

Research on the Integrity System for a Network RTK System

TANG Weiming^{1,2}, ZHAI Chuanrun^{3,4}, ZHAO Qile^{1,2}

1. GNSS Research Center, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China

2. State key laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China

3. Shanghai GALILEO Industries Ltd, 680, Guiping Rd, Shanghai 200233, China

4. School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiaotong University, 800 Dongchuan Road, Shanghai 200240, China

e-mail: wmtang@whu.edu.cn

Abstract: Integrity system is an important part of a system. It includes providing the parameters of insuring safety for users and the competence of delivering timely and valid warning message. The system warns the users when the errors of corrections from the system exceed limits. Simultaneously, users have the ability to assess the information from the control center of the system accurately. Network RTK system is a real time GNSS positioning service system which provides ionosphere, troposphere, and orbit corrections to rovers. Rovers can achieve cm level accuracy positioning results which can be used in the applications of high precision navigation, machine control, land management and surveying and so on. As a system providing real-time positioning service, integrity system is a key part of Network RTK system. This paper proposes an integrity system for a network RTK system based on the parameters of integrity such as reliability, continuity, positioning accuracy, the characters of users and the application fields of network RTK system. At first, the parameters of integrity system are given and their characteristics and uses are analyzed. The monitoring system which attains the parameters is introduced. Then the parameters broadcasted to users are given according to the type of the users and the method of communication. At last, by combining the information from the network with the receiver integrity automatic monitoring method, the authors propose a new receiver integrity monitoring method for the network RTK system rovers.

Keywords: integrity system; network RTK; RIAM; monitoring station

网络 RTK 系统完备性体系组成研究

唐卫明¹, 翟传润^{2,3}, 赵齐乐¹

1. 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 武汉市珞瑜路 129 号, 中国, 430079

2. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉市珞瑜路 129 号, 中国, 430079

3. 上海伽利略导航有限公司, 上海桂平路 680 号, 中国, 200233

4. 上海交通大学航空航天学院, 东川路 800 号, 中国, 200240

e-mail: wmtang@whu.edu.cn

摘要: 完备性体系是一个系统的重要组成部分, 包括提供保证用户安全性的重要参数和系统给用户提供及时有效的警告信息的能力, 当系统误差超过限值时警告用户, 用户同时对系统提供的信息的可信程度进行度量。网络 RTK 系统是利用在一定区域内建立的多个连续运行参考站实时观测数据为用户提供电离层、对流层和卫星轨道等误差改正信息, 在参考站覆盖范围内实现厘米级实时高精度定位, 应用于高精度导航、机械控制、国土资源管理、测量和施工控制等。网络 RTK 系统作为一个实时给用户提供服务的系统, 必须为网络 RTK 系统用户提供定位精度、可靠性等的安全保证, 因此完备性体系就是其中必不可少的部分。本文通过对可用性、连续性、精度、完好性等通用完备性监测指标的研究, 提出了一套网络 RTK 系统完备性体系, 该体系包括网络 RTK 完备性监测的参数体系、系统监测体系、播发体系和用户自主完备性监测体系。然后介绍了完备性参数分类, 完备性监测体系的组成, 并结合用户的需要和通讯方式不同给出了需要发布给用户的参数和发播方式, 提出了融合网络 RTK 系统给出的完备性信息和用户自主完备性监测技术的网络 RTK 流动站完备性监测技术。

关键词: 完备性体系; 网络 RTK; 用户接收机自主完备性监测; 监测站

1 引言

国家高科技 863 计划项目(2006AA12Z326), 上海市科委重点项目资助(075115013), 上海市科委重大项目资助(08dz1500300)

在某一区域内建立多个(一般为 3 个或 3 个以上)的 GNSS(Global Navigation Satellite System)基准站, 对该地区构成网状覆盖, 并以这些基准站中的一个或多个为基准, 为该地区内的用户实时高精度定位提供

误差改正信息，称为 GNSS 网络 RTK(Real-time Kinematic)。网络 RTK 也称多基准站 RTK，是近年来在常规 RTK、计算机技术、通讯网络技术的基础上发展起来的一种实时动态定位新技术。网络 RTK 技术与常规 RTK 技术相比，扩大了覆盖范围、降低了作业成本、提高了定位精度和减少了用户定位的初始化时间。网络 RTK 系统是基于网络 RTK 技术和多个连续运行基准站建立起来的高精度实时定位系统。其中完备性是保证用户安全性的一个重要组成，当系统不能提供用户需要的服务的时候，系统在预定的时间范围内给用户及时有效的警告信息及可靠性指标。另外，完备性还包括用户对系统提供的信息进行正确的保护水平计算，检查是否超过报警限值。因此，网络 RTK 系统完备性是网络 RTK 系统一个重要的组成部分，也是更加有效、安全的使用该系统的一个重要保证。

美国无线电导航设计说明书(FRP)中给出的导航系统完备性监测定义为：系统的完备性是指系统发生故障，系统的差分 GPS 信号不能用于导航和定位时，系统向用户提供及时报警的能力，有报警限值、示警耗时、示警能力和失误几率四个参数来加以确定。秘金钟（2004）总结了卫星导航系统完备性技术包括卫星自主完备性监测(SAIM)、星载和星间完备性监测、完备性能力评估（GIPA）、用户自主完备性监测。Galileo 系统的完备性指标主要有空间信号准确度 SISA(Signal In Space Accuracy)，空间信号监测精 SISMA(Signal In Space Monitoring Accuracy)/完备性标 IF(Integrity Flag)和用户水平或垂直保护水平 xPL (Level/Vertical Protection Level，总称 xPL)(VEIT Oehler, 2004)。赵春梅（2007）等利用 GALILEO 全球监测网络和中国地壳运动监测网络分别对 GALILEO 系统完备性指标 SISMA 进行仿真计算。

用户接收机自主完备性监测 (Receiver Autonomous Integrity Monitoring, 即 RAIM), 是完备性监测中一个重要组成部分。RAIM 根据用户接收机的多余观测值监测用户定位结果的可靠性，典型的情况是发现一颗有问题的卫星对定位结果的影响，卫星的问题可能是钟差改正信息不正确或者卫星不能正常工作等(Col. G.B. Green,1989)。RAIM 算法的基本思想是用伪距观测矢量估算位置矢量和单位权方差，若单位权方程大于限值则发出完备性报警信息。

秘金钟，李毓麟（2000，2001）提出了广域差分 GPS 系统完备性监测系统的构成和各个部分的监测方法，包括监测站和用户站的监测技术，给出了完备性监测的一般步骤。监测站的作用是监测整个广域差分 GPS 系统，供 GPS 差分信息的完备性、正确性信息

以保证用户使用的安全性，并介绍了监测站的选址、仪器的选择和讨论了监测站粗差的探测和分离技术。

国内外许多学者对于导航系统局域完备性的概念、局域监测网的设计、GPS 增强系统差分改正的计算和 GPS 系统完备性监测等方面做了大量的研究工作。高星伟（2002）在其博士论文中也对网络 RTK 完备性研究提出了展望。周东卫(2007)基于四川 GPS 观测网络进行了完备性监测研究。赵春梅等（2008）根据 GALILEO 系统局域完备性的概念和网络 RTK 的基本理论，建立导航系统局域网络完备性监测理论和算法。算法主要包括网络系统完备性算法和用户完备性算法，内容包括网络误差模型的建立、插值算法和误差改正数完备性指标的计算、完备性指标的验证和用户保护水平的计算。

目前，国内外已经建立起了非常多的网络 RTK 系统。我国自 2000 年第一个城市级网络 RTK 系统在深圳建立起来后，进入一个网络 RTK 系统建设的蓬勃发展阶段，由于系统的覆盖面广、定位精度高、可靠性好，在社会发展和科学研究中发挥了非常重要的作用。但是，这些网络 RTK 系统还缺少完善的系统完备性监测功能，主要表现在没有卫星和整个系统的工作状况与健康情况，及时向用户播发差分改正信息及其精度信息以及报警信息，在电离层和对流层强烈活动条件下出现的误差仍然是一个影响实际使用；任何一个参考站的故障都有可能对整个系统的瘫痪，任何一个参考站的某一个卫星的信噪比欠佳，都有可能减少卫星模型改正数的数量，导致 RTK 无法进行。另外在从目前网络 RTK 系统完备性的研究现状来看，很多的研究人员为完备性研究做出了很大的贡献，但还没有专门为网络 RTK 系统的完备性进行系统的研究，没有能从理论上解决目前网络 RTK 系统存在的问题。

本文通过对网络 RTK 系统的完备性进行系统的研究，提出了由完备性参数体系、系统监测体系、播发体系、网络 RTK 系统用户自主完备性监测方法组成的网络 RTK 系统完备性体系。

2 网络 RTK 完备性体系的组成

在数学及其相关领域中，一个对象具有完备性，即它不需要添加任何其他元素，这个对象也可称为完备的或完全的。从系统的角度来描述，完备性是指一旦系统对于当前的应用不可用，系统在预定的时间范围内警告用户的能力。另外，完备性还指用户得到这些信息的可靠性。因此，对于网络 RTK 系统完备性体系，首先必须有一套参数，表示各种内容，每种参数都有严格的定义。要获取这些参数必须要有数据源，因此另一个组成部分就是监测体系，具体负责各处监

测参数计算所需要的数据。完备性参数播发体系，根据不同的播发方式和服务对象，制定不同的播发策略，为用户提供完备性参数。流动站的自主完备性监测是对系统提供的完备性参数结合流动站本身的观测数据，计算出流动站定位结果的可用性。因此网络RTK系统的完备性体系包括四个部分：网络RTK完备性参数体系、完备性的监测体系和完备性参数播发体系以及网络RTK流动站自主完备性监测体系如图 1 所示。

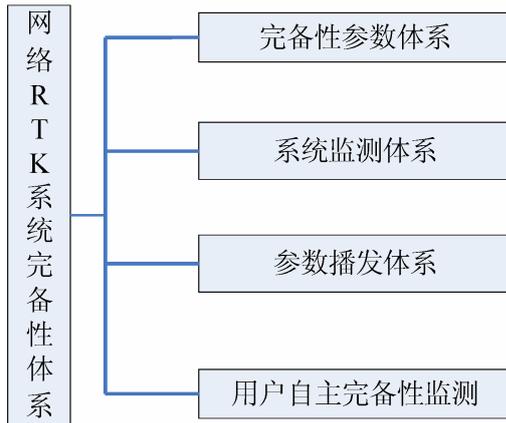


图 1. 网络 RTK 系统完备性体系组成
Figure.1 the Integrity System for a Network RTK

3. 网络RTK完备性参数体系

EGNOS 等广域增强系统为用户给出了用户差分距离误差 UDRE, 格网电离层垂直误差 GIVE, 真位置误差 PE, 警告限值 AL, 保护水平 PL。但这些完备性参数一般都是从差分改正信号和用户的角度来进行定义。网络 RTK 系统是一种区域增强型定位系统，给用户提供的厘米级精度的实时导航定位服务。因此必须根据网络 RTK 系统的特点、技术指标（可用性、精度）和用户本身对精度的要求，从网络 RTK 系统的角度来给出一套完备性参数。网络 RTK 系统播发给用户的参数主要包括主参考站的坐标和辅站的相对坐标，主站载波相位和伪距观测数据，主站相对于辅站的电离层差值和几何差值。流动站收到电离层和对流层改正数后首先计算出流动站处的改正数，流动站的观测值与主站的观测值进行差分后再加上几何改正数和电离层改正数，然后计算流动站的坐标。根据网络 RTK 系统的组成以及参数的特点分成以下四种：

- (1) 与基准站相关的参数
 - 基准站的坐标精度和基准站的稳定性
 - 基准站多路径影响指标
 - 基准站周围电子环境指标
 - 主站伪距观测值的用户差分距离误差 (UDRE)
 - 主站载波相位观测值质量指标（周跳情况）

- (2) 与信号传播路径相关的参数
 - 电离层活跃状态参数
 - 单颗卫星的电离层差值精度指标和可信度
 - 单颗卫星的几何差值精度指标和可信度；
- (3) 与卫星相关的参数
 - 广播星历卫星轨道的精度指标
 - 卫星的健康状况
- (4) 与流动站相关的参数
 - 真位置误差 PE
 - 用户定位的保护水平（垂直，水平）
 - 用户定位误差报警限值
 - 报警时间

4 网络RTK系统完备性监测体系

为了获取各种完备性参数和为用户提供完备性信息，应充分利用各种监测技术手段和设施，建立起完善的完备性监测体系。网络 RTK 系统的完备性参数反映的是卫星导航系统、网络 RTK 系统的基础设备、误差改正模型和发播给流动站误差改正数、流动站定位的精度和可靠性等。因此，网络 RTK 系统的完备性监测包括 GNSS 系统的监测，网络 RTK 系统本身的故障监测和用户定位结果的监测。监测体系包括以下四个部分：

- (1) 利用基岩基准站监测其他基准站稳定性

基准站稳定性和坐标的精确性关系到整个网络解算、网络误差改正数的精确性、流动站坐标能否精确计算等问题。因此对基准站坐标的监测非常重要。监测方法主要有两种：一是实时监测；二是事后处理。实时监测的方法是在网内的多个基准站中选择观测条件最好，站点最为稳定的作为参考站，实时计算其他站点与该站点的相对位置变化。事后处理就是把一定时间段的观测数据，用高精度的事后处理软件定期对所有基准站坐标进行计算，检查是否存在变动。

- (2) 利用基准站网实时数据监测
 - 卫星健康状况，轨道和卫星钟差
 - 主站伪距观测值的用户差分距离误差 (UDRE)
 - 主站载波相位观测值质量指标（周跳情况）
 - 基准站网观测数据完整性监测
 - 各个基准站网的网络通讯情况
 - 数据采集设备的完备性监测
 - 基准站周围多路径环境、电子环境分析和监测
 - 电离层活跃指数监测
- (3) 利用监测站对系统误差改正数进行完备性监测
 - 电离层活跃指数监测
 - 利用监测站和作业的流动站对双差电离

- 电离层残差完备性监测指标 IRIM
 - 电离层残差内插不确定性指标 IRIU
 - 对流层残差完备性监测 TRIM
 - 对流层残差内插不确定性 TRIU 指标
 - 评价差分改正信号的质量，向主控站报告对信息质量的评价
- (4) 利用 NTRIP 服务器监测流动站
- 流动站的定位精度
 - 模糊度固定时间
 - 定位的延迟时间
 - 流动站与服务器的网络状态

5 完备性信息播发体系研究

网络 RTK 完备性体系的参数和监测内容非常多，但只有少部分需要发送给用户。本文首先给出需要发送给用户的参数，然后根据参数内容定义一种简约的发播策略。需要发送给用户的参数有两类：

- (1) 与误差改正数相关的完备性参数
 - 电离层和对流层内插不确定性指标
 - 电离层的活跃状态参数
- (2) 与主站观测值相关的完备性参数
 - 卫星的健康状况
 - 卫星轨道的精度指标
 - 主站伪距观测值的用户差分距离误差 (UDRE)
 - 主站载波相位观测值质量指标 (周跳情况)

播发给用户可以是两种方式：一是完备性参数单独进行播发，独立编码按照需求进行播发。另外一种是在 RTCM 3.0 中播发格式中进行适当的修改。

6 网络RTK流动站完备性监测

目前网络 RTK 流动站定位中，仅仅是获取到流动站的观测值数据和网络 RTK 系统播发的差分数据后，进行 RTK 定位解算，只能给用户给出定位的内符合精度指标。在具有完备的网络 RTK 完备性信息后，除了流动站单点定位自主完备性监测以外，流动站的将需要新的算法。网络 RTK 流动站定位的完备性信息的模糊度确定、位置解算和用户保护水平技术等一系列的网络 RTK 流动站定位完备性算法。

网络 RTK 流动站完备性监测的计算的过程为：

- (1) 利用流动站观测数据进行单点自主完备性监测计算
 - (2) 根据流动站的位置和主站误差改正数计算出流动误差改正数的不确定性指标
 - (3) 计算模糊度确定的可靠性指标
 - (4) 计算定位精度指标
 - (5) 与定位报警限制进行比较，判断是否可用
- 接收机自主完备性监测内容包括：

- (1) 单站完备性监测
- (2) 定位精度
- (3) 电离层和对流层等误差改正数的不确定性指标
- (4) 模糊度确定可靠性指标

7 总结

网络 RTK 系统完备性体系是网络 RTK 系统的一个重要组成部分，但目前已有的网络 RTK 系统还相对缺乏。通过对网络 RTK 完备性体系的研究可以得出以下结论：

(1) 本文第一次系统地提出了由网络 RTK 系统完备性参数体系、完备性监测和播发系统、用户完备性监测组成的等一整套网络 RTK 系统完备性体系。然后，根据网络 RTK 系统的要求，给出了网络 RTK 系统完备性体系的每一个组成部分的内容。

(2) 网络 RTK 系统完备性体系，监测内容和参数指标非常多，下一步需要对各个参数指标进行量化和研究相关的关键技术。

(3) 监测站在网络 RTK 完备性监测体系中占有非常重要的位置，对监测站本身的监测技术和手段需要进一步的研究。

References (参考文献)

- [1] CAA PAPER, GPS Integrity and Potential Impact on Aviation Safety, CAA PAPER 2003/9.
- [2] Col. G. B. Green, P. D. Massatt, and N.W. Rhodus, "The GPS 21 Primary Satellite Constellation", Navigation, Vol. 36, No. 1, Spring 1989, pp. 9-24.
- [3] European Commission(2000), Galileo Definitions Document, GALA-DD092.
- [4] HELMUT B, WALTER E., *et al.* GNSS/Galileo Global and Regional Integrity Performance Analysis [A]. Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation ION GNSS 2004 September 21-24, 2004.
- [5] Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment, RTCA/DO-229C, 28 November 2001.
- [6] P. B. Ober, R. Farnworth, E. Breeuwer, D. van Willigen SBAS Integrity Verification, ION GPS 2001, 11-14 September 2001.
- [7] Samuel P. Pullen, Boris S. Pervan, Bradford W. Parkinson A New Approach to GPS Integrity Monitoring Using Prior Probability Models and Optimal Threshold Search.
- [8] VEIT Oehler, FRANCESCO Luongo, *et al.* The Galileo Integrity Concept [A]. ION GNSS 17th International Technical Meeting of the Satellite Division [C]. Long Beach: The Institute of Navigation, 2004. 6042615.
- [9] Gao Xingwei. GPS/GLONASS Network RTK algorithm and Program Realization[D], Wuhan University, 2002. 高星伟, GPS/GLONASS 网络 RTK 算法研究与程序实现[D], 武汉大学, 2002.
- [10] Liu Jingnan Chen Juanyong, Zhang Yanping. WADGPS Principle and Method[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1999. 刘经南, 陈俊勇, 张燕平等(1999). 广域差分 GPS 原理和方法. 北京: 测绘出版社, 1999.
- [11] Bi Jinzhong, Li Yulin. Integrity Monitoring on WADGPS System[J]. SCIENCE OF SURVEYING AND MAPPING, 2000, 1(125), pp. 37-40.

- 秘金钟, 李毓麟. 广域差分 GPS 系统完备性监测[J]. 测绘科学, 2000, 1(125), pp. 37-40.
- [12] Bi Jinzhong, Li Yulin. Integrity Monitoring on WADGPS Monitoring Station[J]. SCIENCE OF SURVEYING AND MAPPING, 2001, 26(3), pp 29-33.
秘金钟, 李毓麟. 广域差分 GPS 监测站的完备性监测[J]. 测绘科学, 2001, 26(3), pp 29-33.
- [13] Bi Jinzhong, Li Yulin. New Development on Integrity Monitoring Technology of WADGPS [J]. SCIENCE OF SURVEYING AND MAPPING, 2001, 3(126), pp. 44-47.
秘金钟, 李毓麟. 广域差分 GPS 系统完备性监测技术的新进展[J]. 测绘科学, 2001, 3(126), pp. 44-47.
- [14] Bi Jinzhong, Li Yulin. Research on RAIM Algorithm[J]. BULLETIN OF SURVEYING AND MAPPING, 2001, (3), pp. 7-9.
秘金钟, 李毓麟. RAIM 算法研究[J]. 测绘通报, 2001, (3), pp. 7-9.
- [15] Tang Weiming. Research on Techniques of Large Area and Long Range GNSS Network RTK and Developing Network RTK Software. Wuhan University[D], 2006.
唐卫明, 长距离大范围网络 RTK 关键技术研究, 武汉大学[D], 2006.
- [16] Zhao Chunmei, Dang Yamin, Zhang Huayi. Calculation and Analysis of Integrity Index SISMA of GALILEO System[J], ACTA GEODAETICA ET CARTOGRAPHICA SINICA, 2007 36(2), pp. 129-133.
赵春梅, 党亚民, 张化疑, GALILEO 系统完备性指标 SISMA 的计算和分析, 测绘学报, 2007 36(2), pp. 129-133.
- [17] Zhao Chunmei, Cheng Pengfei, Gao Xingwei. Design and Realization of GALILEO Local Integrity Monitoring[J], ACTA GEODAETICA ET CARTOGRAPHICA SINICA, 2008, 37(1), pp. 23~29.
赵春梅, 程鹏飞, 高星伟, GALILEO 系统局域完备性监测设计与实现[J], 测绘学报, 2008, 37(1), pp. 23~29.
- [18] Zhou Dongwei, Research on Quality Control and Integrity Monitoring for VRS technique[D]. Xinan Jiaotong University, 2007.
周东卫, 虚拟参考站(VRS)技术的质量控制和完备性监测研究, 西南交通大学[D], 2007.
- [19] Zhang Huayi, Dang Yamin, Zhao Chunmei. The study on the change rule of the precision and integrity in the GALILEO local monitoring network, SCIENCE OF SURVEYING AND MAPPING[J], 2007, 3.
张化疑, 党亚民, 赵春梅等. 精度和完备性在 GALILEO 局域监测网中变化规律研究[J]. 测绘科学. 2007, 3.