

DOI : 10.13875/j.issn.1674-0637.2019-03-0266-08

北斗地基增强系统观测数据质量分析

肖秋龙^{1,2,3}, 成芳^{1,2}, 沈朋礼^{1,2,3}, 肖厦^{1,2}

(1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600 ;
2. 中国科学院 精密导航定位与定时技术重点实验室, 西安 710600 ;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 基于 G-Nut/Anubis 软件对北斗地基增强系统全国 113 个基准站连续 3 个月的观测数据从多路径效应与周跳等方面进行了数据质量分析, 其统计结果表明北斗地基增强系统 91.1% 国内框架网基准站的观测数据质量满足建站要求。同时, 对同源基准站的 GPS 和 BDS 多路径误差进行了对比分析, 得到同一地点 BDS 多路径误差小于 GPS, 且 BDS 的 B2 频点多路径误差最小, GPS 的 L2 频点多路径误差最大的结论。

关键词: 北斗地基增强系统; 数据质量; 统计分析; BDS/GPS

Observational data quality analysis of BeiDou Ground-based Augmentation System

XIAO Qiu-long^{1,2,3}, CHENG Fang^{1,2}, SHEN Peng-li^{1,2,3}, XIAO Xia^{1,2}

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. Key Laboratory of Precise Positioning and Timing Technology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on G-Nut/Anubis software, the data quality analysis of multipath and cycle slip is conducted by collected datasets from the BeiDou Ground-based Augmentation System (BDGBAS), and the datasets contain three continuous months' observation data of 113 reference stations. The statistical results of the data quality show that the observation data quality of about 91.1% stations by the BDGBAS meets the construction requirements. In addition, the multipath errors of GPS and BDS observations at the homologous observing station are compared and analyzed. The results show that the multipath error of the BDS is smaller than the GPS, and the multipath error of BDS B2 frequency is the smallest, and the multipath error of GPS L2 frequency is the largest.

Key words: BeiDou Ground-based Augmentation System; data quality; statistical analysis; BDS/GPS

0 引言

北斗地基增强系统作为国家卫星导航高精度服务基础设施, 是北斗卫星导航系统重要组成部分, 是

收稿日期: 2019-01-19; 接受日期: 2019-03-23

基金项目: 中国科学院青年科学基金促进会资助项目 (11880000CF)

作者简介: 肖秋龙, 男, 硕士, 主要从事卫星导航通信技术研究。

高效实现现代经济社会发展和位置服务的重要项目。北斗地基增强系统按照“统一规划、统一标准、共建共享”的原则，构建全国一张网，已完成全国150个框架网基准站的建设，实现部门间、地区间和用户间资源统筹、数据共享。作为北斗地基增强系统广域服务的数据基础，北斗地基增强系统框架网基准站的正常稳定运行对北斗地基增强系统充分发挥自身作用和提供优质服务具有重要意义。

GNSS连续参考站在进行选址、设计、建造以及布放等工作时，要确保区域连续参考系统的稳定运行，需对GNSS接收机观测数据进行必要的分析^[1-4]。李军等基于TEQC软件对52个GPS台站4a观测数据进行了质量分析^[1,5-6]。杨海彦等对IGS MGEX跟踪网47个多系统跟踪站2.4a观测数据进行多路径效应与观测噪声评估，得出的多系统多路径效应与观测噪声之间的关系对多模多频信号的选取和随机模型的确定具有一定的参考意义^[7]。针对上述研究成果使用观测站少，区域较小，且为了了解基准站附近观测环境是否对观测结果存在干扰，是否存在造成多路径效应的反射物等基准站环境因素对观测数据质量造成的影响，本文对北斗地基增强系统113个框架网基准站连续3个月的观测数据进行了质量检核与分析，给出了这些基准站的检核结果报告，并对数据质量较差的基准站进行BDS和GPS单系统精密单点定位（precise point positioning, PPP）数据解算以及BDS+GPS双系统PPP解算，比较BDS和GPS单系统的定位解算结果，分析数据质量对解算结果的影响^[8-14]。

1 数据质量分析评估理论

码伪距观测值与载波相位观测值是GNSS测量的两个基本观测量。在实际观测过程中，GNSS卫星观测信号从卫星天线传播到接收机天线会受到卫星钟差、电离层延迟、对流层延迟、接收机钟差等误差影响。码伪距与载波相位观测方程可分别表示为^[15]：

$$R_i = P + c(\Delta t^k - \Delta t_i) + I_i + T + M_{p_i} + \varepsilon_{p_i} \quad (1)$$

$$\Phi_i = P + c(\Delta t^k - \Delta t_i) - I_i + T + M_{\phi_i} + \lambda_i N_i + \varepsilon_{\phi_i} \quad (2)$$

式(1)和(2)中， R 和 Φ 分别表示码伪距观测值与载波相位观测值， i 表示不同载波频点标识符， P 表示卫星天线相位中心到接收机天线相位中心的几何距离， c 表示真空中的光速， Δt^k 和 Δt_i 分别表示卫星钟差与接收机钟差， I 表示电离层延迟， T 表示对流层延迟， M_p 和 M_ϕ 分别表示码伪距观测值多路径效应与载波相位观测值多路径效应， ε_p 和 ε_ϕ 分别表示码伪距观测值噪声与载波相位观测值噪声， λ 表示载波波长， N 表示载波相位整周模糊度。

1.1 多路径效应

GNSS实际观测过程中，除了直接接收到卫星信号外，还接收到经周围反射物反射的信号，两种信号产生干涉使真值发生偏离的现象称之为多路径效应^[15]。载波相位多路径效应远远小于码伪距多路径效应，在数据处理过程中一般不予考虑载波相位多路径效应带来的影响。将式(1)的1频点与式(2)的1频点结果作差可得^[5-6, 16-20]

$$M_{p1} = R_1 - \Phi_1 - 2I_1 + \lambda_1 N_1 \quad (3)$$

将式(2)的1频点与2频点结果作差可得

$$I_1 = ((\Phi_1 - \lambda_1 N_1) - (\Phi_2 - \lambda_2 N_2)) / (f_1^2 / f_2^2 - 1) \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)，化简可得

$$M_{p1} = R_1 - (1 + 2/(\alpha - 1))\Phi_1 + 2/(\alpha - 1)\Phi_2 - B_{p1} \quad (5)$$

同理可求2频点和3频点的结果如下：

$$M_{p2} = R_2 - 2\alpha/(\alpha - 1)\Phi_1 + (2\alpha/(\alpha - 1) - 1)\Phi_2 - B_{p2} \quad (6)$$

$$M_{P_3} = R_3 - (1 + 2/(\beta - 1))\Phi_1 + 2/(\beta - 1)\Phi_3 - B_{P_3}, \quad (7)$$

式 (6) 和 (7) 中 :

$$\begin{cases} B_{P_1} = -(\alpha + 1)/(\alpha - 1)N_1\lambda_1 + 2/(\alpha - 1)N_2\lambda_2 \\ B_{P_2} = -2\alpha/(\alpha - 1)N_1\lambda_1 + (2\alpha/(\alpha - 1) - 1)N_2\lambda_2 \\ B_{P_3} = -(\beta + 1)/(\beta - 1)N_3\lambda_3 + 2/(\beta - 1)N_3\lambda_3 \\ \alpha = f_1^2/f_2^2 \\ \beta = f_1^2/f_3^2 \end{cases}, \quad (8)$$

式 (5) 至 (8) 中, α 和 β 为比例系数, B_{P_1} 、 B_{P_2} 、 B_{P_3} 为载波相位整周模糊度和观测噪声等系统偏差的总和, 在不发生周跳的情况下 B_{P_1} 、 B_{P_2} 、 B_{P_3} 为常数, 若要求出准确的多路径误差值, 必须准确地求出整周模糊度, 复杂度增加。因此采用滑动窗口的方法求伪距多路径误差变化的幅值, 即设定一个窗口长度, 求出该窗口长度平均 M_{P_i} , 用当前历元 M_{P_i} 减去窗口长度平均 M_{P_i} , 消除 B_{P_1} 、 B_{P_2} 、 B_{P_3} , 得到相对多路径误差值为 :

$$\begin{cases} M'_{P_1} = R_1 - (1 + 2/(\alpha - 1))\Phi_1 + 2/(\alpha - 1)\Phi_2 \\ M'_{P_2} = R_2 - 2\alpha/(\alpha - 1)\Phi_1 + (2\alpha/(\alpha - 1) - 1)\Phi_2 \\ M'_{P_3} = R_3 - (1 + 2/(\beta - 1))\Phi_1 + 2/(\beta - 1)\Phi_3 \end{cases} \quad (9)$$

本文采用的滑动窗口长度为 30 个历元, 且在计算第 3 频点时采用另一计算公式^[17] :

$$M'_{P_3} = R_3 - \Phi_1 - (\alpha + \gamma)/(\alpha - 1)/\gamma(\Phi_1 - \Phi_2), \quad \gamma = f_3^2/f_2^2. \quad (10)$$

1.2 载波相位周跳探测

在进行载波相位观测过程中, 因某些因素使接收机在一段时间内无法接收到卫星信号引起计数器中止, 导致计数发生错误的现象称之为周跳^[15]。周跳是载波相位测量数据处理过程中必须解决的关键问题, 如果周跳未能被准确地探测与修复, 会严重影响 GNSS 高精度导航、定位以及授时技术的应用^[15, 21]。目前探测与修复周跳的方法很多, 例如: 高次差法, 多项式拟合法、电离层残差法、小波分析法。这些方法各有特色也各有局限性, 在不同的场合采用不同的方法^[22-23]。本文采用无几何线性组合和 M-W 组合联合探测出周跳, 用 O/S 表示观测历元数与周跳比, 用公式 (11) 表示最终结果^[1, 17], 该项结果越大, 则表示周跳越频繁。

$$C_{SR} = \frac{1000}{O/S}. \quad (11)$$

2 数据质量检核结果与分析

G-Nut/Anubis 是由捷克国家大地测量、地形与地图制图研究所开发的一款数据质量分析软件, 它可对所有 GNSS 系统进行数据的定量和定性分析, 主要功能包括: 多系统观测文件统计、标准单点定位、计算多系统各频点多路径、钟跳探测、周跳以及其他中断统计, 最终结果以.xml 文件形式输出^[17, 24]。基于 G-Nut/Anubis 软件分析北斗地基增强系统 113 个基准站 2017 年 10 月 1 号至 2017 年 12 月 31 号的观测数据, 通过计算获得基准站每天的 C_{SR} , GPS L1C/L2P/L5Q 和 BDS B1I/B2I/B3I 三频多路径误差的 RMS 结果, 统计分析每天生成的数据质量检核结果。

限于篇幅, 表 1 和表 2 仅列出部分基准站 10 到 12 月 GPS 和 BDS 的 C_{SR} 、三频多路径误差的 RMS 月平均值, 其中表 1 和表 2 与 113 个基准站计算结果趋势一致。图 1 为 CHHC 站统计结果的 C_{SR} 、三频

多路径误差的 RMS 时间序列。

表1 GPS的 C_{SR} 、三频多路径误差的 RMS 值 (2017-10/2017-12)

站点	2017年10月				2017年11月				2017年12月			
	C_{SR}	L1C	L2P	L5Q	C_{SR}	L1C	L2P	L5Q	C_{SR}	L1C	L2P	L5Q
CHHC	2.98	0.14	0.20	0.14	3.41	0.14	0.20	0.15	3.20	0.13	0.20	0.13
CHKF	1.14	0.15	0.21	0.19	1.43	0.16	0.22	0.21	1.91	0.17	0.25	0.23
CHML	0.56	0.19	0.27	0.29	0.71	0.19	0.28	0.30	1.40	0.21	0.30	0.30
DZAL	1.26	0.10	0.16	0.17	1.44	0.11	0.18	0.18	1.84	0.12	0.19	0.19
DZCX	0.62	0.20	0.26	0.22	0.70	0.24	0.29	0.24	0.98	0.21	0.30	0.25
DZKE	0.71	0.15	0.28	0.26	0.68	0.16	0.30	0.27	0.99	0.17	0.31	0.29
QXAL	80.64	0.13	0.18	0.18	48.85	0.15	0.22	0.21	12.81	0.16	0.25	0.23
QXDW	29.12	0.10	0.17	0.17	32.43	0.12	0.21	0.19	33.51	0.23	0.20	0.10
QXDZ	1.11	0.14	0.24	0.18	3.24	0.15	0.26	0.19	3.21	0.16	0.26	0.21
QXNC	26.36	0.35	0.48	0.45	24.51	0.32	0.45	0.43	20.82	0.33	0.45	0.44
ZKCD	1.00	0.14	0.22	0.21	1.39	0.15	0.25	0.23	2.12	0.16	0.28	0.24
ZKEL	1.01	0.12	0.18	0.18	1.44	0.14	0.22	0.20	2.17	0.15	0.24	0.21
ZKYS	1.11	0.18	0.23	0.21	1.69	0.20	0.27	0.23	3.84	0.21	0.28	0.23

注： C_{SR} 为无量纲， M_{P1} ， M_{P2} 和 M_{P3} 分别与L1C，L2P和L5Q频点对应，单位为m

表2 BDS的 C_{SR} 、三频多路径误差的 RMS 值 (2017-10/2017-12)

站点	2017年10月				2017年11月				2017年12月			
	C_{SR}	B1I	B2I	B3I	C_{SR}	B1I	B2I	B3I	C_{SR}	B1I	B2I	B3I
CHHC	2.98	0.08	0.07	0.09	3.41	0.08	0.07	0.08	3.20	0.12	0.13	0.13
CHKF	1.14	0.08	0.06	0.08	1.43	0.09	0.07	0.09	1.91	0.09	0.07	0.09
CHML	0.56	0.12	0.10	0.11	0.71	0.12	0.10	0.11	1.40	0.13	0.11	0.12
DZAL	1.26	0.07	0.06	0.08	1.44	0.07	0.06	0.08	1.84	0.08	0.07	0.08
DZCX	0.62	0.11	0.10	0.11	0.70	0.12	0.11	0.12	0.98	0.12	0.12	0.13
DZKE	0.71	0.11	0.12	0.14	0.68	0.12	0.12	0.14	0.99	0.12	0.13	0.14
QXAL	80.64	0.07	0.05	0.09	48.85	0.07	0.06	0.10	12.81	0.08	0.06	0.10
QXDW	29.12	0.07	0.06	0.09	32.43	0.08	0.07	0.10	33.51	0.10	0.09	0.12
QXDZ	1.11	0.08	0.08	0.09	3.24	0.09	0.11	0.09	3.21	0.09	0.14	0.10
QXNC	26.36	0.31	0.34	0.37	24.51	0.31	0.34	0.36	20.82	0.30	0.31	0.32
ZKCD	1.00	0.08	0.07	0.09	1.39	0.09	0.09	0.10	2.12	0.09	0.08	0.10
ZKEL	1.01	0.08	0.10	0.10	1.44	0.08	0.08	0.10	2.17	0.09	0.08	0.11
ZKYS	1.11	0.10	0.07	0.10	1.69	0.10	0.08	0.11	3.84	0.14	0.10	0.14

注： C_{SR} 为无量纲， M_{P1} ， M_{P2} 和 M_{P3} 分别与B1I，B2I和B3I对应，单位为m

分析 113 个基准站统计结果可知，各基准站的数据质量变化较为稳定，下面以 CHHC 基准站为例，CHHC 基准站的 C_{SR} 变化拟合曲线几乎是一条平行 x 轴的直线，GPS 与 BDS 三频多路径误差的 RMS 变化

幅值波动范围极小, 仅 1~3 cm, 其统计结果时间序列图如 1 所示。

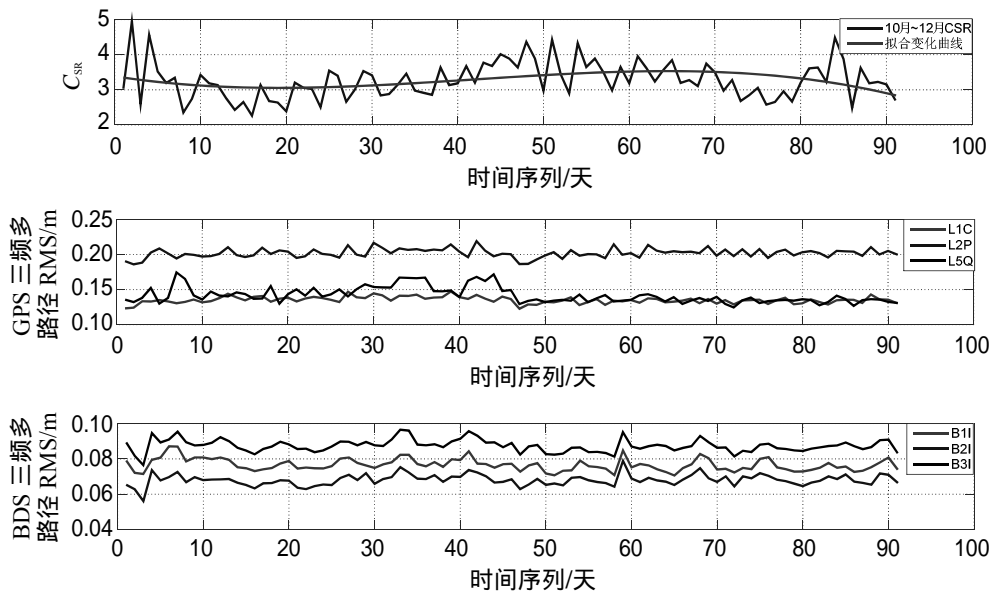


图 1 CHHC 站 C_{SR} 、三频多路径误差的 RMS 时间序列统计结果

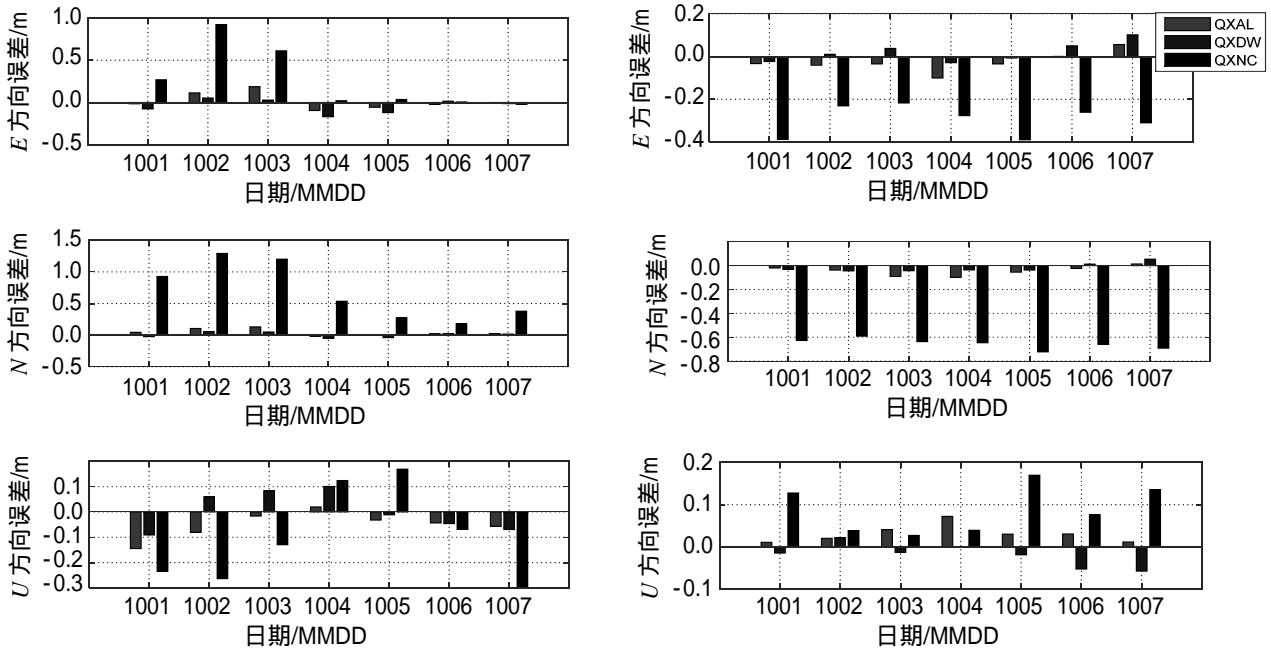
通过分析所有基准站统计结果可得: 113 个基准站中, 有 10 个基准站 C_{SR} 值超过 5, 其中 QXAL 基准站的 C_{SR} 值在 10 月份更是高达 80.64, QXDW, QXHK, QXNC 和 QXTZ 4 个基准站的 C_{SR} 值均超过 10, 明显高于其他基准站; JTDS, DZCU 和 QXTZ 基准站的 GPS 多路径误差偏大, QXGY 和 ZKKS 基准站的 BDS 多路径误差偏大。综合现象分析, 在中容易产生周跳的 5 个基准站中, QXTZ 和 QXNC 站的多路径误差偏大, 而该 5 个站的接收机型号为 PDB38, 天线类型为 HX-CGX-601A, 则说明多路径效应不是造成周跳频繁的必然原因, 设备老化等因素也有可能造成接收机频繁失锁。

从表 1 数据可得: GPS 中的 M_{P1} , M_{P2} 和 M_{P3} 的 RMS 值均优于系统指标要求 ($C_{SR} < 5$, $M_{P1} < 0.5$, $M_{P2} < 0.65$, $M_{P3} < 0.65$), 并且可以发现在同一观测站同一观测时间段, M_{P2} 的 RMS 值普遍高于 M_{P1} 的 RMS 值和 M_{P3} 的 RMS 值, 与其他文献^[2-3, 9]结果一致; 从表 2 数据可得: BDS 中的 M_{P1} , M_{P2} 和 M_{P3} 的 RMS 值均优于系统指标要求, 并且可以发现在同一观测站同一观测时间段, M_{P2} 的 RMS 值普遍低于 M_{P1} 的 RMS 值和 M_{P3} 的 RMS 值。综合比较表 1 和表 2, 能够得到 GPS 和 BDS 多路径效应差异, 表 1 中同地点同时段 GPS 的 M_{P1} , M_{P2} 和 M_{P3} 的 RMS 值普遍大于表 2 中 BDS 的 M_{P1} , M_{P2} 和 M_{P3} 的 RMS 值。

3 数据解算分析

从 113 个基准站的数据质量分析统计结果来看, 10 个基准站数据质量较差, 不满足系统指标要求。为了分析基准站观测数据质量对系统定位解算精度的影响, 利用 RTKLIB 软件进行静态 PPP 解算比较, 解算方案如下: 选取 2017 年 10 月 1 号至 7 号 QXAL (平均 C_{SR} 值为 47.43)、QXDW (平均 C_{SR} 值为 31.69) 和 QXNC (平均 C_{SR} 值为 23.90) 3 个 C_{SR} 值偏大的基准站观测数据和 MGEX 提供的 GBM 精密星历和钟差产品, 利用 RTKLIB 软件对各基准站分别进行 GPS 和 BDS 单系统静态 PPP 解算以及 GPS+BDS 双系统静态 PPP 解算, 解算结果如图 2 至图 5 所示。

对 QXAL, QXDW 和 QXNC 3 个基准站分别进行 BDS 单系统和 GPS 单系统静态 PPP 解算, 结果如图 2 所示。其中 E , N 和 U 构成以测量点为原点的站心坐标, E 表示东方向, N 表示北方向, U 表示天顶方向。



(a) 10月1号到7号 BDS PPP 解 (b) 10月1号到7号 GPS PPP 解

图 2 QXAL, QXDW 和 QXNC 站 BDS PPP 与 GPS PPP 解算 E , N 和 U 方向误差

从图 2 可以看出：QXAL 和 QXDW 基准站 GPS PPP 解算结果与 BDS PPP 解算结果差异不大， E , N 方向误差为厘米级， U 方向误差仅 10 月 1 号 BDS PPP 解为分米级。但 QXNC 基准站解算结果明显偏大， E , U 方向差值为分米级， N 方向差值为米级，最大高达 1.3 m。

然后，对 QXAL, QXDW 和 QXNC 3 个站进行了 GPS+BDS 双系统静态 PPP 解算，结果如图 3 所示。

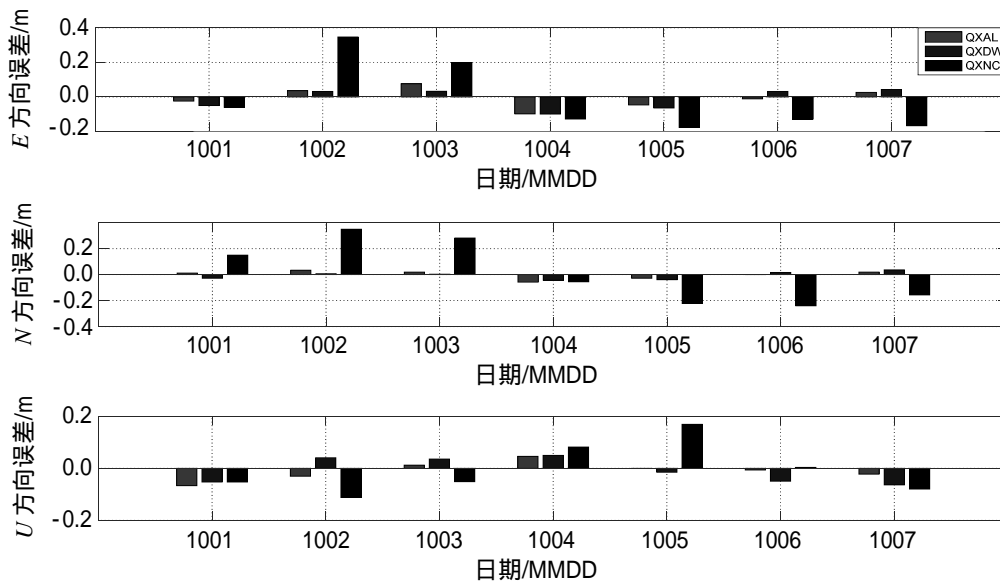


图 3 QXAL, QXDW 和 QXNC 站 GPS+BDS (双系统) E , N 和 U 方向误差

从图 3 可以看出，QXNC 站坐标偏差大于其他两个基准站坐标偏差。根据分析可知：

虽然 QXAL 基准站 C_{SR} 值最大，但解算结果与其他站点基本相同，达到厘米级。初步判定，造成此现象的原因是由于目前比较成熟的软件 (GIPSY, GAMIT, Bernese 和 RTKLIB 等) 中已包含了周跳探测和修复，因此在利用上述软件进行静态 PPP 解算时， C_{SR} 值的大小对定位精度的影响很小，基本可以忽略。

由表 1 和表 2 数据可知：QXNC 基准站的多路径误差大，QXAL 和 QXDW 两个基准站多路径误差较小。由此说明多路径误差是导致 QXNC 基准站解算坐标偏差远大于另外两个基准站的主要原因。因此，在定位解算时，需对多路径误差较大的数据进行剔除或者降权处理，降低对定位精度的影响。

下面我们以 QXAL 基准站为例来具体分析，图 4 为 QXAL 基准站分别利用 GPS 和 BDS 进行单系统定位解算的坐标偏差，图 5 为分别利用 GPS 和 BDS 进行单系统定位解算坐标偏差的 RMS 统计图。从图 4 可看出：与 GPS 单系统解算结果相比，BDS 单系统解算结果在 E 、 N 和 U 方向坐标偏差普遍比 GPS 大，因此，在进行单系统定位解算时应考虑星座因素对定位解算影响，在进行融合定位解算时可提高 GPS 卫星权重。图 5 可看出 GPS 定位解算结果的 RMS 相比 BDS 定位解算结果的 RMS 来说变化平缓，也说明了在进行单系统定位解算时对 GPS 定位解算的性能优于 BDS。

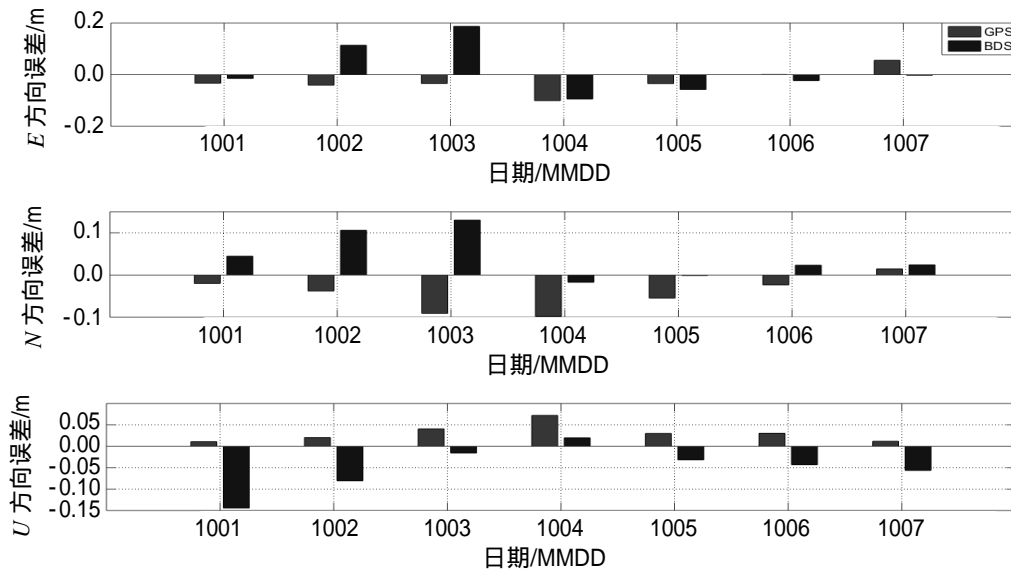


图 4 QXAL 站 GPS 和 BDS 单系统定位解算 E 、 N 和 U 方向误差

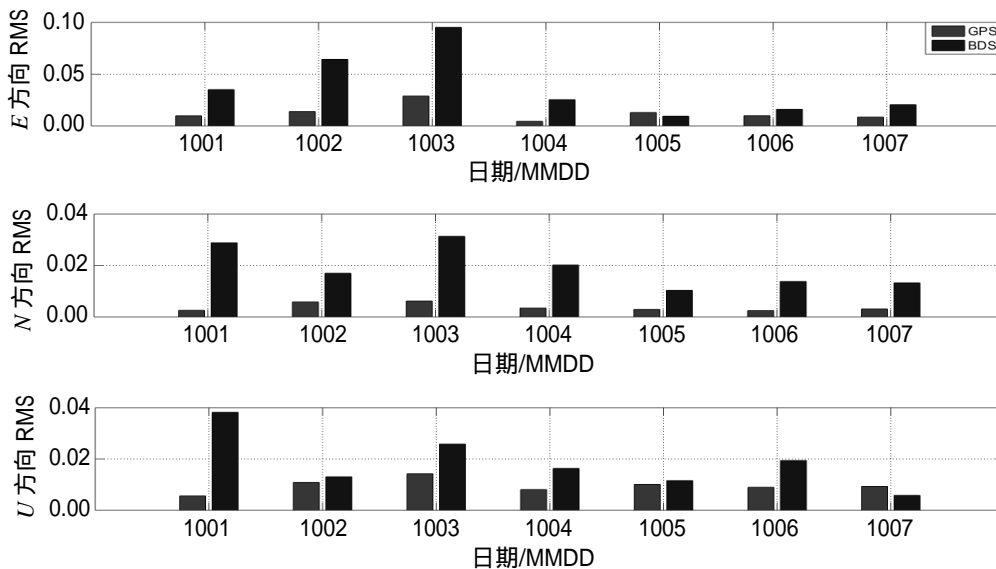


图 5 QXAL 站 GPS 和 BDS 单系统 E 、 N 和 U 方向的 RMS 统计图

4 结语

通过对北斗地基增强系统 113 个基准站连续 3 个月的观测数据进行计算并统计分析，发现：

在同一地点相同环境下, GPS L2 频点多路径误差最大, BDS B2 频点多路径误差最小, 因此在进行 GPS 定位解算过程中应考虑到 L2 频点多路径效应带来的误差影响, 在进行 BDS 双频定位解算可优先选择 B2 频点数据;

在同一地点相同环境下, BDS 多路径误差小于 GPS 多路径误差;

在本文分析的 113 个北斗地基增强系统基准站中, 91.1% 基准站的观测数据质量满足北斗地基增强系统的建站要求;

在单系统精密单点定位过程中, GPS 定位性能优于 BDS, 在后续进行基准站坐标精密单点定位解算时, GPS 卫星应该占有更大权重;

在多路径误差较大的情况下, 需要进行数据预处理以提高定位解算精度。

致谢: 感谢北斗地基增强系统管理委员会提供的数据。

参考文献:

- [1] 李军, 王继业, 熊熊, 等. 东北亚地区 GPS 观测数据质量检测和分析[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2006, 31(3): 209-212.
- [2] 聂兆生, 黄勇, 刘刚, 等. 湖北 CORS 系统数据质量评估分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(6): 53-56, 61.
- [3] 赵国强, 孙汉荣. 连续基准网 GPS 数据质量检测与分析[J]. 城市勘测, 2009(3): 73-75.
- [4] 陈中新, 奚长元, 范占永, 等. 应用 TEQC 对 GPS 连续参考站数据进行质量分析[J]. 全球定位系统, 2007, 32(3): 35-37, 46.
- [5] UNAVCO Facility. TEQC[R/OL]. (2003-08-15)[2019-06-11] <http://www.unavco.org/software/data-proceesing/teqc.html>.
- [6] LOUIS H E, CHARLES M M. TEQC: the multi-purpose toolkit for GPS/GLONASS data[J]. GPS Solution, 1999, 3(1): 42-49.
- [7] 杨海彦, 孙保琪, 杨旭海, 等. Multi-GNSS 多路径效应与观测噪声综合分析[J]. 时间频率学报, 2017, 40(2): 114-123.
- [8] 李洪玉, 王耀强, 陈雷, 等. 利用 TEQC 对 GPS 数据质量的分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2009, 32(2): 80-82.
- [9] 范世杰, 郭际明, 彭秀英. TEQC 在 GPS 数据预处理中的应用与分析[J]. 测绘信息与工程, 2004, 29(2): 33-35.
- [10] 张显云, 姚黔贵, 张鹏飞, 等. 基于 TEQC 的 GNSS 数据质量可视化表达与分析[J]. 测绘通报, 2014(4): 26-29.
- [11] 吴春节, 胡玉坤, 彭攀. BDS/GPS 观测值质量评估与分析[J]. 北京测绘, 2017(S1): 32-36.
- [12] 吴丹, 王利, 张勤, 等. GNSS 数据质量评估软件的实现及验证分析[J]. 测绘科学技术学报, 2015, 32(4): 344-348.
- [13] 刘荟萃, 唐歌实, 崔红正. 多模 GNSS 数据质量检测方法与软件研发[J]. 测绘空间地理信息, 2014, 37(1): 5-8.
- [14] 李晓光, 程鹏飞, 成英燕, 等. GNSS 数据质量分析[J]. 测绘通报, 2017(3): 1-4, 8.
- [15] 李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2010.
- [16] 夏林元. GPS 观测值中的多路径效应理论研究及数值结果[D]. 武汉: 武汉大学, 2001.
- [17] VACLAVOIC P, DOUSA J. G-Nut/Anubis: open-source tool for multi-GNSS data monitoring with a multipath detection for new singals, frequencies and constellations[J]. IGA SYMPOSIA, 2015, 143: 775-782.
- [18] 时荣. 一种计算北斗三频多路径的方法及结果分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2015, 38(8): 175-177.
- [19] 王梦丽, 王飞雪. 三频电离层延迟改正中多路径误差和观测噪声的削弱算法[J]. 测绘学报, 2008, 37(4): 418-422.
- [20] CAI C S, HE C, SANTERRE R, et al. A comparative analysis of measurement noise and multipath for four constellations: GPS, BeiDou, GLONASS and Galileo[J]. Survey Review, 2016, 48(349): 287-295.
- [21] 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.
- [22] 蔡昌盛, 高井祥. GPS 周跳探测及修复的小波变换法[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2007, 32(1): 39-42.
- [23] 张小红, 郭斐, 李盼, 等. GNSS 精密单点定位中的实时质量控制[J]. 武汉大学学报, 2012, 37(8): 940-944, 1013.
- [24] Department of Geodesy and Geodynamics. Geodetic Observatory Pecný[EB/OL]. (2012-08-17)[2019-03-26] <http://www.pecny.cz>.