

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2015.02.07

空间信号精度的算法设计与实验分析

杨赛男^{1,2}, 陈俊平¹, 曹月玲¹, 张益泽^{1,3}

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092)

摘要: 导航系统的完好性关系到用户的安全问题, 空间信号精度 (*SISA*) 是反映卫星导航系统完好性的重要指标之一。针对导航电文中的广播星历和钟差参数信息处理问题, 设计了 *SISA* 参数计算方法; 利用 GPS 和 BDS 系统中的实际数据, 分析了不同轨道类型卫星 *SISA* 参数对空间信号误差的包络特性, 并将导航电文中 *URA* 参数与 *SISA* 参数进行比较, 验证了 *SISA* 参数计算方法。实验结果表明, *SISA* 能够准确反映广播星历的空间信号精度, 并能够对空间信号误差基本实现平均 98% 的包络能力; 目前北斗广播星历中的 *URA* 参数不能够精确反映空间信号的精度, 不同卫星的空间信号精度相差较大, *SISA* 能够准确反映和包络北斗空间信号误差。

关键词: 完好性; 空间信号精度 (*SISA*); 用户距离精度 (*URA*)

中图分类号: P173 **文献标识码:** A

1 引 言

将卫星导航系统应用于民用航空导航等领域, 因关系到飞行安全, 导航系统的完好性 (Integrity) 保证能力是用户最为关注的性能需求^[1]。空间信号精度 (Signal-in-Space Accuracy, *SISA*) 是反映完好性的重要参数之一, 能够衡量空间信号误差 (Signal-in-Space Error, *SISE*)。假设预测 *SISE* 满足高斯分布, *SISA* 则可表示为此高斯分布的标准差^[2]。*SISE* 一般在卫星轨道确定和卫星钟时间对比过程中求得, 以轨道和卫星钟差的协方差形式或等效距离误差的标量形式表示^[3,4]。GALILEO 系统提供的完好性指标主要有: *SISA*、*SISMA* (Signal-in-Space Monitoring Accuracy) 和 *IF* (Integrity Flag)。其中 *SISA* 反映了卫星导航系统的空间信号误差, *SISE* 的大小将会影响导航用户的定位精度及其可靠性^[5]。GPS 导航电文中播发的 *URA* (User Range Accuracy) 参数和健康标志体现了

收稿日期: 2014-10-09; 修回日期: 2015-03-02

资助项目: 中国科学院百人计划; 国家 863 计划 (2013AA122402); 国家自然科学基金 (11273046, 40974018, 11203059); 上海市科学技术委员会课题 (12DZ2273300, 13PJ1409900)

通讯作者: 杨赛男, snyang@shao.ac.cn

系统完好性, *URA* 的作用与 *SISA* 类似。用户可以根据这些完好性指标决定是否采用该卫星信号进行导航定位。

SISA 算法已有相关的研究文献, 赵春梅等人^[3]以及秘金钟等人^[5]根据卫星星历误差和卫星钟误差引起的距离误差标量值处理 *SISE*, 利用概率论数学模型获得 *SISA* 值; 郭英基于空间信号完备性参数的算法, 优化计算最坏用户位置 WUL (Worst User Location) 方法处理 *SISE*, 利用统计理论界定 *SISA* 值^[6]。

本文设计了一种 *SISA* 参数的计算方法, 与以上算法相比, 本文在处理 *SISE* 时方法有所不同, 将卫星轨道切向、法向、径向与钟差分开处理, 并利用概率统计学误差椭圆计算 *SISA*。算法在文中进行验证, 利用 GPS 和 BDS 广播星历数据和精密星历、钟差, 根据广播星历计算的轨道坐标和钟差, 与精密星历、钟差比较得到 *SISE*, 对 *SISE* 的精度进行分析, 计算得到后验的 *SISA* 参数, 并与 GPS 广播星历中播发的 *URA* 进行比较和分析。

2 *SISA* 计算原理

2.1 空间信号误差的处理

空间信号误差 (*SISE*) 反映的是与卫星有关的误差, 它的大小将会影响导航用户的定位精度及其可靠性。空间信号误差包含卫星轨道误差和星钟误差^[5,6]。将当前确定的精密轨道与钟差作为观测量 \mathbf{O} , 相应弧段内的广播星历轨道和钟差视为计算值 \mathbf{C} , 对相同历元的 \mathbf{O} 和 \mathbf{C} 取差, 得到该历元的空间信号误差 *SISE*:

$$\mathbf{SISE} = \mathbf{O} - \mathbf{C} = \begin{pmatrix} \Delta X & \Delta Y & \Delta Z & \Delta Clk \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中, ΔX 、 ΔY 和 ΔZ 为星历误差在地心地固坐标系 (ECEF) 中的分量, ΔClk 代表星钟误差。根据该历元卫星的状态向量, 可计算出旋转矩阵 $\mathbf{G}_{3 \times 3}$, 可将地固系中的轨道误差转换到卫星轨道坐标系中的空间信号误差:

$$\mathbf{SISE} = \begin{pmatrix} \mathbf{G}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta X & \Delta Y & \Delta Z & \Delta Clk \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} \Delta R & \Delta T & \Delta N & \Delta Clk \end{pmatrix}^T, \quad (2)$$

其中, ΔR 、 ΔT 、 ΔN 分别表示轨道径向、轨道切向、轨道法向的分量。在一个广播星历更新周期内, 根据卫星轨道和钟差的采样间隔, 可以得到 n 个历元的空间信号误差时间序列 (若广播星历更新周期为 2 h, 轨道和钟差取 30 s 采样间隔, 则有 240 个空间信号误差样本)。

$$\mathbf{SISE}_i = \begin{pmatrix} \Delta R_i & \Delta T_i & \Delta N_i & \Delta Clk_i \end{pmatrix}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

同时, 由 *SISE* 能够计算空间信号距离误差 *SISRE*, GPS 卫星和北斗卫星的 *SISRE* 公式

分别表示如下^[7]:

$$\begin{cases} SISRE_{\text{GPS}} = \sqrt{(\Delta R - \Delta Clk)^2 + \frac{1}{49}(\Delta T^2 + \Delta N^2)} \\ SISRE_{\text{BDS(GEO,IGSO)}} = \sqrt{(0.99\Delta R - \Delta Clk)^2 + \frac{1}{127}(\Delta T^2 + \Delta N^2)} \\ SISRE_{\text{BDS(MEO)}} = \sqrt{(0.98\Delta R - \Delta Clk)^2 + \frac{1}{54}(\Delta T^2 + \Delta N^2)} \end{cases} \quad (4)$$

2.2 后验精度 *SISA* 计算

利用轨道误差和卫星钟差的协方差,可算出 *SISA*。假设空间信号误差 *SISE* 呈正态分布,根据统计分析方法,可利用 *SISE* 各分量的均值和方差组合表示空间信号精度。卫星轨道精度主要反映轨道切平面内的预报精度,可通过轨道切向误差和法向误差综合表示。轨道切向误差、法向误差时间序列的均值和方差的统计估值为:

$$\begin{cases} (\bar{T} \quad \bar{N}) \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta T_i \quad \Delta N_i) \\ \begin{pmatrix} \sigma_T^2 & \sigma_{TN} \\ \sigma_{TN} & \sigma_N^2 \end{pmatrix} \approx \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \begin{pmatrix} \Delta T_i - \bar{T} \\ \Delta N_i - \bar{N} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta T_i - \bar{T} & \Delta N_i - \bar{N} \end{pmatrix} \end{cases} \quad (5)$$

根据正态分布精确度的估计公式,并取随机误差椭圆的长轴,则卫星轨道预报精度 $SISA_{\text{oe}}$ 可表示为:

$$SISA_{\text{oe}} = \sqrt{(\bar{T}^2 + \bar{N}^2) + 3.29 \left(\frac{\sigma_T^2 + \sigma_N^2}{2} + \frac{\sqrt{(\sigma_T^2 - \sigma_N^2)^2 + 4\sigma_{TN}^2}}{2} \right)} \quad (6)$$

对于卫星钟差精度,主要反映径向的预报精度,通过卫星轨道径向误差和钟差误差综合表示。由于卫星钟差误差具有快变特性,为精确表达径向预报精度,将卫星钟差精度细化为 3 个参数 $SISA_{\text{ocb}}$ 、 $SISA_{\text{oc1}}$ 、 $SISA_{\text{oc2}}$ 。

在一个星历更新周期内,要多个统计结果才能计算 3 个参数。因此,将一个广播星历更新周期划分为 12 个子区间(如 GPS 广播星历更新周期为 2 h,每个子区间为 10 min),在每个子区间内将轨道径向误差和钟差误差一起统计,卫星轨道径向误差、钟差误差时间序列的均值和方差统计估值为:

$$\begin{cases} (\bar{R}_k \quad \bar{C}_k) = \frac{1}{q} \sum_{j=1}^q (\Delta R_j \quad \Delta Clk_j) \\ \begin{pmatrix} \sigma_{R,k}^2 & \sigma_{RC,k} \\ \sigma_{RC,k} & \sigma_{C,k}^2 \end{pmatrix} = \frac{1}{q-1} \sum_{j=1}^q \begin{pmatrix} \Delta R_j - \bar{R}_k \\ \Delta Clk_j - \bar{C}_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta R_j - \bar{R}_k & \Delta Clk_j - \bar{C}_k \end{pmatrix} \end{cases} \quad (7)$$

卫星轨道径向和卫星钟差误差对服务区伪距的综合影响服从正态分布,可记作:

$$Z \sim N \left((\bar{R} \cos el - \bar{C}), \begin{pmatrix} \cos el & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{R,i}^2 & \sigma_{RC,i} \\ \sigma_{RC,i} & \sigma_{C,i}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos el \\ -1 \end{pmatrix} \right) \quad (8)$$

根据正态分布精确度的估计公式, el 为卫星到地球质心的连线与卫星到接收机连线之间的夹角 ($el \in (0, 13^\circ.88)$), 则每个子区间内的卫星钟差预报精度 $SISA_{oc,k}$ 可表示为:

$$SISA_{oc,k} \approx \sqrt{(\bar{R}_k - \bar{C}_k)^2 + 3.29(\sigma_{R,k}^2 + \sigma_{Clk,k}^2 - 2\sigma_{RCIk,k})} \quad (9)$$

根据 12 个子区间计算的卫星钟差预报精度, 假设 t_0 为本段星历的初始时刻, t_k 为第 k 个子区间中点处时刻, 按照如下模型计算细化后的钟差预报精度参数:

$$SISA_{oc,k} = SISA_{ocb} + SISA_{oc1}(t_k - t_0) + SISA_{oc2}(t_k - t_0)^2 \quad (10)$$

利用最小二乘法拟合, 获得细化的钟差预报精度参数 $SISA_{oc,k}$, $SISA_{ocb}$, $SISA_{oc1}$, $SISA_{oc2}$ 。

$SISA$ 的计算采用包络法, 后验的空间信号精度 $SISA$ 由下式可算出:

$$SISA = 0.14SISA_{oe} + 0.98SISA_{oc} \quad (11)$$

其中, $SISA_{oc}$ 的取值为广播星历更新区间内的 $SISA_{oc}$ 的最大值。

3 数据计算与分析

本文采用 GPS 和 BDS 数据进行处理分析: 根据广播星历计算出的卫星坐标以天线相位中心为参考点, 将 GPS 广播星历计算出的卫星坐标和钟差与精密星历、钟差进行比较, 需要考虑坐标系和时间的一致性, 卫星天线相位中心改正等问题^[8]。GPS 广播星历基于 WGS84 坐标系, 采用 GPST 作为系统参考时, 北斗广播星历基于 CGCS2000 坐标系, 采用 BDT (与 GPST 差 14 s) 作为系统参考时, 卫星坐标都是基于卫星天线相位中心。本文将上海天文台 GNSS 分析中心 (SHA)^[9] 生成的 GPS 以及北斗精密轨道和钟差作为参考值, 把广播星历计算的轨道和钟差与参考值进行比较, 获取 $SISE$ 、 $SISRE$ 以及 $SISA$ 。上海天文台后处理得到的 GPS 精密轨道和钟差精度与 IGS 产品相当, 轨道精度达到 2.5 cm, 钟差精度为 75 ps。北斗精密轨道三维精度在 1~2 m, 轨道径向精度优于 0.2 m; 精密星钟的精度为 1 ns。

GPS 广播星历正常每 2 h 更新一次, 因此每条卫星星历计算时长为 2 h, 采样间隔为 30 s 的卫星坐标和钟差, 共有 240 个历元。BDS 广播星历正常每 1 h 更新一次, 因此每条卫星星历计算时长为 1 h, 采样间隔为 30 s 的卫星坐标和钟差, 共有 120 个历元。广播星历计算的卫星坐标与拉格朗日内插得到的精密星历坐标比较, 计算的钟差与线性内插的精密钟差比较, 得到空间信号误差。

首先分析卫星空间信号误差在 1 d 内的变化趋势, 选取 2013 年 4 月 10 日的广播星历计算出广播星历轨道和钟差, 与精密星历轨道、钟差进行比较, 并将空间信号误差转化到卫星轨道坐标系进行分析, 15 号卫星结果如图 1 所示。图 1 中坐标横轴表示历元, 纵轴表示误差, 单位为 m, R 、 T 、 N 、 C 分别代表径向、轨道切向、轨道法向的误差、星钟误差。由于 GPS 每 2 h 更新一次广播星历, 所以每隔 2 小时 R 、 T 、 N 、 C 的值可能会发生跳变。可看

到, GPS 广播星历轨道 R 方向误差在 0.5 m 以内, T 、 N 方向的误差比 R 方向大, 卫星钟差预报精度优于 0.5 m。GPS 广播星历每 2 h 播发一组, 相邻两组轨道参数之间可能存在一定跳变, 卫星轨道有时发生 dm 到 m 级的跳变现象, 切向 T 表现最显著, 法向 N 其次, 径向 R 最小。另外, 径向精度优于切向和法向, 这是由于地面站跟踪 GPS 卫星时, GPS 观测值对径向的变化相对其他两个方向更为敏感, 且切向和法向的力模型不够完善。 R 、 T 、 N 方向的轨道误差大致呈现 12 h 的周期, 这与卫星的运行周期和轨道力学模型误差相关。

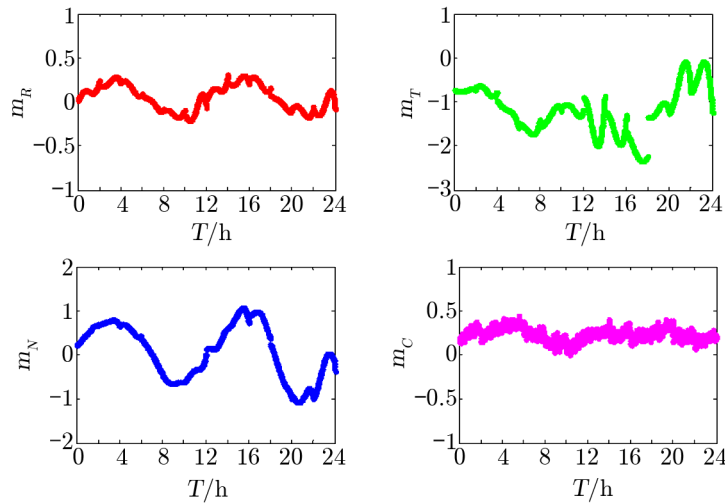


图 1 GPS G15 卫星空间信号误差 $SISE$ 各分量分布示意图

选取 BDS 2013 年 4 月 25 日的广播星历计算广播星历轨道和钟差, 与精密星历轨道、钟差进行比较, 7 号卫星的结果如图 2 所示。可看到 7 号卫星的空间信号轨道误差在 1 m 以内, T 和 N 方向的误差较大, 钟差预报误差大部分在 1 m 以内。在一天之中, 空间信号误差 R 、 T 、 N 方向变化出现周期规律。广播星历更新后, 各轨道误差分量尤其是 T 、 N 方向会发生较大的跳变。

以第 2 章介绍的 $SISA$ 的处理算法为基础, 选取 2013 年 4 月 10 日的 GPS 广播星历进行计算, 与精密星历轨道、钟差比较, 计算得到 $SISE$ 和 $SISRE$ 以及后验的空间信号精度 $SISA$, 将其值与 GPS 广播星历中发布的 URA 值进行比较。主控站利用地面监测站数据进行定轨的同时也进行内符合评定, 将定轨结果与监测站坐标组合计算的星地距离, 与伪距原始观测数据作差计算观测残差, URA 即为残差的统计量, 详细过程参考文献 [11]。对于重复播发的广播星历, 取整点的进行计算。由于篇幅原因, 只对 IIA、IIR、IIR-M、IIF 这 4 种卫星类型分别选取 1 颗卫星, 结果如图 3 所示。

分析图 3 可以得出, GPS Block IIA 类型卫星计算出的 $SISRE$ 值明显比 Block IIR、Block IIR-M 和 Block IIF 类型卫星的大; Block IIR 卫星的 $SISRE$ 在 1.5 m 以内, Block IIR-M 和 Block IIF 卫星的 $SISRE$ 基本都在 1 m 以内, 说明 Block IIR、Block IIR-M 和 Block IIF 类型的卫星空间信号精度较高。Block IIA8 号卫星在第一个广播星历更新周期

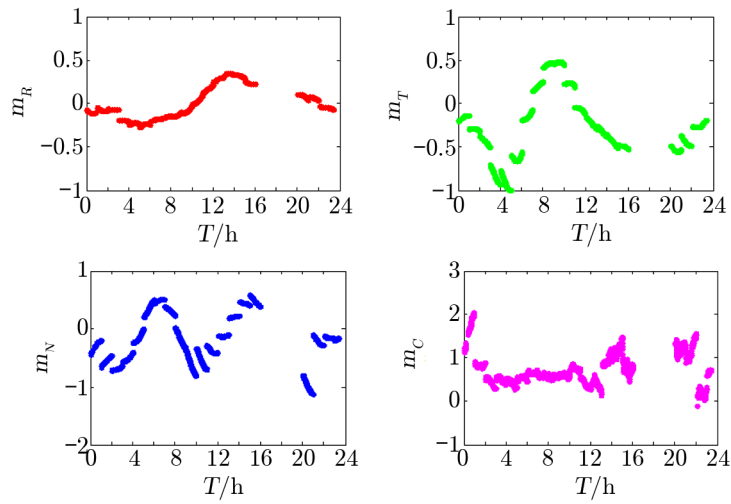


图 2 BDS C07 卫星空间信号误差 *SISE* 各分量分布示意图

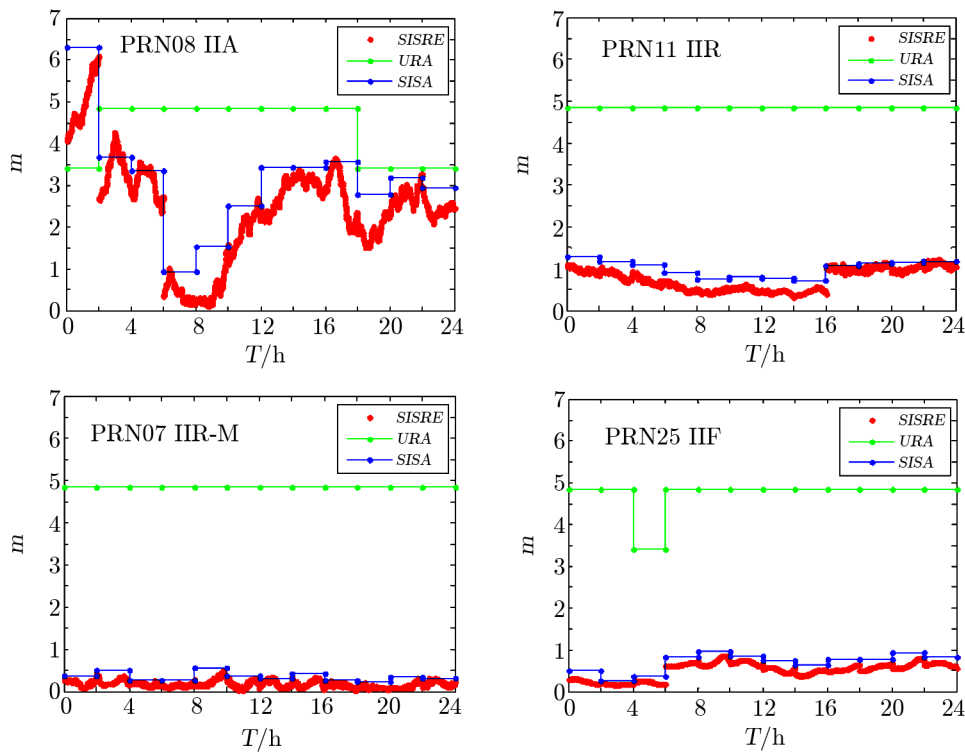


图 3 GPS 卫星空间信号 *SISRE*、*URA* 与 *SISA* 比较

内, URA 值小于广播星历的 $SISRE$ 值, 在其他更新周期内又大于 $SISRE$, URA 值用来表示空间信号精度并不准确。与由广播星历计算的 $SISRE$ 值相比, Block IIR、Block IIR-M 和 Block IIF 卫星的 URA 值普遍比其大很多。这同样说明, GPS 广播星历给出的用户距离精度 URA 比实际的空间信号精度更差的结论并不准确, 而由本文计算的 $SISA$ 值与空间信号误差 $SISRE$ 基本接近吻合。另外, 对于不同类型的卫星, GPS 广播星历都给出了相似的 URA 值来标识 GPS 卫星空间信号精度。而从 $SISA$ 的计算中, 可以看到不同类型卫星的空间信号精度是有差别的, 因此本文设计的 $SISA$ 算法比 URA 更能准确地反映 GPS 空间信号精度。

对于 BDS 卫星, 选取 2013 年 4 月 25 日的广播星历进行计算, 与精密星历、钟差比较, 针对 GEO、IGSO 和 MEO 卫星, 以 C01、C03、C07 和 C12 卫星为例, 计算结果如图 4 所示。从图 4 可以看出, 对于不同卫星, 北斗广播星历的轨道和星钟的综合误差有差异, 综合误差在 1 m 左右。目前广播星历给出的 URA 参数能够完全包络空间信号误差, 但是却不能准确反映空间信号的精度, 给出的 URA 参数远远超过空间信号的精度。图中, 本文计算的 $SISA$ 值能较好地包络北斗的空间信号误差, 同时也能更好地反映北斗空间信号真实的精度状况。

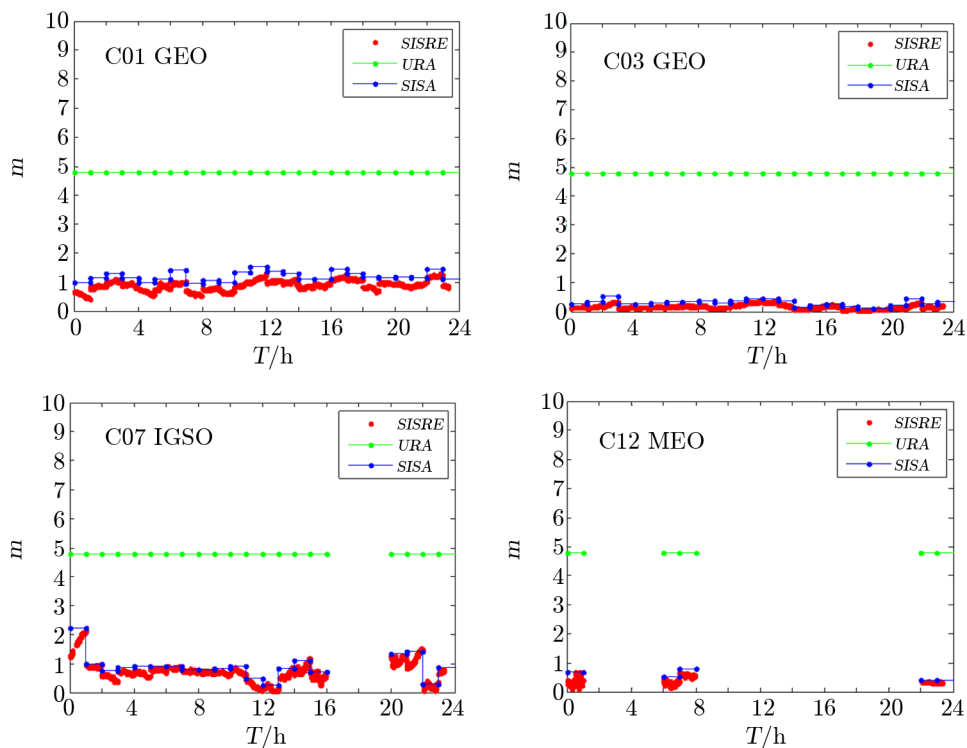


图 4 BDS 卫星空间信号 $SISRE$ 、 URA 与 $SISA$ 比较

URA 值由广播星历发播, 由地面控制段计算给出, 它是卫星测距精度的统计指标, 不包

含信号在大气传播中的误差和接收机设备误差^[10]。通过 *SISA* 和 *URA* 对卫星信号 *SISRE* 包络的对比, 发现本文的 *SISA* 值比广播星历给出的 *URA* 值能更精确地反映卫星空间信号精度。

综合图 3 和图 4 中 GPS 和 BDS 的空间信号的分析结果, 并将 *SISA* 对空间信号误差的包络情况进行统计, 得到结论: 根据本文算法所算出的 *SISA* 值能够对卫星的空间信号误差实现平均 98% 的包络能力, 结果如表 1 所示。

表 1 *SISA* 对 GPS 和 BDS 的空间信号误差的包络统计

卫星号	G08	G11	G07	G25	C01	C03	C07	C12
<i>URA</i> 包络/(%)	91.67	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
<i>SISA</i> 包络/(%)	93.44	97.88	99.37	100.00	100.00	100.00	98.19	99.42

4 总 结

针对导航电文中的广播星历和钟差参数信息处理问题, 我们设计了一种 *SISA* 参数计算方法。在处理 *SISE* 时, 将卫星轨道平面内的切向和法向、卫星轨道径向和钟差分开处理, 并利用概率统计学误差椭圆计算 *SISA*。

利用 GPS 和 BDS 广播星历与精密星历、钟差进行试验分析, 结果表明, *SISA* 参数能够准确反映预报轨道和钟差的精度情况。针对不同系统、不同类型的卫星, 该算法对大部分卫星可实现对空间信号误差 98% 的包络。通过与广播星历发表的 *URA* 参数进行比对, 发现本文提出的空间信号精度算法能够更准确反映空间信号误差, 对本文提出的 *SISA* 算法进行了有效验证。

参考文献:

- [1] 陈金平. 博士论文. 郑州: 解放军信息工程大学测绘学院, 2001: 3
- [2] Oehler V, Luongo F, Boyero J P, et al. ION GNSS 17th International Technical Meeting of the Satellite Division, 2004: 604
- [3] 赵春梅, 张化疑, 王华. 测绘科学技术学报, 2007, 24: 340
- [4] 赵春梅, 党亚民, 张化疑. 测绘学报, 2007, 36: 129
- [5] 秘金钟, 谷守周, 赵春梅. 测绘科学, 2010, 35: 14
- [6] 郭英, 赵春梅, 党亚民, 等. 测绘科学技术学报, 2007, 24: 353
- [7] Hu Zhihang, Chen Guo, Zhang Qiang etc. China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2013
- [8] Heng Liang, Gao Xingxin, Walter Todd, Enge Per. Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION 2010), 2010: 3115
- [9] www.shao.ac.cn/shao_gnss_ac, 2014
- [10] Global Positioning Systems Directorate Systems Engineering & Integration Interface Specification IS-GPS-200G, 2012

[11] 范媚君, 周建华, 牛飞, 等, 测绘科学技术学报, 2011, 28: 407

Calculation and Analysis of Signal-in-Space Accuracy

YANG Sai-nan^{1,2}, CHEN Jun-ping¹, CAO Yue-ling¹, ZHANG Yi-ze^{1,3}

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Surveying and
Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Integrity of satellite navigation system is critical to user's security. Signal-in-Space accuracy (*SISA*) is one of the important indicators reflecting the integrity parameters in satellite navigation and positioning system. This paper designs and discusses a method of *SISA* parameter calculation for the satellite orbit information and clock errors in the broadcast ephemeris, respectively. We utilize GPS's and BDS's navigation messages to analyze satellite's *SISA* envelope characteristic of spatial signal error of different types. The method is verified by comparing *SISA* with *URA* in the broadcast ephemeris. The results show that: *SISA* reflects the GPS signal accuracy more accurately than the value. And it can achieve nearly 98% envelope capacity for *SISE*. For BDS, *SISA* can accurately reflect and envelope *SISE* while *URA* parameter in broadcast ephemeris can't. *SISA* realize more than 99.9% envelope capacity in Compass.

Key words: Integrity; Signal-in-Space Accuracy (*SISA*); User Range Accuracy (*URA*)