

赵镇,陈刚,胡志刚,2020. 星基增强系统 L1 频段信息服务性能分析. 中国地震,36(4):912~923.

星基增强系统 L1 频段信息服务性能分析

赵镇¹⁾ 陈刚^{2,3)} 胡志刚⁴⁾

1) 天津市测绘院, 天津 300381

2) 中国地质大学(武汉), 海洋学院, 武汉 430074

3) 中国地质大学(武汉)地质探测与评估教育部重点实验室, 武汉 430074

4) 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 武汉 430079

摘要 在北斗全球导航服务进程中,北斗星基增强服务的建设是我国卫星导航事业自身建设和不断完善发展的内在需求,更是我国卫星导航系统标准化建设的必然要求。本文基于星基增强信息定位原理,研究并实现星基增强系统的标准定位算法,采用 IGS 站点数据及增强信息电文,对 WAAS 与 EGNOS 系统服务性能进行分析评估,在“陆态网络”数据处理中,加入 SBAS 信息也可对相关误差进行改正。结果表明,加入播发的差分改正信息定位精度相对于伪距单点定位显著提高,平面方向统计均方根残差优于 1m,高程方向优于 1.2m;研究发现受地面参考站分布区域以及电离层、观测星座的影响,WAAS 和 EGNOS 在定位服务性能覆盖范围内均表现出一定的区域性。从总体分析来看,不同系统空间段 GEO 卫星播发 SBAS 消息特性不一,均满足单频定位需求,EGNOS 稳定性低于 WAAS 系统,播发消息时有中断现象,在实时单频定位性能方面,WAAS 的服务性能较 EGNOS 得到更优的解算结果。

关键词: WAAS EGNOS 实时差分 区域评估 SBAS

[文章编号] 1001-4683(2020)04-0912-12 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

GNSS(Global Navigation Satellite System)导航系统在全球范围提供米级左右精度的基本导航服务,满足大多数用户的精度要求,然而对于民航系统进近而言,基本导航服务的精度和完好性远远不能满足其要求(Enge et al,1996;Loh et al,1995),为了提升 GNSS 系统的性能,星基增强系统率先在航空、航海领域得到了广泛应用。WAAS 是由美国交通运输部(DOT)和美国联邦航空局(FAA)建设的服务于北美地区的星基增强系统(SBAS),对 GPS 定位性能进行了增强,在生命安全服务、经济增长、资源节约等领域发挥了重要作用(宋伟琳等,2007)。EGNOS 是由欧洲航天局(ESA)、欧洲联盟(EU)和欧洲航空安全组织(EUROCONTROL)联合规划的服务于欧洲范围内的 SBAS。目前,全球范围内已经建设完成的星基增强系统还包括俄罗斯的差分改正监测系统(SDCM)、印度的 GPS 辅助型静地轨道增强导航系统(GAGAN)和日本多功能卫

[收稿日期] 2020-02-28; [修定日期] 2020-09-08

[项目类别] 国家自然科学基金(41674015)资助

[作者简介] 赵镇,男,1994年生,硕士研究生,主要从事 GNSS 精密定位算法的研究。E-mail:zhaozhezhen@163.com

陈刚,通讯作者,男,1971年生,教授,主要从事大地测量、地灾监测的研究。E-mail:ddwhcg@cug.edu.cn

星增强系统(MSAS),韩国的 KASS(Bang et al,2014)和中国的 SBAS 系统(Yang et al,2019)正在实验验证阶段。WAAS 与 EGNOS 等星基增强系统定位性能的相关研究对北斗星基增强系统(BDSBAS)系统的建设运行有重要的借鉴意义。

Nie 等(2019)对现已运行的五大星基增强系统在轨道、钟差、电离层改正等方面进行评估,研究发现,SDCM 的轨道径向、切向和卫星钟差改正精度最高,其次是 WAAS 和 EGNOS,而 MSAS 和 GAGAN 的改正精度较差,SDCM、EGNOS、WAAS 的电离层校正精度约为 0.5m,改正效果优于广播星历校正,MSAS 和 GAGAN 系统 SBAS 校正的准确性明显低于其他系统。SBAS 增强信息在中国区域服务性能及定位精度也逐步得到了验证和应用(刘翔等,2019;毛琪等,2017;雷艳等,2016;楼益栋等,2016),在 GPS 基本导航服务的基础上加入增强信息,定位结果可实现 20%~50%的精度提高,高精度定位的数据处理进一步还可用于地壳变形动态特性研究(王迪晋,2016;朱治国等,2018)。本文基于 SBAS 定位原理开发实现支持五大星基系统的精密定位算法,针对 WAAS 系统与 EGNOS 系统增强信息电文的播发特性以及系统连续性进行研究分析,评估 SBAS 在不同区域范围内的服务性能。

1 星基增强系统定位原理

WAAS 与 EGNOS 等星基增强系统(图 1)均是由大量分布广泛的监测站(位置已知)对导航卫星进行监测,由地球同步卫星(GEO)向用户播发改正数信息(喻思琪等,2019)。对 GNSS 卫星播发的广播星历和增强电文信息的联合定位,可实现对导航系统定位精度的改进和完好性性能的提高。

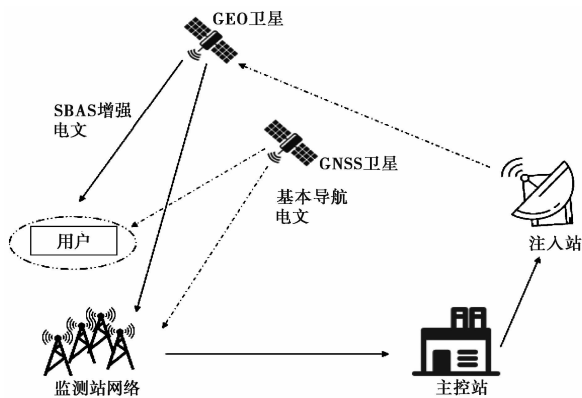


图 1 SBAS 系统基本结构

1.1 SBAS 电文信息解析

WAAS 与 EGNOS 等播发的 SBAS 电文遵循 RTCA-DO-229D 标准协议(朱治国等,2018),相应的电文播发信息、解码方式一致。通过 GEO 卫星播发慢变、快变改正数、格网形式的电离层延迟改正以及完好性等增强信息(Aleshkin et al,2019)。L1 频段每条电文信息均为 250bit,分别包含电文类型标识、数据块、校验码等信息,播发频率为 1Hz。不同信息类型所播发的信息内容相互关联,采用数据版本号(IOD)对信息进行标识(RTCA,2001),包括 $IODE_k$ 、 $IODC_k$ (星历和星钟的数据版本号)、 $IODP$ (当前 PRN)、 $IODF_j$ (快变修正参数的版本号)、 $IODI$ (电离层格网掩码版本号),关联方式如图 2 所示。

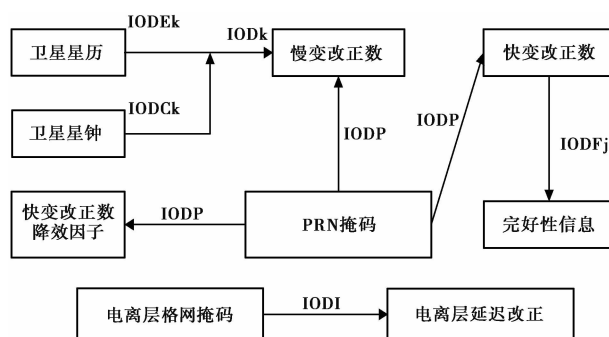


图 2 SBAS 播发消息关联方式

对电文信息解码及关联,获得差分改正数,以提高轨道钟差等产品的精度,进而改善基本定位服务性能。

1.2 增强信息单频定位算法

1.2.1 星历改正

已知卫星星历差分改正数及其变化率,得到卫星星历差分改正值

$$\begin{bmatrix} dx_k \\ dy_k \\ dz_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{dx} \\ \dot{dy} \\ \dot{dz} \end{bmatrix} (t - t_0) \quad (1)$$

其中, $[dx_k \ dy_k \ dz_k]^T$ 表示根据播发信息计算得到的卫星星历差分改正数, $[dx \ dy \ dz]^T$ 与 $[\dot{dx} \ \dot{dy} \ \dot{dz}]^T$ 分别表示播发的卫星星历差分改正数及其变化率, t 为历元时刻, t_0 为差分改正数的时刻。在 SBAS 播发的 25 号电文信息中,如果速度标识为 1,则表示该信息不但播发了星历差分改正数,而且播发了其变化率;否则,星历差分改正数变化率为 0。另外,如果当前解算历元与星历差分改正数播发历元的时间差大于最大更新间隔,该差分改正数无效。

经过星历差分改正的卫星位置为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{\text{brdc}} \\ Y_{\text{brdc}} \\ Z_{\text{brdc}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dx_k \\ dy_k \\ dz_k \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, $[X \ Y \ Z]^T$ 表示差分改正之后的卫星坐标, $[X_{\text{brdc}} \ Y_{\text{brdc}} \ Z_{\text{brdc}}]^T$ 为由广播星历计算得到的卫星坐标。

1.2.2 星钟改正

已知卫星钟差差分改正数及其变化率,可以得到卫星钟差差分改正值 Δt

$$\Delta t = d\delta t + d\delta \dot{t}(t - t_0) \quad (3)$$

其中, $d\delta t$ 、 $d\delta \dot{t}$ 为卫星钟差差分改正数及其变化率。根据广播钟差计算得到卫星钟差,经星钟差分改正后的卫星钟差为

$$\Delta t_{\text{L1}} = \Delta t_{\text{brdc}} + \Delta t \quad (4)$$

其中, Δt_{brdc} 为经广播星历计算得到的卫星钟差。SBAS 快变改正数为星钟改正的快变部分, 以 PRC(快变改正数)表示, 用于进一步改善广播钟差的精度。PRC 不在电文中播发, 而通过 PRC 的差分进行估算(RTCA, 2001), 有

$$\text{PRC}_{\text{corrected}}(t) = \text{PR}_{\text{mea}}(t) + \text{PRC}(t_{\text{of}}) + \text{PRC}(t_{\text{of}})(t - t_{\text{of}}) \quad (5)$$

其中, $\text{PRC}_{\text{corrected}}(t)$ 代表修正后的伪距; $\text{PR}_{\text{mea}}(t)$ 代表当前时间的观测伪距; t_{of} 代表快变改正数的参考时间, 定义为播发当前 PRC 的信息类型的参考时间; $\text{PRC}(t_{\text{of}})$ 为修正量的变化率, 可由式(6)得到

$$\text{PRC}(t_{\text{of}}) = \frac{\text{PRC}_{\text{current}} - \text{PRC}_{\text{previous}}}{\Delta t} \quad (6)$$

其中, $\text{PRC}_{\text{current}}$ 代表最近一次的快变改正数, $\text{PRC}_{\text{previous}}$ 代表前一次的快变改正数, Δt 为 2 次参考时间差。得到钟差的快变部分后, 将其加到已经过慢变改正数改正的卫星钟差上, 可得到最终改正后的卫星钟差。

1.2.3 电离层延迟改正

电离层信息一般以电离层格网的形式给出, 即按照经纬度将全球分为一定的格网, 给出格网点的垂直电离层延迟(袁运斌等, 2017), 选取距离该位置最近的 4 个格网点上的电离延迟进行双线性内插, 即可得到自身位置的电离层延迟。

电离层穿刺点(IPP)是接收机与某一颗卫星视线对应电离层穿刺点所在的地理位置(图 3), 用地理经纬度 (φ_p, λ_p) 表示, 周围 4 个格网点的位置分别用 $(\varphi_i, \lambda_i, i = 1, 2, 3, 4)$ 表示, 格网点垂直电离层延迟用 $\text{VETC}_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 表示, 穿刺点与 4 个格网点的距离权值分别用 $\omega_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 表示。穿刺点周围至少有 3 个格网点标识为有效时, 可以内插出穿刺点处的电离层延迟

$$\text{ion}_p = \frac{\sum_{i=1}^4 \omega_i \cdot \text{VTEC}_i}{\sum_{i=1}^4 \omega_i} \quad (7)$$

定义 $x_p = \frac{\lambda_p - \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}, y_p = \frac{\phi_p - \phi_1}{\phi_2 - \phi_1}$, 则权值分别为

$$\begin{aligned} \omega_1 &= (1 - x_p)(1 - y_p) \\ \omega_2 &= x_p(1 - y_p) \\ \omega_3 &= x_p y_p \\ \omega_4 &= (1 - x_p)y_p \end{aligned} \quad (8)$$

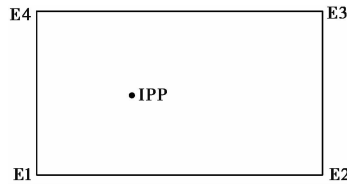


图 3 用户穿刺点与所在格网点示意图

如果该观测历元某一个格网点标识为无效,则其对应的权值为 0。当建立了穿刺点处的垂直延迟后,通过与倾斜因子相乘得到相应的电离层改正 (Rovira-garcia et al, 2016)。将 SBAS 增强信息与伪距单点定位算法结合,得到改正后定位坐标,处理流程如图 4 所示。

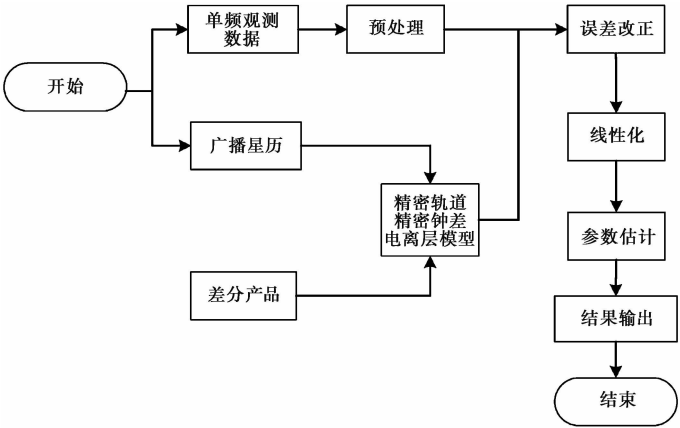


图 4 星基增强系统定位算法流程

2 增强信息定位性能评估

2.1 数据来源

美国联邦航空管理局 (FAA) 的国家卫星实验台 (NSTB) 是基于 WAAS 的研发平台,免费开放 WAAS 的 SBAS 电文信息,可提供相关电文下载^①。欧洲航天局向社会公布 EGNOS 的电文信息^②,但不同的管理机构发布的 SBAS 信息格式不一。目前 WAAS 系统通过 Galaxy 15 (PRN 135) 和 Anik F1R (PRN 138) 2 颗 GEO 卫星播发增强电文,原始数据 (二进制形式) 需经过格式转换得到标准 RTCA 电文形式,EGNOS 利用 SES-5 (PRN 136) 和 Astra 5B (PRN 123) 播发信息,提供以小时分隔的增强信息电文,在进行 SBAS 系统基本定位时,首先要进行电文信息的解码得到所需的改正信息。

2.2 信息播发更新特性

SBAS 消息以队列的形式进行播发,一般而言,每秒播发 1 条差分或完好性信息,不同类型的消息播发频率不同。RTCA 规定了各类信息的最大更新频率,如表 1 所示。各星基增强系统均根据自身系统特性及信息重要程度执行不同的播发策略,黄双临等 (2019) 通过对 WAAS 与 EGNOS 的电文播发特性研究发

表 1 最大更新频率				
消息 ID	信息类型	信息内容	最大更新时间 /s	超时时间 /s
1	PRN 掩码	播发增强信息的 PRN 标记	120	600
2~5	快变改正数	快变改正数、UDREI	6	12
7	快变改正数降效	卫星 ai 值	120	240
18	电离层格网掩码	IGP, 边带号	300	1200
25	慢变改正数	差分信息	120	240
26	电离层延迟	延迟改正数	300	600

① ftp://ftp.nstb.tc.faa.gov
② ftp://ems.estec.esa.int



现,WAAS 与 EGNOS 系统大部分电文信息并无固定的播发规律。在实时定位中,若 PRN 掩码、慢变、快变以及电离层信息更新频率大于超时时间,SBAS 定位服务性能会受到不同程度的影响。

由 GEO 卫星播发电文信息统计(表 2)可以看出,对于 WAAS 和 EGNOS 系统而言,同一增强系统内不同的 GEO 卫星播发增强电文的统计信息一致,播发电文信息方式较为可靠稳定。由于不同星基系统播发电文信息策略的不一致性,WAAS 播发完好性信息及快变改正数的频率较为固定,EGNOS 播发频率略高于 WAAS,但所播发信息中超出最大更新时间的信息数目明显多于 WAAS,对单频单点定位而言,当式(6)中 Δt 大于该信息时效期

时,快变改正数无效,将影响该时刻的定位结果。电离层信息以格网形式播发,通过信息类型 18 播发电离层格网点(IGPs)掩码,用于 L1 频段定位的电离层改正。由于一帧电文无法广播过多的格网点,将格网点划分为 11 个边带,每帧电文表示 1 个边带的可能的格网点,当 PRN 掩码或电离层格网掩码发生更新时,新的掩码将会重复多次,以保证所有的用户均能接收并使用新的掩码,从而保证较高的连续性,这一特性也导致了 WAAS 与 EGNOS 系统没有按固定的频率播发信息。电离层延迟及慢变改正数信息播发频率均在最大更新时间以内,满足单频单点定位服务性能。

2.3 播发连续性

广域高精度实时定位一直是 GNSS 导航领域研究的热点,依靠 SBAS 系统提供的实时差分改正信息进行实时精密定位也不失为一种选择。显而易见,PPP 精密定位依赖于精密卫星轨道和钟差产品,而这些精密产品通常在约 11 天后获得(赵禹,2016)。通过 SBAS 播发的差分改正信息,可以实时计算得到卫星轨道误差和卫星钟差,基于改正信息进行 PPP 定位可以达到分米级精度(Heßelbarth et al,2013)。因此,增强系统播发差分信息的稳定性严重影响到实时定位的性能。WAAS 与 EGNOS 不同的系统播发差分信息的连续性各异,不同 GEO 卫星播发信息的完整性也有所区别。本文统计了年积日 2018 年 30~130 共 101 天的不同卫星播发差分消息的数量,见表 3。

SBAS 每颗 GEO 卫星每天播发数量为 86400 条,PRN123 和 PRN136 卫星属于 EGNOS 系统,相对于 WAAS 系统而言,消息丢失现象发生较为

表 2 GEO 卫星播发电文信息统计

信息类型	PRN123		PRN136		PRN135		PRN138	
	频率/s	数量	频率/s	数量	频率/s	数量	频率/s	数量
1	80	0	80	0	8~109	0	10~108	0
2	4~5	21	4~5	21	6	1	6	1
3	4~5	21	4~5	21	6	0	6	0
4	4~5	21	4~5	21	6	2	6	2
7	76~85	0	75~82	0	1~113	0	7~114	0
18	3~172	0	1~172	0	1~190	0	1~186	0
25	1~61	0	4~58	0	1~38	0	1~40	0
26	1~44	0	1~37	0	1~36	0	1~48	0

注:数量指不同信息类型播发间隔大于规定最大更新时间的数量。

表 3 WAAS 与 EGNOS 播发消息缺失数目统计

年积日/天	EGNOS		WAAS	
	PRN123	PRN136	PRN135	PRN138
30~50	0	0	0	5
51~70	36	52807	0	0
71~90	1633	517148	4	11
91~110	2582	88778	4	0
111~130	776	69685	4	12

频繁,可以看出 PRN136 卫星稳定性较差,若 SBAS 消息丢失过多,将无法用于实时定位。选取 EGNOS 系统 2018 年第 109 天的 SBAS 数据进行标准定位,结果如图 5 所示。由图可见,PRN123 卫星丢失时长 41min 左右的 SBAS 消息(共计 2557 条),第 33~151 历元解算失败,而 PRN136 卫星连续丢失 55020 条消息,无法继续进行单点定位,由于卫星传播消息的不稳定性,定位性能明显降低。

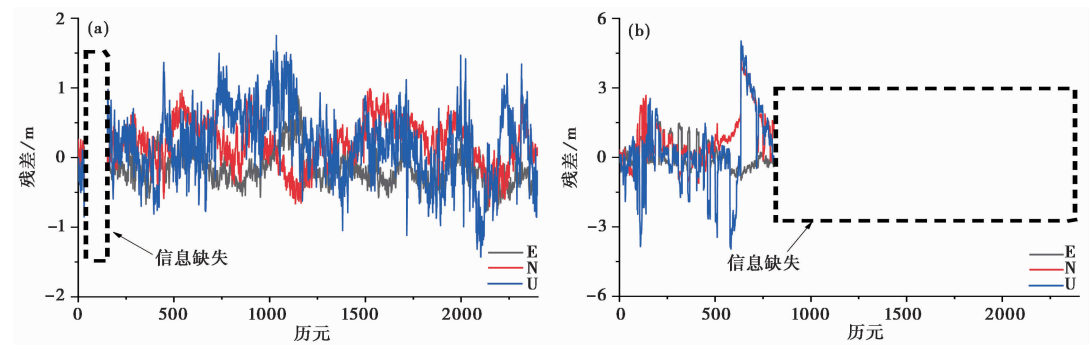


图 5 EGNOS 系统 PRN123(a)、PRN136(b)消息缺失定位残差

2.4 标准定位性能评估

在北美及欧洲地区 5 个随机站点选取年积日 2018 年 68~74 连续 7 天的测试数据,历元采样率为 30s。分别进行单频 SPP 定位处理以及 SBAS 基本定位解算,以 IGS 提供的跟踪站坐标为参考值,统计分析不同定位模式下的平面和高程方向的外符合精度。单频定位解算策略如表 4 所示。

表 4 单频定位解算策略					
类别	频段	截至高度角	电离层模型	对流层模型	卫星星历
WAAS/EGNOS	L1	10°	SBAS	SBAS	SBAS+Broadcast
SPP	L1	10°	Klobuchar	Saastamoinen	Broadcast

表 5 给出了 WAAS 和 EGNOS 覆盖区域每个站点定位误差的均方根值,可以看出,在平面方向,北美地区 WAAS 覆盖区域定位误差的均方根值在 0.4~0.8m 以内浮动,欧洲地区经过 EGNOS 播发的改正数处理后得到的定位误差在 1m 以内,相比于单频伪距定位,北美和欧洲地区单点定位精度均有不同程度的提升,由于不同站点的观测环境不同,单频伪距定位的精度高低不一;在垂直方向,星基增强系统的定位效果精度提升明显,高程定位均方根误差控制在 1.2m 以内,与 FAA 发布的 WAAS 运行报告中的定位精度一致。WAAS 覆盖区域大部分站点的高程误差在 0.6~0.9m 左右,高程改正精度略优于 EGNOS 覆盖区域。

在星基增强系统实时导航定位精度方面,对位于加拿大地区的 ALBH 站点以及位于欧洲地区的 MATE 站点进行实验,2 个站点均位于 SBAS 覆盖区域的中部位置。差分改正数信息的 IODE 应与 GNSS 系统播发的星历、星钟严格对应,并且不同系统 SBAS 信息播发策略的不同,因此可对 1 天时间内 2400 历元(30s 采样率)连续观测数据进行解算,如图 6 所示。

由图 6 可以看出,对广播星历经过轨道改正以及电离层、对流层改正(Penna et al,2001; Felski et al,2011)后(图 6 黑色曲线),历元间定位精度得到明显提升,E、N 方向误差控制在 1m 以内,U 方向误差在 1.5m 以内,相对于 SPP 精度提升约 50%~60%;在不同历元之间,

WAAS 和 EGNOS 系统定位结果的变化幅度减小,而单点定位得到结果(图 6 红色曲线)幅度较大,稳定度偏低。且通过对比图 6(a)、6(b)可以得出,WAAS 系统相对于 EGNOS 系统能得到更为可靠、稳定的结果。

对所有历元的解算结果进行统计,得到 ALBH 站点和 MATE 站点的位置残差分布,如图 7、图 8 所示,其分布均符合高斯正态分布,由于 2 个站点均位于北半球,受增强卫星结构和观测点纬度的影响,在 N 方向展现出一定的偏差。对于 99.99% 的误差范围,WAAS 和 EGNOS 的 E、N、U 方向定位残差均在 2m 以内;在 95%的误差范围内,

表 5 WAAS 与 EGNOS 系统定位误差与伪距单点定位误差

站点	水平			垂直		
	WAAS /m	SPP /m	改善率 /%	WAAS /m	SPP /m	改善率 /%
GODE	0.749	0.894	16.22	1.107	2.680	58.69
PIE1	0.550	0.911	39.63	0.728	2.348	68.99
PRDS	0.513	1.529	66.45	0.684	2.078	67.08
SCH2	0.460	1.463	68.56	0.687	1.699	59.56
YELL	0.454	0.917	50.49	0.836	2.875	70.92

站点	水平			垂直		
	EGNOS /m	SPP /m	改善率 /%	EGNOS /m	SPP /m	改善率 /%
GLSV	0.834	1.456	42.72	1.025	2.780	63.13
GRAZ	0.668	1.415	52.79	0.890	2.856	68.84
ONSA	0.662	1.371	51.71	1.026	1.980	48.18
TLES	0.537	1.314	59.13	0.870	2.083	58.23
WSRT	0.638	0.833	23.41	1.171	2.522	53.57

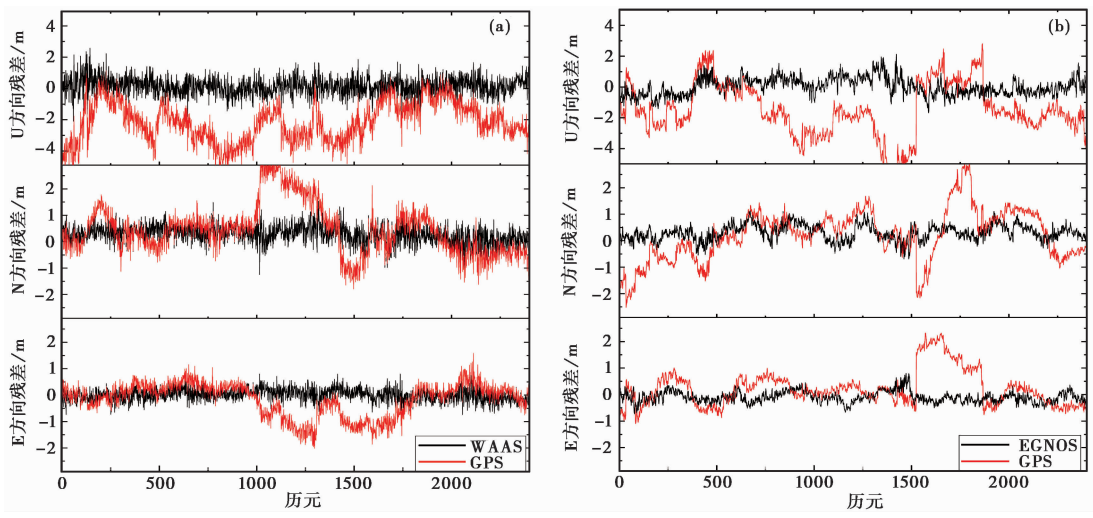


图 6 ALBH 站(a)与 MATE 站(b)历元间定位残差序列

星基增强信息定位平面方向的精度已达到亚米级。由此可见 WAAS 和 EGNOS 在高置信度下的定位性能也得到了较大优化。

2.5 覆盖区域定位性能

本文随机选取了位于北美和欧洲地区不同纬度和经度的 20 个站点连续 5 天的数据,针对每个站点得到的定位残差,统计其在水平和垂直方向的均方根值,得到不同覆盖区域的定位精度情况,如图 9、10 所示。

由图 9 可以看出,在 WAAS 覆盖区域,位于边缘地带的站点(GUAT)定位精度有明显的

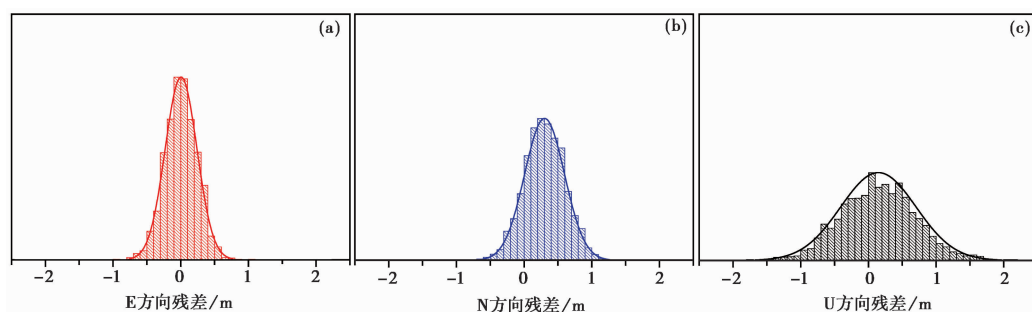


图 7 WAAS 覆盖区域 ALBH 站定位残差分布直方图

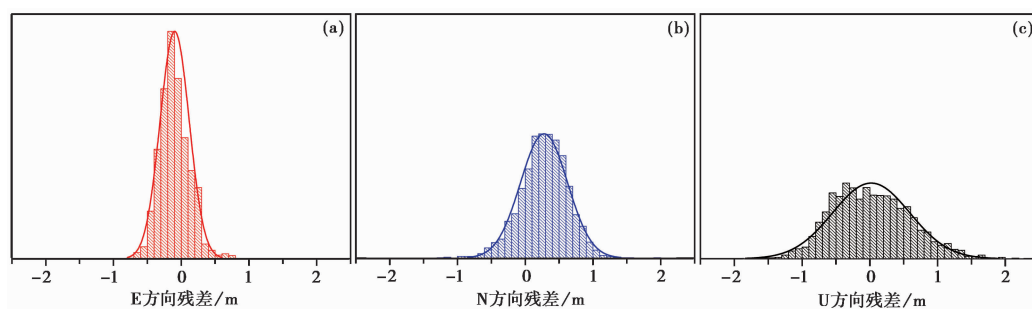


图 8 EGNOS 覆盖区域 MATE 站定位残差分布直方图

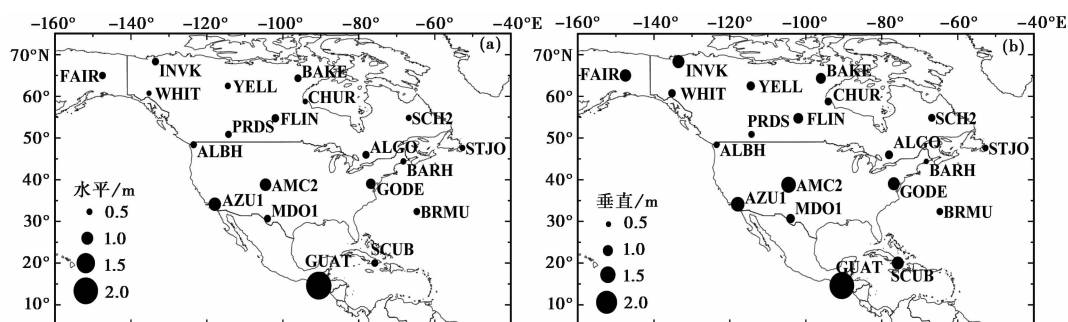


图 9 WAAS 覆盖区域增强信息定位水平(a)和垂直(b)方向误差分布示意

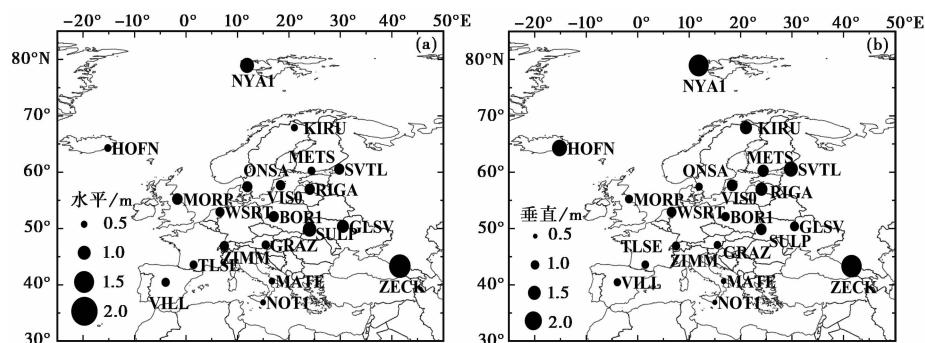


图 10 EGNOS 覆盖区域增强信息定位水平(a)和垂直(b)方向误差分布示意图

降低,说明在覆盖区域的边缘地带,SBAS 电文信息的利用率较低;在垂直方向上(图 9(b)),误差具有一定的区域性,南部地区的改善精度要略差于北部地区,但整体定位误差均在 2m 以内;在水平方向上(图 9(a)),WAAS 覆盖区域东北部的定位效果最好,可达到 0.5m 的精度。在 EGNOS 覆盖区域,水平方向上(图 10(a)),西南部的定位精度要明显优于东北部,另外在其边缘地带,虽然可以接收到 SBAS 改正信息,但改正效果明显变差。研究发现,由于 SBAS 改正信息由地面广域参考站精确测量得到,参考站的分布范围也会影响到星基增强系统在不同区域的定位精度,另一面区域性定位精度的不同,也与 GPS 观测星座条件和电离层改正精度综合相关(Shi et al,2017)。将所有站点高程和平面方向的均方根误差并列展示,得到图 11,可以看出,WAAS 在覆盖区域的水平和高程方向平均定位精度要高于 EGNOS,进一步说明 WAAS 所提供的定位服务性能要优于 EGNOS 系统。

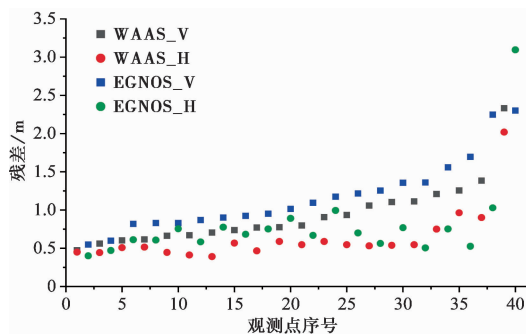


图 11 WAAS 与 EGNOS 各站点定位残差效果对比

3 结语

本文基于 SBAS 增强信息定位原理,实现了 L1 频段差分伪距单点定位算法,研究分析 WAAS 与 EGNOS 覆盖区域增强信息定位性能,得到不同覆盖区域平均定位残差的分布情况,得到如下结论:

(1)通过增强信息定位与伪距单点定位的性能对比评估,表明 WAAS 与 EGNOS 的覆盖区域加入增强信息后,定位性能相对于 SPP 有显著提升,平面方向的均方根值在 1m 的残差范围以内,在高程方向,统计误差优于 1.2m;从 1 天内连续历元间定位精度分析来看,星基增强系统定位精度提升明显,E、N 方向每一历元残差控制在 1m 以内,U 方向残差在 1.5m 以内,相对于单点定位得到更为稳定可靠的结果。

(2)从不同覆盖区域的分析来看,WAAS 与 EGNOS 均表现出一定的区域性,显然,边缘地区的定位精度明显降低。在覆盖区域内,由于地面参考站覆盖的区域不均匀性以及观测星座和电离层的综合影响,WAAS 区域内东北部的定位效果最好,EGNOS 区域内西南部的定位精度优于东北地区。

(3)从 WAAS 与 EGNOS 的定位服务性能对比情况可以看出,WAAS 单频定位服务性能在系统可用性、连续性、定位精度可靠性等方面要优于 EGNOS 系统。

由于星基增强系统最大的优势在于完好性的监测,完好性增强信息以及相关降效参数的算法仍需要进一步评估研究,未来几年 SBAS 各系统也将会陆续实现双频服务。另一方

面,SBAS 差分信息通过卫星实时传输,不需要额外的数据链路,在海洋、沙漠地区的应用也会得到进一步推广。第一颗北斗星基增强系统的 GEO 卫星已于 2018 年 11 月发射成功,现已进入实验运行阶段,该系统中兼具双频多星座(DFMC)的增强服务模式将利用双频观测消除电离层延迟误差,相对单频增强模式具有更高的系统可用性、连续性和精度。

致谢: 本文采取的数据来源于 IGS、NSTB 以及 ESA 等机构,图件采用 origin 以及 visio 绘制,审稿专家在百忙之中对本文提出了宝贵意见,在此一并表示感谢。

参考文献

- 黄双临,辛洁,王冬霞,等,2019. 星基增强系统电文及播发特性研究. 数字通信世界, **2**(2):4~6.
- 雷艳,高延铭,王金磊,等,2016. 北海区 MSAS 单点定位精度分析. 海洋地质前沿, **32**(12):65~70.
- 刘翔,万茜,曲鹏程,2019. WAAS 和 MSAS 增强定位性能评估与分析. 见:第十届中国卫星导航年会论文集——S07 卫星导航增强技术. 北京:中国卫星导航学术年会组委会,22~26.
- 楼益栋,郑福,龚晓鹏,等,2016. QZSS 系统在中国区域增强服务性能评估与分析. 武汉大学学报·信息科学版, **41**(3):298~303.
- 毛琪,麻智超,卢满宏,等,2017. GAGAN 系统在北京地区定位性能测试与评估. 遥测遥控, **38**(4):53~57.
- 宋炜琳,谭述森,2007. WAAS 技术现状与发展. 无线电工程, **37**(6):50~52.
- 王迪晋,李瑜,聂兆生,等,2016. 呼图壁地下储气库地表盖层变形的 GPS 研究. 中国地震, **32**(2):397~406.
- 喻思琪,张小红,郭斐,等,2019. 卫星导航近技术进展. 航空学报, **40**(3):11~32.
- 袁运斌,霍星亮,张宝成,2017. 近年来我国 GNSS 电离层延迟精确建模及修正研究进展. 测绘学报, **46**(10):1364~1378.
- 赵禹,2016. GNSS 广域差分定位及增强技术研究. 硕士学位论文. 哈尔滨:哈尔滨工程大学.
- 朱治国,秦姗兰,艾力夏提·玉山,等,2018. 基于 GPS 的精河 $M_s 6.6$ 地震前地壳变形动态特征研究. 中国地震, **34**(3):428~434.
- Aleshkin A P, Myslivtsev T O, Nikiforov S V, et al, 2019. Calculation of navigation corrections for a single-frequency GNSS receiver based on satellite radio occultation data. Gyroscopy Navig, **10**(1):15~20.
- Bang E, Lee J, 2014. Considerations on ionospheric correction and integrity algorithm for Korean SBAS. J Position Navigation Timing, **3**(1):17~23.
- Enge P, Walter T, Pullen S, et al, 1996. Wide area augmentation of the global positioning system. Proc IEEE, **84**(8):1063~1088.
- Felski A, Nowak A, Woźniak T, 2011. Accuracy and availability of Egnos-results of observations. Artif Satellites, **46**(3):111~118.
- Heßelbarth A, Wanninger L, 2013. SBAS orbit and satellite clock corrections for precise point positioning. GPS Solut, **17**(4):465~473.
- Loh R, Wulschleger V, Elrod B, et al, 1995. The U.S. Wide-Area Augmentation System(WAAS). Navigation, **42**(3):435~465.
- Nie Z X, Zhou P Y, Liu F, et al, 2019. Evaluation of orbit, clock and Ionospheric corrections from five currently available SBAS L1 services; methodology and analysis. Remote Sens, **11**(4):411.
- Penna N, Dodson A, Chen W, 2001. Assessment of EGNOS tropospheric correction model. J Navigat, **54**(1):37~55.
- Rovira-Garcia A, Juan J M, Sanz J, et al, 2016. Accuracy of ionospheric models used in GNSS and SBAS; methodology and analysis. J Geod, **90**(3):229~240.
- RTCA, 2001. Minimum operational performance standards for global positioning system/wide area augmentation system airborne equipment. Washington DC:Radio Technical Commission for Aeronautics.
- Shi C, Zheng F, Lou Y D L, 2017. Research and evaluation of BDS real-time wide-area precise positioning service system. Acta Geodaet Cartograph Sin, **46**(10):1354~1363.
- Yang Y X, Gao W G, Guo S R, et al, 2019. Introduction to BeiDou-3 navigation satellite system. Navigation, **66**(1):7~18.

Service Performance Analysis on L1 Frequency of Satellite-based Augmentation System

*Zhao Zhen*¹⁾ *Chen Gang*^{2,3)} *Hu Zhigang*⁴⁾

1) Tianjin Institute of Surveying and Mapping, Tianjin 300381, China

2) College of Marine Science and Technology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3) Key Laboratory of Geological Survey and Evaluation of Ministry of Education China, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4) GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract In the BDS service process, the construction of Satellite-based augmentation system (SBAS) is the internal demand for the self-improvement and continuous improvement of China's satellite navigation industry, and it is also the inevitable requirement of the standardized construction of BDS. Based on the principle of SBAS positioning and related standards, we study and implement the standard positioning algorithm that supports the current SBAS messages. In this paper, service performance of WAAS and EGNOS systems is analyzed by IGS site data and SBAS messages. In the data processing of the Crustal Movement Observation Network of China, the relevant errors can also be corrected with SBAS messages. The results show that the accuracy of positioning by differential correction information is significantly improved relative to single point positioning, with the statistics of horizontal better than 1m, and the vertical statistics better than 1.2m. Both WAAS and EGNOS showed a certain regional feature in the coverage of service performance due to the the ionosphere and observation constellations and distribution area of ground reference stations. Overall, the SBAS message characteristic by different system space segment GEO satellite is inconsistent, which all meet the demand for single-frequency positioning. EGNOS constancy is lower than WAAS, which exists interruption phenomenon. In real-time single-frequency positioning performance, WAAS service performance is better than EGNOS on the computed results.

Keywords: WAAS; EGNOS; Real-time differential; Regional assessment; SBAS