



星基增强系统码噪声和多路径误差处理方法研究

张 键, 邵 搏, 丁 群, 李平力, 吴显兵

Research on code noise and multipath error processing methods of satellite-based augmented system

ZHANG Jian, SHAO Bo, DING Qun, LI Pingli, and WU Xianbing

引用本文:

张键, 邵搏, 丁群, 等. 星基增强系统码噪声和多路径误差处理方法研究[J]. *全球定位系统*, 2024, 49(5): 19–23. DOI: [10.12265/j.gnss.2024103](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2024103)
ZHANG Jian, SHAO Bo, DING Qun, et al. Research on code noise and multipath error processing methods of satellite-based augmented system[J]. *Gnss World of China*, 2024, 49(5): 19–23. DOI: [10.12265/j.gnss.2024103](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2024103)

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.gnss.2024103>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

顾及有色噪声的卡尔曼滤波在多路径误差削弱中的应用

The application of Kalman filter with colored noise in mitigation of multi-path error
全球定位系统. 2019, 44(1): 62–67

基于EMD-LSTM耦合预测模型的BDS多路径误差削弱方法研究

BDS multipath errors reducing method based on EMD-LSTM coupled prediction model
全球定位系统. 2020, 45(2): 98–104

小波分析和经验模态分解对BDS多路径误差削弱对比研究

Comparative study on wavelet analysis and empirical mode decomposition for BDS multipath error reduction
全球定位系统. 2019, 44(3): 49–55

载波相位平滑时间常数对GBAS精度增强的影响

Influence of carrier phase smoothing time constant on GBAS accuracy enhancement
全球定位系统. 2020, 45(1): 43–50

SBAS监测站构成及部署方法分析

Analysis of the composition and deployment methods of SBAS ground monitoring stations
全球定位系统. 2020, 45(4): 42–48

eLoran噪声误差模型及产生方法研究

Researcher on eLoran noise error model and generation method
全球定位系统. 2022, 47(6): 73–78, 122



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.12265/j.gnss.2024103

星基增强系统码噪声和多路径误差处理方法研究

张键, 邵搏, 丁群, 李平力, 吴显兵

(中国电子科技集团公司第二十研究所, 西安 710068)

摘要: 星基增强系统 (Satellite-Based Augmentation System, SBAS) 利用伪距测量校正值实现对导航卫星的差分完好性增强, 码噪声和多路径误差处理精度是影响系统服务性能和用户定位精度的重要因素。本文详细介绍了三种不同的原始伪距码噪声和多路径误差处理方法, 包括单频平滑方法、码噪声和多路径改正方法 (code noise and multipath correction, CNMC) 以及广域增强系统 (Wide Area Augmentation System, WAAS) 使用的码噪声多路径方法 (code noise multipath, CNMP), 并通过正式运行的 SBAS 数据, 验证了不同的码噪声和多路径误差方法对于用户定位精度的影响。结果表明: CNMP 能够有效消除 SBAS 服务性能评估中的原始伪距码噪声和多路径误差影响, 相较于 CNMC 方法, 全球参考系统 (wide-area reference station, WRS) 站点 95% 水平定位精度提升 0.2 m, 95% 垂直定位精度提升 0.47 m。

关键词: 星基增强系统 (SBAS); 码噪声和多路径误差; 载波相位平滑; 码噪声和多路径改正方法 (CNMC); 码噪声多路径方法 (CNMP)

中图分类号: P228

文献标志码: A

文章编号: 1008-9268(2024)05-0019-05

0 引言

为满足 GNSS 在民航领域应用的高精度、高完好性需求, 采用广域差分完好性增强技术体制的星基增强系统 (Satellite-Based Augmentation System, SBAS) 应运而生。SBAS 利用广域分布的地面监测站对 GNSS 卫星信号进行持续监测并生成差分改正数及完好性信息, 再通过地球同步轨道 (geostationary orbit, GEO) 卫星向服务区内的用户进行广域播发, 民航用户使用 SBAS 电文进行定位解算及保护级计算, 从而实现对于 GNSS 的定位增强与完好性保障^[1]。

我国的北斗星基增强系统 (BeiDou Satellite-Based Augmentation System, BDSBAS) 已于 2020 年 7 月 31 日正式为中国及周边区域提供试运行服务, 其通过 BDSBAS B1C 频点和 B2a 频点分别播发单频增强信号和双频增强信号^[2]。为进一步提升系统性能, 推进民航服务性能评估与认证工作, 需对 SBAS 数据处理方法进一步深入研究。

对于 SBAS 来说, 系统端的差分与完好性处理与用户端的增强定位所使用的观测量均为原始伪距测量值, 而码噪声和多路径是在数据处理过程中必须考

虑的一项重要误差源^[3-4]。

当前, 消除原始伪距测量噪声和多路径误差的常用方法有传统的单频平滑方法、Hatch 滤波、码噪声和多路径改正方法 (code noise and multipath correction, CNMC) 以及码噪声多路径方法 (code noise multipath, CNMP)。传统的单频平滑方法简单, 能够有效消除原始伪距码噪声影响, 被广泛应用在数据预处理领域, 在航空无线电技术委员会 (Radio Technical Commission for Aeronautics, RTCA) 发布的 DO-229E 中也推荐单频 GNSS 用户使用该方法进行原始伪距平滑处理, 然而该方法对多路径误差消除效果有限^[5]; 双频 Hatch 滤波和 CNMC 方法被证明在数学上等价, 理论上对于码噪声和多路径均有较好的消除效果^[6]; CNMP 方法是 WAAS 发展的一种采用 CMC (code minus carrier) 观测量来改正 GPS 伪距测量码噪声和多路径误差的方法, 实测数据表明该方法在完好性参数性能、服务可用性等系统性能提升上具有显著作用^[7-8]。

本文在详细阐述单频平滑方法、CNMC 方法和 CNMP 方法原理的基础上, 采用了监测站实测数据对广域增强系统 (Wide Area Augmentation System, WAAS) 从定位精度的角度分析了不同方法在消除码

收稿日期: 2024-06-04

通信作者: 李平力 E-mail: 707692677@qq.com

噪声和多路径误差的效果. 不同方法误差消除效果的对比能够为 BDSBAS 服务性能优化升级、民航验证评估工作提供参考.

1 码噪声和多路径处理方法

1.1 单频平滑方法

RTCA DO-229E 中推荐了机载设备单频载波相位平滑处理方法, 以提升伪距测量精度. 公式如下:

$$P_{\text{proj}} = P_{n-1} + \frac{\lambda}{2\pi} (\phi_n - \phi_{n-1}) \quad (1)$$

$$P_n = \alpha \rho_n + (1 - \alpha) \quad (2)$$

式 (1) 和式 (2) 中, P_{proj} 为预测的当前时刻伪距值; P_{n-1} 为上一时刻的载波相位平滑伪距值; λ 为载波波长; ϕ_n 为当前时刻载波相位测量值; ϕ_{n-1} 为上一时刻的载波相位测量值; P_n 为当前时刻载波相位平滑伪距值; ρ_n 为当前时刻原始伪距测量值; α 为权重函数, 取值为数据采样间隔 (单位: s) 与常数 (100 s) 之比.

该方法适用于单频接收机用户, 不需要第二频点测量数据作为辅助.

1.2 CNMC 方法

CNMC 方法实质上也是一种载波相位平滑伪距方法. f_1 频点的原始伪距和载波观测方程如下:

$$P_1(t) = \rho(t) + c[\Delta t_r(t) - \Delta t^s(t)] + I_1(t) + T(t) + M_{P,1}(t) + \varepsilon_P(t) \quad (3)$$

$$\phi_1(t) = \rho(t) + c[\Delta t_r(t) - \Delta t^s(t)] - I_1(t) + T(t) + A_1 + M_{\phi,1}(t) + \varepsilon_\phi(t) \quad (4)$$

式中: P_1 和 ϕ_1 分别为 f_1 频点上的原始伪距测量值和载波相位测量值; ρ 为站星真实距离; c 为真空中的光速; Δt_r 为接收机钟差误差; Δt^s 为星钟误差; I_1 为 f_1 频点上的电离层延迟误差; T 为对流层延迟误差; $M_{P,1}$ 为 f_1 频点上的伪距多路径误差; A_1 为 f_1 频点上的模糊度; $M_{\phi,1}$ 为 f_1 频点上的载波相位多路径误差; ε_P 和 ε_ϕ 分别为伪距测量噪声和载波相位测量噪声.

在实际处理过程中, 因载波相位测量值精度很高, 受多路径误差影响较小, 因此 $M_{\phi,1}$ 和 ε_ϕ 一般忽略, ε_P 一般作为高斯白噪声处理.

由式 (3) 和式 (4), 可得 CMC 测量方程

$$\begin{aligned} \text{CMC}_1(t) &= P_1(t) - \phi_1(t) \\ &= 2I_1(t) - A_1 + M_{P,1}(t) + \varepsilon_P(t) \end{aligned} \quad (5)$$

则原始伪距码噪声和多路径误差可由下式得到:

$$M_{P,1}(t) + \varepsilon_P(t) = P_1(t) - \phi_1(t) - 2I_1(t) + A_1 \quad (6)$$

式中,

$$I_1(t) = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [\phi_1(t) - \phi_2(t) + A_1 - A_2] \quad (7)$$

将式 (7) 带入式 (6), 可得:

$$\begin{aligned} M_{P,1}(t) + \varepsilon_P(t) &= P_1(t) \\ &- [(1+2k)\phi_1(t) - 2k\phi_2(t)] + \text{Bias}_1 \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $k = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}$. 在忽略其他偏差的情况下, Bias_1 是与 f_1 和 f_2 频点模糊度相关的偏差项, 在实际测量中也会包含卫星和接收机通道时延等常数偏差. 因此只要求解出常数偏差 Bias_1 , 便可确定 f_1 频点上的伪距码噪声和多路径误差值. f_1 频点实时误差修正方法如下.

初始化:

$$\text{Bias}_1(t_0) = P_1(t_0) - [(1+2k)\phi_1(t_0) - 2k\phi_2(t_0)] \quad (9)$$

$$M_{P,1}(t_0) + \varepsilon_P(t_0) = 0 \quad (10)$$

在未发生周跳的情况下, 随着历元累积, t_i 时刻的常数偏差估计以及多路径误差的更新如下:

$$\begin{aligned} \text{Bias}_1(t_i) &= \text{Bias}_1(t_{i-1}) + \frac{P_1(t_i)}{n} - \frac{1}{n} \{ \phi_1(t_i) \\ &+ \text{Bias}_1(t_{i-1}) + 2k[\phi_1(t_i) - \phi_2(t_i)] \} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} M_{P,1}(t_i) + \varepsilon_P(t_i) &= P_1(t_i) - \phi_1(t_i) \\ &- 2k[\phi_1(t_i) - \phi_2(t_i)] - \text{Bias}_1(t_i) \end{aligned} \quad (12)$$

如果载波相位没有发生周跳, 则可以持续更新, 如果有周跳发生, 为了确保误差修正的正确性, 需要对 CNMC 方法进行初始化.

通过以上操作可以对原始伪距的码噪声和多路径误差 $M_{P,1}(t_i) + \varepsilon_P(t_i)$ 进行实时估计并消除, 以提高伪距测量精度, 从而提升 SBAS 服务性能.

1.3 CNMP 方法

CNMP 方法最先被 WAAS 使用在监测站数据预处理过程中, 以减小码噪声和多路径误差对伪距测量值的影响, 随后逐步应用于精密进近着陆和接收机硬件延迟、电离层估计等方面. CNMP 方法与 CNMC 方法一样, 也是基于双频观测值的组合值 CMC 发展而来的. 由式 (12) 可得

$$\begin{aligned} MP_1(t) &= M_{P,1}(t) + \varepsilon_P(t) + B_1 \\ &= P_1(t) - [(1+2k)\phi_1(t) - 2k\phi_2(t)] \end{aligned} \quad (13)$$

在考虑其他未完全消除偏差的情况下, 上式中 B_1 是一个偏差项, 包含伪距偏差、载波偏差、载波模糊度等常数偏差项. 由于在实际处理中一般假设伪距

测量噪声是一个典型的零均值高斯白噪声,因此将 K 个历元的 MP_1 求平均可得

$$\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K MP_1 \approx \bar{M}_{P,1} + B_1 \quad (14)$$

可以看到, K 个历元的 MP_1 平均值由一个常数偏差 B_1 和伪距多路径均值 $\bar{M}_{P,1}$ 组成.可以通过滑动窗口的方法获得平均 MP_1 时间序列,并确定出最小多路径误差出现的时刻.如图1所示,对于每个滑动窗口,可以确定出最大和最小的 MP_1 值,从而得到该滑动窗口时段内的 MP_1 值的变化范围,如下式:

$$MP_{1,\text{bound}}(i+1:i+k) = \min[MP_1(i+1:i+k)]: \max[MP_1(i+1:i+k)] \quad (15)$$

拥有最小 $MP_{1,\text{bound}}$ 的窗口对应着多路径误差最小的时间段,记该时段为 t_B .则可由式(14)得到对 B_1 的估计:

$$\overline{MP}_1(t_B) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K MP_1(t_B) \approx B_1 \quad (16)$$

得到常数偏差项后,便可由式(13)计算码噪声和多路径误差,如下式:

$$M_{P,1}(t) + \varepsilon_P(t) = MP_1(t) - \overline{MP}_1(t_B) \quad (17)$$

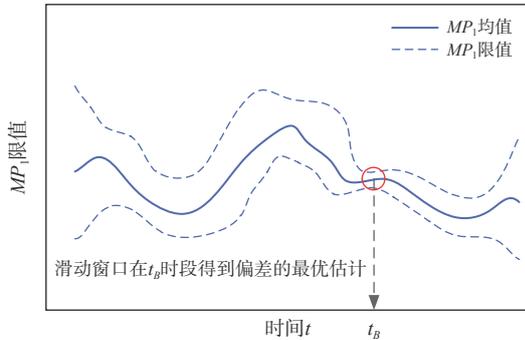


图1 CNMP滑动窗口 B_1 偏差项估计示意图

对比CNMC和CNMP方法可以看到,两者的差别主要在于常数偏差项的估计方法不同,但都依赖于CMC组合观测量的构建.

2 定位精度比较分析

美国的WAAS作为最早提供正式服务的SBAS,通过其官方网站(<http://www.nstb.tc.faa.gov/>)定期以季度报和年报的形式公开发布其系统服务性能,报告主要内容包括WAAS服务定位精度、可用性、服务覆盖率、完好性等内容.其中用于评估WAAS服务定位精度的观测数据源为37个WAAS参考站(WAAS

reference station, WRS).根据WAAS 2023年度第四季度性能评估报告显示,精密进近(precision approach, PA)模式下95%水平定位误差(horizontal positioning error, HPE)达到0.7 m,95%垂直定位误差(vertical positioning error, VPE)达到1.1 m,优于WAAS服务性能期望指标水平95%定位误差1.5 m和垂直95%定位误差2.0 m^[9-10].

为了验证三种不同的码噪声和多路径处理方法对于SBAS用户定位精度的影响,选用10个公开的WRS观测数据及WAAS GEO卫星(PRN 131)增强电文对WAAS增强定位精度进行评估并与官方网站公布的结果进行对比分析.选用的10个WRS站点分布如图2所示.数据时段为2023年5月1日0时至24时,采样频率为1 Hz,计算卫星截止高度角5°.三种方法的定位精度结果与WAAS公布结果对比如表1、表2和图3、图4所示.

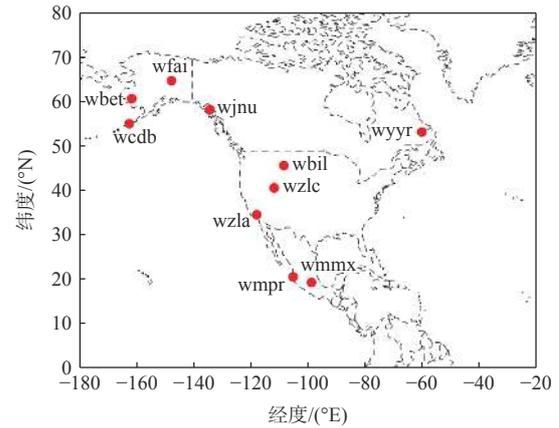


图2 所选WRS监测站分布

表1 WRS站点HPE对比表

WRS站	HPE(95%)/m			
	官网	CNMP	单频平滑	CNMC
wbet	0.63	0.67	0.70	0.74
wbil	0.53	0.68	0.75	0.96
wcd	0.63	0.74	0.72	0.76
wfai	0.60	1.06	1.07	1.12
wjnu	0.70	1.09	1.11	1.20
wmmx	1.12	1.12	1.13	1.15
wmpr	1.01	0.97	1.07	1.46
wyyr	2.03	1.97	2.06	2.01
wzla	0.88	0.77	1.01	1.16
wzlc	0.52	0.58	0.83	1.10
均值	0.87	0.97	1.05	1.17

表 2 WRS 站点 VPE 对比表

WRS站	VPE(95%)/m			
	官网	CNMP	单频平滑	CNMC
wbet	1.50	1.60	1.69	1.74
wbil	0.72	0.83	1.19	1.65
wcdb	1.55	1.83	2.00	2.00
wfai	1.60	1.89	2.06	2.15
wjnu	1.16	1.49	1.51	1.82
wmmx	2.24	2.40	2.62	2.80
wmpr	2.58	2.56	2.55	3.10
wyyr	1.67	1.95	2.07	2.08
wzla	1.46	1.53	1.86	2.44
wzlc	0.80	0.87	1.30	1.93
均值	1.53	1.70	1.89	2.17

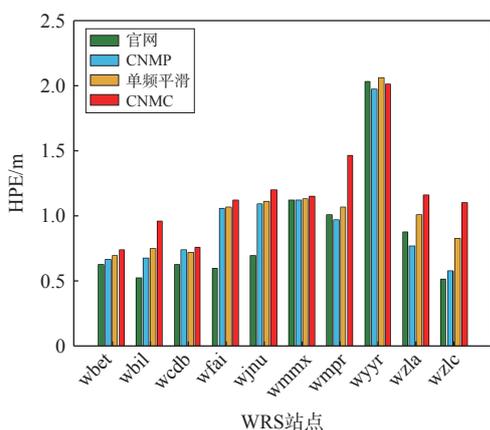


图 3 WRS 站点单频增强服务水平定位精度对比

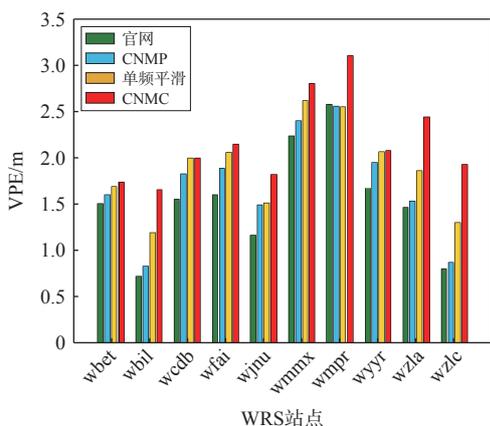


图 4 WRS 站点单频增强服务垂直定位精度对比

从表 2 和图 3~4 中可以看到: WAAS 官方公布的 10 个站点 HPE(95%) 均值为 0.87 m, VPE(95%) 均值为 1.53 m; 使用 CNMP 方法评估得到的 HPE(95%) 均值为 0.97 m, VPE(95%) 均值为 1.70 m; 单频平滑方法评估得到的 HPE(95%) 均值为 1.05 m, VPE(95%)

均值为 1.89 m; CNMC 方法评估得到的 HPE(95%) 均值为 1.17 m, VPE(95%) 均值为 2.17 m. 与 WAAS 官方结果对比, 使用 CNMP 方法的精度最高, 单频平滑方法次之, CNMC 方法最差, 在垂直方向尤为明显, CNMP 与 CNMC 方法的垂直精度差距达到了 0.47 m. 从以上结果看出, CNMP 方法对伪距码噪声和多路径影响抑制效果最好, 对垂直定位精度提升明显.

为验证非 WRS 数据是否有相同的结果, 另外选择了 3 个分布在美国的 IGS 站点数据进行了 WAAS 定位精度评估. 数据段为 2023 年 6 月 24 日 0 时至 24 时, 数据采样间隔 30 s, 计算卫星截止高度角 5°. 统计结果如表 3、表 4 所示.

表 3 IGS 站点 HPE 统计表

IGS 站点	HPE(95%)/m		
	CNMP	单频平滑	CNMC
gcgo	0.93	0.98	1.11
gode	0.52	0.58	0.65
sgpo	0.59	0.63	0.87
均值	0.68	0.73	0.88

表 4 IGS 站点 VPE 统计表

IGS 站点	VPE(95%)/m		
	CNMP	单频平滑	CNMC
gcgo	1.39	1.52	1.86
gode	1.22	1.20	1.37
sgpo	1.04	1.01	1.48
均值	1.22	1.24	1.57

从上表可以看到, WAAS 外部的 IGS 站点定位经过也表现出了相同的趋势, 使用 CNMP 方法的水平和垂直定位精度最高, 且在垂直方向最为明显. 进一步验证了 CNMP 方法能够更好地处理码噪声和多路径误差影响.

应当说明, CNMP 和 CNMC 方法, 都引入了第二个频点的载波观测量作为码噪声和多路径误差处理的辅助观测量, 适用于接收机能够实现双频或多频观测的情况; 对于仅能实现单频观测的接收机, 传统的单频平滑方法更为适用.

上述评估结果, 仅使用了单频伪距进行定位解算, 对于未来多频双星座 (dual-frequency multi-constellation, DFMC) SBAS 的定位精度评估, 因双频无电离层组合观测的引入, 伪距码噪声和多路径误差将会因组合系数而明显放大, 对定位精度尤其是垂直精度会产生重大的影响, 使用 CNMP 方法对伪距码噪声和多路径误差进行处理的劣势将会更加明显.

3 结束语

本文在详细介绍当前三种伪距码噪声和多路径误差处理方法的基础上,利用美国 WAAS 监测站数据和 IGS 站点数据对三种方法处理后的定位精度进行了评估。评估结果表明:CNMP 方法能够有效消除原始伪距码噪声和多路径误差对于定位精度的影响,相较于单频平滑方法和 CNMC 方法,WRS 站点 95% 水平定位精度分别提升 0.08 m 和 0.2 m,95% 垂直定位精度分别提升 0.19 m 和 0.47 m,垂直方向精度提升明显。

本文的结果能够对后续 BDSBAS 服务性能评估、民航测试认证以及未来 DFMC SBAS 的技术发展提供参考。

参考文献

- [1] 邵搏. 混合星座导航系统的用户差分距离误差完好性关键技术研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2012.
- [2] SHAO B, DING Q, GENG Y C, et al. BDSBAS status update report [C]//International Civil Aviation Organization Navigation Systems Panel Joint Working Groups – Eighth Meeting, 2021.
- [3] 张键, 邵搏, 熊帅, 等. GNSS 广域差分改正数估计方法研究 [J]. 导航定位与授时, 2023, 10(2): 82-92.
- [4] 魏以宽, 厉芳婷, 唐晓霏, 等. 基于省级区域地基增强系统的北斗三号系统卫星数据评估分析 [J]. 全球定位系统, 2023, 48(2): 81-87.
- [5] RTCA-DO-229E. Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area

Augmentation System Airborne Equipment[S]. 2016.

- [6] 常志巧, 胡小工, 郭睿, 等. CNMC 与 Hatch 滤波方法比较及其在北斗相对定位中的精度分析 [J]. 中国科学 (物理学力学天文学), 2015, 45(7): 48-56.
- [7] SHALLBERG K, FANG S. WAAS measurement processing: current design and potential improvements[C]//2008 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, 2008. DOI: 10.1109/PLANS.2008.4570014
- [8] SHALLBERG K, SHLOSS P, ALTSHULER E, et al. WAAS measurement processing, reducing the effects of multipath[C]//Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2001), 2001: 2334-2340.
- [9] FAA William J Hughes Technical Center. Wide area augmentation system performance analysis report [R]. 2024.
- [10] 杨甜甜, 李锐, 陈杰, 等. WAAS 性能评估 [C]// 第八届中国卫星导航学术年会, 2017.

作者简介

张键 (1993—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为星基增强技术差分完好性处理和性能评估. E-mail: 1063865346@qq.com

邵搏 (1983—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为星基增强技术和差分完好性算法. E-mail: shaobo@cetc-pnt.com

丁群 (1967—), 男, 硕士, 研究员, 研究方向为卫星导航技术、北斗卫星导航系统工程. E-mail: 13991202985@139.com

Research on code noise and multipath error processing methods of satellite-based augmented system

ZHANG Jian, SHAO Bo, DING Qun, LI Pingli, WU Xianbing
(The 20th Research Institute of CETC, Xi'an 710068, China)

Abstract: The Satellite Based Augmentation System (SBAS) uses the pseudorange measurement corrections to enhance the integrity of navigation satellites, the code noise and multipath error processing accuracy are important factors affecting the service performance of the system and the accuracy of user positioning. In this paper, three different methods for dealing with raw pseudorange code noise and multipath error are introduced, including the single-frequency smoothing method, the code noise and multi-path correction (CNMC), and the code noise multipath method (CNMP) used by the Wide Area Augmentation System (WAAS). Through the data of the satellite-based augmentation system in operation, the influence of different code noise multipath error methods on the user's positioning accuracy is verified. The results show that CNMP can effectively eliminate the influence of code noise and multipath error in the service performance evaluation of satellite-based augmentation system, and the horizontal accuracy of 95% is increased by 0.2 m, and the vertical positioning accuracy of 95% is increased by 0.47 m.

Keywords: SBAS; code noise and multipath error; carrier phase smoothing; CNMC; CNMP