



GNSS 开放服务的监测评估

焦文海^{①*}, 丁群^②, 李建文^③, 卢晓春^④, 冯来平^⑤, 马加庆^⑥, 陈罡^⑥

① 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094;

② 西安导航技术研究所, 西安 710068;

③ 郑州测绘学院, 郑州 450052;

④ 中国科学院国家授时中心, 西安 710600;

⑤ 西安测绘研究所, 西安 710054;

⑥ 中国卫星导航系统管理办公室, 北京 100086

*E-mail: Jiaowh0927@163.com

收稿日期: 2011-03-18; 接受日期: 2011-03-25

摘要 GNSS 开放服务的互操作是卫星导航发展的新趋势, 其服务性能将直接决定用户使用的安全和可靠性; 因此, 开展 GNSS 开放服务的监测评估已成为卫星导航系统供应商和用户关注的焦点. 本文首先系统地提出了 GNSS 开放服务监测评估的要素和方法; 根据需求, 我们设计了基于全向天线、多波束天线和大型抛物面天线分别实现四重、一重逆覆盖跟踪和精细分析的国际 GNSS 监测评估系统(iGMAS)架构, 并对全球布站方案进行了初步的论证. 最后, 介绍了对北斗卫星导航系统开放服务监测评估的相关工作, 并初步验证了系统实现的可行性.

关键词 GNSS, 开放服务, 监测, 评估

PACS: 07.05.Tp, 89.70.+c, 87.16.Xa, 43.60.Gk, 84.40.Ua

1 引言

进入 21 世纪, 北斗卫星导航系统和欧洲 Galileo 卫星导航系统卫星的相继成功发射, 使卫星导航系统由 GPS 和 GLONASS 的两极竞争态势, 转入四大系统竞争与合作的新局面. 导航信号的兼容与互操作是 GNSS 发展的最主要特征. 在兼容与互操作背景下, 具有互操作功能的公开信号有望为全球 GNSS 用户带来质量更高、性能更优的 GNSS 服务. 特别是在卫星可视空域受限的城市峡谷、山区等地区, 具有互操作功能的开放信号可以显著增加可视卫星的数目,

提高导航定位服务可靠性和可用性^[1]. 目前, 已有的和正在计划的 GNSS 开放服务信号主要如表 1 所示.

目前, 四大卫星导航系统已经发布或计划发布各自的开放服务性能规范, 由于各自的条件和认识的不同, 开放服务性能规范无论从形式上还是性能上都可能存在差异, 会造成用户困惑和使用的不便. 此外, 目前尚无针对 GNSS 开放服务信号的服务性能规范, 为确保用户使用安全, 真正达到开放信号互操作的最终目标, 开展 GNSS 开放服务的监测与评估是非常必要的.

开展 GNSS 开放服务的监测与评估, 一方面可对

引用格式: 焦文海, 丁群, 李建文, 等. GNSS 开放服务的监测评估. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41: 521–527

Jiao W H, Ding Q, Li J W, et al. Monitoring and assessment of GNSS Open Services (in Chinese). Sci Sin Phys Mech Astron, 2011, 41: 521–527, doi: 10.1360/132011-359

表 1 GNSS 开放服务信号

Table 1 Signals of GNSS open services

卫星导航系统	频点	频率(MHz)	调制方式	是否参与兼容与互操作
GPS	L1 C/A	1575.42	BPSK(1)	是
	L1C	1575.42	MBOC(6,1,1/11)	
	L2C	1227.6	BPSK(1)	
	L5C	1176.45	QPSK	
Glonass	L1OF/L1OCM	1598.06~1604.40	BPSK	
	L2OF/L1OCM	1242.94~1248.63	BPSK	
	L3 OC	1202.025/1207.14	BPSK	
BeiDou	B1-C	1575.42	MBOC(6,1,1/11)	是
	B2a	1191.795	AltBOC(15,10)	
	B2b			
Galileo	E5a	1191.795	AltBOC(15,10)	是
	E5b			
	E1	1575.42	MBOC(6,1,1/11)	是

单个系统提供第三方监测与性能评估信息,可为导航用户在使用其服务时提供可靠的决策支持信息,从而最大限度地减少可能产生的不利影响,提高系统的服务质量。另一方面,基于兼容与互操作的GNSS系统既可为导航服务的性能和质量带来飞跃,也有可能由于系统间信号干扰问题降低导航服务的性能和质量。开展多系统开放服务的监测与评估可提高用户使用公开信号服务的可靠性;另一方面,从系统角度讲,对多系统公开信号综合性能的监测与评估还可提升系统间的兼容与互操作性能,为多系统的维护和管理提供决策支持信息。

1997年开始,斯坦福大学加入了美国GPS联合计划,具体负责监测评估GPS卫星L波段信号。具体方法是利用一个47 m的大型抛物面天线系统,长期监测GPS的信号功率、码延时、频率及卫星星座,并对信号进行数据采集和性能评估。同时,斯坦福大学对其他国家的卫星导航系统也进行了监测分析。2005年9月,德国宇航研究院(DLR)建立了一个GNSS信号质量的监测评估站。该系统利用一个30 m的大天线系统,可以实现信号的采集和数据离线分析工作,能够进行较高质量的GNSS信号分析。当美国GPS SNV49出现问题时,DLR利用其GNSS信号监测设施,在第一时间发现信号异常并给出一个详尽的信号异常原因分析,为信号异常诊断提供了依据。目前,斯坦福大学和德国宇航研究院已经形成了合作机制,共同对GPS和GALILEO信号进行联合监测评估。

2 监测评估的要素与方法

GNSS开放服务的监测与评估可分解为以下层次:星座状态层、空间信号层、导航信息层以及服务性能层。在进行评估要素和方法的选择、确定时,需从不同用户的需求服务角度出发,综合考虑不同层次要素之间的有机联系,以及独立要素的特点,在面向多系统开放服务的同时,又可顾及单系统开放服务的独立性。最终确定的要素和方法应该具有开放性、扩展性和兼容性,一旦新的系统和新的公开信号出现,监测系统即可开展对该信号的监测与评估。另外,GNSS开放服务的监测与评估更应该强调实时监测、实时发布,真正发挥第三方监测的功能和作用。

2.1 星座状态

星座状态是卫星导航系统实现服务性能的决定性因素之一,其实时监测与评估对于用户安全可靠地使用服务都具有重要意义。星座状态的监测与评估包括以下内容:

2.1.1 星座状态

星座状态是指指定时刻单个及GNSS星座中每颗卫星的工作状态。常用的工作状态可分为:正常工作状态、测试与维护状态、故障状态等。状态描述方式为处于各种状态的卫星数量及其轨位分布。另外,卫星的发射日期、服役年限等也可作为卫星状态的参考。各卫星导航系统独自发布的星座故障和维护管

理的信息也是星座健康状态监测与评估的重要信息来源。

2.1.2 星座 DOP

星座 DOP 是指单个和 GNSS 星座, 处于正常工作状态的卫星在服务范围内的各类 DOP 值, 包括 GDOP, PDOP, HDOP, VDOP 和 TDOP 值等. DOP 作为星座几何构型和布局对于导航定位授时服务误差的影响因子, 综合反映了星座的几何构型和健康状态. 对单系统星座而言, 瞬时 DOP 是最直接的性能评价指标; 对多系统组成的混合星座而言, 瞬时 DOP 亦可作为公共信号互操作导航定位性能的重要参考指标.

2.1.3 可见卫星数

可见卫星数也是反映星座时空状态的重要性能指标. 无论对于单一系统还是多系统星座, 瞬时可见卫星数与瞬时 DOP 具有很强的相关性. 随着 GNSS 公开信号的互操作成为可能, 更多的可见卫星数必然会降低单颗卫星对于服务性能的敏感性, 但会提高观测的冗余度, 从而改善或提高服务的精度、完好性和可用性.

2.2 空间信号

GNSS 空间信号质量监测评估分别从时域、频域、调制域和相关域特性等方面进行全方位多层次的评估.

2.2.1 信号时域特性

利用软件接收机对经过高增益天线采集的数字中频信号进行正交载波剥离和多普勒去除, 得到待分析的基带信号. 画出其时域波形图, 针对单个码片分析其边缘形状、考察码的时间序列、码速率、码片赋形、数字畸变和模拟畸变程度^[2]; 将实际眼图和理想眼图同时图形显示, 观察它们之间的相似度, 并计算眼图相关参数, 如噪声容限等. 从信号的时域特性来评价接收信号的质量.

2.2.2 信号频域特性

主要是利用离线分析软件和标准测量仪器如实时频谱分析仪等, 通过测试空间信号的载波频率、信号功率谱及包络、带宽和中心频率、主瓣零点宽度等

方面, 比较实际信号功率谱与理想信号功率谱之间的差异, 通过对频谱不对称性或失真、信号杂散及载波泄漏等方面指标的评价, 综合考察接收信号的频谱失真程度以及频域其他相关特性.

2.2.3 信号调制域特性

主要是利用离线分析软件构建星座图, 将测量得到的实际信号星座图与理想信号的星座图进行对比, 并构建误差矢量图, 提取 I/Q 支路相位正交性、载波正交性、幅度不平衡性等指标, 考察由于信道失真和噪声干扰等引起的相位及幅度误差, 并由直方图表示信号电平值的概率密度评估信号噪声水平的大小. 另外还可利用矢量信号分析仪, 观察信号星座图, 并读取中心频率偏移、信噪比、EVM 值等测量数据, 画出相应的曲线图并计算标准差, 考察其稳定性.

2.2.4 信号相关域特性

信号的相关域特性, 主要是利用离线分析软件从相关特性曲线、相关损耗、相关特性曲线对称性分析、DLL 鉴相的码延迟及 S 曲线偏差等方面进行分析^[3]. 将实测相关函数与理想复制码序列自相关函数进行对比, 考察相关函数曲线的不对称性、错锁概率是否增加的情况, 评估由于限带滤波、噪声、多径、互相关等引起的相关函数畸变.

2.3 导航信息

导航信息是指卫星导航系统通过导航电文向各类用户提供的卫星星历、卫星钟差、电离层时延、时间系统偏差等参数或数据, 是影响系统服务性能的最重要因素, 是 GNSS 公开信号监测与评估的重要内容之一.

2.3.1 电文的正确性

导航电文正确性的验证包含两方面的内容: 一是电文与 ICD 文件规定的一致性验证, 诸如各类时间信息、星历、星钟、历书、校验信息等参数是否按照 ICD 文件的规定正确设置和更新; 二是电文参数的合理性和有效性检验, 需根据每个参数的具体属性和产生方法进行确定.

2.3.2 电离层时延改正精度

电离层时延改正模型参数对单频用户具有重要

影响. 在各个卫星导航系统中, 电离层模型和参数形式不尽相同. 其精度不仅与模型有关, 还与参数的精度及其更新率有关. 电离层时延改正精度可利用双频或多频伪距观测量计算得到电离层延迟值进行评估.

2.3.3 GNSS 时间偏差精度

GNSS 时间偏差反映的是各卫星导航系统时间基准间的偏差, 是实现 GNSS 兼容互操作的重要基础数据, 其精度将直接影响各类 GNSS 用户设备的 PVT 解算精度, 尤其对授时型设备影响更为明显. GNSS 时间偏差信息的监测对设备有较高要求, 以获得较为可靠的外部精度.

2.3.4 通道频间偏差参数(Tgd)正确性

通道频间偏差参数 Tgd 的监测包含两方面的内容: (i) 不同频率间信号经过星载设备路径时的时间偏差, 该偏差与卫星出厂时的标定值以及信号频率有关; (ii) 同一载波不同调制码之间的时间偏差, 也称为载波与伪码的相位一致性.

2.4 服务性能

卫星导航系统为各类用户提供定位、测速和授时(PVT)等三类基本服务, 导航系统的服务性能常用精度、可用性、完好性和连续性等指标描述^[4].

2.4.1 精度

空间信号精度包括用户测距精度 URE、测速精度 URRE、测加速度精度 URAE 以及授时精度(UTE). 它是评估卫星星历和预报钟差对用户定位、测速和授时误差贡献的大小重要指标. 空间信号精度评估, 需要事后计算得到的精密轨道和钟差.

服务精度用于描述系统用户端定位、测速和授时测量值与真实值的偏差. $\text{精度} = \text{UERE} \times \text{DOP}$, 其中 UERE 由空间信号的测距误差 URE 和用户设备误差 UEE 确定; $\text{UERE} = \sqrt{(\text{URE})^2 + (\text{UEE})^2}$, UERE 与卫星钟误差、星历误差、大气模型误差、多路径影响、接收机钟差误差等有关.

2.4.2 可用性

服务可用性是指在规定的时间内(一个回归周期), 规定的服务区域内, 定位、测速和授时精度满

足规定阈值的时间百分比. 在 UERE 设定时, 根据精度 = $\text{UERE} \times \text{PDOP}$, 服务可用性就转换到 DOP 值可用性.

2.4.3 完好性

服务完好性主要指当导航系统的定位、测速和授时误差超过规定阈值, 并且系统在规定的时间内及时报警的概率. 服务完好性一般用告警阈值、告警时间和危险误导信息(HMI)概率表示. 告警时间是指从系统出现故障开始到系统发出告警所允许的最大时间延迟. HMI 概率是指当前测量值落在告警阈值范围内的危险概率.

2.4.4 连续性

服务的连续性是指在一段时间内和服务区域内, 卫星导航系统连续满足服务精度的时间百分比. 服务的平均连续性可根据卫星的非计划中断条件下的平均故障间隔(MTBF)和平均故障恢复时间(MTTR)进行计算得到.

3 系统架构

3.1 系统组成及其功能

为开展全球范围 GNSS 开放服务的监测评估, 需建设国际 GNSS 监测评估系统(iGMAS). 其基本功能模块包括: 数据监测与采集、数据传输、数据存贮、数据分析与信息发布, 其组成见图 1.

3.1.1 数据监测与采集

基本任务是 GNSS 卫星导航信号的接收、测量以及环境(电磁、气象)观测数据的采集, 功能包括: (1) 为完好性监测和精密定轨提供 4 重覆盖的观测数据; (2) 利用数字多波束天线及相关设备实时监测所有 GNSS 卫星信号的质量; (3) 采用 30 m 口径高增益天线及相关设备对重点卫星实现全弧段连续精细观测.

主要监测与采集设备包括: 抗多径全向天线、可接收视界内所有 GNSS 信号的多波束天线(等效 2.4 m 口径, 增益: 28 dB)、30 m 口径大天线; 监测接收机、射频信号观测数据采集设备、基带信号采集设备、时延标校设备, 气象传感设备、电磁环境分析设备; 其他辅助设备包括: 原子钟、数据处理机、网络交换机等.

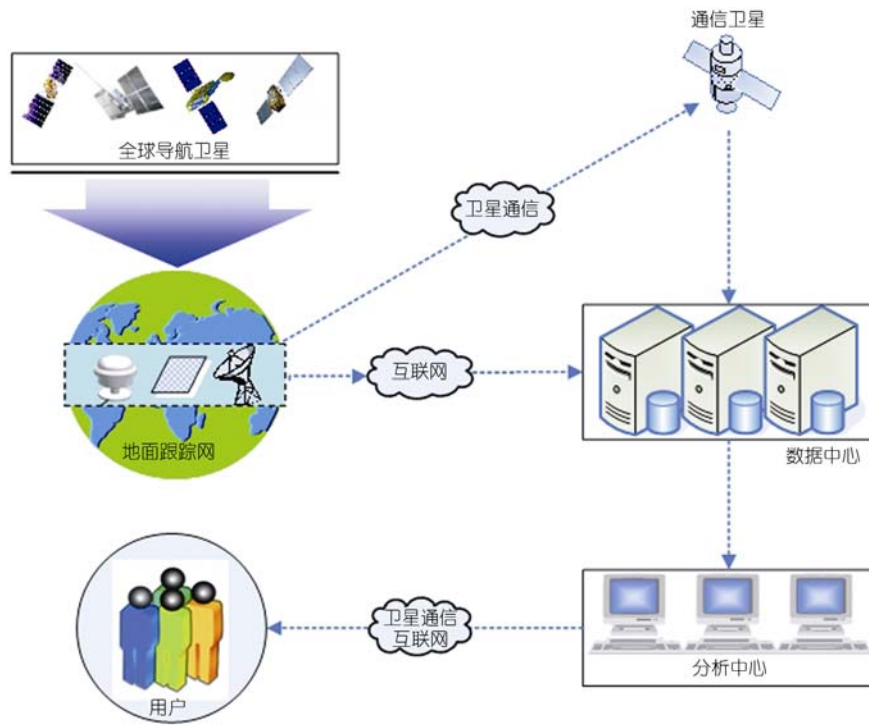


图 1 iGMAS 架构图

Figure 1 Framework of iGMAS.

3.1.2 数据存贮

基本任务是实现数据监测与采集、数据存储、数据分析、信息发布之间的数据交换、控制指令传输, 以及将发布信息传递给用户。

数据传输链路包括: Internet、卫星链路(Vsat)和无线移动通信网等。

3.1.3 数据分析与信息发布

基本任务是分类处理 GNSS 监测数据, 对 GNSS 信号及信息进行综合分析, 评估服务性能。包括: 生成可见卫星数、星座状态和星座 DOP 等星座特性; 分析导航信号时域、频域、调制域、相关域特性; 检核导航电文、电离层时延改正精度、GNSS 时间偏差精度、通道频间偏差参数(Tgd)等导航信息的正确性; 评估 GNSS 开放服务的精度、完好性、可用性和连续性。对以上结果进行综合, 向用户发布 GNSS 卫星运行状态统计信息。主要设备包括: 实时状态显示设备、分析评估软件、服务器、工作站、网络交换设备、海量存储器等。

3.1.4 数据传输

基本任务是实现数据监测与采集、数据存储、数据分析、信息发布之间的数据交换、控制指令传输, 以及发布信息向用户的数据传递。

数据传输链路包括: Internet、卫星链路(Vsat)和无线移动网等。

3.2 系统实现设想

3.2.1 初步论证布局

iGMAS 数据采集依靠全球分布的跟踪站完成, 跟踪站布设主要考虑两方面因素: (1) 为实现信号质量监测, 利用多波束天线和 30 m 口径高增益天线对各卫星连续跟踪, 应至少满足跟踪站对卫星一重逆覆盖; (2) 为实现卫星完好性监测任务, 应满足跟踪站对卫星四重逆覆盖。跟踪站从现有 IGS 站中选取, 优化布设方法采用格网分析法^[5], 分析范围为南北纬度 65° 、高度为 19000 km 的卫星飞行区域, 网格划分为 $1^\circ \times 1^\circ$, 截止高度角为 15° 。为满足上述两种情况, 初步分析分别需布设跟踪站 6 个和 24 个站, 站点选

择见表 2, 两种情况布站优化方案见图 2 和 3。

3.2.2 运行模式

通过国际合作的方式构建 iGMAS, 国际合作的

表 2 iGMAS 跟踪站所在国家和地区

Table 2 Locations of iGMAS tracking stations

测站名	所属国家和地区	测站名	所属国家和地区
BEIJ ^{a)}	中国	MAS1	西班牙
PERT ^{a)}	澳大利亚	BAHR	巴林
RCMN ^{a)}	肯尼亚	ONSA	瑞典
LPGS ^{a)}	阿根廷	SANY	中国
CAGS ^{a)}	加拿大	IRKT	俄罗斯
TAHI ^{a)}	法国(塔希提岛)	WLMQ	中国
CHAT	新西兰	NOUM	法国(新喀伦群岛)
KOKB	美国	KERG	法国(克革伦群岛)
COSO	美国	HART	南非
FAIR	美国	CAS1	南极
BOGT	哥伦比亚	OHI3	南极半岛
FORT	巴西	KELY	格陵兰岛

a) 为一重、四重逆覆盖并址跟踪站

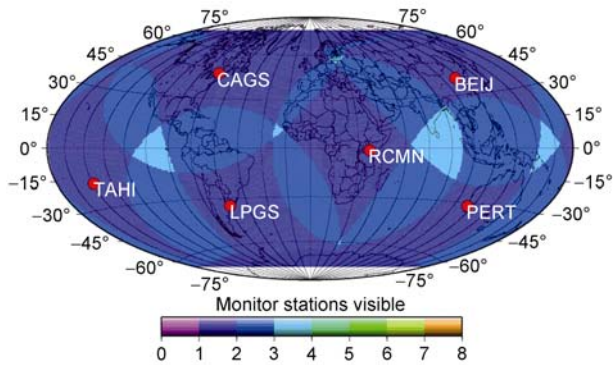


图 2 一重逆覆盖跟踪站优化布设

Figure 2 Optimal design of 1-overlap coverage stations.

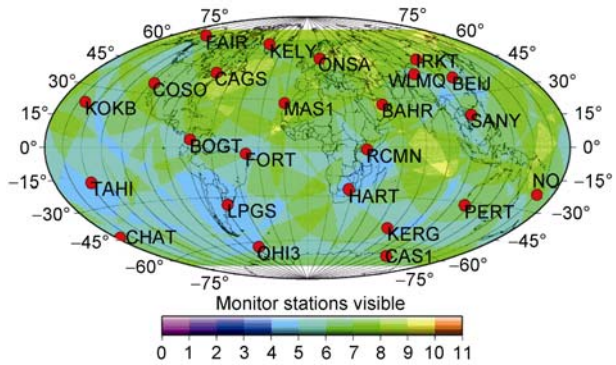


图 3 四重逆覆盖跟踪站优化布设

Figure 3 Optimal design of 4-overlap coverage stations.

对象是全球系统四大供应商和全球民用用户。

网络的基本单元是节点。节点可包含的功能包括: 数据采集与监测、数据传输、数据存储、数据分析和产品发布 5 项功能。

节点共分三个级别: 一级节点具有全部 5 项功能; 二级节点具有采集、传输、存储和分析功能; 三级节点只具有采集和传输功能。各节点主动为网络提供数据, 实现数据共享。同时自动从网络中提取数据, 进行性能评估。一级节点联合完成对全球开放服务的监测评估任务, 联合进行发布产品。网络通过节点的协同工作, 节点采用自愿的原则, 自由接入接入网络。

4 北斗系统性能监测评估

4.1 空间信号精度监测评估

为从信息层面监测评估北斗导航卫星的开放服务性能, 2007 年 11 月, 建成了由 1 个监测评估中心、1 个数据分析中心和 6 个跟踪站组成的北斗卫星导航系统监测评估系统。跟踪站位于西安、上海、长春、昆明、乌鲁木齐和南极中山站, 每个跟踪站上配备北斗测量型接收机、高精度原子钟和计算机等设备。监测评估系统主要进行北斗导航卫星的精密轨道和卫星钟差计算, 卫星钟性能评估, 导航电文正确信、合理性检验, 电离层模型参数精度评估等。

4.2 空间信号质量监测评估

2009 年 2 月, 中国科学院国家授时中心在陕西省西安市临潼区建成我国第一个北斗空间信号质量监测与评估系统。该系统由 7.3 m 天线、射频接收子系统、射频信号观测数据采集子系统、基带信号采集子系统、监测接收机、标校子系统及数据存储等子系统构成, 能够利用标准测量仪器、多台监测接收机、高速数据采集设备及离线分析软件完成较深入的 GNSS 空间信号的质量监测及评估任务。

目前, GNSS 空间信号质量监测评估的两项关键技术: 基于相关曲线的信号性能离线分析方法、监测系统通道校准已完成技术攻关, 监测评估系统抗干扰技术也取得了相应的研究成果。该系统自 2009 年 4 月运行以来, 成功完成了对北斗系统、GEO 和 IGSO 卫星的信号质量监测评估工作。与此同时, 还成功地

采集和分析了 GPS 的 MEO 卫星信号和 Galileo 的 Glove-B 的信号.

5 结论

GNSS 开放服务的监测评估有利于 GNSS 系统的健康发展, 可扩展 GNSS 应用的深度和广度, 为各类

民用用户安全、可靠的使用系统服务奠定基础. 北斗在开放服务监测评估方面的初步探索, IGS 长期成功运行案例, 以及斯坦福大学、德国宇航研究院(DLR)在导航信号监测方面的研究成果, 证明了本文提出的方案在技术上是可行的. 但是 iGMAS 的建设是一项全球性、长期性的工作, 需要更多的组织和国家参与, 开展国际合作非常必要.

参考文献

- 1 Yang Y X. Progress, contribution and challenges of Compass/Beidou satellite navigation system (in Chinese). *Acta Geod Cartogr Sin*, 2010, 39(1): 1–6 [杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战. *测绘学报*, 2010, 39(1): 1–6]
- 2 Hegarty C J, Ross J T. Initial results on nominal GPS L5 signal quality. In: 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Portland, OR: the Institute of Navigation, 2010
- 3 Lu X C, Zhou H W. Methods of analysis for GNSS signal quality (in Chinese). *Sci Sin Phys Mech Astron*, 2010, 40(5): 528–533 [卢晓春, 周鸿伟. GNSS 空间信号质量分析方法研究. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2010, 40(5): 528–533]
- 4 Department of Defense of United States of America. Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard 2008. <http://pnt.gov/public/docs/2008/spsps2008.pdf>
- 5 Stanton B J, Ralph S. Analysis of GPS monitor station outages. In: ION GNSS 20th International Technical Meeting of the Satellite Division, 25–28, September 2007. Fort Worth, TX: the Institute of Navigation, 2007

Monitoring and assessment of GNSS Open Services

JIAO WenHai^{1*}, DING Qun², LI JianWen³, LU XiaoChun⁴, FENG LaiPing⁵,
MA JiaQing⁶ & CHEN Gang⁶

¹ *Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China;*

² *Xi'an Research Institute of Navigation, Xi'an 710068, China;*

³ *Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping, Zhengzhou 450052, China;*

⁴ *National Time Service Center, Xi'an 710600, China;*

⁵ *Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China;*

⁶ *China Satellite Navigation Office, Beijing 100086, China*

Interoperability of GNSS Open Services have already been a significant tendency in developing all Satellite Navigation Systems, and its performance will directly affect the security and reliability of its usages. Therefore, monitoring and assessment of GNSS Open Services have become an attention focus for all providers and users of GNSS. This paper begins to illuminate the elements and methods for monitoring and assessing GNSS Open Services. Then according to the requirements, the architecture of an international GNSS Monitoring and Assessment System (iGMAS) is designed to achieve the 4-overlap and 1-overlap coverage and sophisticated analysis respectively. Here, this iGMAS is based on omni-directional antennas, multi-beam antennas and a high-gain paraboloid antenna. In the meantime, the configuration scheme of world-wide monitoring stations is provided. Finally, some related works that have been done to monitor and assess BeiDou Open Service are introduced, which can be used to verify the feasibility of this proposed system.

GNSS, Open Service, monitoring, assessment

PACS: 07.05.Tp, 89.70.+c, 87.16.Xa, 43.60.Gk, 84.40.Ua

doi: 10.1360/132011-359