



# SBAS星历改正数及UDRE参数生成算法分析

金彪<sup>1,2</sup> 魏巍<sup>3</sup> 陈姗姗<sup>1</sup> 李东俊<sup>1</sup>

1 航天恒星科技有限公司, 北京, 100094

2 中国科学院云南天文台, 云南 昆明, 650011

3 中国卫星导航系统管理办公室, 北京, 100000

**摘要:** 星基增强系统(satellite based augmentation system, SBAS)通过地球同步轨道卫星实时播发导航卫星星历改正数和完好性参数, 以提升用户定位精度和完好性。采用最小方差法解算GPS星历改正数, 利用卡方统计进行改正数完好性检核, 并依据星历改正数方差-协方差信息计算SBAS用户差分距离误差(user differential range error, UDRE)和信息类型28(message type 28, MT28)等完好性参数。利用中国区域27个监测站的实测数据, 首先以国际GNSS服务组织的精密轨道和钟差产品为参考解算星历改正数, 结果表明, 钟差改正精度优于0.1 m, 轨道改正精度优于0.4 m; 然后解算广播星历改正数, 并生成UDRE和MT28参数, 广播星历残余误差卡方检验值均小于告警门限, 保证了改正数的完好性; 最后利用生成的改正数进行SBAS定位解算, 得到定位结果的水平精度优于0.7 m, 垂直精度优于1.0 m, 对比GPS单点定位, 所提算法的水平 and 垂直方向精度分别提升了30%和40%。

**关键词:** 星基增强系统; 星历改正数; 完好性; 用户差分距离误差

**中图分类号:** P228

**文献标志码:** A

为满足民航用户对全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)导航定位精度、完好性、连续性及可用性的需求, 很多国家相继建立了星基增强系统(satellite based augmentation system, SBAS), 用于提升GNSS基本导航的性能。目前已建成的SBAS包括美国的广域增强系统(wide area augmentation system, WAAS)<sup>[1-2]</sup>、欧洲地球静止轨道导航重叠服务(European geostationary navigation overlay service, EGNOS)<sup>[3-4]</sup>、印度GPS辅助地球静止轨道卫星增强导航(GPS aided geo augmented navigation, GAGAN)<sup>[5]</sup>和日本多功能卫星增强系统(multi-functional satellite augmentation system, MSAS)<sup>[6-7]</sup>等, 中国北斗卫星基导航增强系统(BeiDou satellite based augmentation system, BDSBAS)、俄罗斯差分改正和监测系统(system of differential correction and monitoring, SDCM)以及韩国增强卫星系统(Korea augmentation satellite system, KASS)也在建设之中。SBAS利用区域监测站数据生成导航卫星星历改正数、电离层改正数及相应的完好性参数, 终端利用SBAS改正数及完好性参数进行定位解算,

并生成保护级以保证用户定位的完好性。

SBAS通过播发卫星钟差和轨道改正数, 以及用户差分距离误差(user differential range error, UDRE)和改正数协方差信息保证用户定位的完好性<sup>[8-9]</sup>。受限于SBAS信息播发带宽, 星历改正数分为快变和慢变参数。慢变参数用于描述卫星轨道及钟差的缓慢变化, 快变参数主要是卫星钟差的快变部分。快变参数播发周期为6 s, 慢变参数播发周期为120 s<sup>[9]</sup>。

利用监测站数据解算星历改正数主要有快照法<sup>[10-11]</sup>和卫星动力学<sup>[12-13]</sup>方法。基于卫星动力学模型解算星历改正数, 精度较高, 但算法较为复杂; 快照法的实现相对简单, 同时能够快速反应卫星机动。本文采用基于最小方差估计的快照法估计星历改正数, 首先利用GPS观测数据解算卫星钟差改正数, 并利用经钟差改正后的伪距残差解算卫星轨道改正数, 将此时得到的轨道和钟差改正数作为慢变参数; 然后利用慢变改正后的伪距残差再次进行卫星钟差解算, 将得到的改正数作为快变改正数。

SBAS向用户播发完好性参数UDRE表示改

收稿日期: 2020-01-03

项目资助: 国家自然科学基金(41974041); 装备预研基金(61405180103)。

第一作者: 金彪, 博士生, 高级工程师, 主要从事卫星导航完好性和卫星定轨研究。jinbiao366788@126.com

正数的精度。UDRE是标量<sup>[9]</sup>,若仅向用户提供UDRE参数,则需要播发服务区域内UDRE的最大值,将影响系统的可用性。信息类型28(message type 28, MT28)可对UDRE参数进行调整,用户利用MT28信息恢复改正数方差协方差信息,并根据自身位置对UDRE参数进行调整<sup>[14-15]</sup>,避免了采用区域内UDRE最大值导致可用性降低的问题<sup>[16]</sup>。

本文利用经过慢变和快变参数改正后的伪距残差解算星历残余误差,并进行完好性检验;通过检验后,基于改正数方差-协方差矩阵生成该卫星的UDRE参数和MT28信息;并利用中国区域实测数据对本文算法进行了验证。

## 1 数学模型

### 1.1 轨道钟差改正数解算

GPS双频无电离层伪距观测方程可表示为<sup>[11]</sup>:

$$\begin{cases} \rho_i^j = \rho^0 - G\Delta E + cdt_i - cdt^j + \epsilon \\ G = \left[ \frac{x^{\text{sat}} - x}{\|r^{\text{sat}} - r\|}, \frac{y^{\text{sat}} - y}{\|r^{\text{sat}} - r\|}, \frac{z^{\text{sat}} - z}{\|r^{\text{sat}} - r\|} \right] \\ \Delta E = [dx^{\text{sat}}, dy^{\text{sat}}, dz^{\text{sat}}]^T \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\rho_i^j$ 为观测值; $\rho^0$ 为卫星和测站间的几何距离; $G$ 为卫星至测站的视线向量; $\Delta E$ 为卫星轨道误差; $dt_i$ 为接收机钟差; $dt^j$ 为卫星钟差; $c$ 为光速; $\epsilon$ 包括了观测噪声、多路径及模型残余误差等; $(x^{\text{sat}}, y^{\text{sat}}, z^{\text{sat}})$ 为卫星位置; $(x, y, z)$ 为测站位置; $r^{\text{sat}}$ 、 $r$ 分别为卫星、测站的位置向量; $(dx^{\text{sat}}, dy^{\text{sat}}, dz^{\text{sat}})$ 为卫星轨道改正数。在解算卫星及测站钟差时,忽略卫星轨道误差,则式(1)可表示为:

$$\rho_i^j = \rho^0 + cdt_i - cdt^j + \epsilon \quad (2)$$

此时卫星钟差吸收了轨道误差在站星视线方向的投影。解算时选定某一测站作为主控站估计接收机钟差,再以主控站为基准解算卫星及其他测站钟差。解算完成后,对式(1)中的伪距残差进行卫星和测站钟差改正,此时认为残余误差仅包括卫星轨道误差,利用最小方差法估计轨道误差,计算如下:

$$\hat{X}_{\text{MV}} = (\mathbf{A}^{-1} + \mathbf{G}^T \mathbf{W}^{-1} \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{W}^{-1} \mathbf{z} \quad (3)$$

$$\hat{P}_{\text{MV}} = (\mathbf{A}^{-1} + \mathbf{G}^T \mathbf{W}^{-1} \mathbf{G})^{-1} \quad (4)$$

式中, $\hat{X}_{\text{MV}}$ 为轨道误差估计值; $\mathbf{A}$ 为广播星历先验轨道精度,取值为径向2.61 m、切向13.25 m、法向5.45 m<sup>[17-18]</sup>,实际使用时需将该误差转到XYZ

方向; $\mathbf{W}$ 为观测值权矩阵; $\mathbf{z}$ 为消除卫星和测站钟差后的伪距残差。

上述轨道和钟差改正数每秒解算一次,实际电文播发时需进行120 s拟合得到慢变改正数。完成慢变改正数解算之后,对伪距残差进行慢变误差改正,根据式(2)再次解算卫星钟差,并将其作为快变改正数,每6 s播发一次。本文在解算过程中未对慢变和快变改正数进行拟合,直接使用解算结果作为慢变和快变改正数。

### 1.2 星历改正数完好性检核

完成SBAS星历改正数解算后,对观测值进行修正得到消除星历误差的伪距残差,并利用此残差进行卫星星历残余误差的解算,计算如下:

$$\mathbf{e} = (\tilde{\mathbf{P}}^{-1} + \mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{z}_c \quad (5)$$

$$\mathbf{P} = (\tilde{\mathbf{P}}^{-1} + \mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \quad (6)$$

$$\tilde{\mathbf{P}} = \text{diag}(\Lambda_X^2 + L_X^2, \Lambda_Y^2 + L_Y^2, \Lambda_Z^2 + L_Z^2, 2.61^2 + L_{\text{clock}}^2) \quad (7)$$

式中, $\mathbf{e}$ 为星历残余误差; $\mathbf{P}$ 为星历残余误差的后验方差矩阵; $\tilde{\mathbf{P}}$ 为广播星历先验方差; $\Lambda_X, \Lambda_Y, \Lambda_Z$ 为广播星历误差在X、Y、Z方向的投影,广播星历钟差先验精度取值2.61 m; $(L_X, L_Y, L_Z), L_{\text{clock}}$ 分别为§1.1中解算的轨道、钟差改正数; $\mathbf{H}$ 为 $m \times 4$ 观测矩阵, $m$ 为观测值数量, $\mathbf{H}$ 矩阵中前3列为各测站至卫星的方向余弦,第4列向量元素均为1; $\mathbf{W}$ 为观测值权矩阵; $\mathbf{z}_c$ 为 $m \times 1$ 矩阵,是经卫星轨道、钟差以及接收机钟差改正之后的伪距残差。

利用星历残余误差构造统计量,计算如下:

$$\begin{cases} k_{\text{state}} = \sqrt{\mathbf{e}^T \mathbf{P}^{-1} \mathbf{e}} \\ k_{\text{user}} = \frac{\|\mathbf{u}^T \mathbf{e}\|}{\sqrt{\mathbf{u}^T \mathbf{P} \mathbf{u}}} \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\mathbf{u}$ 的前3列为用户至卫星的视线向量,第4列为1;当残余误差符合高斯分布时, $\mathbf{e}^T \mathbf{P}^{-1} \mathbf{e}$ 符合卡方分布。当 $k_{\text{state}} \leq k_{\text{FA}}$ 时,根据柯西-施瓦茨定理有 $k_{\text{user}} \leq k_{\text{FA}}$ ,即星历残余误差投影至用户视线方向引起的测距误差小于 $k_{\text{FA}}$ 倍方差在视线方向的投影。 $k_{\text{FA}}$ 为检测门限,当误警率为 $1 \times 10^{-3}$ ,自由度为4时, $k_{\text{FA}}$ 为4.3<sup>[17]</sup>。因此,当 $k_{\text{state}} \leq k_{\text{FA}}$ 时认为该卫星正常,否则将该卫星标识为未监测状态。

### 1.3 完好性参数UDRE及MT28信息生成

SBAS播发星历改正数的同时向用户提供相应的完好性信息,即UDRE参数和MT28信息。用户可利用MT28信息恢复改正数的方差-协方差矩阵,同时结合自身位置对UDRE参数进行调

整,提升系统的可用性<sup>[9]</sup>,计算如下:

$$\begin{cases} U_{\text{UDRE}} = \sigma_{\text{UDRE}} \cdot \delta_{\text{UDRE}} \\ \delta_{\text{UDRE}} = \sqrt{\mathbf{u}^T \mathbf{C} \mathbf{u}} \\ \mathbf{C} = \mathbf{M}_{28}^T \mathbf{M}_{28} \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $U_{\text{UDRE}}$  为用户根据自身位置确定的 UDRE 参数;  $\sigma_{\text{UDRE}}$  为 SBAS 信息类型 2~6 中播发的卫星 UDRE 参数;  $\delta_{\text{UDRE}}$  为调整因子;  $\mathbf{C}$  为改正数方差-协方差矩阵;  $\mathbf{M}_{28}$  为矩阵  $\mathbf{C}$  的上三角分解矩阵,即信息类型 28 的内容<sup>[9]</sup>。

星历改正数方差-协方差信息  $\mathbf{P}_{\text{broadcast}}$  的计算如下:

$$\mathbf{P}_{\text{broadcast}} = \sigma_{\text{UDRE}}^2 \mathbf{C} \quad (10)$$

$$\mathbf{P}_{\text{broadcast}} = \left( \frac{1}{5.33} \right)^2 (k_{md} + k_{FA})^2 \mathbf{P} \quad (11)$$

式中,系数 5.33 是考虑用户在后续定位解算时为满足  $1.0 \times 10^{-7}/150 \text{ s}$  的完好性要求,取 5.33 倍定位误差作为用户保护级<sup>[9]</sup>;  $k_{md}$  为高斯分布漏警门限值,漏警率取值为  $4.5 \times 10^{-10}$  时,  $k_{md}$  为 6.13<sup>[19]</sup>。为保障系统服务的完好性,在计算矩阵  $\mathbf{P}$  时需假设某一监测站  $i$  发生故障,此时解算得到的星历改正数及协方差信息记为  $\mathbf{e}_i$  和  $\mathbf{P}_i$ ,协方差矩阵  $\mathbf{P}_{\text{broadcast}}$  需满足:

$$\sqrt{\mathbf{u}^T \mathbf{P}_{\text{broadcast}} \mathbf{u}} \geq \sqrt{\mathbf{e}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{e}_i} \quad (12)$$

使用数学方法计算  $\mathbf{P}_{\text{broadcast}}$  较为复杂,本文采用文献[17]提出的方法计算  $\mathbf{P}_{\text{broadcast}}$  矩阵。假设某一监测站  $i$  故障时,SBAS 服务区域内用户  $j$  处改正数误差  $\sigma_j$  最大,即:

$$\sigma_j = \max(\sqrt{\mathbf{u}_j^T \mathbf{P}_i \mathbf{u}_j}) \quad (13)$$

利用  $\sigma_j$  以及所有监测站均无故障时解算得到的方差矩阵  $\mathbf{P}$  计算扩展系数  $F_0$ :

$$F_0 = \max\left(\frac{\sigma_j}{\sqrt{\mathbf{u}_j^T \mathbf{P} \mathbf{u}_j}}\right) \quad (14)$$

此时,系统播发的协方差矩阵计算如下:

$$\mathbf{P}_{\text{broadcast}} = \left( \frac{1}{5.33} \right)^2 (k_{md} + k_{FA})^2 F_0^2 \mathbf{P} \quad (15)$$

对  $\mathbf{P}_{\text{broadcast}}$  进行分解得到上三角分解矩阵  $\bar{\mathbf{U}}$  以及系统播发的 UDRE 参数  $\sigma_{\text{UDRE}}$  和信息  $\mathbf{M}_{28}$ :

$$\mathbf{P}_{\text{broadcast}} = \bar{\mathbf{U}}^T \bar{\mathbf{U}} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \sigma_{\text{UDRE}} = \bar{U}_{4,4} \\ \mathbf{M}_{28} = \bar{\mathbf{U}}/\bar{U}_{4,4} \end{cases} \quad (17)$$

## 2 解算结果分析

为了验证本文算法的有效性和正确性,使用 2018-06-01 中国区域 27 个监测站的实测数据进

行 GPS 改正数的解算并生成完好性参数。

### 2.1 精密星历改正数解算

利用 IGS 精密产品计算卫星位置和钟差,得到测站和卫星间的几何距离及伪距残差并解算改正数。图 1 为 GPS PRN01 号卫星的慢变钟差改正数,慢变钟差改正数均值为  $-0.02 \text{ m}$ ,标准差为  $0.07 \text{ m}$ 。图 2 为 GPS PRN01 号卫星慢变轨道改正数,  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向的轨道改正数均值分别为  $-0.19 \text{ m}$ 、 $0.39 \text{ m}$  及  $0.17 \text{ m}$ ,方差分别为  $0.28 \text{ m}$ 、 $0.33 \text{ m}$  和  $0.23 \text{ m}$ ,三轴平均精度优于  $0.4 \text{ m}$ 。在卫星观测开始和结束弧段改正数精度较低,这主要是由于卫星高度角较低导致观测值噪声大以及可视监测站数量少。

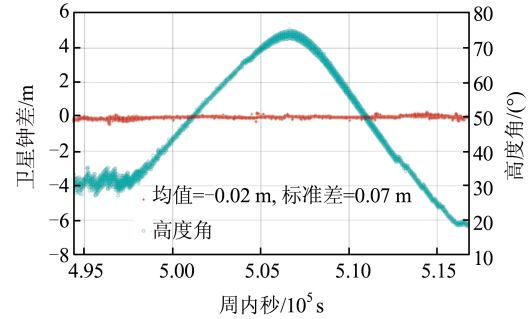


图 1 GPS PRN01 卫星慢变钟差改正数  
Fig.1 Long-Term Clock Corrections for GPS PRN01 Satellite

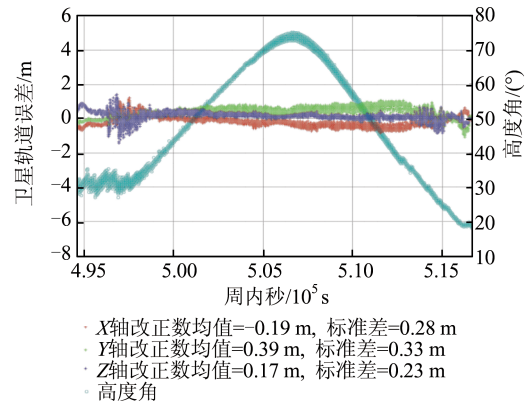


图 2 GPS PRN01 卫星慢变轨道改正数  
Fig.2 Long-Term Orbit Corrections for GPS PRN01 Satellite

利用经过慢变改正后的伪距残差重新计算卫星钟差,并将其作为快变改正数,由于采取每历元解算一次慢变改正数,因此此处快变钟差改正数可视为星历残余误差导致的测距误差。图 3 为 GPS PRN01 号卫星的钟差快变改正数,均值为  $-0.02 \text{ m}$ ,方差为  $0.04 \text{ m}$ ,其综合影响小于  $0.1 \text{ m}$ 。



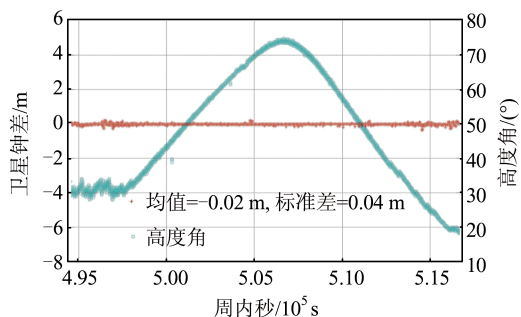


图3 GPS PRN01 卫星钟差快变改正数

Fig.3 Fast Clock Corrections for GPS PRN01 Satellite

## 2.2 广播星历改正数及完好性参数解算

利用GPS广播星历计算卫星慢变和快变改正数及星历残余误差,对星历残余误差进行完好性检验并生成UDRE参数。图4为利用广播星历解算的GPS PRN21号卫星慢变钟差改正数,改正数小于1 m,与广播星历卫星时钟精度较为一致,且能够反映出卫星钟差的变化趋势。图5为PRN21号卫星的慢变轨道改正数,X、Y、Z方向改正数统计值分别为 $(0.27 \pm 0.43)$  m、 $(0.23 \pm 0.72)$  m和 $(-0.46 \pm 0.64)$  m,该改正数中包含了广播星历的真实轨道误差。图6为该卫星的快变改正数,均值为0,标准差为0.07 m,其余卫星情况类似。

通过精密星历和广播星历改正数的解算结果可以看出,本文解算的卫星钟差和轨道改正数精度较高,残余误差小于0.1 m,能够保证SBAS系统服务的精度和可用性。

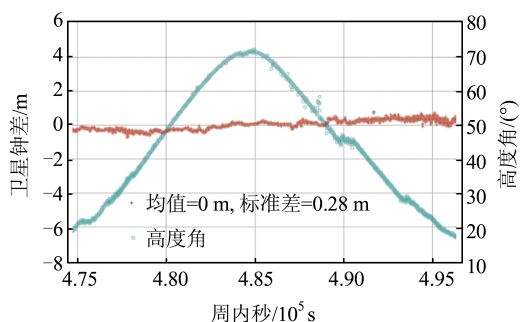


图4 GPS PRN21 卫星钟差慢变改正数

Fig.4 Long-Term Clock Corrections for GPS PRN21 Satellite

采用§1.2的方法对星历改正数进行完好性检验并计算UDRE参数。图7为所有卫星24 h完好性检核结果,红色线为检测门限,绿色点为卡方统计值。由图7可以看出,统计值均小于检测门限,表明该时段内各卫星改正数均能够满足完好性要求。

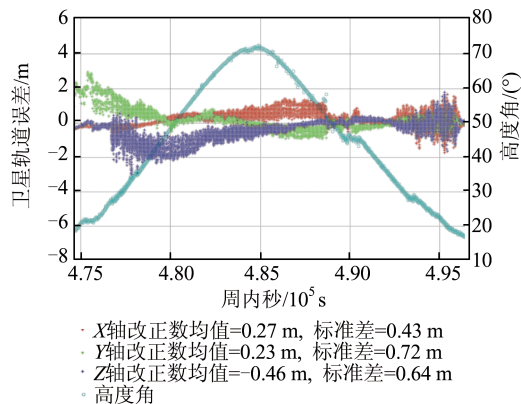


图5 GPS PRN21 卫星轨道慢变改正数

Fig.5 Long-Term Orbit Corrections for GPS PRN21 Satellite

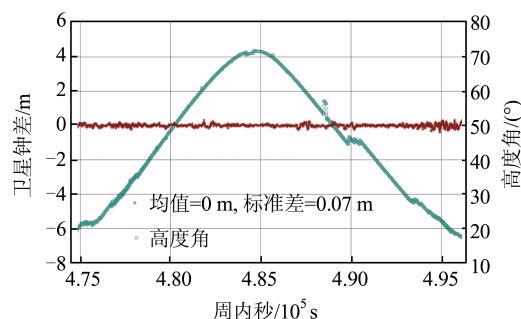


图6 GPS PRN21 卫星钟差快变改正数

Fig.6 Fast Clock Corrections for GPS PRN21 Satellite

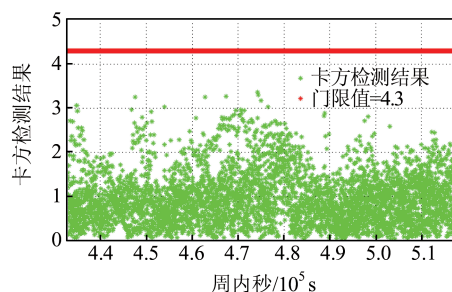


图7 星历改正数完好性检测结果

Fig.7 Integrity Test Results of Ephemeris Corrections

图8给出了卫星UDRE值与高度角的关系,红色点表示各卫星的UDRE值,绿色点为该高度角下卫星UDRE的均值,评估时段内UDRE最大值为20.96 m,最小值为1.27 m,对应的UDRE指数分别为12和3<sup>[9]</sup>。从图8中可以看出,卫星UDRE值随高度角的增大而减小。

## 2.3 模拟卫星故障和机动解算改正数

为了验证本文算法应对卫星故障<sup>[20-21]</sup>的能力,对GPS PRN21号卫星钟和轨道分别加入误差。首先对卫星钟加入0.5 m/s的钟漂误差以模拟星钟故障,然后在卫星Y坐标上加入0.5 m/s的轨道变化模拟卫星机动。两次误差模拟起始时刻均为475 200 s,持续时间为100 s。

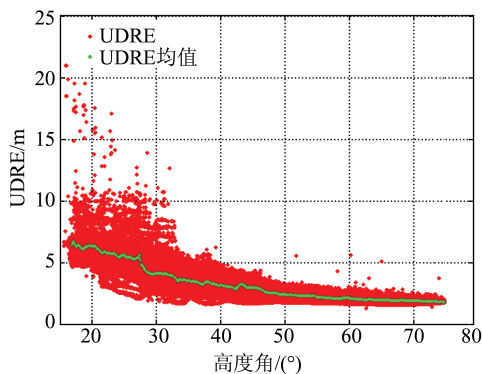


图 8 卫星 UDRE 参数随高度角的变化

Fig.8 Satellite UDRE Change with Elevation

图 9 为加入卫星钟误差后解算的慢变钟差改正数。由图 9 可以看出,钟差改正数在 475 200 s 时能够准确反映出模拟误差并在 475 300 s 处达到最大值。图 10 为加入轨道误差后解算得到的改正数。由图 10 可以看出,轨道径向误差被钟差改正数吸收,残余误差体现在轨道改正数上。通过上述分析,本文算法能够有效针对卫星钟故障或轨道机动导致的测距误差进行改正。

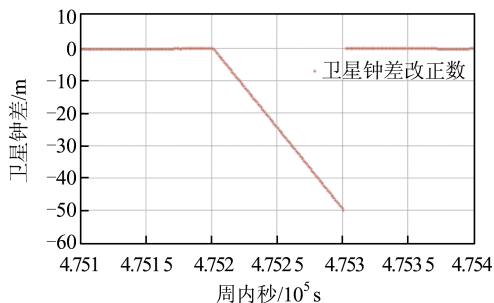
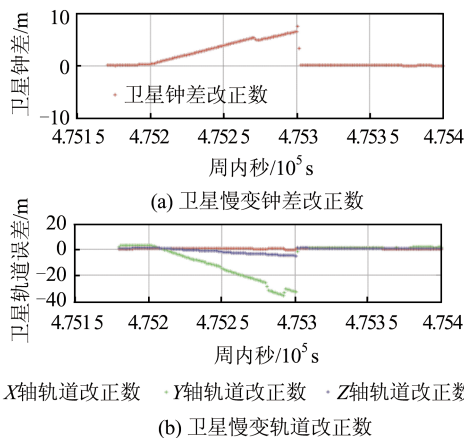


图 9 模拟卫星钟故障下 GPS PRN21 卫星钟差慢变改正数

Fig.9 Long-Term Corrections for GPS PRN21 with Satellite Clock Failure

图 10 模拟卫星机动时 GPS PRN21 卫星慢变改正数  
Fig.10 Long-Term Corrections for GPS PRN21 with Satellite Maneuvering

## 2.4 定位结果影响分析

利用广播星历及§2.2 解算的星历改正数进行 SBAS 定位解算,并与 GPS 单点定位结果进行比较,电离层误差使用 Klobuchar 模型进行改正。图 11 给出了 27 个监测站的定位结果。从图 11 中可以看出,SBAS 水平定位精度为 0.7 m,高程定位精度为 1.0 m, GPS 水平定位精度为 1.1 m,高程定位精度为 1.8 m。相对于 GPS 单点定位,利用本文解算的改正数进行 SBAS 定位时,水平和高程精度分别提升了 30% 和 40%。

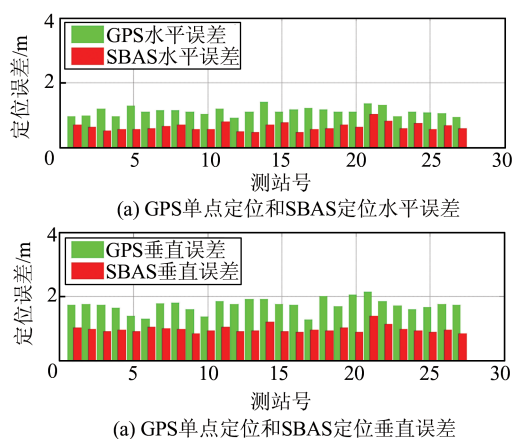


图 11 GPS 单点定位和 SBAS 定位误差

Fig.11 GPS Single Point Positioning and SBAS Positioning Errors

## 3 结 语

本文利用中国区域 27 个监测站数据进行 GPS 星历慢变、快变改正数解算,首先利用精密星历验证了算法的正确性,利用广播星历解算改正数进行完好性检测,并生成 UDRE 参数,结果显示改正后的星历残余误差小于 0.1 m,卫星改正数能够满足完好性要求,UDRE 参数随卫星高度角增大而减小;在广播星历的基础上加入误差以仿真卫星钟故障或轨道机动,结果表明,本文算法能够有效改正由卫星异常引起的测距误差。利用 GPS 广播星历及改正数进行 SBAS 定位解算,与 GPS 单点定位相比,SBAS 定位在保证完好性的同时能够有效提升用户定位精度,水平和高程方向分别提升了 30% 和 40%。

## 参 考 文 献

- [1] Burns J. Wide Area Augmentation System (WAAS) Update[C]. SBAS IWG 30, Changsha, China, 2016
- [2] Schempp T. WAAS Development Changes Since Commissioning [C]. ICAO GBAS/SBAS Imple-

- mentation Workshop, Seoul, Korea, 2019
- [3] Wu Yun, Yang Xinchun, Chen Hui. Simulation and Analysis of EGNOS System's Integrity Under Multi-system with Multi-frequency [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(3):269-273(吴云, 杨鑫春, 陈慧. 多系统多频率的EGNOS系统完备性模拟分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(3): 269-273)
- [4] Seynat C, Flament D. European Geostationary Navigation Overlay Service EGNOS Status Update [C]. The 23rd International Technical Meeting of the Institute of Navigation, Portland, Oregon, USA, 2010
- [5] Rao K. GAGAN—The Indian Satellite Based Augmentation System [J]. *Indian Journal of Radio & Space Physics*, 2007, 36:293-302
- [6] Saito S. MSAS System Development [C]. ICAO GBAS/SBAS Implementation Workshop, Seoul, Korea, 2019
- [7] Lou Yidong, Zheng Fu, Gong Xiaopeng. Evaluation of QZSS System Augmentation Service Performance in China Region [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(3): 298-303(楼益栋, 郑福, 龚晓鹏. QZSS系统在中国区域增强服务性能评估与分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2016, 41(3):298-303)
- [8] Cao Yueling, Hu Xiaogong, Wu bin. The Wide Area Difference System for the Regional Satellite Navigation System of Compass [J]. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2012, 55(7): 1 307-1 315
- [9] RTCA SC-159. Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment[S/OL]. [2013-06-25]. [https://global.ihs.com/doc\\_detail.cfm?item\\_s\\_key=00233409](https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?item_s_key=00233409)
- [10] Tsai Y. Wide Area Differential Operation of the Global Positioning System: Ephemeris and Clock Algorithms [D]. Stanford: Stanford University, 1999
- [11] Chen Junping, Yang Sainan, Zhou Jianhua, et al. A Pseudo Range and Phase Combined SBAS Differential Correction Model [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(5):537-546(陈俊平, 杨赛男, 周建华, 等. 综合伪距相位观测的北斗导航系统广域差分模型[J]. 测绘学报, 2017, 46(5): 537-546)
- [12] Juan C. Hughes Aircraft's Architectural Design of the Federal Aviation Administration Wide Area Augmentation System: An International System [J]. *Acta Astronautica*, 1997, 41(4):335-345
- [13] Rouanet L A, Lembachar R, Authié T, et al. New Orbit Determination and Clock Synchronisation Modules for EGNOS [C]. The 29th International Technical Meeting of the Institute of Navigation, Portland, Oregon, USA, 2016
- [14] Walter T, Hansen A, Enge P. Message Type 28 [C]. The 2001 National Technical Meeting of the Institute of Navigation, Long Beach, California, USA, 2001
- [15] Authié T, Trilles S, Fort J C, et al. Integrity Based on MT28 for EGNOS: New Algorithm Formulation & Results [C]. The 30th International Technical Meeting of the Institute of Navigation, Portland, Oregon, USA, 2017
- [16] Blanch J, Walter T, Enge P. Evaluation of a Covariance Based Clock and Ephemeris Error Bounding Algorithm for SBAS [C]. The 27th International Technical Meeting of the Institute of Navigation, Tampa, Florida, USA, 2014
- [17] Wu J T, Peck S. An Analysis of Satellite Integrity Monitoring Improvement for WAAS [C]. The 15th International Technical Meeting of the Institute of Navigation, Portland, Oregon, USA, 2002
- [18] Jefferson D, Bar-Sever Y. Accuracy and Consistency of Broadcast GPS Ephemeris Data [C]. The 13th International Technical Meeting of the Institute of Navigation, Salt Lake City, Utah, USA, 2000
- [19] Schempp T R, Peck S R, Fries R M. WAAS Algorithm Contribution to Hazardously Misleading Information [C]. The 14th International Technical Meeting of the Institute of Navigation, Salt Lake City, Utah, USA, 2001
- [20] Tang H, Pullen S, Enge P. Ephemeris Type a Fault Analysis and Mitigation for LAAS [C]. IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, Indian Wells, California, USA, 2010
- [21] Hansen A, Walter T, Enge P. GPS Satellite Clock Event on SVN 27 and Its Impact on Augmented Navigation Systems [C]. The 11th International Technical Meeting of the Institute of Navigation, Nashville, Tennessee, USA, 1998

## Analysis of SBAS Ephemeris Correction and UDRE Generation Algorithm

JIN Biao<sup>1,2</sup> WEI Wei<sup>3</sup> CHEN Shanshan<sup>1</sup> LI Dongjun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Space Start Technology Co., LTD, Beijing 100094, China

<sup>2</sup> Yunnan Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China

<sup>3</sup> China Satellite Navigation Office, Beijing 100000, China

**Abstract:** Satellite based augmentation system (SBAS) improves the accuracy and integrity of user positioning by broadcasting ephemeris corrections and associated integrity parameters through geostationary earth orbit satellites in real time. Minimum variance estimation method is proposed to derive the GPS ephemeris corrections and a Chi-square test is performed on the residual errors of corrected ephemeris to meet the integrity requirement. Satellite user differential range error (UDRE) and scaling matrix contained in message type 28 (MT28) are calculated based on the covariance information with the assumption that one of the reference stations failed. Actual data collected by 27 stations spread over China are applied to verify the proposed algorithm. International GNSS Service precise clock and orbit products are firstly taken as reference to assess the accuracy of ephemeris corrections. Results indicate that an accuracy of 0.1 m for clock and 0.4 m for orbit corrections can be obtained. Then, corrections of GPS broadcast ephemeris are estimated, the integrity parameters including UDRE and MT28 are generated. Chi-square test results of the ephemeris remaining errors show no exceeding of the threshold which reveals the integrity of corrections. A clear dependence of UDRE on satellite elevation is presented. On board clock failure and satellite maneuvering were simulated to evaluate the performance of the proposed algorithm. Measurement errors introduced by satellite abnormality can be effectively detected and compensated by the algorithm. With ionospheric delay corrected by Klobuchar model and ephemeris corrections generated in this contribution, SBAS positioning results achieve the accuracies of 0.7 m in horizontal direction and 1.0 m in vertical direction, which show an improvement of 30% in horizontal direction and 40% in vertical direction compared with the GPS single point positioning results.

**Key words:** satellite based augmentation system (SBAS); ephemeris correction; integrity; user differential range error(UDRE)

**First author:** JIN Biao, PhD candidate, senior engineer, specializes in the integrity of satellite navigation and satellite orbit determination. E-mail: jinbiao366788@126.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China (41974041); Equipment Preresearch Foundation of China (61405180103).

**引文格式:** JIN Biao, WEI Wei, CHEN Shanshan, et al. Analysis of SBAS Ephemeris Correction and UDRE Generation Algorithm[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(1):111-117. DOI:10.13203/j.whugis20190033(金彪, 魏巍, 陈姗姗, 等. SBAS 星历改正数及 UDRE 参数生成算法分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(1):111-117. DOI:10.13203/j.whugis20190033)