

北斗卫星导航系统服务精度评估*

王 威^{1†} 胡英男²

(1 北京跟踪与通信技术研究所 北京 100094)

(2 中国人民解放军61741部队 北京 100081)

摘要 精度是北斗卫星导航系统(Beidou Navigation Satellite System, BDS)服务指标体系的重要内容. 给出了北斗卫星导航系统精度指标的含义及精度指标的评估方法, 利用实测数据分析了北斗系统实际实现的精度指标, 并将其与GPS系统实际实现的精度指标作比较分析. DOP (几何精度因子)值由卫星导航系统空间星座分布决定, 是影响用户定位授时精度的重要因素, 比较了北斗与GPS在中国区域DOP值分布的差异. GPS系统PDOP (定位几何精度因子)分布均匀, 随用户经度和纬度变化不大, 在1.0-2.0之间. 而受混合星座影响, 北斗系统PDOP分布随着测站经度和纬度变化较大, 变化范围为1.5-5.0; 且随测站纬度增加而变大, 由中心经度(东经118°)向两侧不断变大. 对于影响用户等效距离误差的空间信号精度进行了比较分析. 利用IGS (国际GNSS服务组织)提供的事后精密轨道、激光跟踪数据和北斗双向时频传递测量的卫星钟差评估了北斗基本导航电文的精度. 结果表明: 北斗IGSO (倾斜地球同步轨道)卫星和MEO (中轨道)卫星轨道径向误差约为0.5 m, 大于GPS卫星轨道小于0.2 m的径向误差. 北斗GEO (地球同步轨道)卫星激光残差约为65 cm, IGSO卫星和MEO卫星激光残差约为50 cm. 受卫星钟差数据龄期影响, MEO卫星钟差参数误差明显大于IGSO卫星和GEO卫星, 约为0.80 m. 最后, 采用MGEX (多GNSS系统试验项目)多模接收机进行了定位试验, 分析了北斗系统和GPS在定位精度上的差异. 结果表明: 受星座构型影响, 北斗卫星导航系统定位精度与GPS系统定位精度相比有所差异, 但满足水平定位精度优于10 m、高程定位精度优于10 m的设计要求, 双系统组合定位精度好于单一系统定位精度.

关键词 天体测量与天体力学, 空间飞行器, 历书, 方法: 数据分析

中图分类号: P128; 文献标识码: A

1 引言

卫星导航系统在过去的几十年间极大地改善了人们的生活, 并带动了相关产业的发展, 产生了丰富的社会经济效应. 美国GPS系统于1994年全面建成, 早期GPS系统空间信号误差为4.5 m. 随着导航卫星的不断更新换代及地面运控系统的拓展, BLOCK

2016-08-22收到原稿, 2016-11-07收到修改稿

*国家自然科学基金项目(41574029)资助

†15810266558@163.com

IIR卫星空间信号误差降低至约 $0.5\text{ m}^{[1-2]}$ 。GLONASS是由俄罗斯研发的卫星导航系统,1976年开始组建,1991年建成具备覆盖全球的卫星导航系统。随着俄罗斯经济不断走低,该系统一度陷入崩溃边缘。截止2011年,该系统完成了空间部分的重新入网,并拓展地面系统,空间信号精度不断提升^[3-5]。我国北斗卫星导航系统按照“三步走”的发展战略,于2012年底完成了由5颗GEO卫星、5颗IGSO卫星和4颗MEO卫星组成的区域星座,正式向亚太地区提供服务,成为世界上成熟的第3大卫星导航系统^[6]。

精度指标是卫星导航系统服务性能规范中约定的服务性能指标体系的最重要的指标之一,是导航系统对用户稳定、可靠服务性能保证的承诺,也是用户选择的重要依据。GPS系统于2007年针对授权用户发布的第1版GPS精密定位服务性能标准(PPS)^[7]和2008年针对普通用户发布的第4版GPS标准定位服务性能标准(SPS)^[8]中,均对GPS精度指标给出了明确的定义。SPS和PPS标准都将系统性能指标大致分为两类:空间信号性能(系统服务能力)与服务性能(用户)。实际运行监视数据分析结果表明:GPS卫星空间信号精度和用户定位授时精度均达到或者好于系统服务性能规范中约定的精度指标^[9]。GLONASS尚未发布类似于GPS标准定位服务性能标准的文档,但是在其信息分析中心可以实时查询到全球DOP分布、用户测距误差和定位精度等指标。

北斗卫星导航系统于2013年公布了公开服务性能规范,明确了精度指标的含义和数值,其精度指标体系见图1^[10],其中规定用户距离误差(User Ranging Error, URE)优于 2.5 m (95%置信度),水平定位精度优于 10 m (95%置信度),高程定位精度优于 10 m (95%置信度),授时精度优于 50 ns (95%置信度)。杨元喜院士等人在文献[11]中分析了北斗系统伪距和相位数据的测量特性,并对北斗系统基于伪距和相位数据的单点定位和相对定位精度进行了评估。与文献[11]不同,本文利用实测数据从卫星空间信号精度和定位精度两个方面对北斗系统服务性能规范中约定的精度指标体系进行讨论。并以GPS系统为参考,将北斗卫星导航系统精度指标与GPS系统所达到的精度指标作比较,分析影响北斗卫星导航系统精度指标的因素。

2 北斗卫星导航系统精度指标的概念

2.1 北斗卫星导航系统精度指标体系

北斗卫星系统精度指标体系与GPS SPS和PPS标准中规定的精度指标体系一致,精度指标体系划分如图1。北斗卫星导航系统精度指标体系可以划分为空间信号精度指标和服务精度指标。空间信号精度指标包括URE及其1阶导数URRE、2阶导数UARE和协调世界时偏差误差UTCOE,其中,URE是空间信号精度指标的重要组成部分,定义了由导航卫星播发的广播星历误差和广播钟差参数误差在平均用户测距方向上的投影。服务精度指标定义了在该系统服务区内用户使用导航系统进行定位、测速和授时所达到的精度,其中,系统服务区是指 55°S – 55°N 、 70°E – 150°E 范围内的大部分区域,如图2所示。在系统服务区内,URE在95%的置信度内优于 2.5 m ,用户高程方向和水平方向定位精度在95%的置信度内分别优于 10 m 。

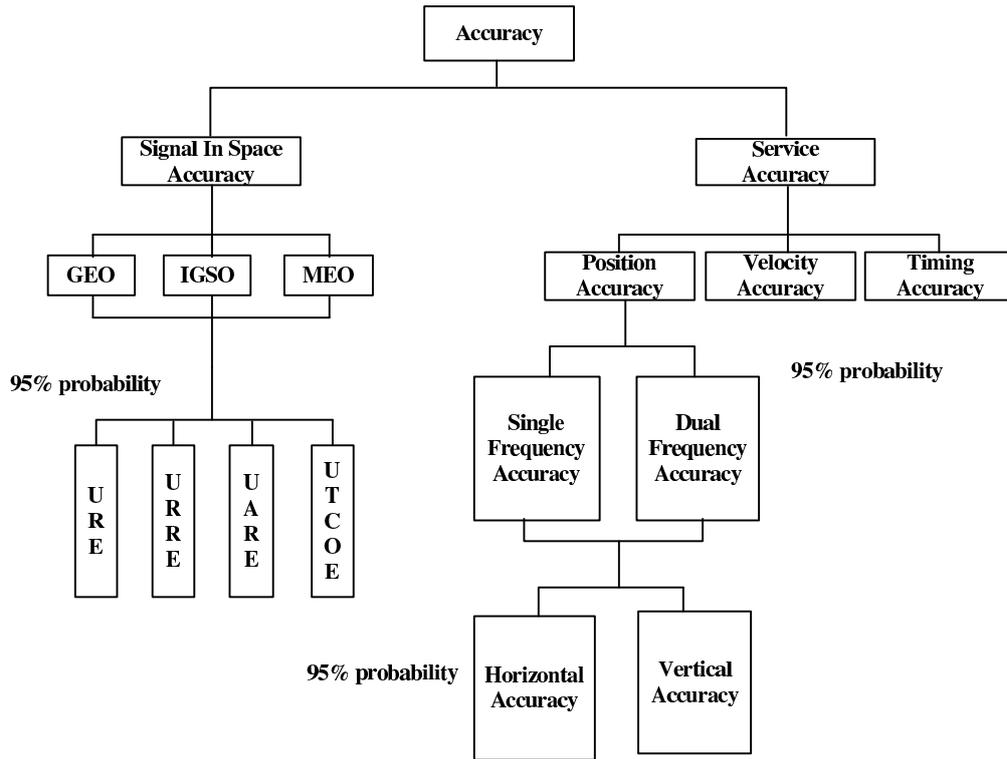


图 1 北斗卫星导航系统精度指标体系

Fig. 1 The precision criteria system of the Beidou navigation satellite system

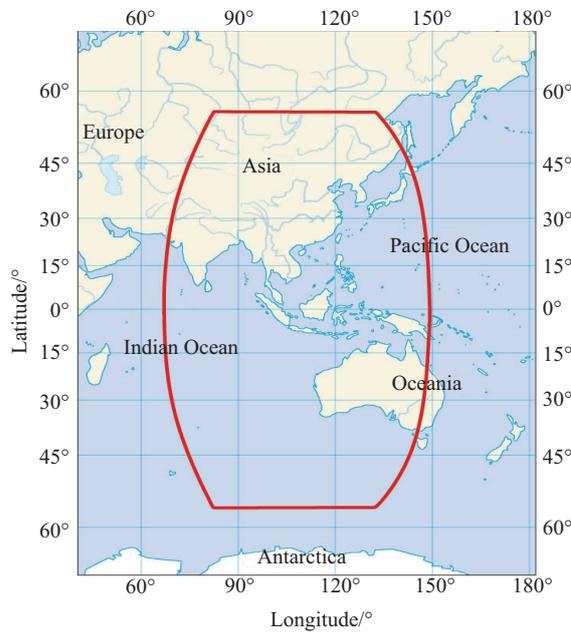


图 2 北斗卫星导航系统服务区

Fig. 2 Service area of the Beidou navigation satellite system

2.2 空间信号精度指标与服务精度指标的关系

卫星定位授时的原理类似于测量中的空间后方交会. 假设测站 s 在某时刻 t 可以看到 N 颗卫星, 伪距测量方程可以写成^[12-13]:

$$\rho_i^s = \sqrt{(X^s - X_i)^2 + (Y^s - Y_i)^2 + (Z^s - Z_i)^2} + ct_s + \Delta_i, \quad (1)$$

其中, ρ_i^s 为伪距观测量, (X^s, Y^s, Z^s) 为未知接收机坐标, (X_i, Y_i, Z_i) 为已知卫星位置, t_s 为未知接收机钟差, c 为光速, Δ_i 为测距误差. 一般情况下, 接收机观测到的导航卫星多于4颗, 将(1)式由泰勒级数展开线性化, 利用最小二乘计算未知参数及其方差-协方差矩阵:

$$\hat{\boldsymbol{x}} = (\boldsymbol{B}^T \boldsymbol{B})^{-1} \boldsymbol{B}^T \boldsymbol{L}, \boldsymbol{Q}_{\hat{\boldsymbol{x}}\hat{\boldsymbol{x}}} = (\boldsymbol{B}^T \boldsymbol{B})^{-1}, \boldsymbol{D}_{\hat{\boldsymbol{x}}\hat{\boldsymbol{x}}} = \sigma_0^2 \boldsymbol{Q}_{\hat{\boldsymbol{x}}\hat{\boldsymbol{x}}}, \quad (2)$$

其中, $\boldsymbol{D}_{\hat{\boldsymbol{x}}\hat{\boldsymbol{x}}}$ 为未知参数的方差-协方差矩阵, \boldsymbol{L} 为(1)式线性化得到的常数矩阵. σ_0 是伪距测距误差的中误差, 由用户等效距离误差(User Equivalent Ranging Error, UERE)决定; $\boldsymbol{Q}_{\hat{\boldsymbol{x}}\hat{\boldsymbol{x}}}$ 为未知参数的协因数阵, 由卫星的空间分布决定. 一般使用几何精度因子(Dilution Of Precision, DOP)表征卫星的空间分布对定位授时精度的影响, 如定位几何精度因子(Positioning DOP, PDOP). PDOP可以由 $\boldsymbol{Q}_{\hat{\boldsymbol{x}}\hat{\boldsymbol{x}}}$ 如下式计算:

$$\text{PDOP} = \sqrt{(\boldsymbol{Q}_{\hat{\boldsymbol{x}}\hat{\boldsymbol{x}}})_{11} + (\boldsymbol{Q}_{\hat{\boldsymbol{x}}\hat{\boldsymbol{x}}})_{22} + (\boldsymbol{Q}_{\hat{\boldsymbol{x}}\hat{\boldsymbol{x}}})_{33}}. \quad (3)$$

服务精度和空间信号精度之间有严格的数学关系. 在导航中, 位置、速度、时间精度(Position, Velocity and Time, PVT)的基本计算公式为:

$$\text{PTV} = \text{UERE} \times \text{DOP}, \quad (4)$$

其中UERE由URE和用户设备误差UEE (User equipment error)确定, 其平方根精度UERE的计算公式为:

$$\text{UERE} = \sqrt{(\text{URE})^2 + (\text{UEE})^2}. \quad (5)$$

就用户定位精度来说, UERE与导航电文的钟差误差、轨道误差、信号传播时延(电离层时延、对流层时延、多路径时延)的模型改正误差有关. DOP可分为PDOP、TDOP等, 定位精度PosAccu的计算公式为:

$$\text{PosAccu} = \text{UERE} \times \text{PDOP}. \quad (6)$$

由以上分析可知, 用户定位授时精度是由用户等效距离误差(UERE)和几何精度因子(DOP)引起的. DOP值是由卫星导航系统空间星座分布决定的, 而UERE受卫星空间信号误差、环境段传播延迟改正误差和用户设备误差的共同影响, 其中URE完全取决于卫星导航系统播发的广播星历和钟差参数. 因此, 本文不讨论环境段传播延迟改正误差和用户设备误差对UERE的影响, 而是分别从DOP值分布、URE和定位精度3个方面讨论北斗卫星导航系统精度指标, 并将其与GPS作比较分析.

3 定位几何精度因子

PDOP是指用户接收的导航卫星组成的几何图形的空间强度. PDOP越小, 用户定位误差越小.

我们利用2016年1月24—30日GPS系统和北斗系统播发的广播星历计算了中国及其周边区域(60°–160°E, 0°–60°N)导航用户的定位几何精度因子(PDOP). 图3和图4分别为上述时段GPS系统和北斗系统PDOP分布, 两图中右侧颜色棒代表PDOP值, 单位归一化, 从图中可以看出, 北斗单系统PDOP分布较GPS单系统差. 由于空间星座采用Walker星座, GPS系统PDOP分布均匀^[13], 随用户经度和纬度变化不大, 在1.0–2.0之间. 而北斗系统PDOP分布随着测站经度和纬度变化较大, 变化范围为1.5–5.0; 且随测站纬度增加而变大, 由中心经度(东经118°)向两侧不断变大. 这是因为GPS系统由均匀分布的MEO卫星构成, 不同经度测站观测到平均卫星数大致相当, 而目前北斗系统空间部分主要由GEO和IGSO卫星组成, 在服务区内暂时无法均匀分布. 随着将来全球系统建设及MEO卫星的组网, 北斗系统导航用户PDOP分布将得到改善^[14].

4 导航电文空间信号误差URE

URE是用户接收终端伪距测量值与利用导航电文计算的伪距理论值的不符合程度. 导航电文的空间信号误差、信号传播路径延迟改正误差和用户接收终端测量多径与噪声均会对URE产生影响, 其中, 信号传播路径延迟包括电离层延迟和对流层延迟, 用户使用双频无电离层组合可以消除电离层延迟误差, 对流层延迟也可以通过精密建模消除, 残余延迟小于10 cm. 用户接收终端测量多径与噪声对用户等效距离误差与接收机实现的算法有关^[15]. 因此, 不再考虑信号传播路径延迟改正误差和用户接收终端测量多径与噪声, 而仅分析导航电文的空间信号误差对用户等效距离误差的影响.

URE仅考虑与北斗空间段和地面控制段相关的误差, 不包括对流层延迟补偿误差、多径及接收机噪声等与用户段相关的误差. URE包括导航电文引起的轨道误差在用户测距方向上的投影和卫星钟差误差. URE的计算公式为^[16]:

$$\begin{aligned} \text{URE}_{\text{GEO/IGSO}} &= \sqrt{(R - cT)^2 + (0.09A)^2 + (0.09C)^2}, \\ \text{URE}_{\text{MEO}} &= \sqrt{(0.99R - cT)^2 + (0.14A)^2 + (0.14C)^2}, \end{aligned} \quad (7)$$

其中, T 为卫星钟差误差, R 为卫星轨道径向误差, A 为卫星轨道切向误差, C 为卫星轨道法向误差. 一般计算URE时使用精度更高的事后精密星历和精密钟差作为依据, 与导航电文中的广播星历和钟差参数作差.

本节利用2016年1月24日至2016年1月30日GPS系统导航电文和北斗系统导航电文评估GPS系统和北斗系统的URE. 其中, 评估GPS系统URE时, 事后精密轨道和精密钟差来源于IGS的最终产品, 其轨道精度优于2 cm, 钟差精度优于0.1 ns. IGS事后精密轨道与GPS系统导航电文参考框架间的差异仅为厘米级; 精密钟差的参考基准为IGST (time scale of IGS), 其与GPST (time scale of GPS)的差异可以在IGS的钟差产品中得到.

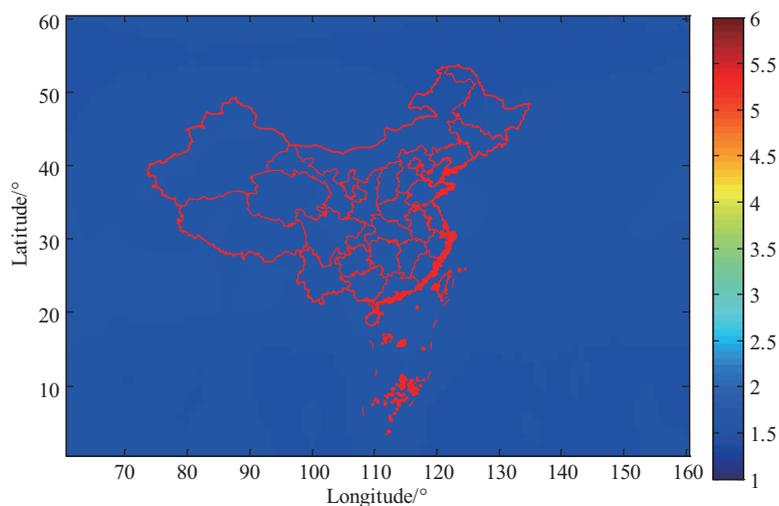


图 3 中国及周边区域GPS系统PDOP分布

Fig. 3 The PDOP distribution of the GPS system in China and its peripheral regions

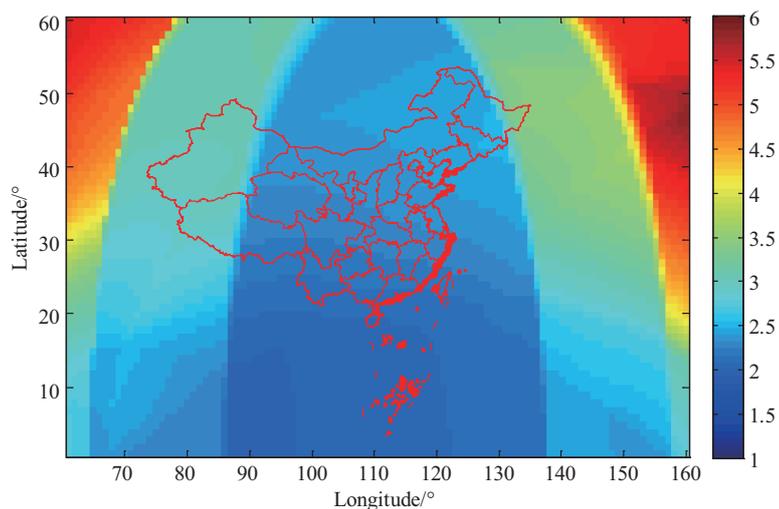


图 4 中国及周边区域北斗系统PDOP分布

Fig. 4 The PDOP distribution of the BDS in China and its peripheral regions

评估北斗系统的URE时,精密轨道采用德国地学中心GFZ利用全球监测网计算的北斗卫星事后轨道,其中IGSO和MEO卫星事后精密轨道径向误差优于10 cm. 由于MGEX计算北斗卫星精密钟差的时间基准与北斗时间BDT不同^[17],尚无机构发布两者之间的差异. 且MGEX计算的北斗卫星钟差产品包含明显的轨道周期形变,不宜作为北斗卫星广播钟差参数评估的依据^[18]. 因此,评估北斗系统URE时,事后精密钟差采用北斗星地双向时频传递的钟差测量值,其精度优于0.3 ns (0.1 m)^[19].

表1和表2分别为GPS和北斗系统卫星导航电文中广播星历与钟差参数误差. 从表1中可以看出, GPS卫星轨道径向误差 R 优于0.2 m,切向误差 A 和法向误差 C 也优

于1.0 m. BLOCK IIR和BLOCK IIR-M卫星钟差参数预报误差大于0.60 m. BLOCK IIF卫星配置了性能更好的星载原子钟, 钟差参数预报误差减小, 约为0.31 m. 而从表2的结果可以看出, 北斗IGSO和MEO卫星轨道误差大于GPS卫星, 径向误差约为0.50 m, 法向误差和切向误差优于1.7 m.

从表2的统计也可以看出, 北斗GEO卫星钟差预报误差较小, 约为0.13 m. IGSO卫星钟差预报误差与BLOCK IIF相当, MEO卫星预报误差最大. 北斗卫星钟差测定利用星地双向时频传递技术完成卫星钟差的测定, 不受卫星轨道误差的影响, 其钟差测定精度优于0.3 ns, 便于进行卫星钟差参数预报. 北斗卫星导航电文定时更新. GEO卫星相对于北斗监测网络始终可视, 广播钟差参数龄期短, 预报误差小. 而MEO卫星大部分时间相对北斗监测网络是不可视的, 广播钟差参数龄期长, 预报误差大.

表1 GPS卫星导航电文中广播星历与钟差参数误差(单位: m)

Table 1 The broadcast ephemeris errors and clock parameter errors of the GPS satellite navigation messages (unit: m)

Satellite Type	Orbit Error			Clock Error
	<i>R</i>	<i>A</i>	<i>C</i>	
BLOCK IIR	0.11	0.71	0.64	0.76
BLOCK IIR-M	0.11	0.85	0.76	0.60
BLOCK IIF	0.19	0.84	0.93	0.31

表2 北斗卫星导航系统在轨卫星导航电文中广播星历与钟差参数误差(单位: m)

Table 2 The broadcast ephemeris errors and clock parameter errors of the BDS messages (unit: m)

Satellite Type	Orbit Error			Clock Error
	<i>R</i>	<i>A</i>	<i>C</i>	
GEO	–	–	–	0.13
IGSO	0.48	0.83	1.64	0.36
MEO	0.52	1.29	1.36	0.81

杜兰的研究结果表明, 精密定轨时GEO卫星的近地特性导致地面监测站测距偏差在GEO卫星轨道的切向上被严重放大^[20]. 不以卫星轨道互差作为GEO卫星广播星历精度评估的依据. 而采用ILRS (International Laser Ranging Service)提供的激光跟踪数据对北斗卫星轨道的精度进行检核. 目前, 有4颗北斗卫星被ILRS跟踪, 卫星编号分别为C01、C08、C10和C11.

表3为评估的2015年4颗卫星广播星历的激光残差均值Mean、标准差STD和均方根误差RMS, 其中, C01为GEO卫星, C08、C10为IGSO卫星, C11为MEO卫星. 从中可以看出, IGSO卫星和MEO卫星的激光残差约为50 cm, 与表2中精密轨道比较结果相当. GEO卫星激光残差约为65 cm, 比IGSO卫星和MEO卫星激光残差略大.

表 3 2015年北斗卫星广播星历激光检核结果(单位: cm)

Table 3 The SLR residuals for the BDS broadcast ephemeris in 2015 (unit: cm)

Satellite	Residual		
	Mean	STD	RMS
C01	6.29	64.37	64.68
C08	-18.35	45.62	49.17
C10	-14.28	44.22	46.47
C11	-0.48	51.13	51.13

5 定位精度比较

北斗系统服务性能规范约定, 导航用户的水平定位精度优于10 m, 高程定位精度优于10 m. 利用MGEX测站可以比较评估单GPS系统和单北斗系统的定位精度. 兼容互操作是卫星导航系统的重要发展方向. 多星座卫星导航系统可以减小定位精度因子, 减弱某单一卫星系统出现重大故障带来的隐患, 提高导航的可用性和完好性. 进行GPS系统和北斗系统组合定位, 可以评估其对单系统定位的精度提升. 组合定位处理时, 除测站位置外, 还解算北斗系统接收机钟差和GPS系统接收机钟差. 表4为亚太地区10个MGEX测站GPS单系统、北斗单系统和GPS/北斗组合双系统定位结果比较, 表中 N 为地平坐标系的北向, E 为地平坐标系的东向, U 为地平坐标系的高程方向. 这10个MGEX测站分别为: JFNG站(30°N, 114°E)、GMSD站(31°N, 131°E)、CUT0站(32°S, 114°E)、KRGG站(49°S, 70°E)、MCHL站(26°S, 148°E)、MRO1站(26°S, 116°E)、NRMG站(22°S, 166°E)、PTVL站(18°S, 168°E)、PERT站(32°S, 116°E)以及YAR2站(29°S, 115°E).

表 4 部分MGEX测站定位精度统计

Table 4 The positioning accuracy statistics of some MGEX stations

Station	GPS-only			BDS-only			GPS/BDS		
	N	E	U	N	E	U	N	E	U
JFNG	1.18	2.00	2.55	1.98	2.50	3.76	0.96	0.68	1.87
GMSD	1.08	0.92	2.23	1.54	2.69	2.86	0.71	0.61	1.42
CUT0	1.62	1.20	3.55	3.09	2.51	4.65	1.35	1.21	2.61
KRGG	1.05	0.77	2.21	5.53	2.64	6.42	1.21	0.66	1.92
MCHL	1.13	0.94	2.11	2.14	3.79	4.42	0.90	1.07	2.19
MRO1	1.31	0.99	3.37	2.32	2.77	4.19	1.05	1.33	2.56
NRMG	1.10	1.12	2.12	2.35	4.54	6.04	0.78	1.14	1.85
PTVL	1.53	1.80	3.87	3.73	5.30	7.62	1.26	1.74	3.57
PERT	2.20	1.31	3.51	3.38	1.58	4.20	2.02	0.84	2.53
YAR2	0.92	0.61	2.26	2.31	2.49	3.71	0.89	1.19	2.18

从表4的统计结果可以看出,单北斗系统定位精度满足水平定位精度优于10 m,高程定位精度优于10 m的精度要求.表4中KRGG站、NRMG站和PTVL站分别位于北斗系统服务区的边缘,其水平定位精度优于6 m,高程定位精度优于8 m.服务区内大部分测站的水平定位精度优于4 m,高程定位精度优于5 m.

受目前北斗导航卫星空间信号精度和卫星几何分布情况影响,单北斗系统定位精度目前仍差于单GPS系统.但是导航用户组合定位精度明显好于单一系统定位精度.

6 结论

本文分析了北斗卫星导航系统服务精度指标体系,并结合实测数据比较分析了北斗导航系统实际实现的精度指标与GPS系统已经实现的精度指标的差异.结果表明:受当前星座构型限制,北斗卫星导航系统几何精度因子分布不均匀,且与GPS系统比仍有差距.北斗导航卫星广播星历的径向误差为0.5 m,比GPS导航卫星广播星历的径向误差大.北斗系统采用星地双向时频传递完成卫星钟差的测定,钟差测定精度高.受广播钟差预报龄期影响,GEO卫星广播钟差参数误差小,但是MEO卫星广播钟差预报误差较大.MGEX亚太地区部分测站的定位结果表明:单北斗系统定位精度满足水平优于10 m和高程优于10 m的精度要求.受制于当前系统DOP值分布,单北斗系统定位精度水平差于单GPS系统定位精度.北斗/GPS双系统组合定位精度明显好于单一系统定位精度.

参考文献

- [1] GPS Directorate. Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces. IS-GPS-200G, September 5, 2012
- [2] Montenbruck O, Steigenberger P, Hauschild A. GPS Solution, 2015, 19: 321
- [3] RISDE. Global Navigation Satellite System GLONASS-Interface Control Document. Moscow: Russian Institute of Space Device Engineering, 2008
- [4] Sergey K, Sergey R, Suriya T. AdSpR, 2007, 39: 1539
- [5] Revniviykh S. Proceedings of the Institute of Navigation GNSS, 2012: 3931
- [6] 中国卫星导航系统管理办公室. BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document. 北京: 中国卫星导航办公室, 2013
- [7] Department of Defense. Global Positioning System Precise Positioning Service Performance Standard. February, 2007
- [8] Department of Defense. Global Positioning System Precise Positioning Service Performance Standard. September, 2008
- [9] Hughes W J. Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Analysis Report, Report 61. 2008
- [10] 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. 北京: 中国卫星导航办公室, 2013
- [11] 杨元喜, 李金龙, 王爱兵, 等. 中国科学D辑, 2014, 44: 72
- [12] Hofmann-Wellenhof B, Lichtenegger H, Wasle E. GNSS Global Navigation Satellite System: GPS, GLONASS, Galileo and More. Berlin: Springer, 2008
- [13] Wang J, Iz B H, Lu C. GPS Solution, 2002, 6: 91
- [14] Yang Y X, Li J L, Xu J Y, et al. ChSBu, 2011, 56: 2813
- [15] 李征航. GPS测量与数据处理. 第2版. 武汉: 武汉大学出版社, 2005
- [16] 周善石. 基于区域监测网的卫星导航系统精密定轨方法研究. 上海: 中国科学院上海天文台, 2011

- [17] Montenbruck O, Steigenberger P, Khachikyan R, et al. 4th International Colloquium on Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo System, Prague, December 4-6, 2013
- [18] Zhou S S, Hu X G, Liu L, et al. ScChG, 2016, 59: 10
- [19] Han C H, Cai Z W, Lin Y T, et al. International Journal of Navigation and Observation, 2013, 2013: 371450
- [20] 杜兰. GEO卫星精密定轨技术研究. 郑州: 解放军信息工程大学, 2006

Accuracy Performance Evaluation of Beidou Navigation Satellite System

WANG Wei¹ HU Ying-nan²

(1 Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094)
(2 No. 61741 Troops of PLA, Beijing 100081)

ABSTRACT Accuracy is one of the key elements of the regional Beidou Navigation Satellite System (BDS) performance standard. In this paper, we review the definition specification and evaluation standard of the BDS accuracy. Current accuracy of the regional BDS is analyzed through the ground measurements and compared with GPS in terms of dilution of precision (DOP), signal-in-space user range error (SIS URE), and positioning accuracy. The Positioning DOP (PDOP) map of BDS around Chinese mainland is compared with that of GPS. The GPS PDOP is between 1.0–2.0 and does not vary with the user latitude and longitude, while the BDS PDOP varies between 1.5–5.0, and increases as the user latitude increases, and as the user longitude apart from 118°. The accuracies of the broadcast orbits of BDS are assessed by taking the precise orbits from International GNSS Service (IGS) as the reference, and by making satellite laser ranging (SLR) residuals. The radial errors of the BDS inclined geosynchronous orbit (IGSO) and medium orbit (MEO) satellites broadcast orbits are at the 0.5 m level, which are larger than those of GPS satellites at the 0.2 m level. The SLR residuals of geosynchronous orbit (GEO) satellites are 65.0 cm, which are larger than those of IGSO, and MEO satellites, at the 50.0 cm level. The accuracy of broadcast clock offset parameters of BDS is computed by taking the clock measurements of Two-way Satellite Radio Time Frequency Transfer as the reference. Affected by the age of broadcast clock parameters, the error of the broadcast clock offset parameters of the MEO satellites is the largest, at the 0.80 m level. Finally, measurements of the multi-GNSS (MGEX) receivers are used for positioning accuracy assessment of BDS and GPS. It is concluded that the positioning accuracy of regional BDS is better than 10 m at the horizontal component and the vertical component. The combined positioning accuracy of both systems is better than one specific system.

Key words astrometry and celestial mechanics, space vehicles, ephemerides, methods: data analysis