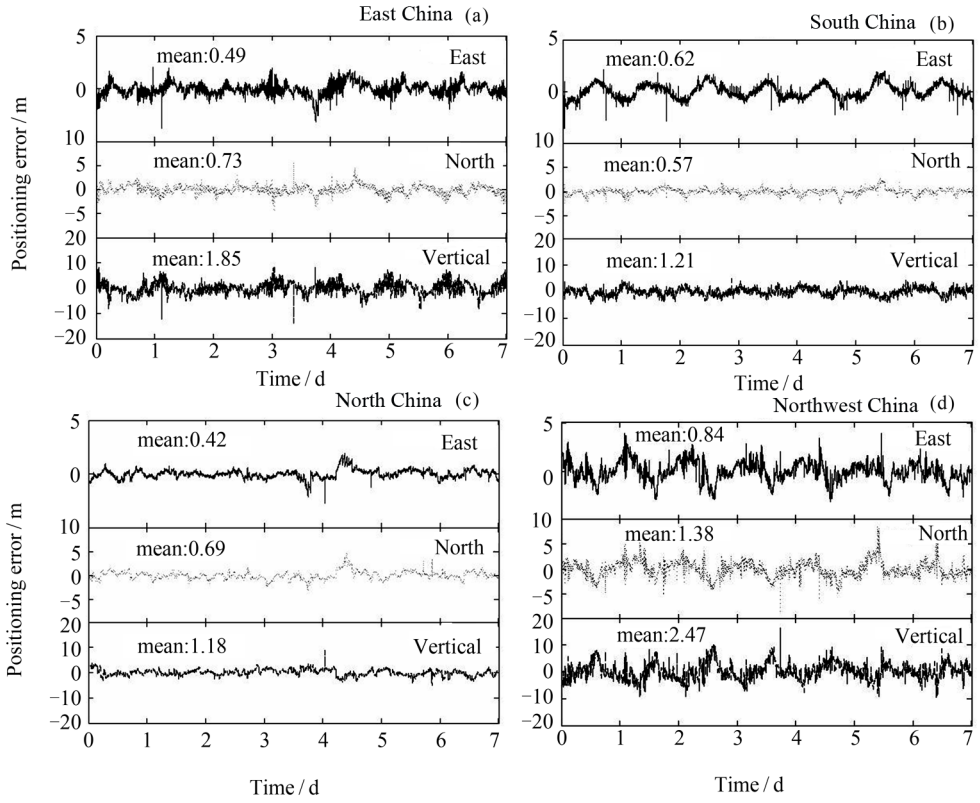

图 8 4 个监测站一周的定位误差

Fig. 8 Positioning accuracy of a week at the four monitoring stations

(3) 在 95% 置信度下 4 个机场观测站定位精度水平方向优于 3.63 m, 垂直方向优于 6.98 m, 满足北斗规范小于等于 10 m 的规定.

(4) 北斗系统在不同区域内覆盖性及服务精度不同, 但差异较小.

这些结论表明北斗区域卫星导航系统在中国华东、华南、华北、西北 4 个典型民航机场的覆盖性及服务性能良好. 测试结果可为北斗导航规范的制定及中国民航北斗应用决策提供重要的依据.

参考文献

[1] HU Zhigang. Beidou Navigation Satellite System Performance Assessment Theory and Experimental Verification [D]. Wuhan: Wuhan University, 2013 (胡志刚. 北斗卫星导航系统性能评估理论与试验验证 [D]. 武汉: 武汉大学, 2013)

[2] YANG Yuanxi, LI Jinlong, WANG Aibing, *et al.* Preliminary assessment of the navigation and positioning performance of Beidou regional satellite navigation system [J]. *Sci. China*: *Earth Sci.*, 2014, **57**: 144-152

[3] FAN Long, CHAI Hongzhou. Research on positioning accuracy analysis of Beidou two generation satellite navigation system [J]. *Hydrog. Sur. Charting*, 2009, **29**(1): 25-27 (范龙, 柴洪洲. 北斗二代卫星导航系统定位精度分析方法研究 [J]. 海洋测绘, 2009, **29**(1): 25-27)

[4] SHI C, ZHAO Q, HU Z, *et al.* Precise relative positioning using real tracking data from COMPASS GEO and IGSO satellites [J]. *GPS Solutions*, 2013, **17**(1): 103-119

[5] TANG Weiming, CUI Jianhui, HUI Memgtang. Analysis of the impact of BeiDou regional constellation on relative positioning accuracy [J]. *J. Wuhan Univ.*, 2016, **41**(8): 1107-1112 (唐卫明, 崔健慧, 惠孟堂. 北斗区域星座对相对定位精度的影响分析 [J]. 武汉大学学报, 2016, **41**(8): 1107-1112)

[6] KOVACH K. New User Equivalent Range Error (UERE) budget for the modernized navstar Global Positioning System(GPS) [C]//NTM 2000. Anaheim: ION NTM, 2000: 550-573

[7] LI Zuohu. Research on Monitoring and Assessment of Satellite Navigation System Performance [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2012 (李作虎. 卫星导航系统性能监测及评估方法研究 [D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2012)

[8] LIANG Heng, GRACE Xingxin Gao, TODD Walter, *et*

al. Statistical characterization of GPS signal-in-space errors [C]//International Technical Meeting of the Institute of Navigation. San Diego: Stanford University. 2011

[9] US Department of Defense. Global positioning system standard positioning service performance standard (4.0th ed) [R]. Washington DC: U.S. DOD, 2008: A17-A19

[10] LIU Reihua, DONG Liyao, ZHAI Xian. Research on calculation method of signal in space user range error for BeiDou Navigation Satellite System [J]. *Chin. Space Sci. Tech.*, 2017, **37**(4): 41-48 (刘瑞华, 董立尧, 翟显. 北斗卫星导航系统空间信号用户测距误差计算方法研究 [J]. 中国空间科学技术, 2017, **37**(4): 41-48)

[11] BeiDou Navigation Satelite System Management Office of China. Beidou navigation satelite system signal in space interface control document-open service signal (2.1th ed) [R]. Beijing: BeiDou Navigation Satelite System Management Office of China, 2016: 1-2 (中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件公开服务信号 (2.1 版) [R]. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2016: 1-2)

[12] HE Y J, YANG L. Analysis of interpolation results on GPS IGS precise ephemeris based on Lagrange interpolation [J]. *Eng. Surv. Mapping*, 2011, **20**(5): 60-63 (何玉晶, 杨力. 基于拉格朗日插值方法的 GPS IGS 精密星历插值分析 [J]. 测绘工程, 2011, **20**(5): 60-63)

[13] DILSSNER F, SPRINGER T, SCHÖNEMANN E, *et al.* Estimation of satellite antenna phase center corrections for BeiDou [R]. Pasadena, California: IGS Workshop, 2014

[14] BeiDou Navigation Satellite Syetem Management Office of China. BeiDou Navigation Satellite System Open Service Performance Standard (1.0th ed) [S]. Beijing: BeiDou Navigation Satellite Syetem Management Office of China, 2013 (中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统公开服务性能规范 (1.0 版) [S]. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2013)

[15] HAO Jun, GUO Shuxia. The Study of Dual Frequency Ionospheric Error Correction Method and Accuracy Analysis Based on GPS [C]//Xi'an:IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC), 2011

[16] HUANG Wengeng, A Ercha, LIU Siqing, *et al.* Effect of the 13 December 2006 solar radio burst on GPS observations [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2015, **35**(6): 679-686 (黄文耿, 阿尔察, 刘四清, 等. 2006 年 12 月 13 日太阳射电暴对 GPS 观测的影响 [J]. 空间科学学报, 2015, **35**(6): 679-686)

[17] DING Xiaoguang. Research of Tropospheric Delay Model and Applications Based on the GPS Data Processing [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009 (丁晓光. 对流层延迟改正在 GPS 数据处理中的应用与研究 [D]. 西安: 长安大学, 2009)

[18] DEMBELOV M G, BASHKUEV Yu B, SANKOV V A, *et al.* An estimation of troposphere corrections of GPS measurements at sites near the Baikal Rift system [C]//International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. Kharkiv: Ukraine, 2012

[19] VEDEL H, HUANG X.Y, HAASE J, *et al.* Impact of GPS zenith tropospheric delay data on precipitation forecasts in mediterranean France and Spain [J]. *J. Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**(2): L02102 1.V4

[20] LI Jinghua, MA Guanyi. Effect of ionospheric irregularities on GPS performance [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2013, **33**(2): 158-169 (李婧华, 马冠一. 电离层不规则结构对 GPS 性能的影响 [J]. 空间科学学报, 2013, **33**(2): 158-169)

[21] LAVETI G, RAO G S, RANI K J, *et al.* GPS Receiver SPS accuracy assessment using LS and LQ estimators for precise navigation [C]//Annual IEEE India Conference (INDICON). Pune: 2014 Annual IEEE India Conference, 2014

[22] SHUAI Ping, QU Guangji, CHEN Zhonggui. Performance Indicators and evaluation methods of satellite navigation system [C]//The Twelfth National Space and Motion Control Technologies Academic Conference Proceedings. Beijing: Chinese Association of Automation, 2006 (帅平, 曲广吉, 陈忠贵. 卫星导航系统性能指标与评估方法 [C]//全国第十二届空间及运动体控制技术学术会议论文集. 北京: 中国自动化学会, 2006)