

北斗卫星导航系统空间信号误差统计分析

张清华^{1,2,3} 隋立芬¹ 贾小林^{2,3} 朱永兴^{2,3}

1 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450052

2 地理信息工程国家重点实验室,陕西 西安,710054

3 西安测绘研究所,陕西 西安,710054

摘要:针对我国北斗卫星导航系统的在轨卫星,通过一定的事后定轨策略得到精密轨道数据,用以对广播星历空间信号误差进行分析。不仅对用户测距误差进行估计,还进行了相关分析和正态性检验。通过分析 2012 年 10 月份的观测数据发现,所有卫星 SISURE 的平均值为 1.45 m;其径向-钟差和切向-法向为低度相关,其他分量之间为微相关;在正态性分析中发现,所有的空间信号误差分量都不符合正态分布,且峰度异常值可以检测偏离较大的误差,偏度异常值可以检测系统偏差。

关键词:北斗卫星导航系统;SISURE;相关性;正态性;峰度;偏度

中图分类号:P228.4

文献标志码:A

空间信号误差对导航系统的建设和维护有重要的作用^[1-2]。对于 GPS 空间信号误差的估计与分布特性,国内外已有学者进行了大量的研究^[3-9]。已有研究表明,用来衡量空间信号的“真实轨道和钟差”,通常用事后精密星历和钟差来近似,其精度受事后精密星历和钟差精度的影响。如果用激光观测解算得到的精密星历和钟差来分析卫星广播星历精度,则评价结果更为可靠,但也存在明显缺陷:①不能广泛布站,且仅能获得广播星历对激光站视线方向的精度;②受观测条件限制,观测量少,评价精度不是全方位和全时段的。本文针对我国北斗卫星导航系统的空间信号误差,不仅从常用的 R 、 T 、 N 方向残差和 SISURE 值进行分析,还将从误差的相关性和正态性两个角度进行统计分析。

1 空间信号误差分析

1.1 空间信号误差计算原理

事后精密星历给出的是固定时间间隔的卫星坐标和速度,而广播星历给出的是轨道根数(如北斗和 GPS),可以依据一定的算法得到卫星的坐标和速度。两种星历给出的卫星坐标和速度可能在时间刻度上不一致,或采样间隔不同,对于这两

种情况,可以通过拉格朗日插值法来解决。

在求得精密星历和广播星历 X 、 Y 、 Z 方向的坐标后,可以转换到 RTN 坐标系,从而得到径向误差(R)、切向误差(T)、法向误差(N)和钟差(C)。图 1 给出了空间信号误差计算的流程。

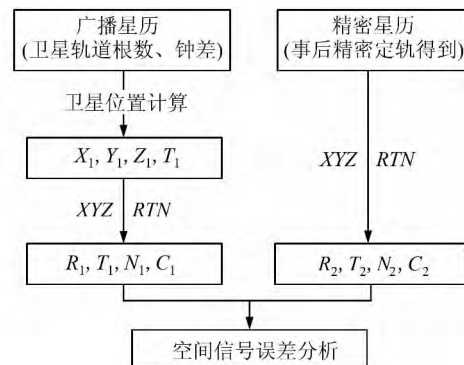


图 1 空间信号误差计算流程图

Fig. 1 Flowchart of SIS Error Calculation

1.2 统计分析

由于空间信号误差的来源比较复杂,如果单纯地用 SISURE 来描述,可以得知其对用户测距的影响,却不能全面了解其自身的特性。对两个及两个以上变量关系的描述,可用相关分析。由于在完好性监测时 SIS 误差符合正态分布,文中对北斗系统卫星在径向、切向、法向和钟差上的分

收稿日期:2013-04-07

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41274016, 41174006, 40974010);地理信息工程国家重点实验室开放研究基金资助项目(SKLGIE2013-M-2-1);信息工程大学博士学位论文创新基金资助项目(2013-02-01)。

第一作者:张清华,博士生,主要从事 GNSS 导航定位数据处理理论与方法研究。E-mail: geodesy@aliyun.com

量分别作正态性检验。

2 算例分析

2.1 数据来源

采用 2012-10-01~10-30 共 30 d 的北斗卫星导航系统的精密星历和广播星历来计算空间信号误差。精密星历来源于长春、乌鲁木齐、喀什、临潼和昆明 5 个国内跟踪站以及 8 个境外站的接收机(图 2)。

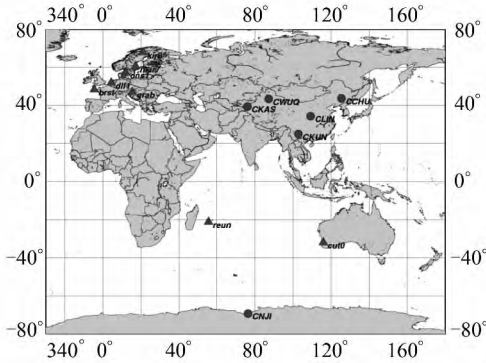


图 2 跟踪站分布(国内 5+国外 8)
Fig. 2 Tracking Station Distribution

2.2 算例 1

利用 10 月份观测数据对 11 颗卫星的空间信号误差进行计算,时间间隔为 30 s。GEO 卫星的观测历元最多,而 IGSO 和 MEO 卫星会缺失部分时段,尤其是 MEO 卫星,西安站只能观测到大约 1/3 的弧段。所有卫星轨道误差 R 、 T 、 N 方向分量见图 3,在轨卫星的轨道 URE 和钟差 URE 分别见图 4 和图 5,其综合影响 URE 即 SISURE 见图 6。

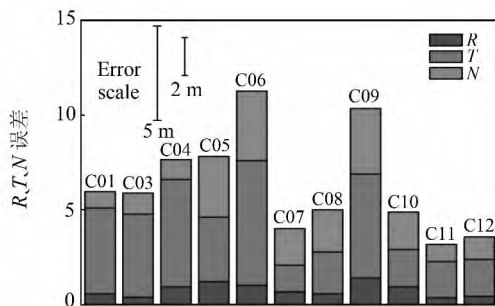


图 3 在轨卫星轨道误差 R 、 T 、 N 方向分量图
Fig. 3 SIS R 、 T 、 N Component of All Satellites

对比分析图 4~图 6,可得到如下结论:

- 1) 比较所有在轨卫星在径向、法向和切向方向的精度,径向最好,法向最差;
- 2) 通过计算,并结合图 3~图 6 可见,所有卫

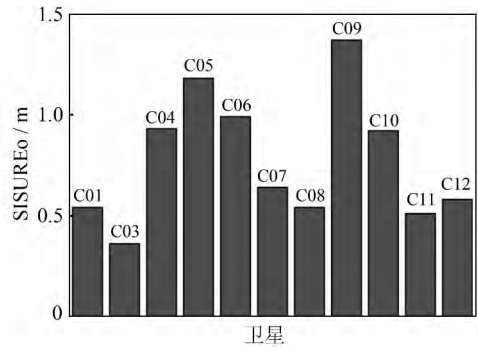


图 4 在轨卫星轨道误差 URE

Fig. 4 SIS Orbit Error Component of All Satellites

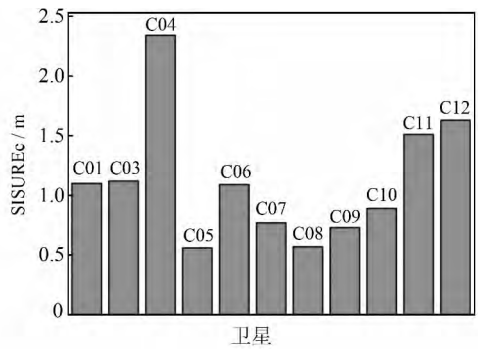


图 5 在轨卫星的钟差误差 URE

Fig. 5 SIS Clock Error Component of All Satellites

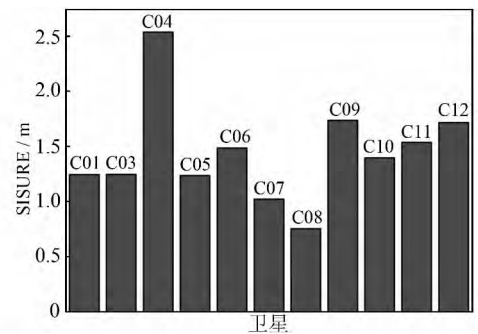


图 6 卫星的 SISURE

Fig. 6 SISURE of All Satellites

星空间信号误差的平均精度为 1.45 m,其中主要部分是钟差分量,其平均精度超过 1 m。

2.3 算例 2

为了验证空间信号在径向、切向、法向和钟差方向误差的相关性,文中对这 4 类误差两两进行相关分析,共 6 个组合,分别是 $C-R$ 、 $C-T$ 、 $C-N$ 、 $R-T$ 、 $R-N$ 、 $T-N$ 。表 1 给出了相关系数的平均值。

表 1 相关系数平均值

Tab. 1 Correlation Coefficient

组合	$C-R$	$C-T$	$C-N$	$R-T$	$R-N$	$T-N$
平均值	0.33	0.14	0.14	0.18	0.18	0.31

分析表 1 可知, $C-R$ 和 $T-N$ 两组分量的相关

性最大,为低度相关;其他 4 组相关系数的均值都小于 0.3,为微相关。

2.4 算例 3

由于在完好性监测时空间信号误差符合正态分布,文中对其径向、切向、法向和钟差上的分量分别作正态性检验。表 2 中给出了 11 颗卫星在径向、切向、法向和钟差方向上误差分布的正态

性,用峰度和偏度来分析。

表 2 中,C06 卫星在法向(N)误差的峰度系数比其他卫星的大得多。同理,也对 C07 卫星的切向(T)误差进行类似的分析。其中,图 7(a)和 7(b)分别表示 C06 卫星在法向(N)的残差图和残差分布图,图 8(a)和 8(b)分别表示 C07 卫星在切向(T)的残差图和残差分布图。

表 2 所有卫星空间信号误差各方向分量的峰度和偏度

Tab. 2 Kurtosis and Skewness in Each SIS Error Component of All Satellites

卫星	峰度系数				偏度系数			
	C	R	T	N	C	R	T	N
C01	-0.19	-0.24	0.54	-1.14	-0.11	-0.52	0.73	-0.08
C03	1.12	1.59	-0.83	-1.34	-0.70	1.01	0.10	-0.07
C04	2.47	0.84	-0.85	-1.21	-0.08	0.10	1.02	0.16
C05	0.79	-1.21	-0.34	-1.20	-0.38	0.15	-0.15	-0.36
C06	-1.04	1.02	2.08	5.35	-0.20	-0.33	-0.37	-0.06
C07	0.01	-0.48	-0.31	-1.19	-0.64	-0.39	1.42	0.01
C08	0.85	-0.53	-0.04	-0.75	-0.78	0.48	-0.90	-0.92
C09	0.24	-0.13	0.04	-1.19	0.03	-0.43	-0.12	-0.05
C10	-0.26	-0.27	-0.48	-1.19	-0.59	0.12	-0.34	-0.05
C11	-0.20	1.40	-0.49	-1.14	0.47	0.76	0.20	-0.11
C12	-0.07	1.84	0.52	-1.11	0.22	0.39	0.94	-0.13

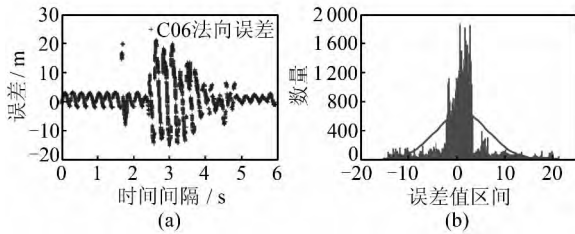


图 7 C06 卫星在法向(N)的残差图和残差分布图
Fig. 7 Residuals Plots and Residuals Distribution in Normal Direction

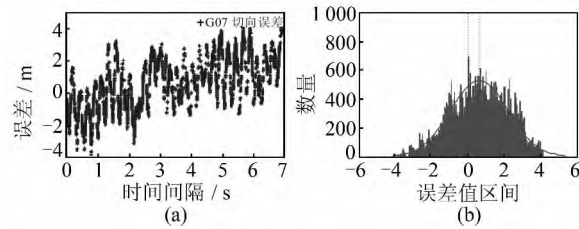


图 8 C07 卫星在切向(T)的残差图和残差分布图
Fig. 8 Residuals Plots and Residuals Distribution in Trace Direction

通过以上图表可以发现:

1) 所有卫星各个残差分量的峰度和偏度都不为 0,不符合理想正态分布的情况。这一点是可以预见的,因为造成空间信号误差的原因较为复杂。

2) 针对 C06 卫星在法向(N)的误差峰度进行分析可以发现,其误差属于尖峰分布($K > 0$),

原因是由于其法向存在一些较大的偏差,从而造成均值与标准差偏离。

3) 针对 C07 卫星在切向(T)误差峰度进行分析可以发现,其误差属于负偏态($S < 0$),且偏差程度极大,原因是其切向误差并不是围绕零值上下摆动,而是存在一个明显的趋势项,这说明 C07 卫星在切向(T)存在系统误差。

3 结 语

本文通过 5 个境内观测站和 8 个境外观测站接收的伪距和相位数据来确定北斗卫星的精密轨道,并以此作为轨道真值来对广播星历的空间信号误差进行分析,有如下结论:

1) 北斗卫星导航系统 11 颗在轨卫星 SISURE 的平均值为 1.45 m,具有较高的精度,可满足实时导航定位的要求;

2) 北斗空间信号误差在钟差方向和径向($C-R$)、切向和法向($T-N$)的相关性较大,分别达到了 0.33 和 0.31,但也仅属于低度相关;

3) 通过峰度和偏度对北斗空间信号误差在各个方向的分量进行正态性分析,从峰度值和偏度值来判断误差的分布特性,进一步了解这些误差自身的特性,以判断空间信号误差中的大误差和系统差。

参 考 文 献

- [1] Kaplan E D. Understanding GPS: Principles and Application[M]. Norwood, MA: Artech House Publisher, 2006
- [2] Parkinson. Global Positioning System: Theory and Application[M]. AIAA, 1996
- [3] John C, Cohenour F. GPS Orbit and Clock Error Distributions[J]. *Journal of the Institute of Navigation*, 2009, 58(1):17-28
- [4] John C, Cohenour F. Temporal Decor Relation Distributions of GPS Range Measurements Due to Satellite Orbit and Clock Errors [J]. *Navigation*, 2009, 59(3):77-92
- [5] Warren D W. Broadcast vs. Precise GPS Ephemerides: a Historical Perspective[D]. Air Force Institute of Technology, 2002
- [6] Langley R B, Jannasch H, Peeters B, et al. The GPS Broadcast Orbits: An Accuracy Analysis[C]. 33rd COSPAR Scientific Assembly, 2000
- [7] Guo Fei. Precision Analysis on Orbit and Clock of GPS Satellites Broadcast Ephemeris[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(5):589-592(郭斐. GPS 系列卫星广播星历轨道和钟的精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(5):589-592)
- [8] Li Zhenghang. Error Analysis of Orbit Determined by GPS Broadcast Ephemeris[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2008, 28(1):50-54(李征航. GPS 广播星历的轨道误差分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(1):50-54)
- [9] Mao Yue. Validating Satellite Broadcast Ephemeris by SLR Data[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2007, 27(4):263-266(毛悦. 利用 SLR 数据进行广播星历精度评估[J]. 测绘科学技术学报, 2007, 27(4):263-266)
- [10] Heng L, Xingxin G, Walter T, et al. Statistical Characterization of GPS Signal-In-Space Errors[C]. ION International Technical Meeting 2011, San Diego, 2011
- [11] Blanch J, Choi M J, Walter T, et al. Prototyping Advanced RAIM for Vertical Guidance[J]. *ION GNSS*, 2010:285-291

SIS Error Statistical Analysis of Beidou Satellite Navigation System

ZHANG Qinghua^{1,2,3} SUI Lifan¹ JIA Xiaolin^{2,3} ZHU Yongxing^{2,3}

1 Institute of Geographical Spatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China

2 State Key Laboratory of Geographic Information Engineering, Xi'an 710054, China

3 Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China

Abstract: For in-orbit Beidou satellites, we make use of precise orbit for broadcast ephemeris SIS error analysis. We not only estimate SISURE, but also take correlation analysis and normality test. Through observational data of October 2012 we find that the average SISURE is 1.45 m; the $R-T$ and $T-N$ have low correlation, while among the other components are micro-correlation. We also find that nearly all the SIS error components do not fit the normal distribution, and large errors can be detected by kurtosis abnormal values, while systematic bias can be detected by skewness abnormal values.

Key words: Beidou satellite navigation system; SISURE; correlation; normality; kurtosis; skewness

First author: ZHANG Qinghua, PhD candidate, specializes in the theories and methods of GNSS navigation. E-mail: geodesy@aliyun.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41274016, 41174006, 40974010; the IEU PhD Innovation Fund(2013-02-01).