

项目批准号	U1333203
资助类别	联合基金重点支持项目

子课题一：面向民航应用的北斗系统导航能力测试与评估

面向民航应用的北斗系统导航能力 测试评估分析报告

项目负责人：何运成

项目周期：2014.01-2017.12

中国民航科学技术研究院

清华大学

目录

1. 项目背景和研究意义.....	1
1.1. 项目背景.....	1
1.2. 研究意义.....	1
1.3. 国内外研究现状.....	5
1.3.1. 国内外机构研究成果.....	6
1.3.2. 国内外学者研究成果.....	8
1.4. 文档内容和结构安排.....	11
2. 面向民航应用的 BDS 导航能力评估方法.....	12
2.1. 引言.....	12
2.2. ICAO RNP 要求.....	12
2.3. BDS 导航性能评估指标参数集合.....	13
2.3.1. 信号级参数.....	15
2.3.2. 信息级参数.....	17
2.4. BDS PNT 性能评估指标关系模型.....	19
2.4.1. 精度.....	21
2.4.2. 完好性.....	22
2.5. 面向民航应用的 BDS PNT 关键性能指标评估方法.....	22
2.5.1. 精度评估方法.....	23
2.5.2. 完好性评估方法.....	27
2.5.3. 连续性评估方法.....	29
2.5.4. 可用性评估方法.....	29
3. 面向民航应用的 BDS 导航能力测试与评估系统.....	31
3.1. 引言.....	31
3.2. 导航能力测评方案概述.....	31
3.3. 多模多频 GNSS 高精度接收机设计方案和实现情况.....	34
3.3.1. 多模多频 GNSS 高精度接收机的功能性能要求.....	34
3.3.2. 多模多频 GNSS 高精度接收机设计方案.....	35
3.3.3. 多模多频 GNSS 高精度接收机实现情况.....	47
3.4. 导航性能测试与评估软件设计方案和实现情况.....	48
3.4.1. Node.js 开发环境.....	49
3.4.2. 导航性能测试与评估软件总体设计.....	52
4. 基于监测站数据的 BDS 导航性能评估分析.....	64
4.1. 引言.....	64
4.2. 精度分析.....	64
4.2.1. 拉萨监测站.....	64
4.2.2. 乌鲁木齐监测站.....	68
4.2.3. 哈尔滨监测站.....	71
4.2.4. 昆明监测站.....	74
4.2.5. 北京监测站.....	77

4.2.6.	温州监测站	80
4.2.7.	大理监测站	83
4.2.8.	台州监测站	86
4.2.9.	成都监测站	89
4.2.10.	海口监测站	92
4.2.11.	三亚监测站	95
4.2.12.	东营监测站	98
4.2.13.	武汉监测站	101
4.3.	其他性能分析	104
4.3.1.	拉萨监测站	104
4.3.2.	乌鲁木齐监测站	105
4.3.3.	哈尔滨监测站	106
4.3.4.	昆明监测站	107
4.3.5.	北京监测站	108
4.3.6.	温州监测站	109
4.3.7.	大理监测站	110
4.3.8.	台州监测站	111
4.3.9.	成都监测站	112
4.3.10.	海口监测站	113
4.3.11.	三亚监测站	114
4.3.12.	东营监测站	115
4.3.13.	武汉监测站	116
4.4.	BDS/GPS 导航性能统计结果	117

1. 项目背景和研究意义

1.1. 项目背景

本项目来源于国家自然科学基金项目《“北斗二代”在民用航空导航中的应用研究》的子课题 1，主要任务为：面向民航应用的北斗系统导航能力测试和评估，提出测试评估方法与技术，研制北斗卫星信号监测评估系统，完成机场测试方案的部署和数据采集，并形成评估分析报告。

1.2. 研究意义

在民用航空导航系统(Navigation System of Civil Aviation, NSCA)中，传统的陆基导航(Ground Based Navigation, GBN)只能通过利用机场覆盖区域内的地面导航台信号来实现航空器的向台或者背台“引导式飞行”。由于地面导航台布局以及导航设备种类等因素的影响，GBN“航路划设”和“终端区飞行程序”等受到很大制约，故 GBN 覆盖范围有限并且精度较低，难以满足民用航空快速增长的运输需求。为了摆脱传统 GBN 导航方式的制约，美国自二十世纪七十年代起逐步实施区域导航(Area Navigation, RNAV)技术。在“导航设备覆盖范围内”或“导航系统能力范围内”，RNAV 允许飞机沿任意想要的航空线路飞行。随着以全球定位系统(Global Positioning System, GPS)为首的卫星导航系统不断发展，星基导航(Satellite Based Navigation, SBN)以其“全球、全天候、高精度”等特点，逐步被 NSCA 采纳吸收。

在此背景下，所需性能导航（Required Navigation Performance, RNP）的概念于上个世纪九十年代初被国际民航组织（International Civil Aviation Organization, ICAO）提出。RNP 是一种“在指定的空域内运行所必须的导航性能精度的描述”，其对导航性能的要求包括精度、完好性、连续性、可用性以及功能性等五个方面。RNAV 及 RNP 导航减轻了航空器（飞机）对传统 GBN 导航设备的依赖，使新导航技术和方法的应用更加方便，对空域的使用也更加灵活。

通过对世界各国 RNAV 及 RNP 技术标准进行有效整合，ICAO 在其运行实践的基础上提出了基于性能导航（Performance Based Navigation, PBN）的概念。如图 1.1 所示，PBN 包含 RNAV 和 RNP 两种导航方式，其中 RNP 对导航精度的要求更高，同时 RNP 的“功能性”要求机载导航设备具备性能监控与告警功能等导航性能，因此本文“面向民航应用的 BDS 导航能力测试与评估”在 ICAO RNP 导航方式下进行。PBN 涵盖了从航路、终端区到进近着陆的各个飞行阶段，将航空器的机载设备导航能力同 GBN 导航设施、SBN“全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System, GNSS）”以及“星基增强系统（Satellite Based Augmentation System, SBAS）”、“地基增强系统（Ground Based Augmentation System, GBAS）”、“接收机自主完好性监测（Receiver Autonomous Integrity Monitoring, RAIM）”等增强完好性的先进技术结合起来，提供了更加精确、安全及稳定的飞行方法，使空中交通管理模式更加的简捷和高效。

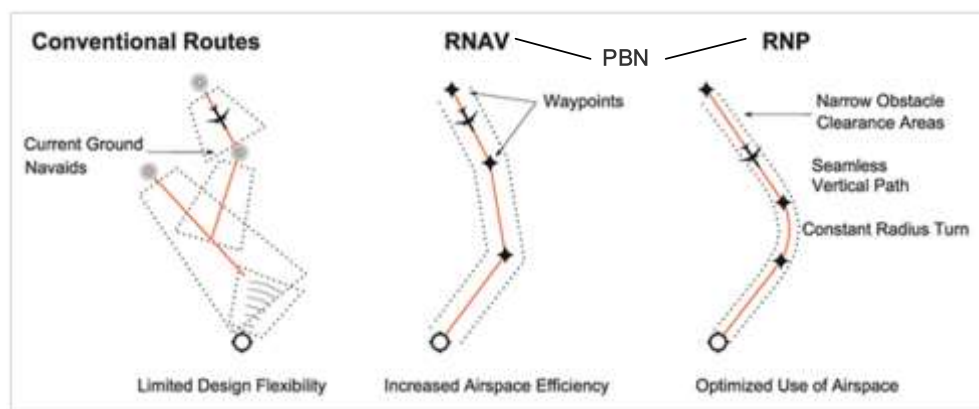


图 1.1 PBN 概念示意

PBN 运行中的三个基础要素为：导航基础设施，导航规范以及航空器导航能力（导航应用）。“导航基础设施”是指用于支持每种“导航规范”的相关基础设施，例如 GBN 地面导航台、SBN GNSS 以及机载导航设备等；“导航规范”是“导航应用”对机载导航设备性能提出的一系列要求，它规范了特定空域范围内航空器和飞行机组的相应性能及功能需求，同时也确定了“导航基础设施”的选择方式，例如 RNAV 和 RNP 两类基本导航规范；“航空器导航能力（导航应用）”是指装载有导航设备的航空器在运行区域内的实际应用，它将“导航基础设施”和“导航规范”进行了有效融合，成功地应用在航路、终端区及进近等各类民用航空飞行阶段，例如 RNAV/RNP 适用航路、RNAV/RNP 进离场及进近程序等。

近年来，我国民用航空事业进入了黄金发展期，快速、持续及大量增长的航空客货运输发展对空中交通的安全管理与运行效率提出了更高的要求。为了应对迅猛增长的航空运输需求，《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006-2020 年）》已将“新一代空中交通管理系统”列为重点研究方向。在以 GPS 为代表的 GNSS 广泛应用于民用

航空 PBN 导航这一整体发展形势下，我国“自主建设”、“独立运行”并“与世界其他卫星导航系统相兼容”的北斗卫星导航系统（BeiDou Navigation Satellite System, BDS）如何在“新一代空中交通管理系统”中进行有效地运用，将成为确保我国航空安全、稳健发展的关键，也是国家领空安全的战略思考。

BDS 于 2012 年完成了由 5 颗“地球静止轨道卫星（Geostationary Earth Orbit, GEO）”、5 颗“倾斜地球同步轨道卫星（Inclined Geosynchronous Orbit, IGSO）”和 4 颗“中圆地球轨道卫星（Medium Earth Orbit, MEO）”构成的空间星座组网，正式向亚太区域提供“定位、导航和授时（Positioning, Navigation and Timing, PNT）”服务。BDS 建设遵循“先试验、后区域、再全球”的三步走发展战略，将于 2020 年建设成为全球卫星导航系统，正式向全球用户提供服务。2016 年 8 月 5 日，BDS 第 22 颗卫星已完成在轨测试、入网测试评估等工作，正式入网提供服务，卫星编号 13。BDS 星座构型也更新为“5GEO+6IGSO+3MEO”。

BDS 作为 PBN“导航基础设施”的一种，对它的研究早已被中国民用航空局（Civil Aviation Administration of China, CAAC）提上日程。2009 年 11 月，CAAC 在其发布的《中国民航基于性能的导航（PBN）实施路线图》中就明确提出在 2013 年~2016 年的中期阶段“开展面向民航 PBN 运行的 BDS 应用研究和实验工作”，在远期的 2017 年~2025 年，“民航将考虑用 BDS 和其它航行系统兼容使用，从而完成从传统到 PBN 的过渡”。

本课题来源于国家自然科学基金项目《“北斗二代”在民用航空导航中的应用研究》。课题以当前“5GEO+6IGSO+3MEO”星座配置下的 BDS 作为研究对象，开展面向民航应用的 BDS 导航能力测试与评估方法研究，完成北斗卫星信号监视设备的研制，设计和实施北斗卫星信号监视系统的部署方案。基于北斗卫星信号监视系统采集的数据和所提出的测试评估方法，可统计分析 BDS 在我国典型机场环境下的精度、完好性、连续性以及可用性等关键 PNT 性能评估指标，解决 BDS 性能能否满足民航运行要求的关键问题。为 PBN“导航应用”，即机载 BDS 接收机关键技术，提供理论支持；为 PBN“导航规范”，即面向民航应用的 BDS 技术规范和标准(包括“BDS 空间信号(Signal In Space, SIS)和 PNT 性能的技术文件”及“BDS 机载导航设备最低运行性能标准(Minimum Operational Performance Standards, MOPS)”)，的形成提供数据支撑。本课题的研究意义如图 1.2 所示。

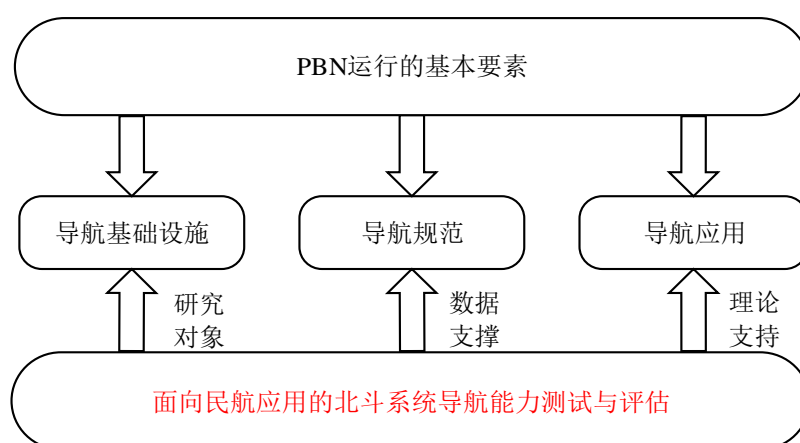


图 1.2 本课题研究对 PBN 运行基本要素的支撑作用示意图

1.3. 国内外研究现状

随着卫星导航系统的快速发展及其性能的不断提升，为满足航空、

航海等各行业的需求，近年来卫星导航系统性能指标体系及评估方法不断发展完善。其中，以 ICAO 提出的 RNP 性能评估指标最具代表性，并已经成为民用航空界公认的用来评价卫星导航系统性能的指标参数，主要包括通常所说的四大性能指标：精度、完好性、连续性和可用性。围绕着四大性能指标，国内外机构及学者展开了大量研究，取得了众多成果。下面介绍一些具有代表性的成果，其国外成果的研究对象以 GPS 为主，国内成果则主要针对 BDS 进行介绍。

1.3.1. 国内外机构研究成果

以 ICAO RNP 四大性能评估指标为基础，国外众多机构对 GPS 性能评估指标体系进行了研究，如：美国交通部发布的《GPS 民用性能监测标准》，美国民航部发布的《GPS 完好性及对民航的潜在影响》和美国国防部发布的《PNT 政策报告》以及《GPS 标准定位服务性能标准（Standard Positioning Service Performance Standard, SPS PS）》等。

在 BDS 研究方面，2013 年 12 月，“中国卫星导航系统管理办公室（China Satellite Navigation Office, CSNO）”发布了《北斗卫星导航系统（BDS）公开服务性能规范（1.0 版）》。

《GPS SPS PS》及《BDS 公开服务性能规范（1.0 版）》均从系统建设和维护的角度对 SIS 层性能进行了说明和规范，从面向用户的角度对位置、速度和时间（Position, Velocity, and Time, PVT）服务层性能进行了描述和评估。如图 1.8 所示，GPS 和 BDS 官方主要是对星座覆盖性、星座可用性等星座性能指标，对 SIS 精度、SIS 完好性、

SIS 连续性、SIS 可用性等 SIS 性能指标进行了统计和分析；对定位服务精度、精度因子（Dilution of Precision, DOP）可用性、定位服务可用性等 PVT 性能指标进行了监测和评估。而对于民航用户关心的连续性、可用性尤其是完好性等 PNT 性能指标都没给出明确的评估方法，故有必要对面向民航应用的 BDS PNT 性能指标体系进行建模及评估。

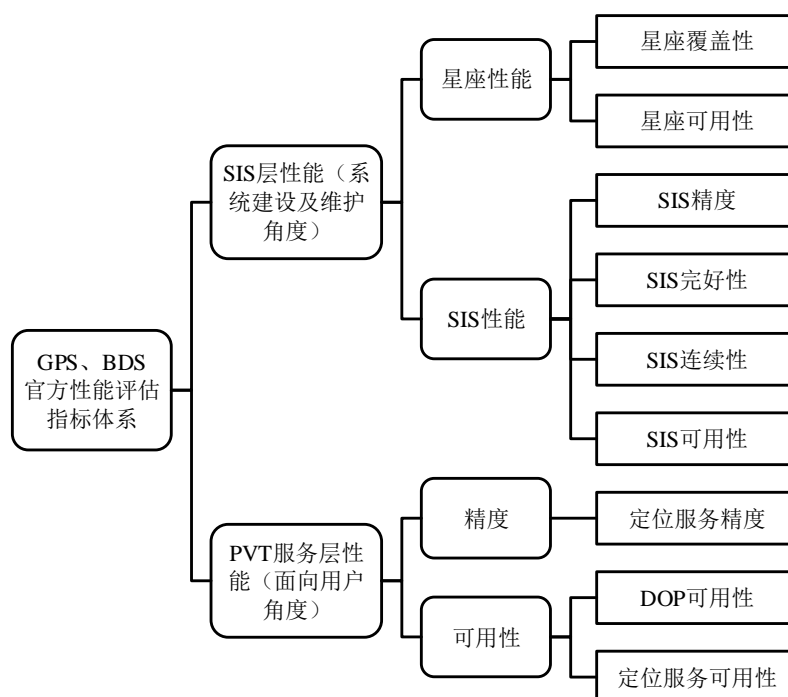


图 1.3 GPS、BDS 官方性能评估指标体系

CSNO 国际合作研究中心于 2011 年 9 月在联合国卫星导航国际委员会第六届大会（ICG-6）上提出了国际 GNSS 监测评估系统（international GNSS Monitoring and Assessment System, iGMAS）的概念。iGMAS 旨在建立一个全球分布的包括中国的 BDS、美国的 GPS、俄罗斯的“全球导航卫星系统（GLObal NAVigation Satellite System, GLONASS）”以及欧盟的伽利略卫星导航系统（Galileo satellite navigation system, Galileo）在内的 GNSS 导航卫星全弧段、多重覆盖

的实时跟踪网络，以及具备数据采集、存储、分析管理、发布等功能的信息平台，对 GNSS 运行状况和主要指标进行监测和评估，生成高精度精密星历、卫星钟差、地球定向参数、跟踪站坐标和速率、全球电离层延迟模型和 GNSS 完好性产品。iGMAS 提出采用多波束天线对所有导航卫星进行基本跟踪与监测，采用 30 m 口径高增益天线对重点卫星进行精细化跟踪与监测。目前，iGMAS 已建成北京、拉萨、乌鲁木齐、长春、昆明、上海、武汉、西安 8 个国内站，1 个南极站，1 个北极站，以及巴基斯坦、巴西、德国、加拿大、阿根廷、塔希提、南非、尼日利亚 8 个海外站。iGMAS 的提出和工程实现充分说明了“我国对 GNSS 性能监测与评估重要性的认识和理解”。

1.3.2. 国内外学者研究成果

国外学者研究成果主要集中在国际导航协会（Institute of Navigation, ION）每年举办的三大会议论文集上。1998 年，Karl Kovach 对卫星导航系统“精度、完好性、连续性和可用性等”PNT 服务层性能指标概念进行深入研究，并给出了对应的指标关系模型，在此基础上对连续性指标进行建模，给予了重点分析。1998 年，Malla R 等人首次提出了“服务空域模型（Service Volume Model, SVM）”的概念，将卫星导航系统的“性能监测与评估”通过 SVM 模型来完成，对 GPS 系统级性能指标，即精度、完好性、连续性和可用性等，之间的对应关系进行了分析，并最终应用于“广域增强系统（Wide Area Augmentation System, WAAS）”的性能评估。1999 年，Slattery R 等人对已有的 GPS 星座可用性模型展开深入探讨，在此基础上用 Markov 链对 GPS 卫星

星座可用性算法进行了改进。2002 年 GPS 选择可用性 (Selective Availability, SA) 政策取消后, Adrados C 等人对期间的 GPS 定位精度进行了前后对比分析, 结果表明: 伴随着 SA 的消失, GPS SPS 用户的定位精度得到了显著提升。从 2011 年至今, 诺丁汉科技有限公司 (Nottingham Scientific Ltd., NSL) Pattinson M 等人对位于英国南部的国际 GNSS 服务 (International GNSS Service, IGS) 站点的 GPS 数据进行了后处理分析, 对比民航非精密进近 (Non-Precision Approach, NPA) 阶段 ICAO RNP 要求, 给出了 GPS 精度、完好性、连续性以及可用性 PNT 性能分析季度报告, 结果表明, GPS PNT 服务性能满足 ICAO 要求, 并且以天为单位的 95% 置信度水平定位精度从 2011 年 3 季度的 3.5m 左右降低到 2016 年 2 季度的 2.5 m 以下。GPS 定位精度日趋精确, 服务能力稳步提升。

在 RAIM 研究方面, Choi M 等人分析了 GPS 与 GLONASS 组合系统的 RAIM 性能, 结果表明 GPS+GLONASS 组合系统的性能比其任一单系统更加可靠和稳定。伴随着 GNSS 的不断发展及国际合作的日益增强, 在未来 BDS、GPS、GLONASS 以及 Galileo 四大系统的“兼容和互操作”必然会带给用户服务性能上的显著提升。

国内学者对 BDS 性能评估指标体系的研究主要包括: 2012 年, 李作虎博士在“球壳模型”和“金字塔模型”的基础上, 进一步提出用于描述 RNP 指标, 即精度、完好性、连续性及可用性等, 相互关系的“平行递进模型”, 为卫星导航系统具体性能指标的评估方法提供了理论依据, 最终归纳总结出卫星导航系统的性能监测及评估理论。本文

导航能力测评系统的研究就是建立在“平行递进模型”的基础之上的。2013 年，胡志刚博士在系统研究了以 GPS 为代表的 GNSS 性能评估理论与方法的基础上，提出了 BDS 性能评估体系，自主设计并研制了以 BDS 性能评估为主，兼顾 GPS 和 Galileo 的 GNSS 性能评估软件系统。杨元喜等人于 2013 年基于北京地区北斗实测数据，对当时“5GEO+5IGSO+4MEO”星座架构下的 BDS 区域系统基本导航定位性能进行了初步分析，指出 BDS 在亚太区域的基本服务性能与 GPS 处在同一水平；2016 年对 BDS 在极区导航定位性能进行了初步评估，结果表明 BDS 在南北极覆盖较差，暂时不具备导航定位能力，并预测随着 BDS 全球系统逐步实现，上述问题将会得到有效解决。陈金平等人在 2016 年介绍了 BDS 全球系统试验卫星在卫星时钟和轨道测定方面的新技术体制，对其性能进行了评估，提出相比于 BDS 区域星座，新一代试验卫星各项性能均有较大提升。

在 BDS 服务于民航的前瞻性研究方面，2015 年刘瑞华等人基于仿真数据对民航 NPA 阶段 BDS 卫星可见性、DOP、RAIM 可用性等导航性能进行了分析；2016 年倪育博等人对面向民航应用的 GPS 和 BDS 定位精度、测速精度及完好性等进行了仿真分析；2016 年蒋虎等人仿真评估了民航精密进近阶段 GNSS 的 RAIM 可用性。上述文献使用的都是仿真数据，对实际环境的反映不够真实；分析的也只是 GNSS 的部分性能，对服务性能的评估不够全面和系统。

1.4. 文档内容和结构安排

如前所述，基于 GNSS 的 PBN 导航是民航领域对现有导航技术及体系的一次革新，它涉及到三个基础要素，即导航基础设施、导航规范和导航应用。本文以 PBN“基础设施”，即 BDS，为研究对象，统计分析 BDS 在我国典型机场环境下的精度、完好性、连续性以及可用性等关键 PNT 性能评估指标，测试评估 BDS 作为主用导航系统为民用航空提供可靠服务的可行性。本报告汇报的研究内容和结构安排如下：

第 1 章用来阐述了本课题的研究背景和意义，并对 GNSS 性能评估体系的国内外研究现状和发展趋势进行了综述。

第 2 章用来介绍面向民航应用的北斗系统导航能力测试评估方法方面的研究成果。首先，提取出面向民航应用的 BDS PNT 性能评估指标参数集合；然后，讨论了性能评估指标之间的关系模型；最后，结合 ICAO RNP 要求给出面向民航应用的 BDS PNT 性能指标评估方法。

第 3 章介绍了面向民航应用的 BDS 导航能力测试与评估系统的设计和实施方案。其中，包含北斗卫星信号监视设备的研制方案和 BDS PNT 性能评估软件的设计方案。

第 4 章基于全国多个机场 BDS 和 GPS 实测数据，对 BDS、GPS 系统的导航性能评估指标进行了后处理分析，形成了定量的测试和评估结果。

2. 面向民航应用的 BDS 导航能力评估方法

2.1. 引言

针对民航应用的卫星导航系统能力测试和评估，目前国内没有通用的方法和规范，也没有统一的评估指标和评价标准。本章拟针对各类民用航空应用对导航能力的特殊要求，论证和确定 BDS 导航能力测试和评估的技术参数集合以及相应的指标关系模型，研究可以准确度量和刻画 BDS 导航性能的方法和技术，以指导具体测试方案的开展和部署。

2.2. ICAO RNP 要求

针对民用航空的不同飞行阶段和运行条件，ICAO 在“标准和建议做法（Standards and Recommended Practices, SARPs）”附件 10

《航空电信》中给出了 GNSS 精度、完好性、连续性和可用性等性能指标的 RNP 要求。如表 2.1 所示。

表 2.1 ICAO RNP（SARPs 2006）

飞行阶段	水平精度 95%	完好性			连续性	可用性
		完好性 风险	水平告警 门限	告警 时限		
航路	3.7 km	$1 \times 10^{-7}/h$	3.7km	5 min	$1-1 \times 10^{-4} \sim 1-1 \times 10^{-8}/h$	0.99~0.99999
终端区	0.74km	$1 \times 10^{-7}/h$	1.85km	15s	$1-1 \times 10^{-4} \sim 1-1 \times 10^{-8}/h$	0.99~0.99999
NPA	220m	$1 \times 10^{-7}/h$	556m	10s	$1-1 \times 10^{-4} \sim 1-1 \times 10^{-8}/h$	0.99~0.99999

表 2.1 给出了民用航空航路、终端区以及 NPA 等 3 个飞行阶段的精度、完好性、连续性以及可用性等 4 类性能指标参数。其中，精度指标可以用 95%置信度水平精度来描述，完好性指标又可分为完好性风险（Integrity Risk, IR）、水平告警门限（Horizontal Alert Limit, HAL）以及告警时限（Time To Alarm, TTA）。IR 是指出现危险误导信息（Hazardous Misleading Information, HMI）的概率，在实际应用中决定了 RAIM 的“漏检概率”。HAL 是各飞行阶段保证安全操作的“定位误差门限”。当“GNSS 的定位误差超过了 HAL”而“未在 TTA 内发出告警”时，称为产生了 HMI。由表 2.1 可以看出，从航路、终端区到 NPA 的各个飞行阶段，RNP 性能要求随着飞机与地面距离的不断减小而逐步提升，具体表现为精度要求越来越高，告警门限越来越小，告警时限也在逐步减小。另外，不同于精度和完好性“固定数值”的 RNP 要求，由于预定操作、交通密度、飞行复杂度、可替代的辅助导航等运行条件的差异，各个飞行阶段对连续性和可用性的 RNP 要求是一个“范围值”。本文对 BDS 导航能力的研究使用最为严格的 NPA 阶段 RNP 要求，在此标准基础上探讨 BDS 服务于民航的可行性。

2.3. BDS 导航性能评估指标参数集合

依据《GPS SPS PS》以及《BDS 公开服务性能规范（1.0 版）》，本文从面向用户的 PNT 服务层角度对 ICAO RNP 四大性能评估指标

进行了进一步分解，通过调研和理论分析，确定了面向民航应用的 BDS PNT 性能评估指标参数集合，主要分为反映 BDS 导航信号质量的“信号级参数”和反映 BDS PNT 服务性能的“信息级参数”两大类，如图 2.1 所示。

不同接收机的输出格式和内容可能会有所不同，但通常均输出跟踪环路所测量的伪距、载波相位、多普勒频移和载噪比等测量值及信息。这些测量信息的精度直接反映导航信号的质量的好坏，被称为“信号级参数”。伪距、载波相位和多普勒频移等测量信息经过加工处理（PVT 解算）后，转化为更能代表接收机服务水平的定位域参数，这些定位域参数的精度反映了 BDS PNT 服务性能，被称为“信息级参数”。以上就是本文划分“信号级参数”与“信息级参数”的主要依据。

众所周知，卫星导航系统一般由空间段（卫星星座）、地面控制段以及用户段（用户接收设备）等三部分构成。在进行系统误差分析时，通常把空间段以及地面控制段部分引入的误差划分为 SIS 层性能指标参数。从这个角度看，包含用户段误差成分的“信号级参数”也可以被认为是面向用户的 PNT 服务层性能指标。

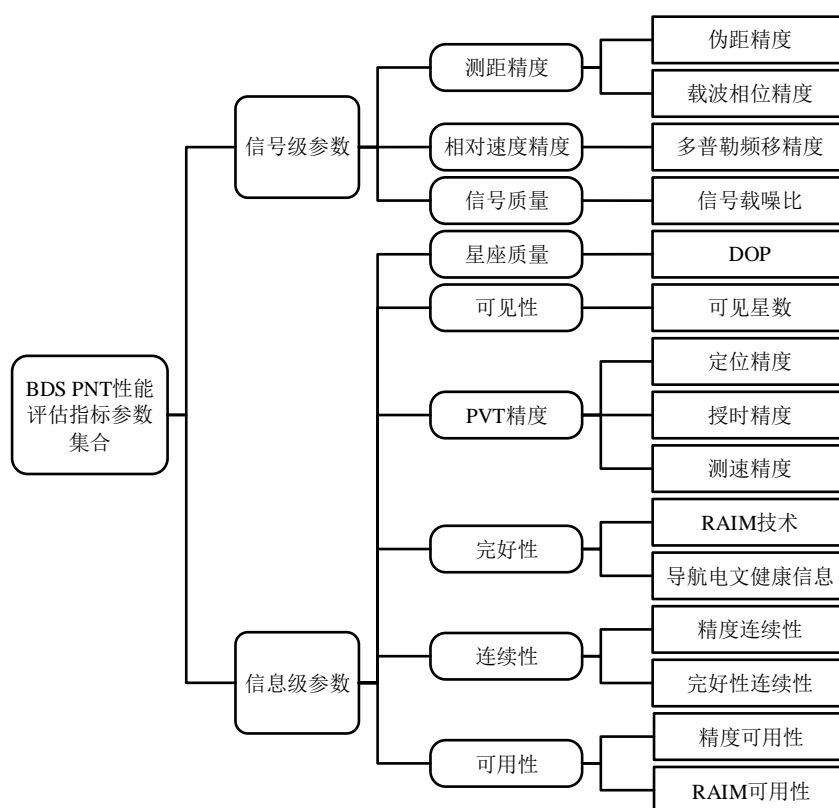


图 2.1 BDS PNT 性能指标参数集合

2.3.1. 信号级参数

如图 2.1 所示，“信号级参数”包括以下三个部分：

（1）测距精度

BDS 接收机的输出包含两个基本距离测量值，即伪距和载波相位。其中，伪距测量值可以独立实现单点绝对定位，但其精度相对粗糙；载波相位测量值虽然含有整周模糊度，不能独立实现单点绝对定位，但是它非常平滑，精度很高。本文只以伪距测量值作为距离测量研究对象。

一般来说，伪距测量误差按照其来源不同可大致分为三类：

① 与卫星相关的误差，主要包括“卫星时钟误差”和“卫星星历误差”两部分；

② 与信号传播相关的误差，通常分为“电离层延时”和“对流层延时”两部分；

③ 与接收设备（接收机）相关的误差，主要分为“多路径效应”和“接收机噪声”两部分。

伪距精度和载波相位精度反映了 BDS 测距精度的质量。

（2）多普勒频移精度

我们将“信号接收频率随信号发射源与接收机之间的相对运动而发生变化的现象”称为多普勒效应，将多普勒效应造成的“信号接收与发射之间的频率差值”称为多普勒频移。在卫星导航系统中，多普勒频移体现的是用户接收机在测量时刻相对于卫星的瞬时运动速度，而两时刻之间的载波相位测量值之差反映的是运动的平均速度。一般来说，接收机会“同时输出”多普勒频移和载波相位测量值。

多普勒频移精度反映了 BDS 接收机与卫星相对速度精度。

（3）信号载噪比

在卫星导航系统中，信号的质量通常用信噪比（Signal Noise Ratio, SNR）或载噪比（Carrier Noise Ratio, CNR）来衡量，但它们的大小与噪声带宽的取值有关，因而通常将“1 Hz 带宽上的载噪比” C/N_0 （dB-Hz）作为衡量信号质量的指标，三者之间的关系为：

$$C/N_0 = CNR + B_N = SNR - G_P + B_N \quad (2.1)$$

其中， B_N 是指等效噪声带宽（dB-Hz）， G_P 为处理增益。

C/N_0 主要受到天线增益参数，接收机中相关器的状态以及多路径效应等因素的影响，在一定程度上反映了载波信号的质量。一般来说，

室外 BDS 接收信号的 C/N_0 值大致在 35~55 dB-Hz 的这一范围内变动, 其中大于 40dB-Hz 的一般可以视为强信号, 而小于 28dB-Hz 的则被视为弱信号。

信号载噪比反映了 BDS 导航信号捕获、跟踪质量。

2.3.2. 信息级参数

由图 2.1 可知, “信息级参数”主要分为以下六个部分:

(1) DOP

DOP 定义为用户等效距离误差 (User Equivalent Range Error, UERE) 转换为 BDS PVT 误差的放大系数, 通常包括“几何精度因子 (Geometric Dilution of Precision, GDOP)”、“位置精度因子 (Position Dilution of precision, PDOP)”、“水平精度因子 (Horizontal Dilution of Precision, HDOP)”、“垂向精度因子 (Vertical Dilution of Precision, VDOP)”以及“时间精度因子 (Time Dilution of Precision, TDOP)”等五个参数。

DOP 指标反映了 BDS 的卫星星座质量。在定位解算过程中, DOP 值越小, 表明卫星、接收机相对几何布局(星座质量)越好, 同等 UERE 条件下, 得到的定位精度也就越高。

(2) 可见性

可见性指标体现了 BDS 为用户提供导航服务的能力, 主要通过可见星数来反映。可见星数是指可观测卫星 (卫星仰角大于遮蔽角) 的数量, 在特定的区域和时间内, 如果可见星数小于 4 颗, 接收机无法进行定位解算, 此时 BDS 将不能为用户提供导航服务。

(3) PVT 精度

PVT 精度用来衡量 BDS 定位、授时、测速结果与目标的真实位置相接近的程度，包括定位精度、授时精度、测速精度等三类精度性能指标。

(4) 完好性

完好性是指“BDS 在不能使用时及时向用户发出告警的能力，是对整个系统所提供信息正确性的置信度的测量”。对于民航用户来说，完好性保证从某方面讲也就是旅客生命的保证，所以极为重要。本文完好性的保证是建立在导航电文健康信息和 RAIM 技术实时监测基础上的。

(5) 连续性

假定 BDS 运行初始即可用，则连续性可定义为“BDS 在运行阶段持续时间内满足规定性能指标，即精度和完好性，要求的概率”。可分为精度连续性和完好性连续性。

(6) 可用性

可用性是对 BDS 满足精度和完好性服务性能标准的时间累计效应的统计，定义为“服务空域内 BDS 能为运载体提供可用导航服务的时间百分比”。依照 2.4 节所述的“平行递进模型”理论，可用性可分为精度可用性及 RAIM 可用性两类。可用性作为民航应用领域的关键性能指标，它的质量水平决定了 BDS 能否作为唯一或主用导航系统为民航提供服务。

2.4. BDS PNT 性能评估指标关系模型

到目前为止，由精度、完好性、可用性、连续性等 PNT 性能指标构成的评估体系内各指标之间的关系还没有公认的结论。文献给出了两种描述四大 PNT 性能指标相互关系的模型，即球壳模型和金字塔模型。如图 2.2 所示，两种模型虽然都从不同角度描述了四大 PNT 性能指标之间的关系，但“指标间的部分关系缺乏严密推理，不能形成科学合理的扩展概念，无法为 PNT 指标评估方法的具体实现提供理论支撑”。例如：依照球壳模型和金字塔模型，处于中心层/最底层的精度指标与其他外层/上层指标都能建立联系，包括直接和间接联系。间接联系如精度的完好性的连续性的可用性就显得极为复杂，很难予以准确描述和正确评估。

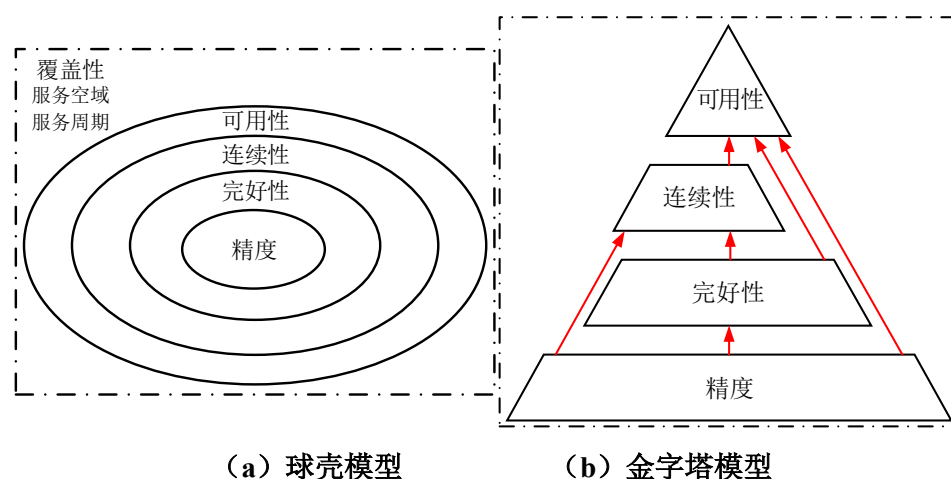


图 2.2 球壳及金字塔模型

为此，文献提出了一种改进型模型，称作“平行递进模型”。如图 2.3 所示，该模型把四大性能指标划分为基础性能层和扩展性能层，对卫星导航系统 PNT 性能的描述更加准确和科学，为性能指标评估方法的具体实现提供了理论支撑。

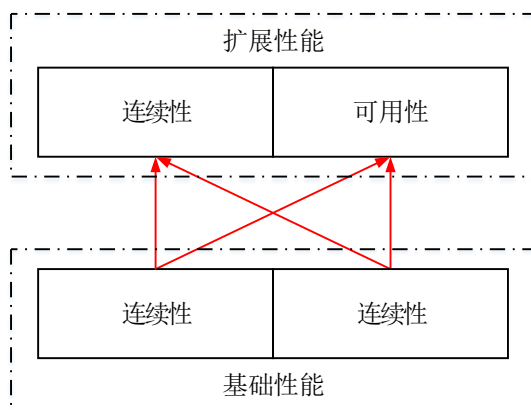


图 2.3 平行递进模型

本文在“平行递进模型”基础上对面向民航应用的“BDS PNT 性能评估指标体系”内各指标之间的关系进行了整理分析，建立了关系模型，如图 2.4 所示。

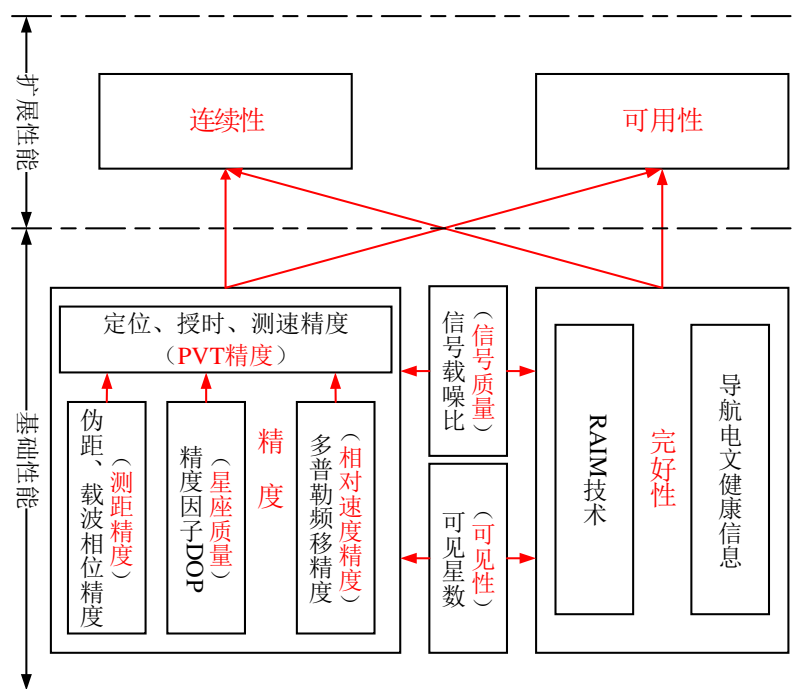


图 2.4 BDS PNT 性能指标关系模型

由图 2.4 可以看出，BDS PNT 性能指标关系模型整体分为两个层次：基础性能层和扩展性能层。其中，处于模型下方的为基础性能层，包括精度和完好性指标，代表 BDS 应该具备的基本性能，在地位上

是相互平等的；另外，位于模型上方的是扩展性能层，是对基础性能层的递进和扩展，是精度和完好性指标在空域和时域上的统计，包括连续性和可用性，两者在地位上也互相平等。

基础性能层和扩展性能层模型之间存在直接关系。例如，精度与连续性和可用性之间都存在直接关系，形成了精度连续性和精度可用性的概念。从故障的角度看，在一定评估周期内，精度故障事件肯定会对精度连续性和精度可用性产生影响。其中，精度故障事件发生的频率会对精度连续性产生影响，精度故障事件持续的总时间同时也会影响精度可用性。精度连续性和精度可用性之间的这种差异表明：可以从不同的角度对精度指标进行描述，这有利于精度概念的丰富和扩展。类似地，完好性连续性和完好性可用性也能用相同的方法进行分析和描述。

2.4.1. 精度

从图 2.4 可以看出，精度指标被划分为伪距精度、载波相位精度、DOP、多普勒频移精度、定位精度、授时精度以及测速精度等部分。其中，伪距精度和载波相位精度都属于测距精度，定位精度、测速精度、授时精度又统称为 PVT 精度。对于精度指标，以下三点需要注意：

（1）定位、授时精度的保证是通过伪距/载波相位精度和精度因子共同作用完成的。

（2）一般来说，速度测量的方法有三种：利用定位位置差计算速度、利用原始多普勒观测值计算速度、利用载波相位中心差分获得

的多普勒观测值计算速度。所以，测速精度的保证有三种途径，分别为：定位精度、载波相位精度、多普勒频移精度。

(3) 测距精度通过 DOP 转化为定位、授时及测速精度的过程称为 PVT 解算。

2.4.2. 完好性

BDS 本身可通过导航电文向用户发送完好性信息，但对民航用户而言，电文信息滞后时间过长，不能满足实时监测的需求，因此需要通过 RAIM 技术为高速运行的机载设备提供及时的导航完好性信息。如图 2.4 所示。

RAIM 算法的完好性监测基本原理为检测各个卫星测量值之间的一致性。算法的输入包括测量噪声的标准差，测量几何布局以及所能允许的最大虚警概率和漏检概率，算法的输出是水平保护级别 (Horizontal Protection Level, HPL)。RAIM 对可见卫星数量和卫星的几何分布有一定要求，一般“需要几何分布较好的 5 颗及以上卫星来检测是否存在故障，需要几何分布较好的 6 颗及以上卫星来识别故障卫星”。

最后，需要注意的是，信号载噪比及可见星数作为卫星导航系统最基础也是最易满足的性能指标，对它们的实时监测也对精度、完好性以至连续性、可用性指标的满足有着不可或缺的作用。

2.5. 面向民航应用的 BDS PNT 关键性能指标评估方法

本章上两节系统介绍了 BDS 导航能力测试和评估的技术参数集

合以及相应的指标关系模型，本节结合 NPA 阶段 ICAO RNP 要求，研究可以准确刻画和度量 BDS PNT 性能的方法和技术。

2.5.1. 精度评估方法

卫星导航系统的精度是指“系统为运载体所提供的实时信息与其真实情况之间的重合度”，包括测距精度（伪距精度、载波相位精度）、PVT 精度（定位精度、授时精度、测速精度）以及多普勒频移精度等，无特别强调的情况下一般指定位精度。限于篇幅，本节仅对 BDS 定位精度相关评估方法作简要介绍，分为直接测评法和间接评估法两类。

2.5.1.1 直接测评法

BDS 定位精度可以表示为在一定置信水平条件下所有误差不会超过的一个限值。对定位精度进行直接评测的方法一般分为两种，即外符合精度和内符合精度。其中，基于用户真实位置获得的这种精度被称为“外符合精度”；在评估时采用多次采样的期望作为真值而获得的精度被称为“内符合精度”。内、外符合精度的评估方法类似，差别只是真值策略不同，外符合精度采用的是真实位置，内符合精度采取的是多次采样的期望。接下来以外符合精度为例介绍直接测评法。

假设参考点在大地坐标系内的坐标为 (ϕ_s, λ_s, h_s) ，观测点 t_k 时刻的坐标为 $(\phi_m(t_k), \lambda_m(t_k), h_m(t_k))$ 。首先将上述坐标转换为站心坐标系东北天（EastNorthUp, ENU）坐标，进而再计算出观测点至参考点的水平和垂直方向误差，即：

$$\Delta e(t_k) = [\lambda_m(t_k) - \lambda_s] \cdot a \cdot \cos(\phi_s) \quad (2.2)$$

$$\Delta n(t_k) = [\phi_m(t_k) - \phi_s] \cdot a \quad (2.3)$$

$$\Delta H(t_k) = \left[(\Delta e(t_k))^2 + (\Delta n(t_k))^2 \right]^{1/2} \quad (2.4)$$

$$\Delta V(t_k) = h_m(t_k) - h_s \quad (2.5)$$

其中, $\Delta e(t_k)$ 代表东向误差, $\Delta n(t_k)$ 代表北向误差, $\Delta H(t_k)$ 为水平方向误差, $\Delta V(t_k)$ 为垂直方向误差, CGCS2000 参考椭球体长半轴 $a=6378137.0$ m。

接下来进行统计运算。首先, 根据不同的 t_k 取值, 我们可以得到评估周期内一系列不同的误差采样序列 $\Delta H(t_k)$ 和 $\Delta V(t_k)$; 其次, 对 $\Delta H(t_k)$ 和 $\Delta V(t_k)$ 的绝对值按照特定的顺序 (一般为从小到大) 进行排列, 分别得到误差采样序列 $\overline{\Delta H_i}$ 和 $\overline{\Delta V_i}$ ($i=1,2,\dots,N$), 其中, N 指的是采样个数; 然后, 假设 BDS 置信度要求为 95%, 则可得评估周期内满足要求的采样序号 n :

$$n = \text{int}(0.95 \times N) \quad (2.6)$$

其中, 运算符 $\text{int}(\dots)$ 表示取整运算; 最终, 得到置信度为 95% 的 BDS 水平、垂向定位精度为:

$$\Delta H_{95} = \overline{\Delta H_n} \quad (2.7)$$

$$\Delta V_{95} = \overline{\Delta V_n} \quad (2.8)$$

2.5.1.2 间接评估法

定位精度的间接评估法可以用下式来表示:

$$Accuracy = UERE \times DOP \quad (2.9)$$

其中, UERE 是伪距精度的统计描述, DOP 指的是精度因子, 上

式数值均为 1σ 指标。

(1) UERE 预算

UERE 预算包含用户测距误差 (User Range Error, URE) 和用户设备误差 (User Equipment Error, UEE) 两部分。通常认为 UERE、URE 以及 UEE 都满足均值为零的正态分布, 所以采用 1σ 以及均方根 RMS 来描述三者之间的关系, 即:

$$UERE = (URE^2 + UEE^2)^{1/2} \quad (2.10)$$

依据《BDS 公开服务性能规范 (1.0 版)》, 可得 BDS 95%置信度的 URE 指标, 如表 2.2 所示:

表 2.2 BDS 公开服务空间信号 URE 精度指标

卫星类型	空间信号精度参考指标 (95%置信度)	约束条件
GEO/IGSO/MEO	URE≤2.5m	公开服务健康空间信号; 忽略单频电离层延迟模型 误差。

URE 的 95%置信度指标与 1σ 指标又有如下关系:

$$95\%URE = URE(1\sigma) \times 1.96 \quad (2.11)$$

对于 UEE 指标, 目前 BDS 还没有合适的预算模型, 本文选取 GPS 相关模型作为参考。运用公式 (2.11), 先把表 2.2 中的 BDS URE (95%) 指标转换为 1σ 指标, 结合 GPS UEE 预算数据, 代入公式 (2.10), 最终得到 BDS UERE 预算。如表 2.3 所示。

表 2.3 GPSUEE 及 BDS UERE 预算

仰角/(°)	GPS UEE 预算	BDS UERE 预算/(m)
--------	------------	-----------------

找到引用源。/(m)		
5	7.48	7.59
10	6.64	6.76
15	5.92	6.06
20	5.31	5.46
30	4.31	4.49
40	3.57	3.79
50	3.06	3.32
60	2.73	3.01
90	2.44	2.75

(2) DOP

在导航学中，一般用 DOP 这个概念来表示“测量误差转化为定位误差的放大倍数”。假设“观测时刻有 N 颗可见卫星，各颗卫星的测量误差呈相同的正态分布，均值为 0，方差为 σ_{URE}^2 ，并且不同卫星间的测量误差互不相关”，则有

$$\begin{bmatrix} \sigma_x^2 & & & \\ & \sigma_y^2 & & \\ & & \sigma_z^2 & \\ & & & \sigma_{\delta_{tu}}^2 \end{bmatrix} = D \sigma_{URE}^2 \quad (2.12)$$

其中，等式左边的矩阵为定位误差协方差矩阵，矩阵 D 为

$$D = (H^T H)^{-1} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

其中，观测矩阵 H 为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} -\cos(\theta^{(1)})\sin(\alpha^{(1)}) & -\cos(\theta^{(1)})\cos(\alpha^{(1)}) & -\sin(\theta^{(1)}) & 1 \\ -\cos(\theta^{(2)})\sin(\alpha^{(2)}) & -\cos(\theta^{(2)})\cos(\alpha^{(2)}) & -\sin(\theta^{(2)}) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\cos(\theta^{(N)})\sin(\alpha^{(N)}) & -\cos(\theta^{(N)})\cos(\alpha^{(N)}) & -\sin(\theta^{(N)}) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

其中， θ 和 α 分别为接收机位置的卫星仰角和方位角。

结合公式 (2.9) 及 (2.12)，可得各类 DOP 的计算方法：

$$\text{GDOP} = \sqrt{D_{11} + D_{22} + D_{33} + D_{44}} \quad (2.15)$$

$$\text{PDOP} = \sqrt{D_{11} + D_{22} + D_{33}} \quad (2.16)$$

$$\text{HDOP} = \sqrt{D_{11} + D_{22}} \quad (2.17)$$

$$\text{VDOP} = \sqrt{D_{33}} \quad (2.18)$$

$$\text{TDOP} = \sqrt{D_{44}} \quad (2.19)$$

接收机通常也会将 DOP 值同定位结果一起输出，以供用户参考。

较小的 DOP 值意味着相对较小的定位误差。

2.5.2. 完好性评估方法

卫星导航系统完好性的构建需要从多个层次共同展开，它的评估涉及多方面因素，PNT 服务层完好性故障的判定标准为“定位解算误差超过了应用领域既定的完好性告警限值，是一个综合的表现”**错误！未找到引用源。**。

假定“完好性损失仅由单颗卫星故障造成”以及“接收机在工作期间是无故障的”，在 RAIM 技术被用来提供实时监测的前提下，BDS PNT 服务层完好性的评估方法如下：

$$\text{Integrity} = 1 - \text{IR} = 1 - \frac{\text{CTI}}{\text{MTBF}_{\text{int}}} \quad (2.20)$$

其中, CTI 是指连续时间间隔 (Continuity Time Interval, CTI), NPA 阶段的 ICAO RNP 是以小时为单位统计的, 所以在这里 CTI 的取值为 1 h; $MTBF_{int}$ 是指完好性损失平均故障间隔时间 (Mean Time Between Failure, MTBF), 它被计算为总时间除以 HMI 事件的数目。

以下事件同时发生, 被统计为 HMI 事件:

(1) 水平定位误差大于 HAL, ICAO 对 NPA 阶段的 HAL 要求为 556m;

(2) 持续 TTA 以上时间的 RAIM 不可用事件, ICAO 对 NPA 阶段的 TTA 要求为 10 s;

RAIM 不可用事件是指任何以下事件:

- ① 可见星数小于 5, 导致 HPL 无法计算;
- ② 计算的 HPL 大于 HAL (556m)。

假设观测时刻的可见星数为 N , 此时 HPL 的计算方法如下式:

$$HPL = \max \left(\sqrt{\frac{A_{1i}^2 + A_{2i}^2}{S_{ii}}} \times \sigma_i \right) \times \sqrt{\lambda_{\min}} \quad (2.21)$$

其中,

$$A = (H^T W H)^{-1} H^T W \quad (2.22)$$

$$S = I_n - H(H^T W H)^{-1} H^T W \quad (2.23)$$

$$W^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & L & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & L & 0 \\ M & M & O & M \\ 0 & 0 & L & \sigma_N^2 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

H 为观测矩阵, 计算方法见公式 (2.14); σ_i 为当前时刻第 i 颗卫星的 UERE 预算, 它和卫星仰角 θ 之间的对应关系见表 2.3; 非中心

χ^2 分布非中心参量 λ 的取值和当前可见星数的对应关系如表 2.4 所示
错误!未找到引用源。

表 2.4 不同可见星数对应的 $\sqrt{\lambda_{\min}}$ 值（航路、终端区、NPA 三阶段）

可 见星数	5	6	7	8	9	10	11	12
$\sqrt{\lambda_{\min}}$	8. 20	8. 48	8. 71	8. 84	9. 01	9. 14	9. 27	9. 35

2.5.3.连续性评估方法

根据 2.4 节的分析可知，连续性可分为精度连续性和完好性连续性。从故障统计的角度看，连续性损失事件的数目即为精度、完好性损失事件在数量上的统计和。

根据可靠性基本原理，BDS PNT 服务层连续性的评估方法如下：

$$Continuity = 1 - \frac{CTI}{MTBF_{con}} \quad (2.25)$$

其中，CTI 取值为 1 h； $MTBF_{con}$ 是指连续性损失 MTBF，它被计算为总时间除以连续性损失事件的数目。

任何持续 10s 以上的下列事件被统计为连续性损失事件：

- (1) HPL 无法计算（大于截止高度角的可见卫星数 <5 ）；
- (2) $HPL > HAL$ （556m）；
- (3) 水平定位误差 $>HAL$ （556 m）；
- (4) 任意 a)、b)、c) 的组合事件。

需要注意的是，连续性损失事件只统计 BDS 非计划中断。

2.5.4. 可用性评估方法

可用性可分为“精度可用性”和“完好性可用性,即 RAIM 可用性”。同连续性的统计方法类似,可得 BDS PNT 服务层可用性的评估公式:

$$Availability = \frac{MTBF_{ava}}{MTBF_{ava} + MTTR} \quad (2.26)$$

其中, $MTBF_{ava}$ 是指可用性损失 MTBF, 被计算为总时间除以可用性损失事件的数目; MTTR 是指平均故障恢复时间 (Mean Time To Restore, MTTR), 被计算为可用性损失事件持续时间除以可用性损失事件的数目。

可用性损失事件的统计和连续性略有不同, 还需包含 BDS 计划中断。任何持续 10s 以上的下列事件被统计为可用性损失事件:

- (1) HPL 无法计算 (大于截止高度角的可见卫星数 < 5);
- (2) $HPL > HAL$ (556m);
- (3) 水平定位误差 > HAL (556 m);
- (4) 任意 a)、b)、c) 的组合事件。

3. 面向民航应用的 BDS 导航能力测试与评估系统

3.1. 引言

为了实现面向民航应用的 BDS 导航能力的测试与评估,课题组完成了测试与评估系统的方案设计,并实现了相应的软硬件系统,在国内多个典型机场进行了部署,具备了对 BDS 导航能力进行测试与评估的初步能力。本章中将对测试评估系统的组成、关键软硬件设备的设计与实现进行介绍。

3.2. 导航能力测评方案概述

图 3.1 给出了面向民航应用的 BDS 导航能力测试与评估系统的组成框架。该系统由硬件设备和测试与评估软件两部分组成。其中,硬件设备包括机场数据监测接收设备、大容量高性能服务器和用户终端设备。机场数据监测接收设备用于采集机场环境下 BDS 和 GPS 等导航系统信号接收质量相关的原始观测量、导航星历等数据;这些采集的数据通过有线网络以设定的频度回传到系统中心的高性能服务器上,在服务器上完成数据的存储、实时性能的评估和统计,也支持以后处理模式来对设定时段内的数据进行统计分析;不同类型的用户可通过其终端设备接入到服务器上,查看测试评估的结果。系统软件则包括服务器数据库存取软件和基于 Node.js 运行环境的数据处理软件两部分,前者用于支持大量数据的并发存储和读取,后者则用于支持实时的和离线的导航数据分析和评估,给出

精度、完好性、连续性、可用性等 BDS PNT 性能的定量评估结果。

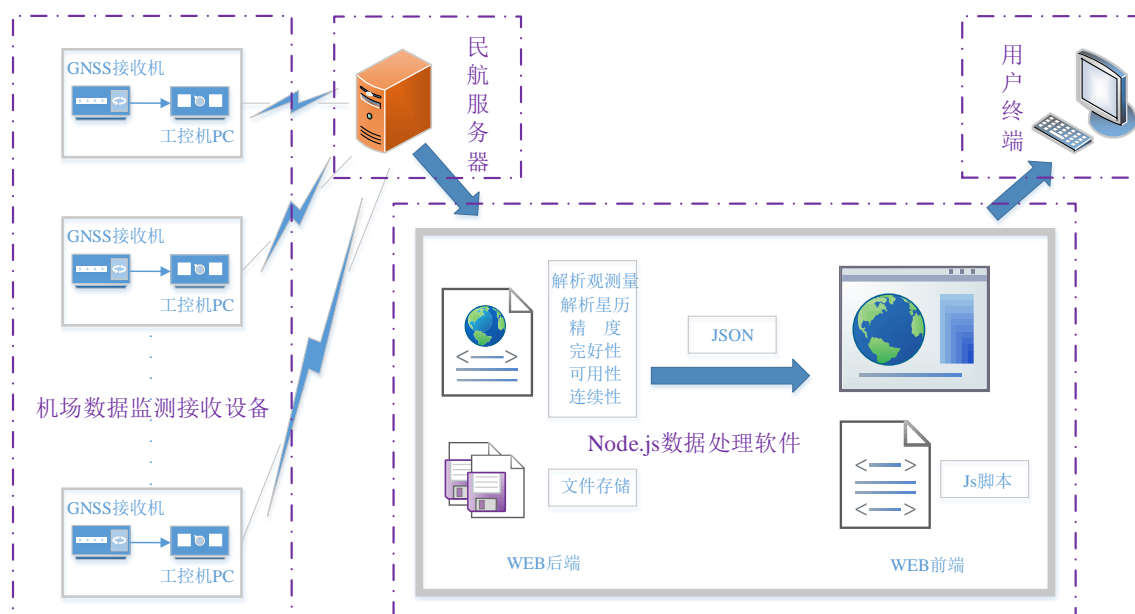


图 3.1 面向民航应用的 BDS 导航能力测试与评估系统组成框架

在本项目和其它相关项目的支持下，目前已在全国地理环境具有代表性的 13 个民航机场完成了硬件部署和数据监测接收，部署机场分别为哈尔滨、北京、东营、温州、台州、武汉、成都、海口、三亚、大理、昆明、乌鲁木齐和拉萨，如图 3.2 所示。



图 3.2 机场数据监测接收设备规划

机场实际部署的情况如图 3.3 所示。



图 3.3 机场数据监测接收设备实地部署图

以下对系统部署和运行流程作简要介绍：

(1) 在我国地理环境具有代表性的若干民航机场分别部署 GNSS 机场数据监测接收设备，设备中安装有课题组自研的 GNSS 多频多模高精度接收机，用于实现对卫星导航信号接收质量相关数据的提取。

(2) GNSS 多频多模高精度接收机对卫星信号进行捕获、跟踪，提取出 BDS 和 GPS 原始观测数据和导航电文等数据，将其按照设定频度编码为 RTCM3.2 格式的消息通过串口传送给工控计算机。工控计算机一方面将数据存储到本地硬盘作为备份，另一方面将数据打包后通过网络传输到远端的服务器。

(3) 在用户终端的指令下，数据处理软件通过网络 TCP 协议从服务器下载 BDS 及 GPS 观测量、星历等卫星原始观测数据，经过 WEB 后端软件的分析处理，得到 BDS 及 GPS 定位精度、完好性、连续性以及可用性等 PNT 性能评估结果。

(4) PNT 性能评估结果以 JS 对象标记(JavaScript Object Notation,

JSON) 格式传输与存储, 实现 WEB 前端与后端之间的无缝交互。通过 WEB 前端画图软件得到 PNT 性能评估图形信息, 最终在用户终端界面给出视图显示结果。

3.3. 多模多频 GNSS 高精度接收机设计方案和实现情况

3.3.1. 多模多频 GNSS 高精度接收机的功能性能要求

为了满足当前测试评估的需求并考虑未来系统能力的扩展, 对多模多频 GNSS 高精度接收机所提出的主要功能、性能要求如下:

1、功能要求

(1) 能够同时处理的导航频点和信号种类如下:

- BDS 系统: B1、B2 频点的两个民码信号;
- GPS 系统: L1C/A 码、L2C 码、L5 码信号;

(2) 每颗卫星每种信号的接收通道数不少于 12 个;

(3) 接收机应能以设定频度以 RTCM3.X 格式输出各卫星信号的伪距、载波相位和载噪比等原始观测量和导航电文;

2、性能要求

(1) 通道间时延一致性

- 伪距测量均值的最大差值: $\leq 0.2\text{ns}$;
- 载波相位测量均值的最大差值: ≤ 0.001 周;
- 多普勒测量均值的最大差值: $\leq 0.0005\text{m/s}$;

(2) 原始观测量精度

- 码伪距测量精度: $15\text{cm}(1\sigma)$;
- 载波相位测量精度: $3\text{mm}(1\sigma, \text{RF 端口输入电平}-130\text{dBm})$;
- 多普勒测量精度: $0.01\text{m/s}(1\sigma, \text{RF 端口输入电平}-130\text{dBm})$;

(3) 定位精度

- 单点定位精度优于 $1.8\text{m}(1\sigma)$ ，高程优于 $3.6\text{m}(1\sigma)$ ；

(4) 时间特性

- 冷启动首次定位时间：60s；

(5) 数据更新率

- 最大更新率不低于 1Hz。

3.3.2. 多模多频 GNSS 高精度接收机设计方案

多模多频 GNSS 高精度接收机的研制方案主要是继承借鉴了清华大学在民用和军用高精度接收机设计与实现方面已有的工作基础。高精度接收机主要由射频和基带两部分组成。射频单元用于对 BDS B1、B2 和 GPS L1、L2C、L5 频点的信号进行放大、变频、滤波等处理，然后输出数字中频信号以便基带模块进行处理。基带模块则用于完成对数字化后的中频信号进行捕获、跟踪、数据解调、观测量提取等导航信号处理和 PVT 解算。

3.3.2.1 射频单元的设计方案

射频单元选用了成熟的导航射频芯片 MAX2769 来完成对射频导航信号的放大、变频和滤波等处理。由于 MAX2769 芯片对输入信号频率范围有限制，对于 B2、L2C 和 L5 三路信号需要先经上变频处理后再送入 MAX2769。如图 3.4 所示，具体的信号流程如下所述：L1、L2、L5、B1、B2 频点的天线射频合路信号经低噪放放大后，通过 1:5 功分器分为五路射频信号；其中，L1、B1 频点射频信号直接通过

MAX2769 进行卫星信号的接收，而 L2、L5、B3 频点射频信号则经上变频处理后再通过 MAX2769 进行卫星信号的接收。对于每一个射频信号，MAX2769 芯片均输出相应的数字中频信号，传输至 FPGA 进行后续的导航信号处理。

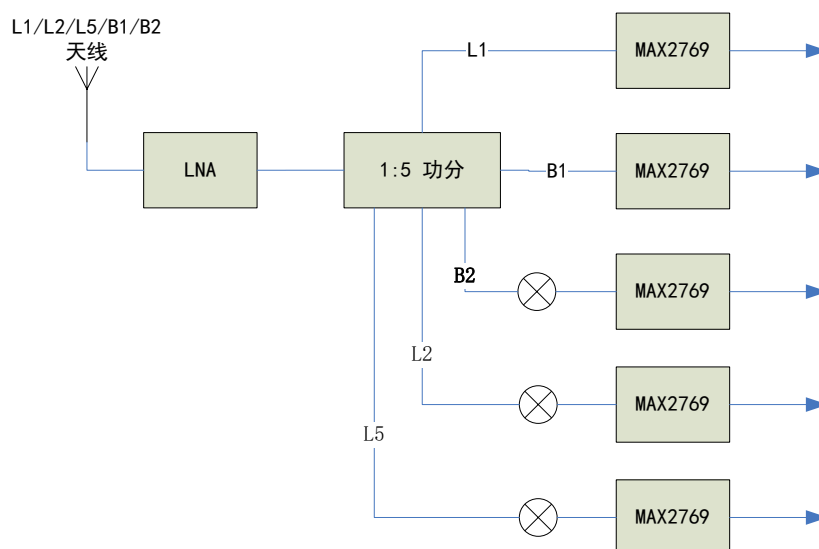


图 3.4 射频单元的信号处理流图

3.3.2.2 基带单元的设计方案

基带单元需要解决 BDS B1、B2 和 GPS L1、L2C、L5 导航信号的捕获、载波和码相位高精度跟踪、解调、观测量提取等关键技术及硬件实现。以下从硬件平台选型和处理算法两个方面进行方案的介绍。

硬件选型方面，由于需要同时完成 5 种导航信号共计 60 个通道的接收处理，基带单元硬件平台选择了 FPGA+DSP 的处理架构。FPGA 芯片为 Altera Cyclone V 系列的 5CEFA9，DSP 芯片为 TI OMAPL138（含个 C6748 DSP 核心和一个 ARM926 核心）芯片。其中，FPGA 芯片用于实现捕获引擎和多达 60 个相关器通道，而 OMAP

L138 中 DSP 核用于完成跟踪环路计算、电文解调解码和观测量提取和 PVT 解算等功能。

主要处理算法方面，可分为捕获、跟踪、观测量提取和 PVT 解算等几方面，分别介绍如下。

1) 捕获

在综合考虑捕获速度以及硬件资源的前提下，本项目设计了码相位维多相关器串行，多普勒维并行的捕获引擎，由 FPGA 和 DSP 共同实现。其中 FPGA 完成相关运算，DSP 根据相关结果对载波 NCO 和码发生器进行控制。下图给出了捕获引擎的实现结构：

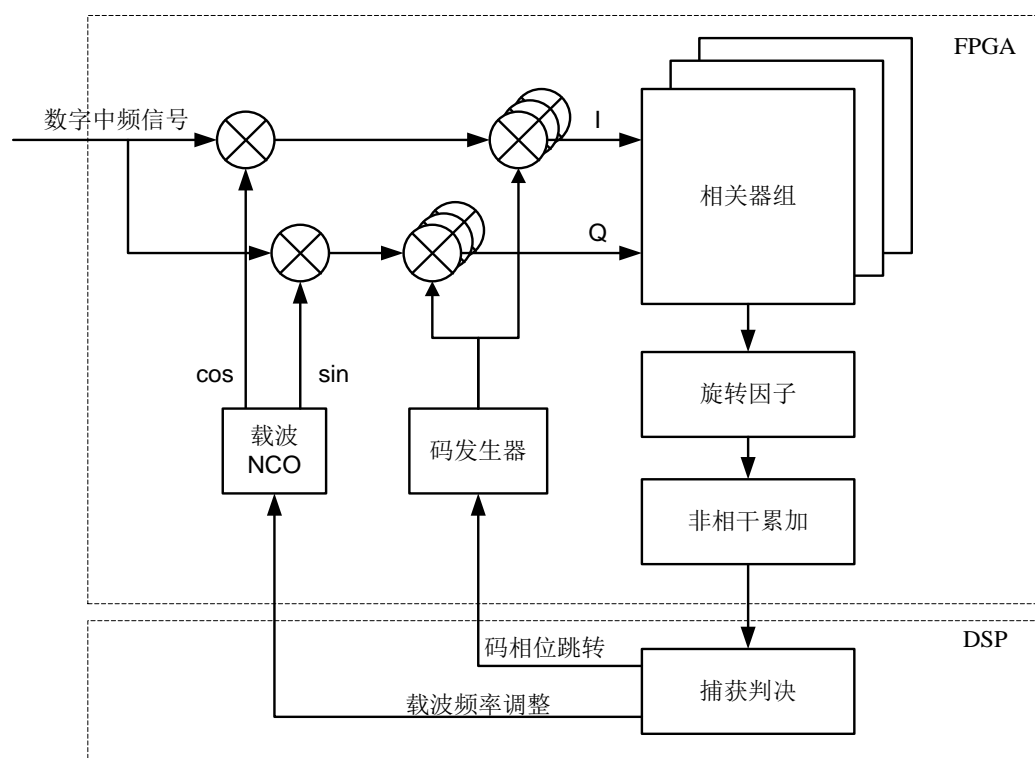


图 3.5 捕获引擎的实现框图

该方案实现简单，与码相位维使用 FFT 模块进行并行搜索相比，硬件实现复杂度大大降低，而且实现了载波多普勒维的并行搜索，多普勒维仅需进行一次搜索，与串行相关器方案相比，大大缩减了检测

时间。

2) 相关器和跟踪环路

图 3.6 给出了相关器通道和跟踪环路的实现框图。

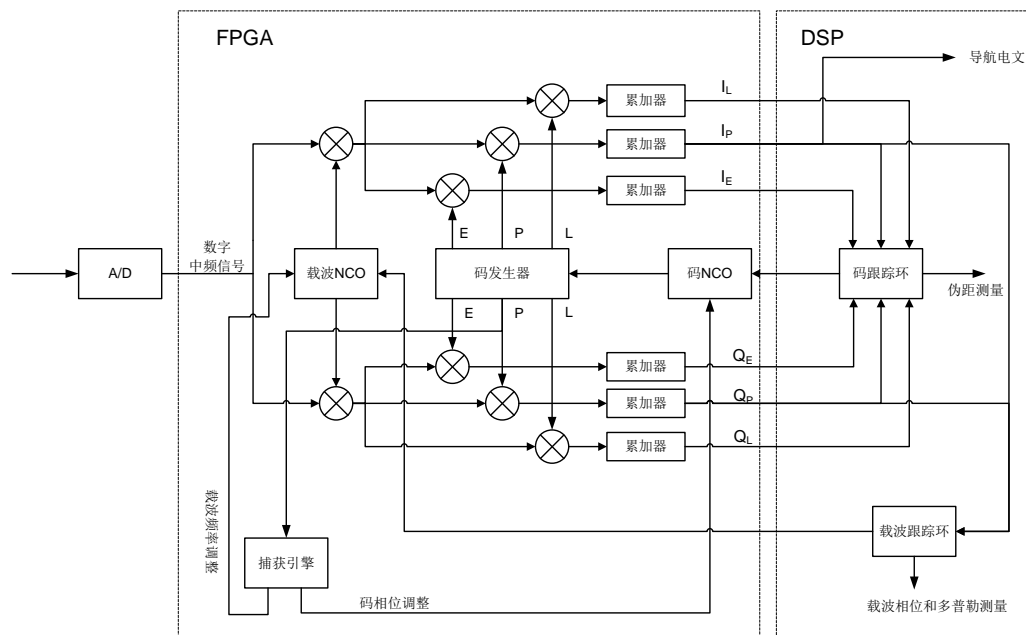


图 3.6 相关器通道和跟踪环路实现框图

为了提高载波环的牵引能力，以及在存在动态情况下实现环路的稳健跟踪，在本项目中，采用 FLL 与 PLL 相结合的载波跟踪环结构。在捕获完成后，初始移交给跟踪通道时，以及动态情况下，进入锁频模式，利用 FLL 跟踪信号的载波频率，将载波频率牵引到 PLL 环的线性范围内。当环路牵引到频偏足够小时，环路切换到锁相模式，利用 Costas 环实现对信号载波的相位跟踪。整个载波跟踪环结构如下图 3.7 所示：

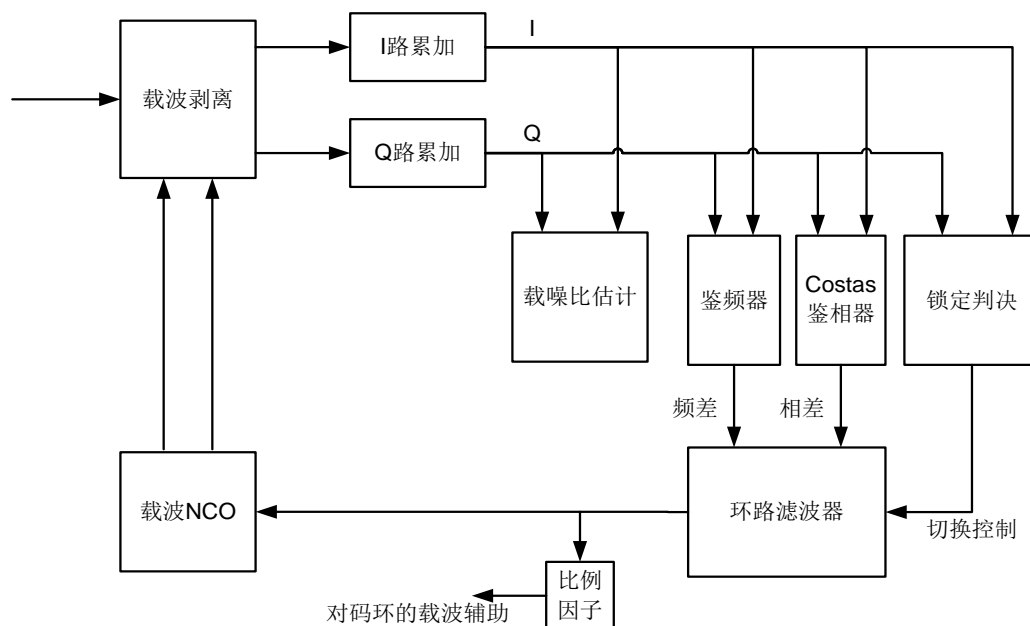
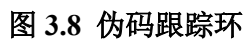


图 3.7 载波跟踪环路

码跟踪环采用相关间距可变技术，能良好的跟踪输入的扩频码，完成伪码相位的测量，为伪距提取提供良好的保证。码跟踪环的结构如图 3.8 所示。码跟踪环由预检测积分器、码环鉴别器、码环滤波器、码 NCO、码发生器及控制逻辑等部分构成。在电路中，码跟踪环将数字下变频后的 I、Q 两路正交基带信号分别与超前、滞后的扩频码(E、L)相乘，相乘后的结果经预检测积分器累加后，进入码环鉴别器。码环鉴别器输出的误差信号经码环滤波器滤波平滑后，加上载波辅助量，对码 NCO 的相位进行调节，产生准确的码钟信号。利用该码钟去控制码生成器，产生相位准确的扩频码，实现对输入卫星信号的准确跟踪。



观测量提取分为伪距提取和载波相位提取，具体说明如下：

接收机产生的扩频码与卫星信号相关，通过读取累积的码相位，提取卫星发射时间，再根据本地时钟测得钟面时间，两者相减获得伪距。

载波相位观测量是从载波 NCO 中提取的。在载波 NCO 中增加一个整周计数器，当 NCO 溢出载波相位增加一周时，整周计数器增 1。在接收机测量时刻点上，从整周计数器中读出整周计数值，从载波 NCO 中读取分数部分，二者相加的结果即为带有整周模糊度的载波相位观测量。

导航解算软件需要完成的功能框图如图 3.9、图 3.10 所示。软件设计上将抽象出定位模式、定位算法类型、电离层校正算法、对流层

校正算法、RAIM 算法等子模块，每个子模块中所采用的算法类型或参数可由用户通过上位机进行配置和选择。具体包括：

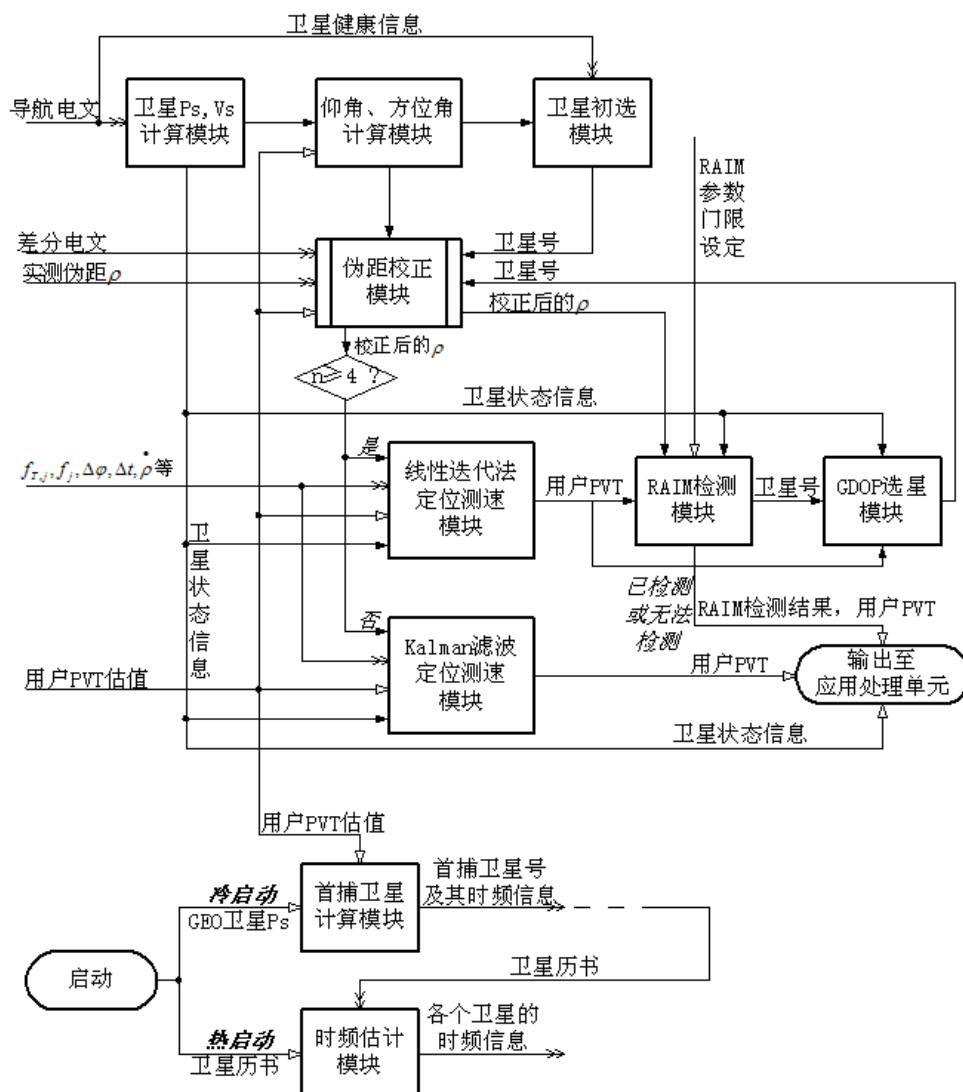


图 3.9 导航解算单元的功能框图

图例说明：

——▷[]和[]——▷ 代表与应用处理单元的接口

——▷[]和[]——▷ 代表与信号处理单元的接口

参数说明：

P_s, V_s : 卫星的三维位置和速度

n : 视界内卫星的个数

$f_{T,j}, f_j$: 卫星信号载波的发射频率和用户接收频率

$\Delta\phi, \Delta t$: 短时 Δt 对应的载波相位变化为 $\Delta\phi$

$\dot{\rho}$: 伪距增量（速率）

图 3.10 导航解算单元的功能框图说明

(1) 多系统组合定位

多星座卫星组合定位算法源自普通的单星座定位算法，其基本思路是将各星座卫星的观测量融合到同一个方程组当中，进而联合求出导航解。

在计算之前，首先要统一时间和空间参考系。在时间方面，首先要考虑到北斗采用的是北斗时，GPS 采用的是 GPS 系统时，两者之间存在偏差，因此接收机的时偏需要划分。另外要考虑通道时延的不一致性，在单星座技术中，各个通道的时延或者实现高度一致，或者将它们的差别测量出来并且在实测伪距当中加以消除；而在多星座技术中即便消除了单星座的通道时延不一致，由于信号频率的不同，各星座卫星的通道延迟也不同，这时我们可以将它们分别划入接收机的时偏当中，从而可以认为通道时延为零。在坐标系方面，北斗二代采用的是 CGS2000 坐标系，GPS 采用的是 WGS-84 坐标系，我们可以把 GPS 中的各个量值转换到 CGS2000 坐标系中。

a) 组合线性迭代算法

组合线性迭代算法与普通线性迭代算法的形式和迭代过程大体相同，但是单步求解方法有所区别。其定位方程为 $\Delta \rho = H \Delta x$ ，其中

$$\Delta \rho = (\Delta \rho_1, \Delta \rho_2, \dots, \Delta \rho_m, \Delta \rho_{m+1}, \Delta \rho_{m+2}, \dots, \Delta \rho_{m+n})^T \quad (1.1)$$

$$\Delta x = (\Delta x_u, \Delta y_u, \Delta z_u, c\Delta t_{BD}, c\Delta t_{GPS})^T \quad (1.2)$$

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & 1 & 0 \\ M & M & M & M & M \\ h_{m1} & h_{m2} & h_{m3} & 1 & 0 \\ h_{(m+1)1} & h_{(m+1)2} & h_{(m+1)3} & 0 & 1 \\ M & M & M & M & M \\ h_{(m+n)1} & h_{(m+n)2} & h_{(m+n)3} & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

M 和 n 为不同系统的卫星数, $\Delta\rho$ 和 H 的前 m 行对应第一个系统的卫星, 后 n 行对应第二个系统的卫星, Δt_{BD} 和 Δt_{GPS} 分别为对应于第一个系统和第二个系统的接收机时偏 (分别含通道时延) 误差, 其余误差量的定义与线性迭代算法的对应相同, 系数矩阵 H 的各个方向余弦因子的定义也与线性迭代算法的对应相同。在求解定位方程时, 对于单星座系统可以利用最小二乘估计, 这是因为各个伪距测量值服从独立同分布的高斯分布; 对于多星座系统, 虽然各个伪距测量值仍然服从独立的高斯分布, 但是不同星座对应的伪距测量值的方差不同, 此时最小二乘估计在误差方差意义上不是最优的, 因此应该采用加权最小二乘估计。设第一个系统的伪距总误差为 σ_{BD-2} , 第二个系统的伪距总误差为 σ_{GPS} , 则最小二乘估计误差的方差矩阵为:

$$V = \begin{bmatrix} \sigma_{BD-2} & & & & \\ & 0 & & & \\ & & \sigma_{BD-2} & & \\ & & & \sigma_{GPS} & \\ & 0 & & & 0 \\ & & & & & \sigma_{GPS} \end{bmatrix}_{(m+n) \times (m+n)} \quad (1.4)$$

进而加权矩阵为:

$$W = V^{-1} = \begin{bmatrix} 1/\sigma_{BD-2} & & & & \\ & 0 & & & \\ & & 1/\sigma_{BD-2} & & \\ & & & 1/\sigma_{GPS} & \\ & 0 & & & 0 \\ & & & & & 1/\sigma_{GPS} \end{bmatrix}_{(m+n) \times (m+n)} \quad (1.5)$$

则单步定位解为 $\Delta x = (H^T W H)^{-1} H^T W \Delta \rho$ 。

b) 组合测速算法

组合测速算法与普通测速算法的形式和求解过程大体相同，不考虑北斗时和 GPS 系统时之间的时漂，测速方程为 $d = H_v g$ ，其中

$$d = (d_1, d_2, \dots, d_m, d_{m+1}, d_{m+2}, \dots, d_{m+n})^T \quad (1.6)$$

$$g = \begin{pmatrix} u_x, u_y, u_z, ct_u \end{pmatrix}^T \quad (1.7)$$

$$H_v = \begin{bmatrix} a_{x1} & a_{y1} & a_{z1} & -(f_1 / f_{T,1}) \\ M & M & M & M \\ a_{xm} & a_{ym} & a_{zm} & -(f_m / f_{T,m}) \\ a_{x(m+1)} & a_{y(m+1)} & a_{z(m+1)} & -(f_{m+1} / f_{T,m+1}) \\ M & M & M & M \\ a_{x(m+n)} & a_{y(m+n)} & a_{z(m+n)} & -(f_{m+n} / f_{T,m+n}) \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

各个量的定义与单星座测速的对应相同。如果两个定位系统的多普勒测量精度相同，此方程可以用最小二乘法求解，否则也需要采用加权最小二乘法求解。

组合选星方案

在多星座系统中，由于不同系统的伪距误差的方差各异，定位方程的求解采用的是加权最小二乘估计，因此不再能够像在单星座系统中那样简单地利用 $(H^T H)^{-1}$ 求出 GDOP。设伪距测量误差向量 $d\rho$ （列向量），带来了用户位置和时间估计的误差向量 dx （列向量），则 $dx = (H^T W H)^{-1} H^T W d\rho$ 。 $d\rho$ 的各分量服从均值为零、相互独立的高斯分布，协方差矩阵为前面提到的 V ；则 dx 服从均值为零的高斯分布。于是定位解的误差协方差矩阵为：

$$\begin{aligned} \text{cov}(dx) &= E \left[(H^T W H)^{-1} H^T W d\rho d\rho^T W H (H^T W H)^{-1} \right] \\ &= (H^T W H)^{-1} H^T W \text{cov}(d\rho) W H (H^T W H)^{-1} \\ &= (H^T W H)^{-1} H^T W V W H (H^T W H)^{-1} = (H^T W H)^{-1} \end{aligned} \quad (1.9)$$

令 $D = (H^T W H)^{-1}$ ，则可以定义 $GDOP = \sqrt{D_{11} + D_{22} + D_{33} + D_{44} + D_{55}}$ ，

$PDOP = \sqrt{D_{11} + D_{22} + D_{33}}$, $VDOP = \sqrt{D_{33}}$, $HDOP = \sqrt{D_{11} + D_{22}}$ 。注意这里的 DOP 直接反映了定位解的精度。对于定位解类似地有：95%的点分布在与真实的点垂直距离为 $2VDOP$ 的范围内；95%的点分布在与真实的点水平距离为 $2HDOP$ 的范围内。根据需选择合适的 DOP 作为量度，最后选择其 DOP 值较小的卫星组合。

(2) 自主完好性监测 (RAIM)

导航系统必须具备在自身不能可靠有效使用的时候，向用户警示的能力，通常称之为系统完好性。系统有可能产生异常，它会导致不可容忍的定位误差。异常发生后，系统的反应时间有可能达到数分钟。因此用户自主并且及时地监测完好性、确定有效的卫星组合甚至找到故障卫星，是非常重要的。对于稳健的导航系统来说，完好性异常应当是稀少的，对于单一系统通常认为故障星不超过一颗。

RAIM 技术以卫星组合为依托，利用超定的系数矩阵进行一致性校验，从而确定是否存在异常，隔离甚至确定发生故障的某颗卫星。RAIM 的性能指标包括：水平告警门限、虚警概率、漏检概率和告警时间。

由于 RAIM 算法保证的是用户的水平定位精度，加上为了用户的使用方便，这里采用 NED 坐标系，它以用户为原点，坐标轴分别指向北方、东方和下方。图 12 给出了采用计算简单、快速有效的最小二乘奇偶法作为 RAIM 算法的实现流程图，其作用为：视界内的卫星个数如果小于 5，则 RAIM 技术无效；如果等于 5，则系统可以检测出异常的存在，但是不能排除故障星；如果大于 5，则系统可能找到

故障星并加以隔离。

该方案具体流程叙述如下：首先利用视界内所有卫星的信息，利用线性迭代的方法求出用户的导航解，然后求出相对各个卫星的预测伪距，进而计算出伪距残差测试统计量 PRT 。若组合中卫星个数为 n ，则 PRT 对应的门限为 $PRT_{thold}(n)$ 。如果 PRT 高于相应的门限值 $PRT_{thold}(n)$ ，则推定组合中含有故障星；否则比较 $HPL(n)$ 和水平告警门限 $Alarm\ Limit$ ，如果前者大于后者，那么可能同时出现漏检概率超过限定值和导航解误差过大，此时导航解不能提供系统原本可以保证的精度，卫星定位系统不适合用于导航和定位，反之导航解满足精度，适于导航和定位。

如果含有故障星且卫星总数大于 5，则每 $n-1$ 颗卫星构成一个子集，计算相应的 H 矩阵和 PRT ，比较 PRT 和 $PRT_{thold}(n-1)$ ，来判断子集中是否含有故障星。遍历所有子集之后，有 $n-1$ 个子集含有故障星，只有一个子集不含有故障星，则这个子集中不包含的卫星为故障星，我们就确定了故障星并且可以将其隔离。完成故障星判别和隔离后，对于当前卫星组合我们仍然要比较 $HPL(n-1)$ 和水平告警门限 $Alarm\ Limit$ ，以判断此时导航解是否满足精度。

如图 3.11 所示，是故障检测排除算法的实现流程框图。

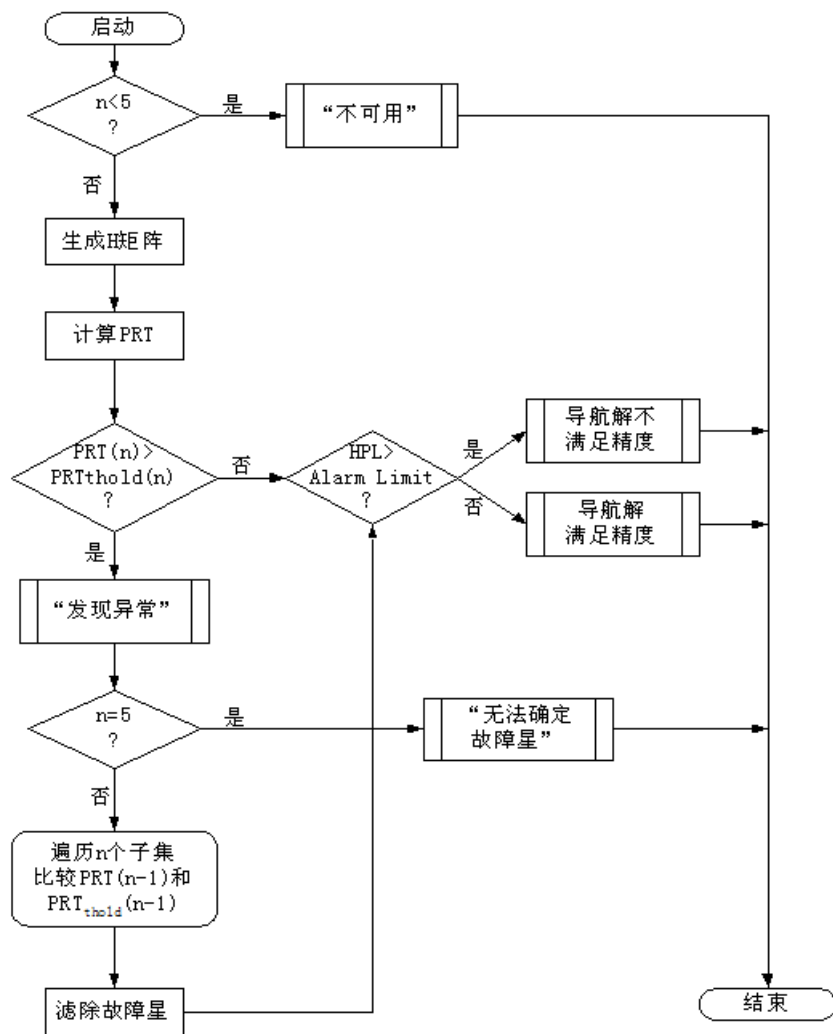


图 3.11 RAIM 算法实现流程图

3.3.3. 多模多频 GNSS 高精度接收机实现情况

根据本项目的研制技术要求，课题组完成了多模多频 GNSS 高精度接收机的研制工作，并在实际部署前开展了基于实际卫星信号和模拟器的接收机指标测试工作。相关测试结果表明所研制的接收机设备功能和性能满足技术要求。接收机实物和安装到工控计算机中的情况如图 3.12 所示。



图 3.12 多模多频 GNSS 高精度接收机实物及安装结构

3.4. 导航性能测试与评估软件设计方案和实现情况

导航性能测试与评估软件是基于 Node.js 运行环境进行设计的，软件的编写使用 JavaScript (JS) 脚本语言，能够实现数据对民航服务器的高并发集中访问，软件的开发包括 WEB 前端和 WEB 后端两部分。

- WEB 后端的核心部分是导航数据处理软件，它的主要功能是将 GNSS 原始观测数据最终转化为精度、完好性、连续性以及可用性等 PNT 性能评估结果。在评估结果处理完后 WEB 后端将数据细分成若干独立文件进行存储，相比于数据库式的读写操作，速度会更为快捷。为了做到格式统一，WEB 后端的数据存储、与前端的数据交互均采用 JSON 格式。
- WEB 前端的开发使用 HTML+CSS+JS 技术，其中静态图表的开发使用 HTML+CSS，JS 主要用来处理前端与服务器之间的动态交互。依照“监测”和“评估”对于数据实时性的不同要求，

可以将前端分为数据实时监控和数据后处理分析两大模块。

3.4.1. Node.js 开发环境

Node.js 是一个基于 Chrome（由 Google 开发的一款设计简单、执行高效的 Web 浏览器）V8 引擎（开源 JavaScript 引擎）的单线程 JavaScript 运行环境，用于方便、快捷地搭建响应迅速、扩展容易的 Web 应用。Node.js 除了具备高性能 Web 服务器“事件驱动”、“非阻塞式 I/O”等特点，还保持了 JavaScript“单线程”的特色，随着 *nix、Windows 等各大平台的加入，又具有了“跨平台”的特点。综合来看，Node.js 可以更高效地利用“分布式环境”，在低资源占用的同时保持高性能，非常适合运行“I/O 密集型”或“CPU 密集型”（统称为“数据密集型”）等实时应用。

3.4.1.1 JavaScript

JavaScript 作为世界上最为流行的编程语言之一，它“基于对象和事件驱动并具有相对安全性”，主要用来向 HTML 页面添加动态交互行为。不同于 C、C++ 等语言，在程序执行之前 JavaScript 代码不用进行预编译，而是在程序运行过程中逐行进行解释，所以被称为“直译式脚本语言”。虽然，JavaScript 可以直接嵌入 HTML 页面，但写成独立的 JS 文件则更“有利于结构和行为的分离”。通常，完整的 JavaScript 实现由以下三部分构成：“ECMAScript”、“文档对象模型（Document Object Model, DOM）”以及“浏览器对象模型（Browser Object Model, BOM）”。其中，“ECMAScript”作为行业标准，是

JavaScript 的核心部分，描述了 JavaScript 的语法和基本对象；“DOM”和“BOM”则分别描述了“网页内容处理”及“浏览器交互”的方法及接口。

3.4.1.2 事件驱动模型

如图 3.13 所示，Node.js 维护一个事件队列用于任务管理，新的任务被安置在队列中，并且任务完成后会触发相应的“回调函数”，事件循环线程循环处理队列中的任务，一直进行到“回调函数”全部调用完成。

当任务进行无阻塞时，事件循环线程按顺序执行任务即可；当执行过程中遇到“I/O 阻塞”例如读取磁盘、请求网络服务等时，Node.js 的事件循环线程不会去等待阻塞的 I/O 返回结果，而是去继续执行队列中的后续任务，如图 3.13 所示的事件队列中，读取文件、获取数据库、打开文件分别是前三个任务，当读取文件任务需要去磁盘中读取数据而阻塞 I/O 的时候，事件循环线程会继续执行获取数据库的任务，当第一个 `GetFile(file)` 的任务执行完成，“回调函数”`Open(file)` 被调用，事件循环线程不会等待连接数据库的任务中的阻塞，而是继续执行第三个任务 `Open(file)`，执行顺序取决于函数的完成快慢。

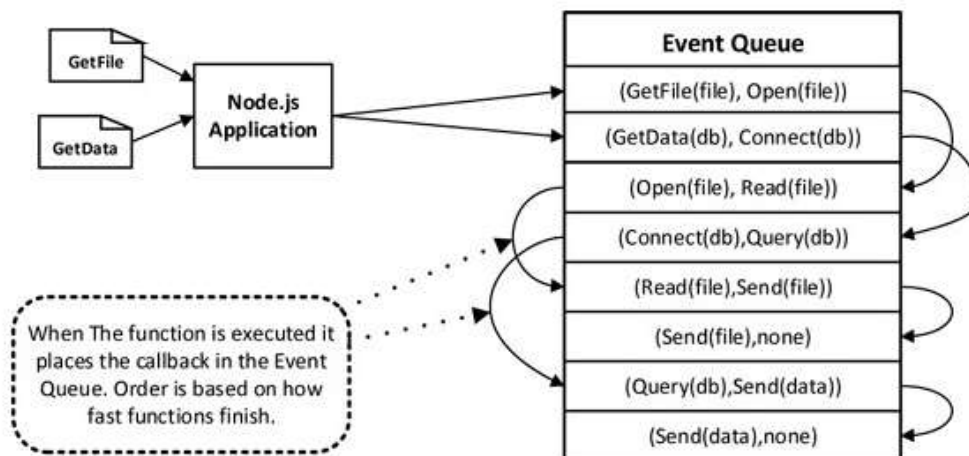


图 3.13 Node.js 事件驱动模型

如图 3.14 所示，Node.js 使用“事件回调机制”来避免对阻塞 I/O 的等待，在后台实现线程池，当遇到 I/O 阻塞任务时，会从线程池中获取一个线程，将该函数回调在那里执行，此时，在被阻塞线程上执行的“回调函数”仍然可以把事件添加到事件队列中。

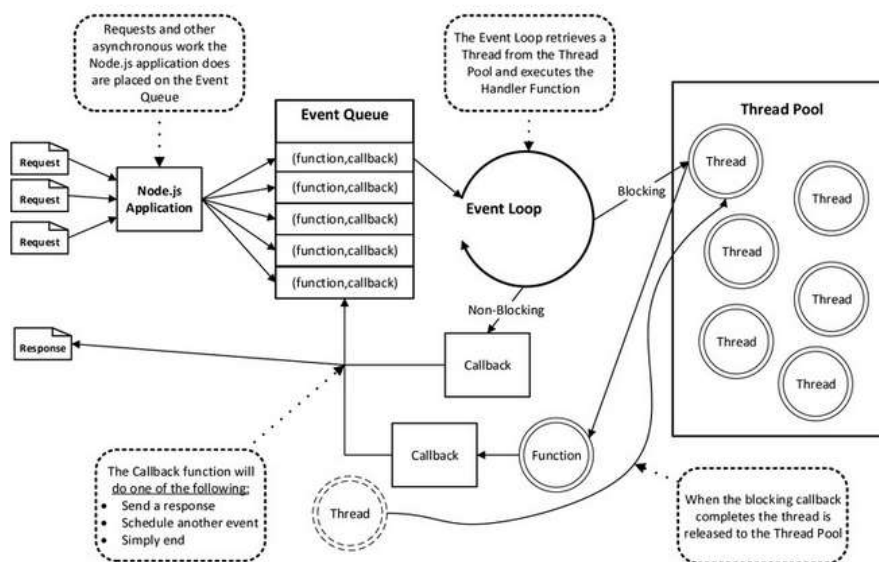


图 3.14 Node.js 事件回调机制

3.4.1.3 非阻塞式 I/O

“阻塞 I/O”的特点是调用之后一定要等到系统内核层面完成所有操作之后，调用才结束。在调用“阻塞 I/O”时，程序必须等待 I/O 完成再返回结果。“阻塞 I/O”造成 CPU 等待 I/O，导致 CPU 的处理能力不能充分被利用。

Node.js 内核提供了“非阻塞 I/O”，跟“阻塞 I/O”的差别是调用之后会立即返回。“阻塞 I/O”完成整个获取数据的过程，而“非阻塞 I/O”则不带数据直接返回，要获取数据，还需要通过文件描述符再次读取；“非阻塞 I/O”返回之后，CPU 时间片可以用来处理其他事物，此时性能提升非常明显。

3.4.2. 导航性能测试与评估软件总体设计

面向民航应用的 BDS PNT 性能评估软件的主要任务是进行数据处理，将 GNSS 原始观测数据最终转化为精度、完好性、连续性以及可用性等 PNT 性能评估结果，并将在此期间产生的关键信息（信号、信息级参数）以数据存储、图形显示等方式反馈给用户终端。它的功能实现主要通过 RTCM3.2 数据解析模块、导航电文解析模块、PVT 解算模块、RAIM 模块、PNT 性能分析模块以及图形显示模块等六部分来完成，如图 3.15 所示。

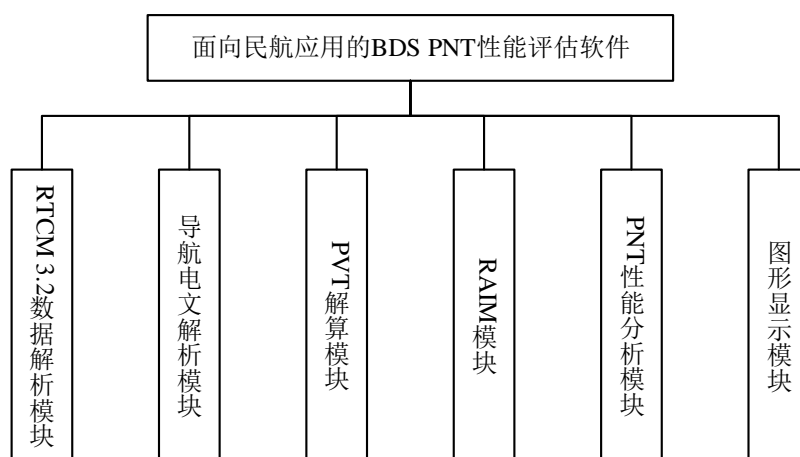


图 3.15 导航性能测试与评估软件组成图

图 3.16 给出了该软件数据处理的流程图。首先，GNSS 服务器数据库将机场实测数据导入 RTCM3.2 数据解析模块，得到伪距、多普勒频移、载波相位以及载噪比等测量值信息和导航电文；然后，导航电文经电文解析模块处理后解析出卫星位置信息以及卫星钟差修正、电离层延迟修正、群波延时校正等模型修正参数信息；接下来，测量值信息经卫星钟差修正、电离层延迟修正、群波延时校正、对流层延时修正以及地球自转校正等多重校正后和卫星位置信息以及 UERE 预算信息等一起导入 PVT 解算模块，得到接收机位置，卫星仰角、方位角，可见卫星数，DOP 值等信息；之后，卫星仰角、方位角和可见星数等信息结合系统 UERE 预算通过 RAIM 模块处理后得到 HPL 信息；然后，接收机位置、可见星数等信息和 HPL 信息经过 PNT 性能分析模块得出精度、完好性、连续性以及可用性等性能评估结果；最后，数据类的接收机位置信息，卫星仰角、方位角、可见星数、DOP 值等信息，HPL 信息以及精度、完好性、连续性和可用性等 PNT 性能信息通过图形显示模块的处理后给出各种图形信息，在前端界面得到展示。

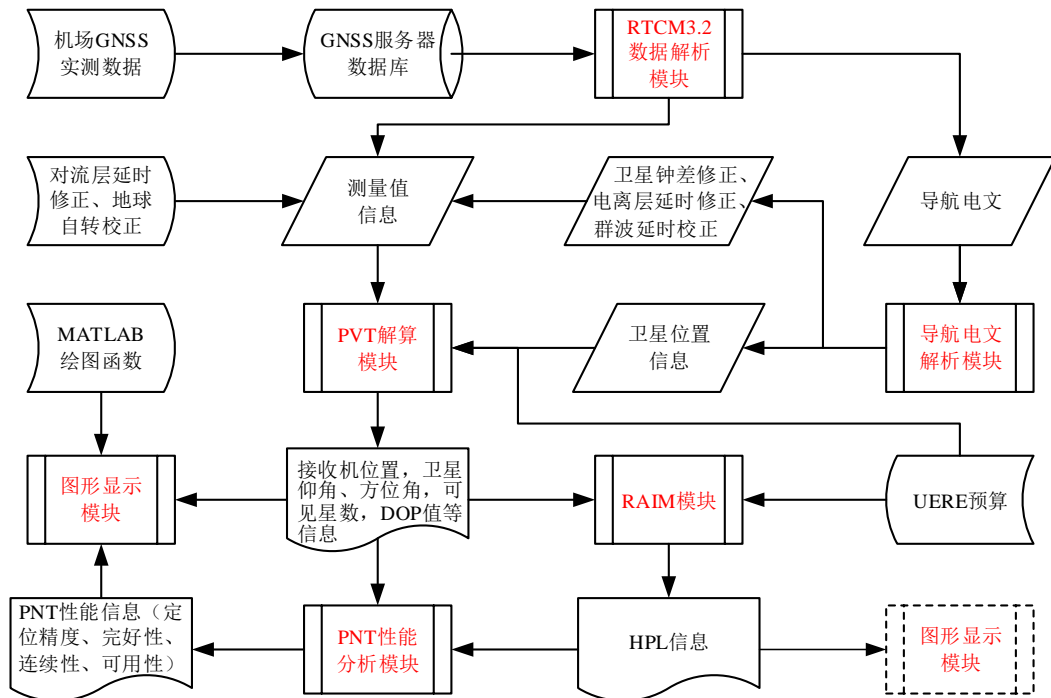


图 3.16 导航性能测试与评估软件数据流程图

3.4.2.1 RTCM3.2 数据解析模块

RTCM 3.2 是海事无线电技术委员会(Radio Technical Commission for Maritime services, RTCM)于 2013 年发布的数据通讯格式。其电文框架结构如表 3.1 所示。

表 3.1 RTCM 3.2 电文框架结构

引导字	保留字	消息长度	可变长度消息	CRC 校验
8bits	6 bits	10bits	长度可变	24 bits
11010011	未定义（设为 000000）	以比特为单位的消息	0~1 023 bytes	CRC-24Q 校验结果

接下来给出与本文相关的 RTCM3.2 电文内容与对应的消息长度，如表 3.2 所示。其中，电文类型：1119、2104 为本文自定义类型，分

别对应 BDS 星历及 BDS 伪距测量值信息。结合表 3.2 中消息长度信息，按照单系统最大可视卫星 12 颗计算，BDS+GPS 单站数据流量估计最大为 2204bytes/s，即 17.2 Kbps。系统建成后会有 12 个站，最大数据流量约为 0.2 Mbps。鉴于此，数据存储策略设计为文件存储模式。相比于数据库存储会随时间逐步变慢的特点，文件细化、独立存储的网络存储机制会更加稳定和可靠。

表 3.2 与本文相关的 RTCM 3.2 电文内容

电文类型	内容	消息长度	备注
1019	GPS 星历	64 bytes	
1119	BDS 星历	67 bytes	自定义
2004	GPS 伪距测量值	250 bytes	
2104	BDS 伪距测量值	382 bytes	自定义

最后，RTCM 3.2 电文的解码流程如图 3.17 所示。

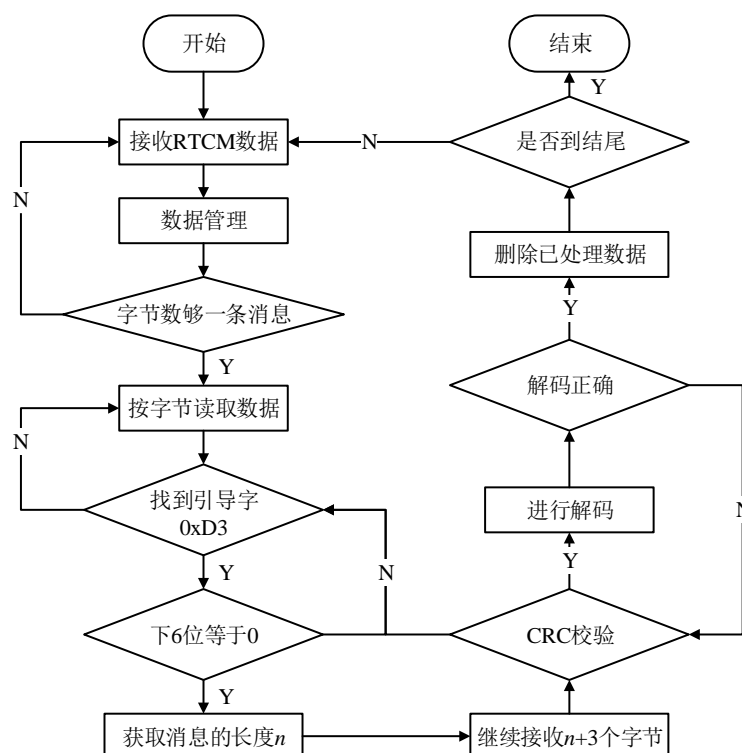


图 3.17 RTCM 3.2 电文解码流程

3.4.2.2 导航电文解析模块

导航电文解析模块的功能是根据导航电文中的星历参数计算出卫星的位置信息，依据电离层延迟改正模型参数、卫星钟差改正参数以及星上设备时延差计算卫星钟差修正量、电离层延迟修正量和群波延时修正量。BDS 卫星的位置计算、卫星钟差修正、电离层延迟修正、群波延时校正以及地球自转校正等实现方法详见《BDSSIS 接口控制文件公开服务信号（2.1 版）》，在此不作介绍。

星历参数描述了卫星导航系统当前的卫星轨道状况，它的取值具有很强的时效性。BDS 星历参数包括 15 个轨道参数和 1 个星历参考时间，更新周期为 1 h。BDS 星历参数的定义如表 3.3 所示。

表 3.3 BDS 星历参数定义

参数	定义
t_{oe}	星历参考时间
\sqrt{A}	长半轴的平方根
e	偏心率
ω	近地点幅角
Δn	卫星平均运动速率与计算值之差
M_0	参考时间的平近点角
Ω_0	按参考时间计算的升交点赤经
$\dot{\Omega}$	升交点赤经变化率
i_0	参考时间的轨道倾角

$IDOT$	轨道倾角变化率
C_{uc}	纬度幅角的余弦调和改正项的振幅
C_{us}	纬度幅角的正弦调和改正项的振幅
C_{rc}	轨道半径的余弦调和改正项的振幅
C_{rs}	轨道半径的正弦调和改正项的振幅
C_{ic}	轨道倾角的余弦调和改正项的振幅
C_{is}	轨道倾角的正弦调和改正项的振幅

3.4.2.3 PVT 解算模块

PVT 解算模块的功能为将伪距、载波相位和多普勒平移等测量值信息进行多重修正，结合卫星位置信息以及 UERE 预算信息，得到接收机定位、授时及测速结果，卫星仰角、方位角，可见卫星数，DOP 值等信息。PVT 解算算法流程图 3.18 所示。

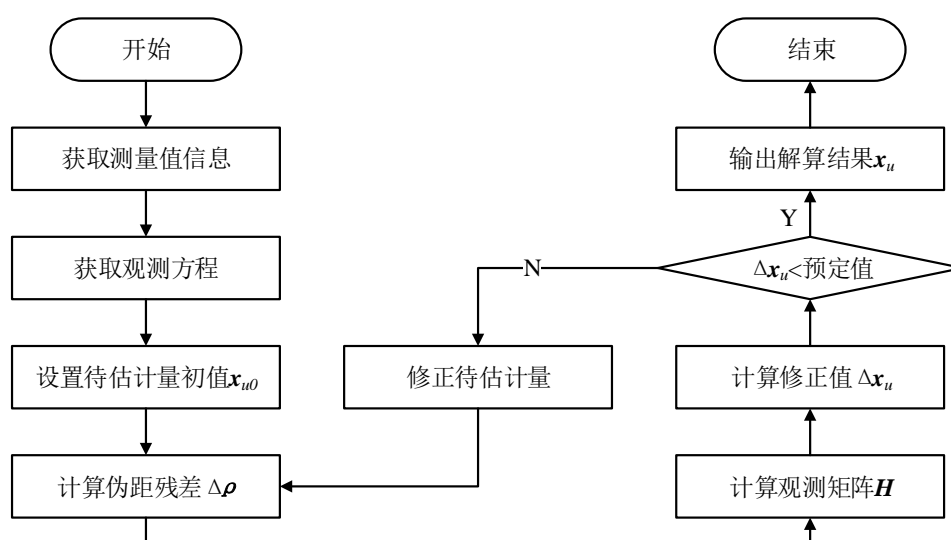


图 3.18 基于最小二乘的 PVT 解算算法流程

3.4.2.4 RAIM 模块

RAIM 模块的主要功能有以下三点：

(1) 故障检测：当可见卫星数大于等于 5 颗时，通过检验各颗卫星测量值之间的一致性，判断是否有卫星存在故障。

(2) 故障隔离：当可见卫星数大于等于 6 颗时，如果判断到卫星存在故障，可以将故障卫星的测量值在进行 PVT 解算之前剔除掉，避免其影响定位结果。

(3) 保障定位解的完好性：需要建立在 RAIM 算法可用的基础上，通过计算的 HPL 和规定的 HAL 进行比较得出。如果 HPL 大于 HAL, RAIM 算法不可用，不能保障定位解的完好性；HPL 小于 HAL，则能保证完好性处于一个相对较高的层次。RAIM 算法流程如图 3.19 所示。

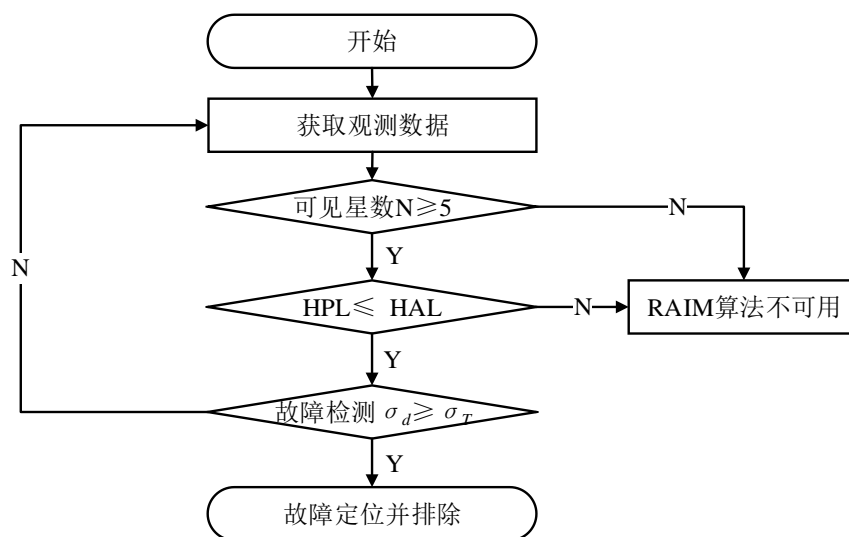


图 3.19 RAIM 算法流程

3.4.2.5 PNT 性能分析模块

PNT 性能分析模块的主要功能为：

(1) 根据接收机位置信息，对比接收机真实位置，计算出水平、垂向定位误差，统计出 95% 水平、垂向定位精度指标。

(2) 统计水平定位误差大于 556 m 事件，持续 10 s 及以上的 RAIM 不可用事件，计算出系统的完好性指标。

(3) 统计系统计划中断外的水平定位误差大于 220 m 事件，持续 10 s 及以上的 RAIM 不可用事件，计算出系统的连续性指标。

(4) 统计水平定位误差大于 220 m 事件，RAIM 不可用事件，计算出系统的可用性指标。

相关评估算法详见 2.5 节。

3.4.2.6 图形显示模块

图形显示模块的功能是给出各种 PNT 性能评估指标参数的图形显示结果。可以使用 MATLAB 绘图工具（数据后处理绘图），也能利用第三方绘图模块（前端的网页绘图）。图 3.20 给出了 WEB 前端处理结果图形显示的数据流程。

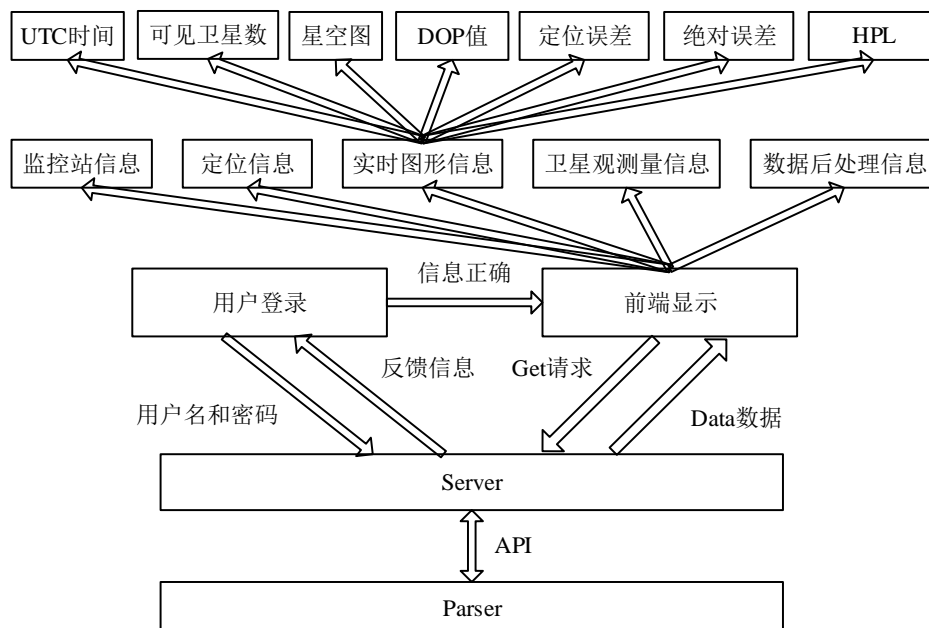


图 3.20 WEB 前端图形显示的数据流程

以下各图给出图形显示模块的若干关键界面和功能。图 3.21 为用户登录界面，用户可通过“IP+端口号”的方式访问网络远程服务。

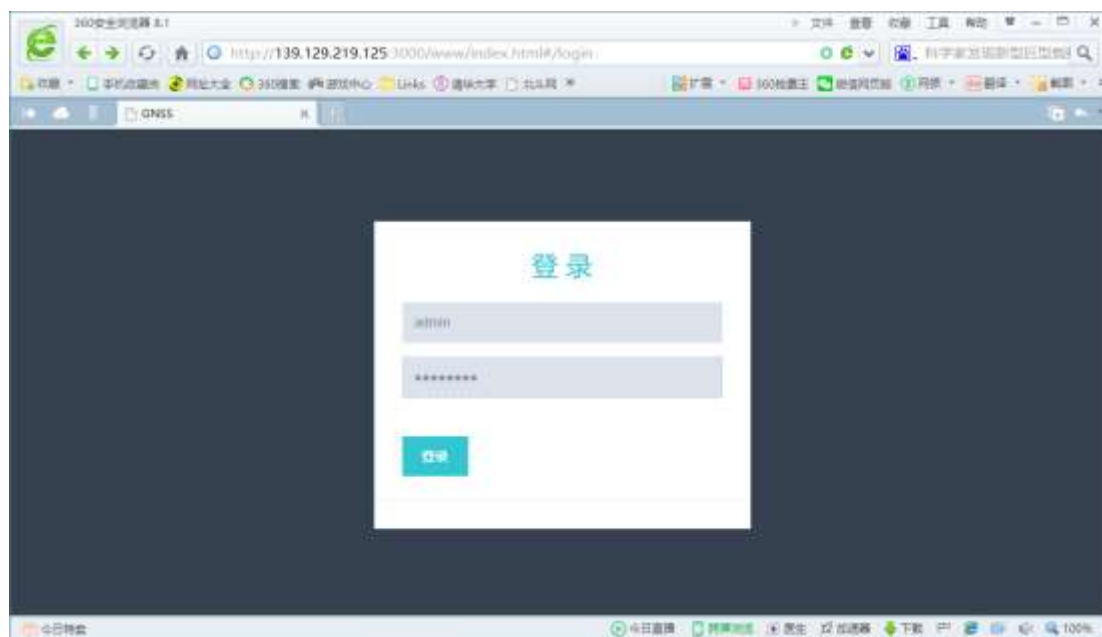


图 3.21 登录界面



图 3.22 WEB 前端主界面

图 3.22 为 WEB 前端主界面，主要包括监测面板、原始数据（选取）、数据分析、阈值报警设置、用户管理等组成部分。监测面板的主要功能为数据的实时监测，展示 PNT 性能参数的文字、图形信息。可以选择数据来源（基站信息）并根据需要设置数据刷新频度，分为 1 s、5 s、10 s、30 s 四个选项。如图 3.22 所示。

原始数据（选取）部分的功能是对监测系统作出选择，给出系统的（可见）卫星编号、系统编号、系统时间等简要信息，如图 3.23 所示。目前可选的监测系统只有 BDS 和 GPS。

卫星编号	PRN	EPOCH	EPOCH	EPOCH	EPOCH	EPOCH	Time stamp
10	10	10	10	10	10	10	10:00:00.000000000
10	10	10	10	10	10	10	10:00:00.000000000
10	10	10	10	10	10	10	10:00:00.000000000
10	10	10	10	10	10	10	10:00:00.000000000
10	10	10	10	10	10	10	10:00:00.000000000
10	10	10	10	10	10	10	10:00:00.000000000
10	10	10	10	10	10	10	10:00:00.000000000
10	10	10	10	10	10	10	10:00:00.000000000
10	10	10	10	10	10	10	10:00:00.000000000
10	10	10	10	10	10	10	10:00:00.000000000

图 3.23 原始数据（选取）面板

数据分析部分的功能是提取历史存储数据并进行后处理分析，如

图 3.24 所示。数据后处理分析效果图（水平定位误差分布）也一并给出，如图 3.25 所示。

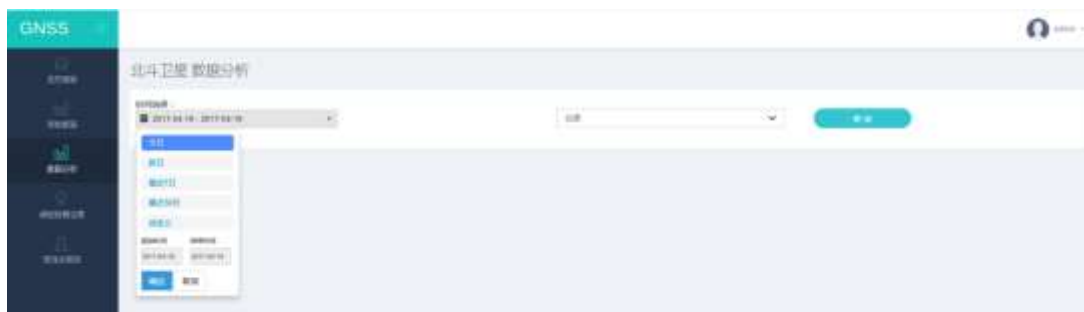


图 3.24 数据分析面板

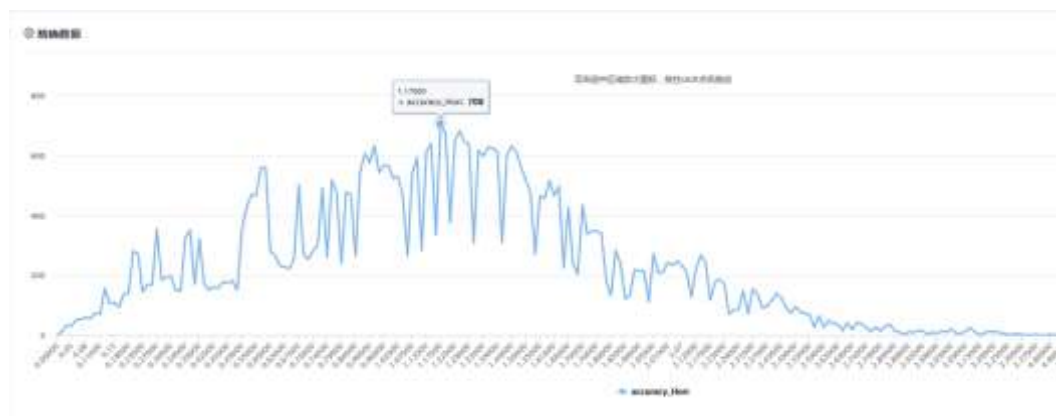
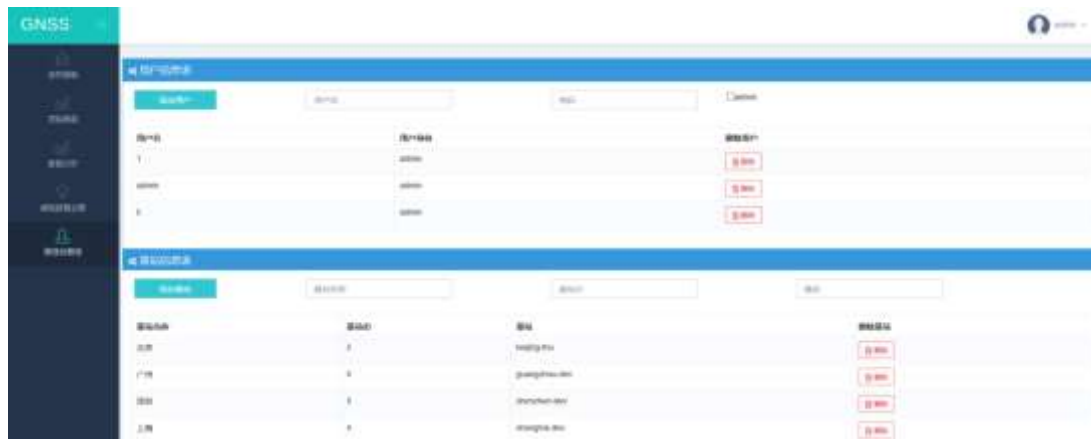


图 3.25 数据后处理分析效果图

阈值报警设置部分对性能指标参数的阈值进行设定，如果指标参数数值超出阈值，会给出声音和文字提示等报警信息。如图 3.26 所示。

图 3.26 阈值报警设置面板

用户管理部分如图 3.27 所示具备两大功能，即用户管理及基站维护。具体做法为：对登录用户进行管理，添加或删除不同权限的用



4. 基于监测站数据的 BDS 导航性能评估分析

4.1. 引言

为更好的分析 BDS 在全国范围内的覆盖情况和性能评估，项目组在我国地理环境具有代表性的若干民航机场分别部署了 GNSS 机场数据监测接收设备，任务为 BDS/GPS 原始观测数据的获取。监测站部署范围覆盖我国东北、东南、华北、华南、西北、西南等地，包括北京、温州、拉萨、乌鲁木齐、哈尔滨、昆明、海口、三亚、大理、台州、成都、东营、武汉等 13 个城市。

4.2. 精度分析

4.2.1. 拉萨监测站

由于数据量较大，因此本报告中水平定位误差分布和垂直定位误差分布均选取了当前监测站一天的数据绘制示意图，分布区间统计是基于该站的全部观测数据的计算结果。水平定位误差分布如图 4.1 所示。通过对全部采集数据进行统计，拉萨监测站 BDS 水平定位误差集中在 0-6 米，GPS 水平定位误差主要分布在 0-3 米。

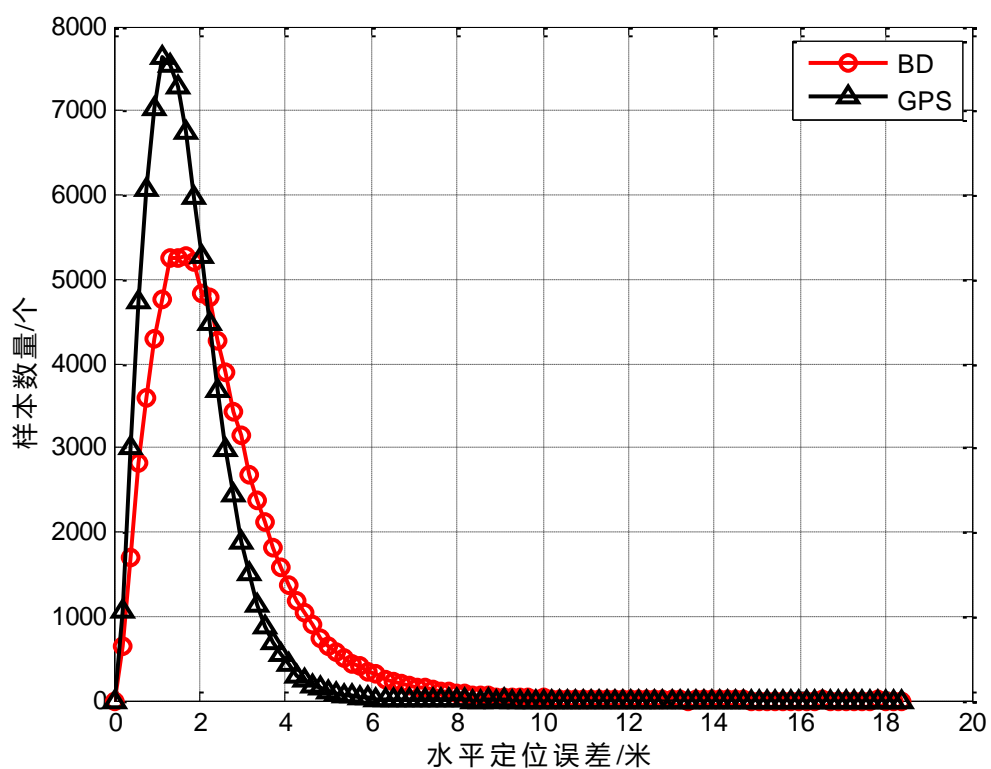


图 4.1 拉萨监测站水平定位误差分布

同水平定位误差分析类似,垂直定位误差分布如图 4.2 所示。BDS 的垂直定位误差分布集中在 0-11 米, GPS 垂直定位误差主要分布在 0-6 米。

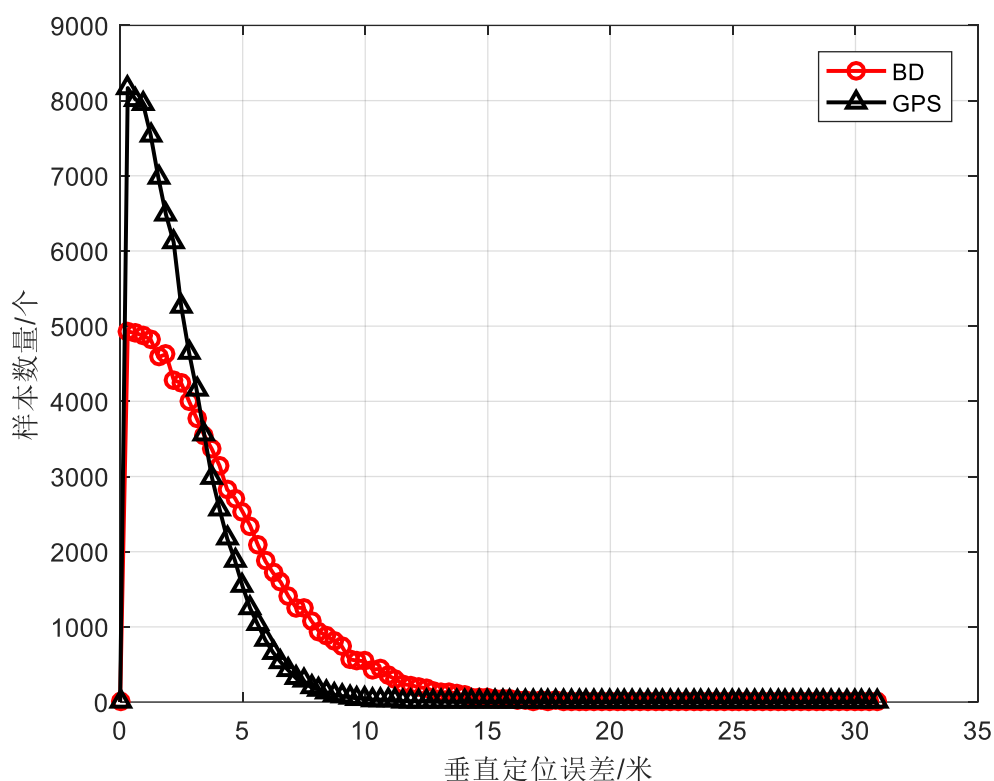


图 4.2 拉萨监测站垂直定位误差分布

图 4.3、图 4.4 展示了拉萨监测站以天为单位的 95%水平、垂直定位精度情况。经统计计算，BDS 的水平定位精度平均值为 6.0 米，最大不超过 12 米；GPS 的水平定位精度平均值为 3.3 米，最大不超过 4 米。BDS 的垂直定位精度平均值为 11.1 米，最大不超过 26 米，GPS 的垂直定位精度平均值为 5.5 米，最大不超过 6 米。

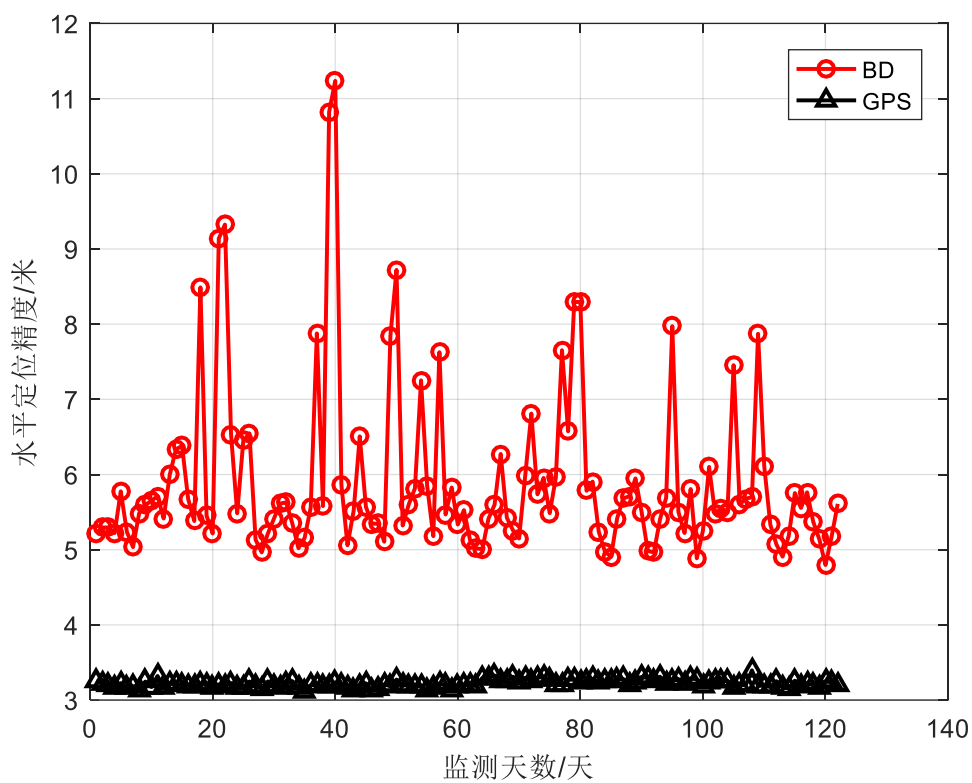


图 4.3 拉萨监测站 95%水平定位精度

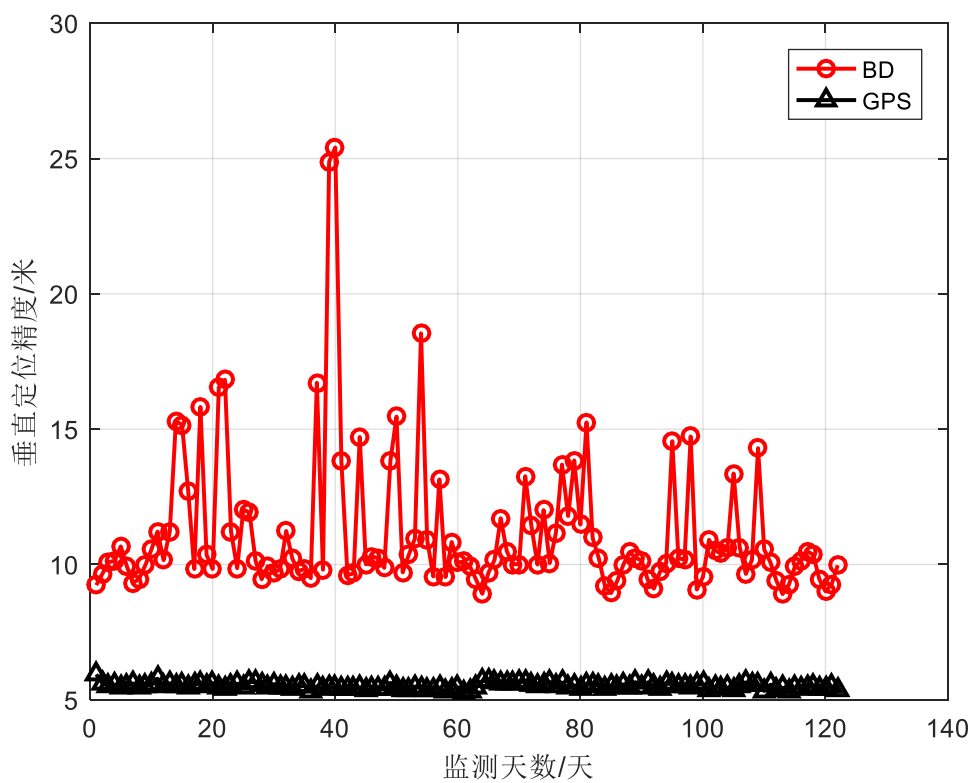


图 4.4 拉萨监测站 95%垂直定位精度

4.2.2. 乌鲁木齐监测站

水平定位误差分布如图 4.5 所示。乌鲁木齐监测站水 BDS 水平定位误差集中在 0-8 米，GPS 水平定位误差主要分布在 0-3 米。

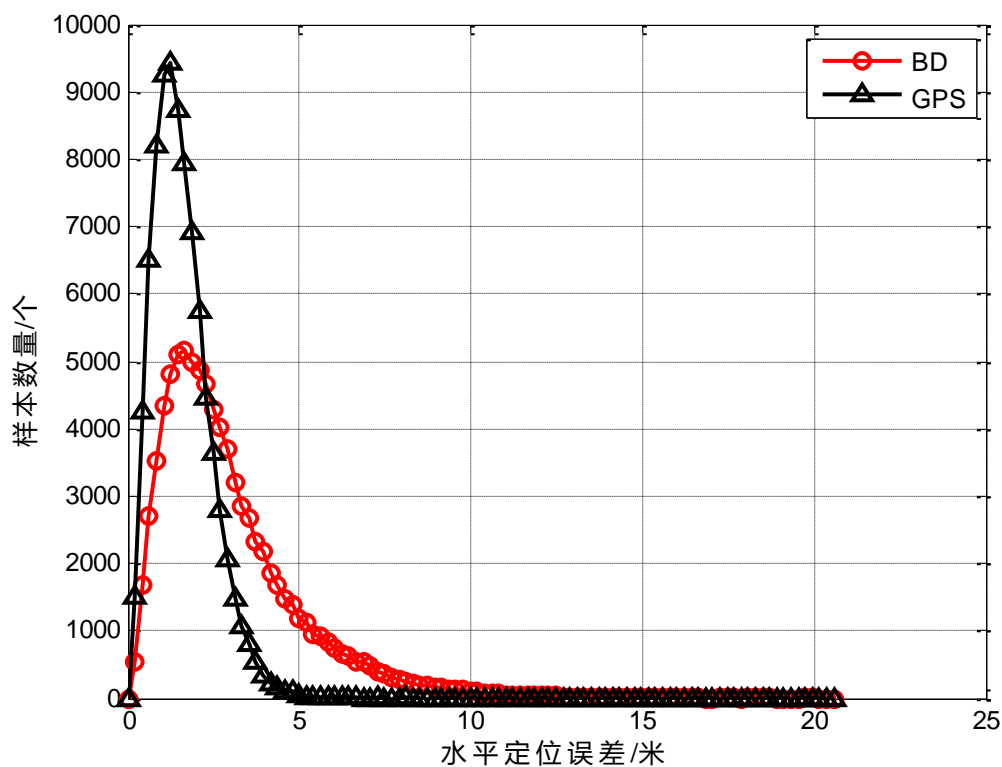


图 4.5 乌鲁木齐监测站水平定位误差分布

同水平定位误差分析类似，垂直定位误差分布如图 4.6 所示。BDS 的垂直定位误差分布集中在 0-11 米，GPS 垂直定位误差主要分布在 0-5 米。

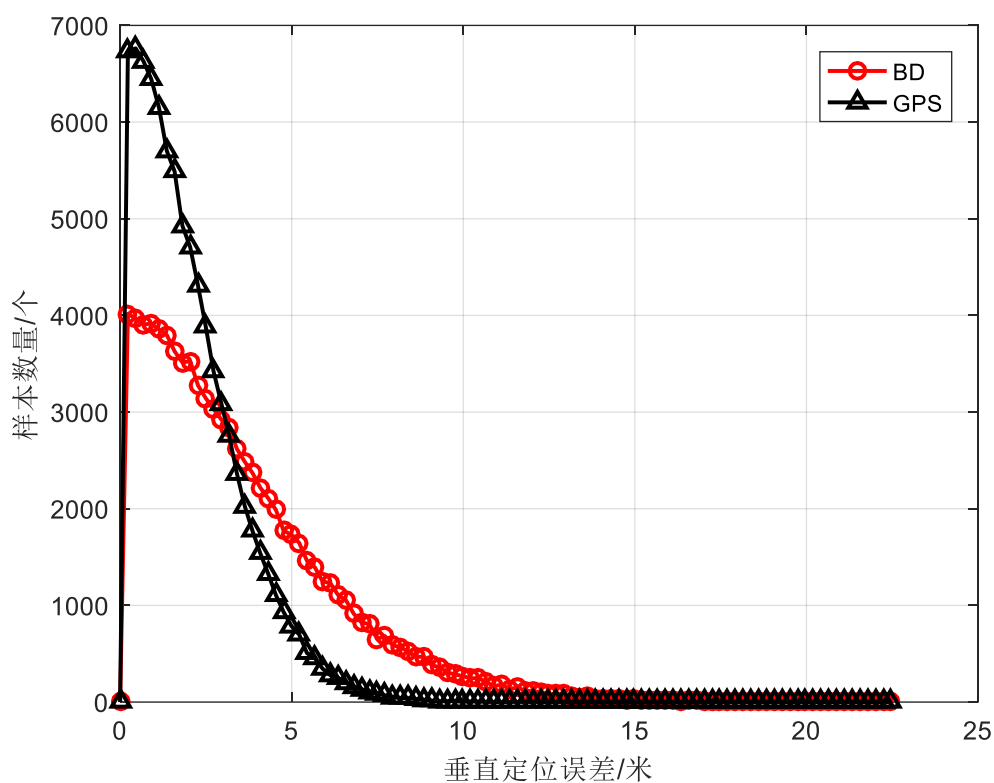


图 4.6 乌鲁木齐监测站垂直定位误差分布

图 4.7、图 4.8 展示了乌鲁木齐监测站以天为单位的 95%水平、垂直定位精度情况。经统计计算，BDS 的水平定位精度平均值为 7.9 米，最大不超过 15 米；GPS 的水平定位精度平均值为 3.0 米，最大不超过 4 米。BDS 的垂直定位精度平均值为 10.5 米，最大不超过 23 米，GPS 的垂直定位精度平均值为 4.8 米，最大不超过 6 米。

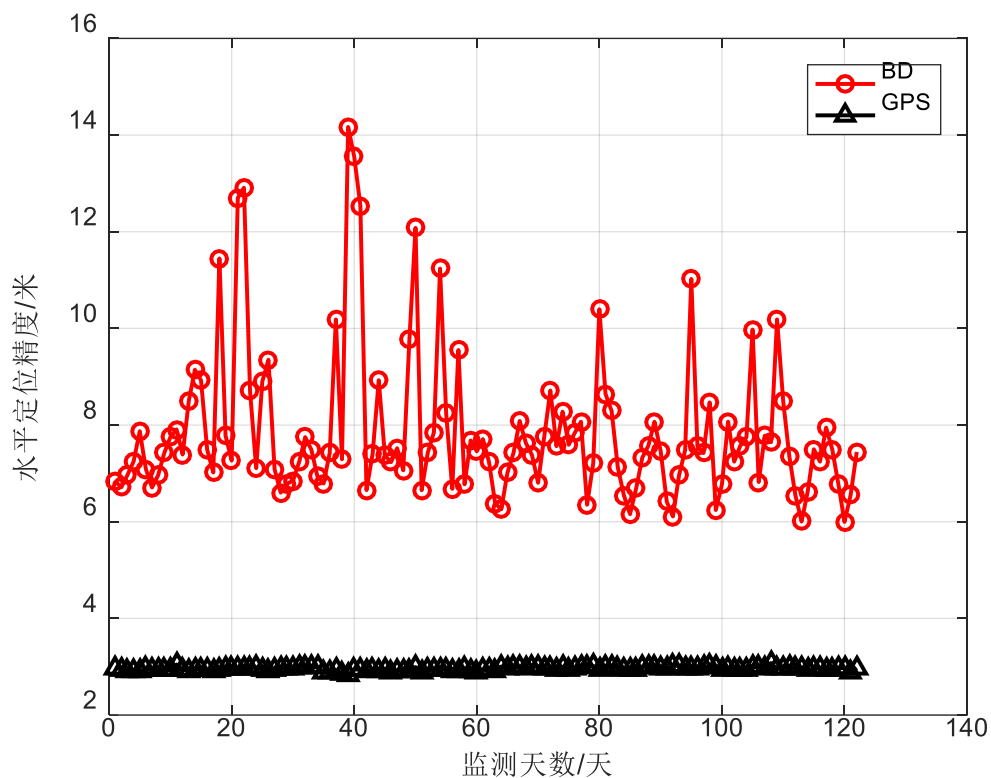


图 4.7 乌鲁木齐监测站 95%水平定位精度

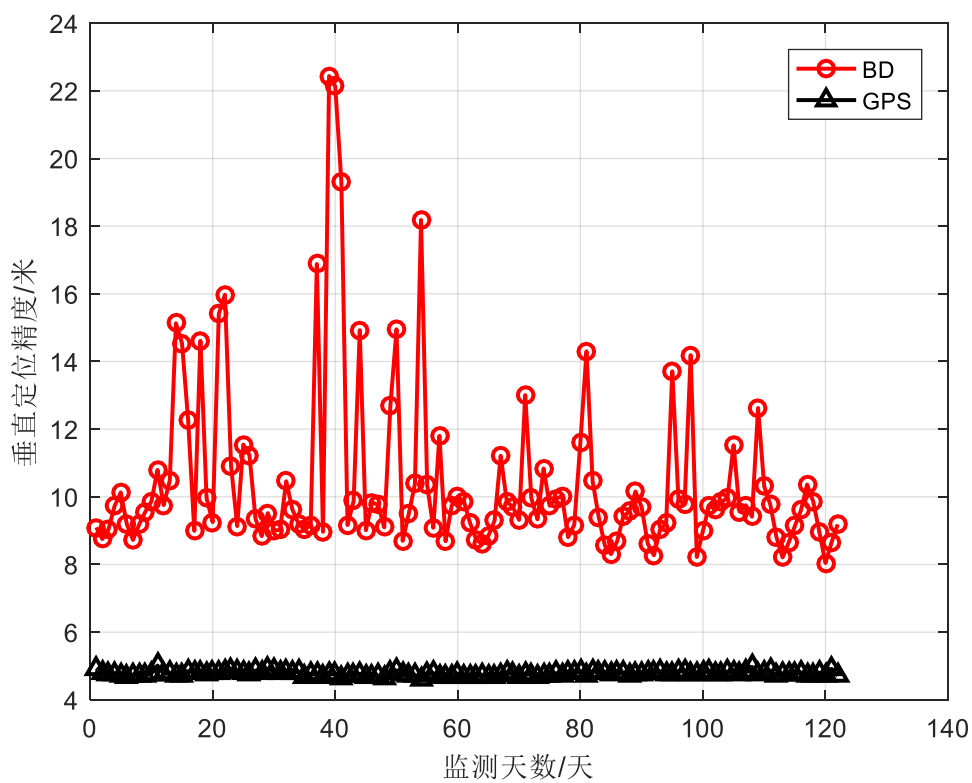


图 4.8 乌鲁木齐监测站 95%垂直定位精度

4.2.3. 哈尔滨监测站

水平定位误差分布如图 4.9 所示。哈尔滨监测站 BDS 水平定位误差集中在 0-9 米，GPS 水平定位误差主要分布在 0-3 米。

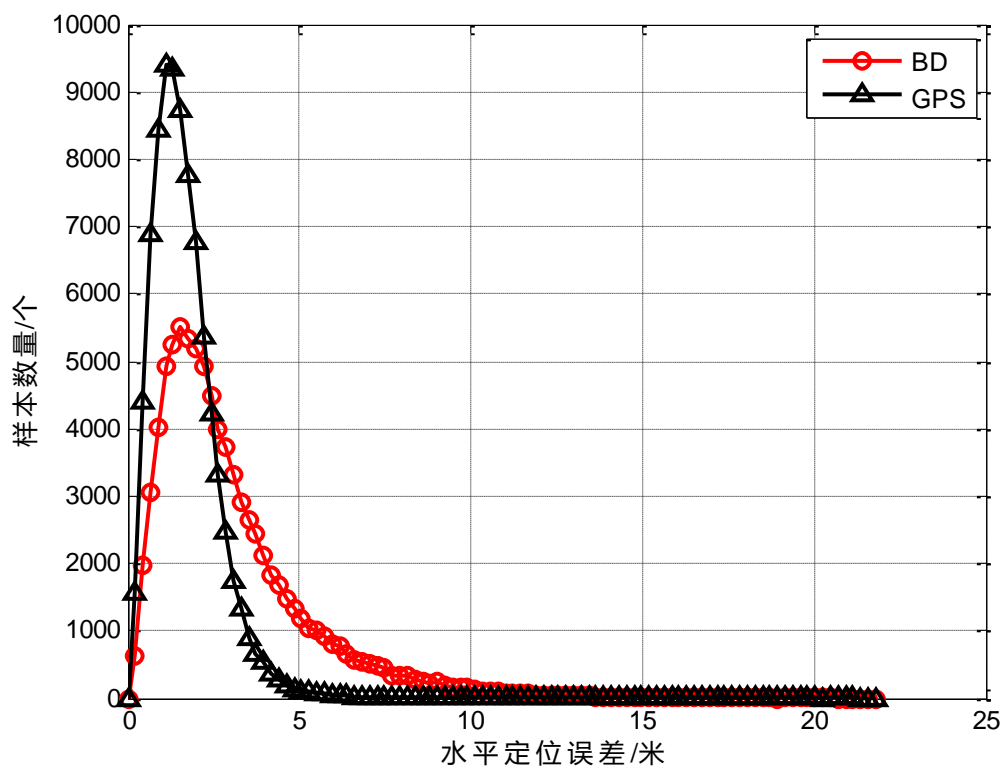


图 4.9 哈尔滨监测站水平定位误差分布

同水平定位误差分析类似，垂直定位误差分布如图 4.10 所示。BDS 的垂直定位误差分布集中在 0-10 米，GPS 垂直定位误差主要分布在 0-5 米。

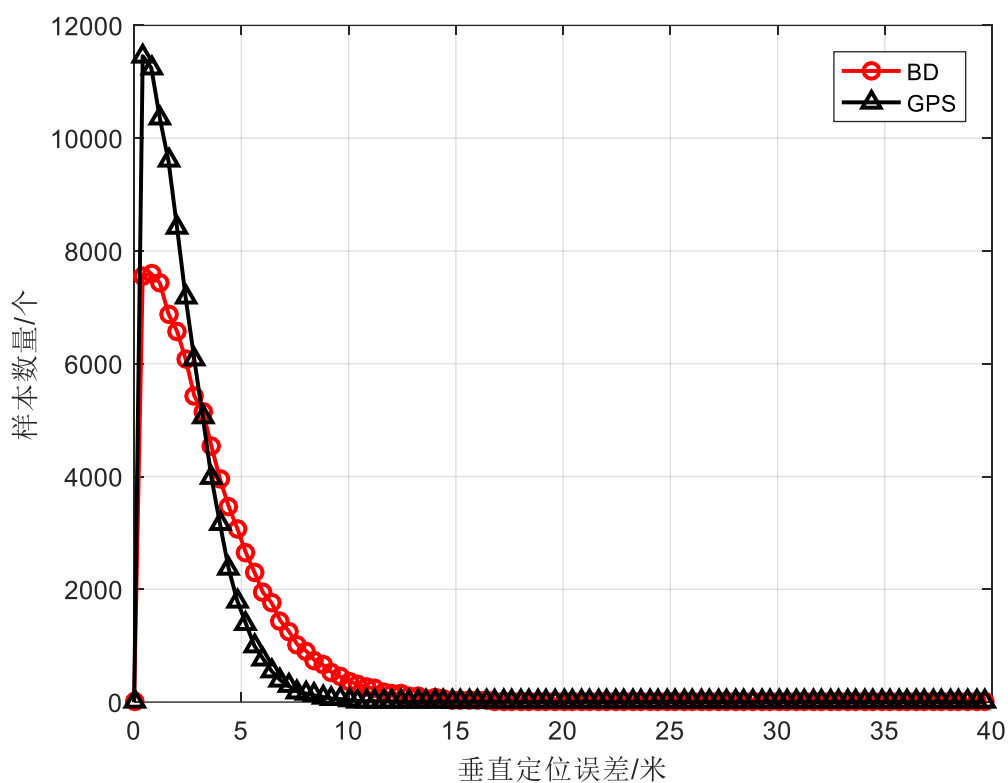


图 4.10 哈尔滨监测站垂直定位误差分布

图 4.11、图 4.12 展示了哈尔滨监测站以天为单位的 95%水平、垂直定位精度情况。经统计计算，BDS 的水平定位精度平均值为 8.5 米，最大不超过 17 米；GPS 的水平定位精度平均值为 3.2 米，最大不超过 4 米。BDS 的垂直定位精度平均值为 9.5 米，最大不超过 18 米，GPS 的垂直定位精度平均值为 5.1 米，最大不超过 6 米。

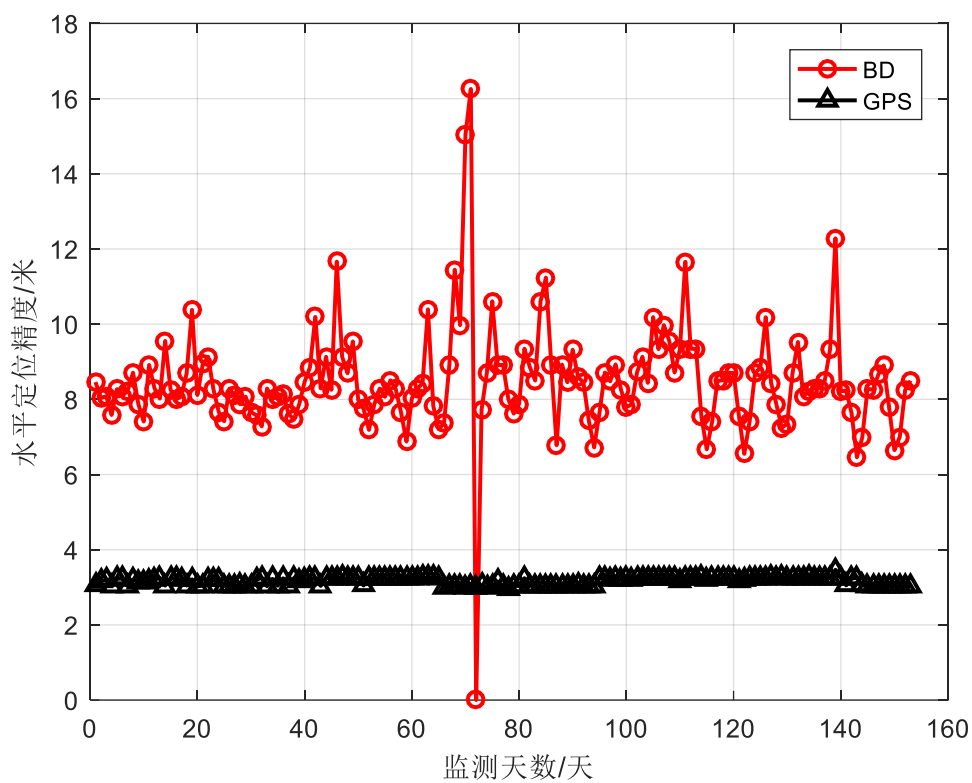


图 4.11 哈尔滨监测站 95%水平定位精度

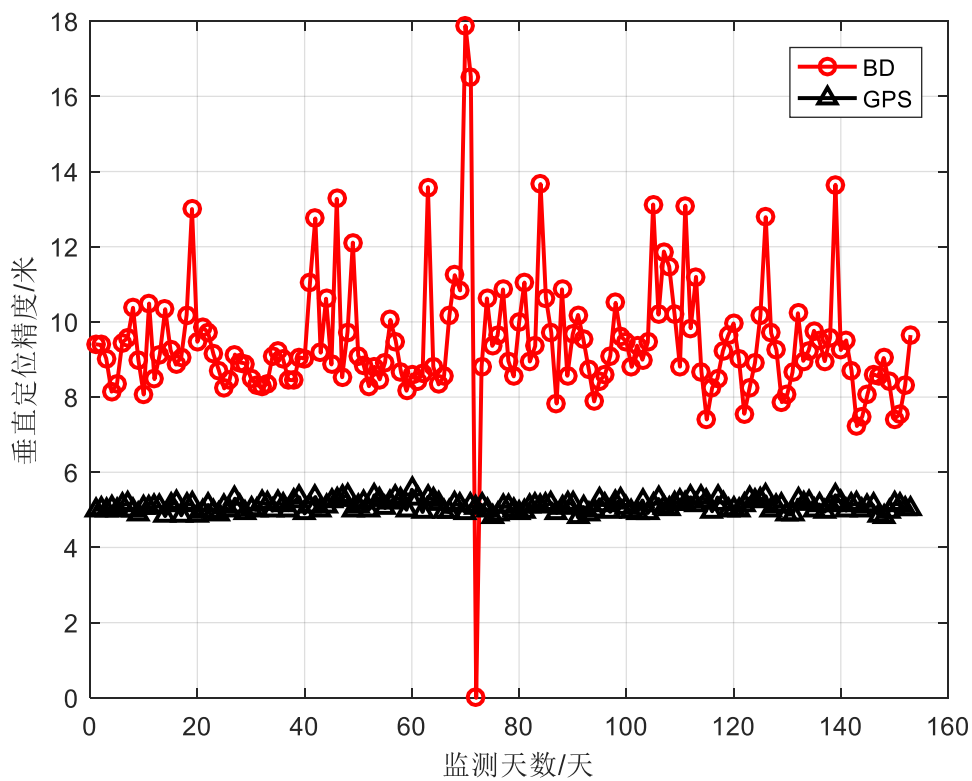


图 4.12 哈尔滨监测站 95%垂直定位精度

4.2.4. 昆明监测站

水平定位误差分布如图 4.13 所示。昆明监测站 BDS 水平定位误差集中在 0-5 米，GPS 水平定位误差主要分布在 0-3 米。

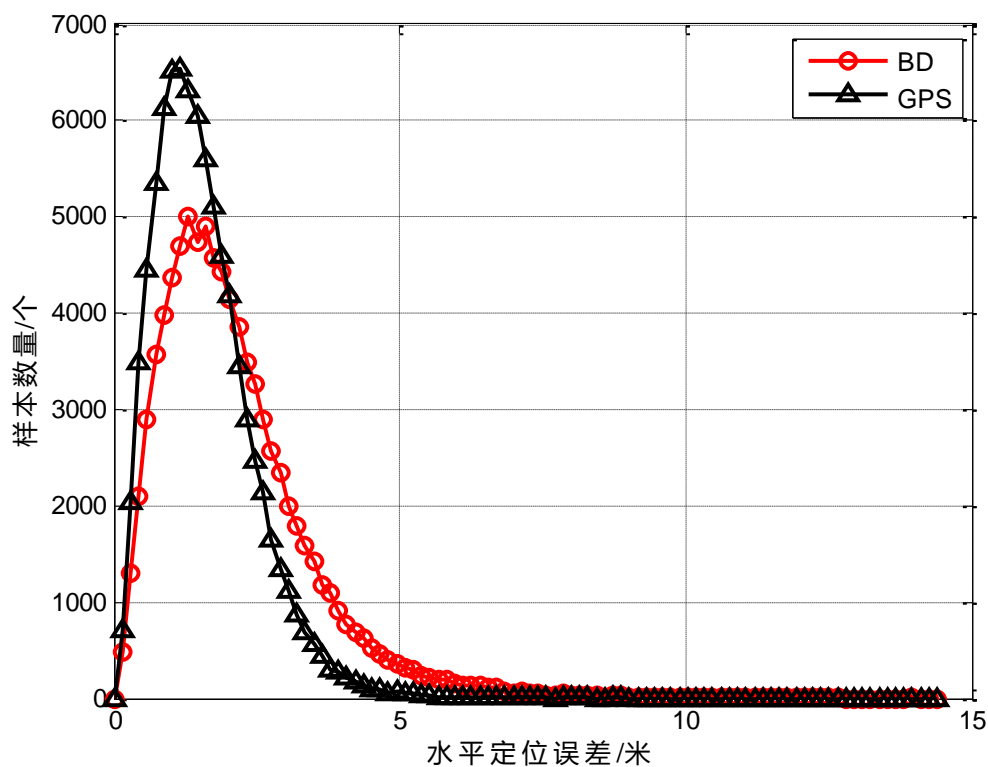


图 4.13 昆明监测站水平定位误差分布

同水平定位误差分析类似，垂直定位误差分布如图 4.14 所示。BDS 的垂直定位误差分布集中在 0-8 米，GPS 垂直定位误差主要分布在 0-5 米。

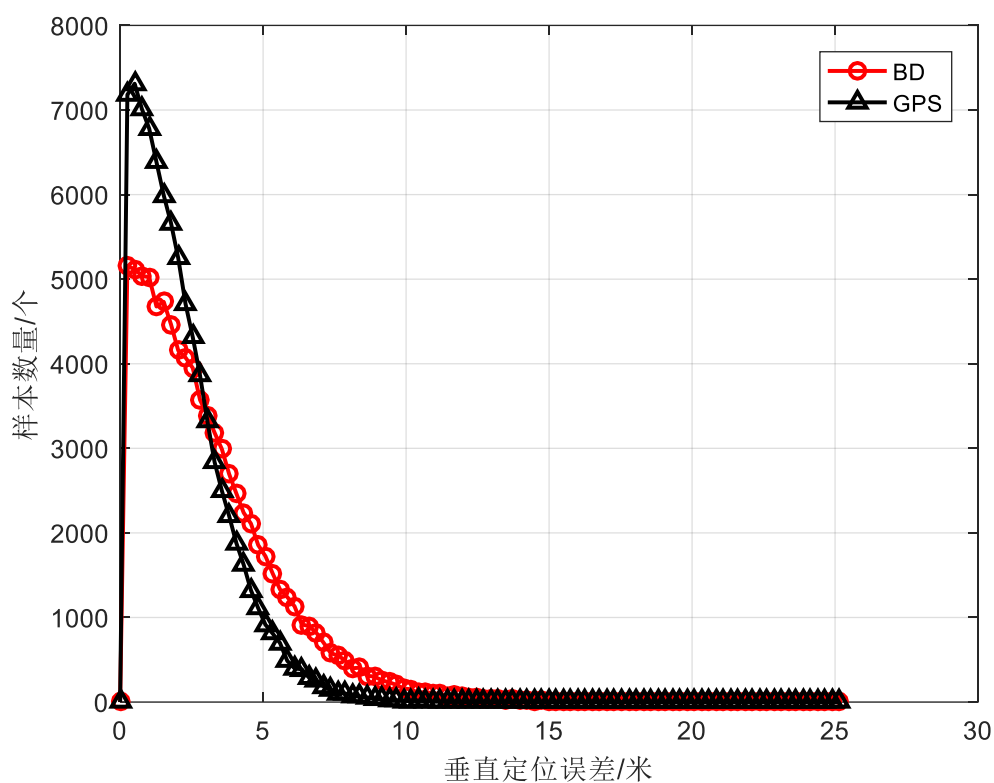


图 4.14 昆明监测站垂直定位误差分布

图 4.15、图 4.16 展示了昆明监测站以天为单位的 95%水平、垂直定位精度情况。经统计计算,BDS 的水平定位精度平均值为 4.8 米,最大不超过 16 米;GPS 的水平定位精度平均值为 2.9 米,最大不超过 5 米。BDS 的垂直定位精度平均值为 7.6 米,最大不超过 20 米,GPS 的垂直定位精度平均值为 5.2 米,最大不超过 7 米。

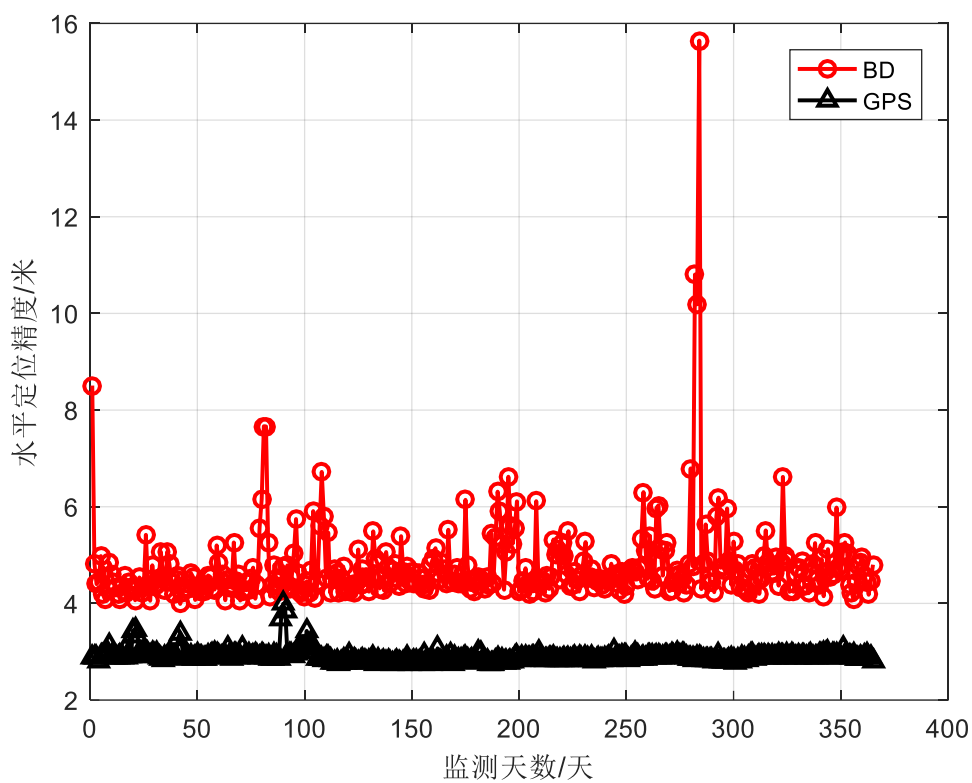


图 4.15 昆明监测站 95%水平定位精度

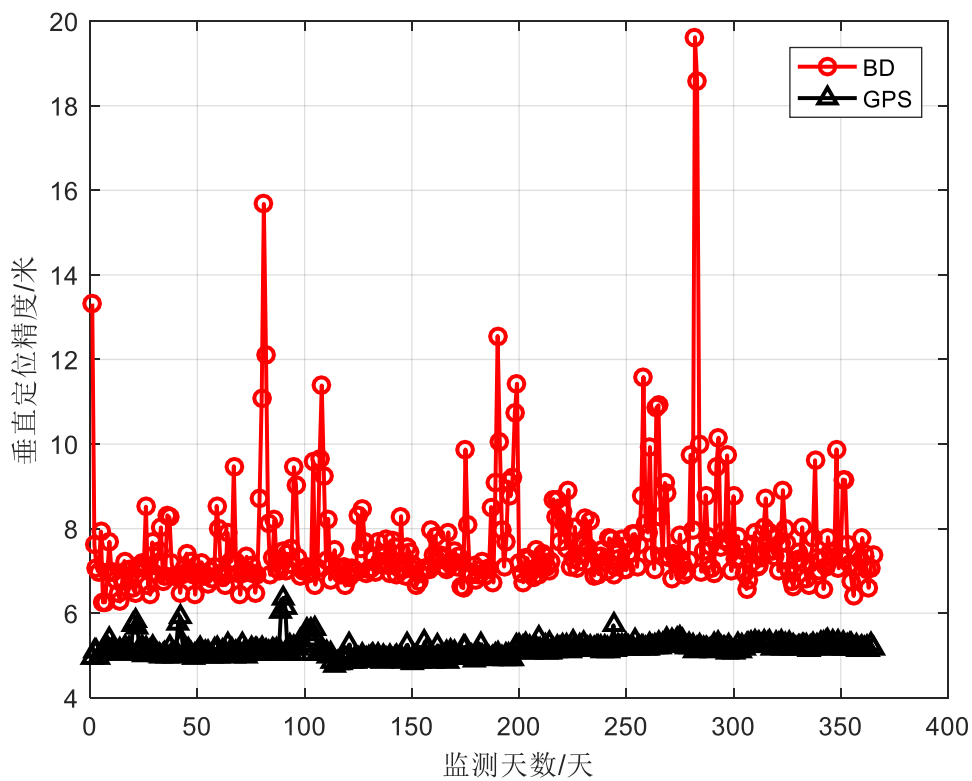


图 4.16 昆明监测站 95%垂直定位精度

4.2.5. 北京监测站

水平定位误差分布如图 4.17 所示。北京监测站 BDS 水平定位误差集中在 0-6 米，GPS 水平定位误差主要分布在 0-3 米。

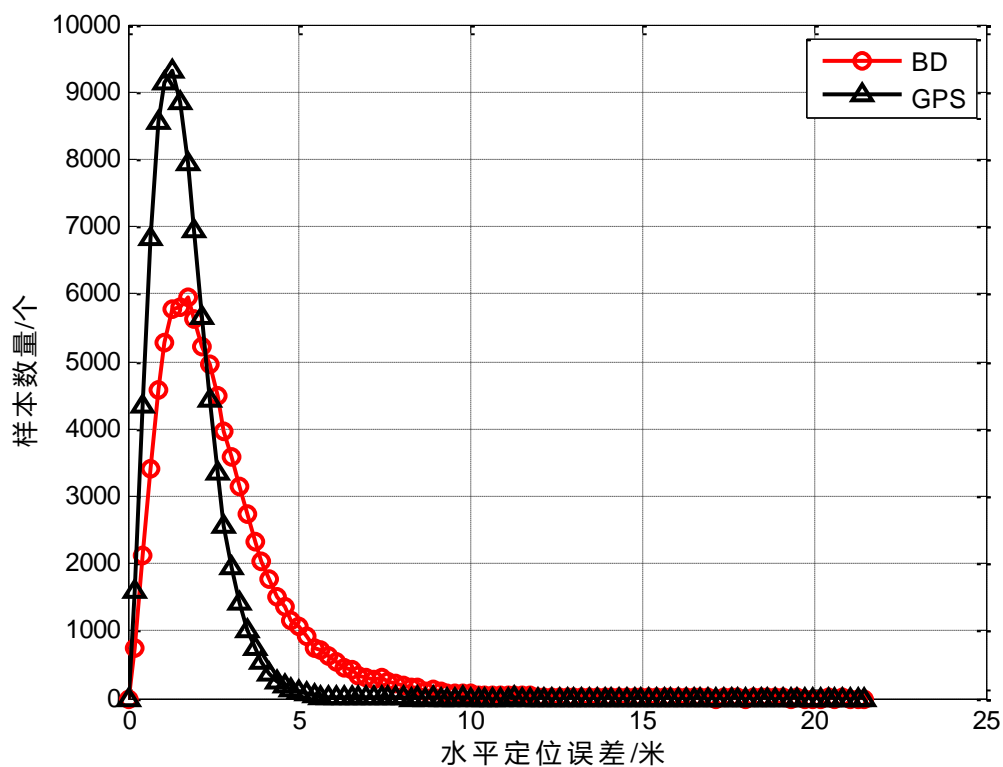


图 4.17 北京监测站水平定位误差分布

同水平定位误差分析类似，垂直定位误差分布如图 4.18 所示。BDS 的垂直定位误差分布集中在 0-9 米，GPS 垂直定位误差主要分布在 0-5 米。

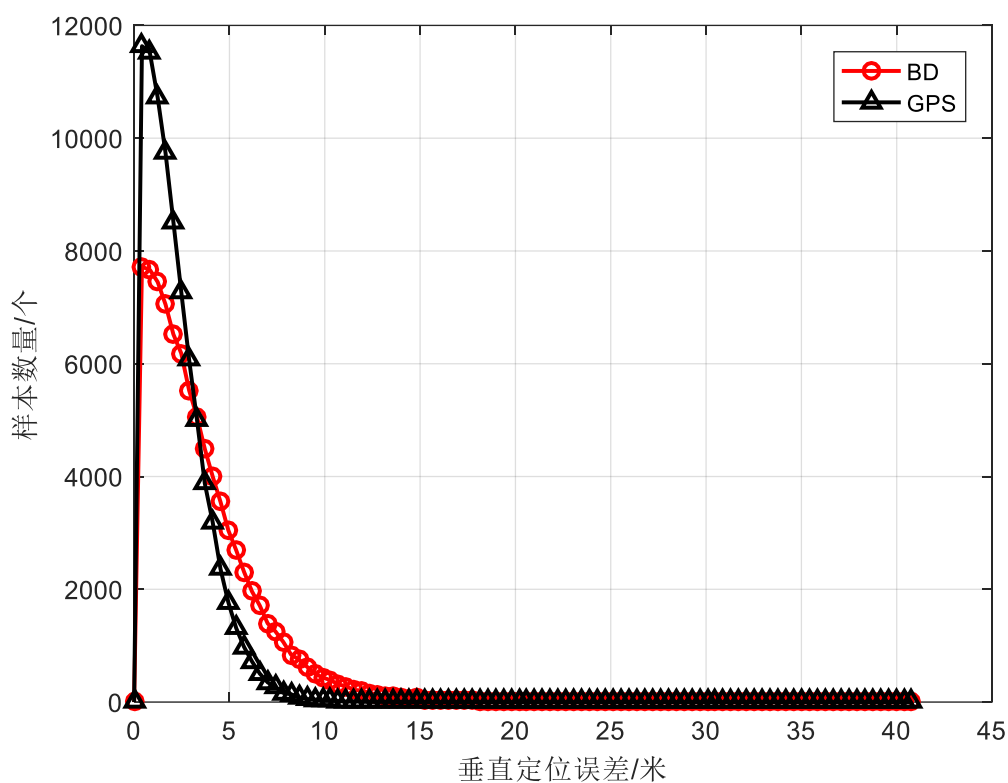


图 4.18 北京监测站垂直定位误差分布

图 4.19、图 4.20 展示了北京监测站以天为单位的 95%水平、垂直定位精度情况。经统计计算,BDS 的水平定位精度平均值为 6.4 米,最大不超过 16 米;GPS 的水平定位精度平均值为 3.1 米,最大不超过 4 米。BDS 的垂直定位精度平均值为 9.0 米,最大不超过 24 米,GPS 的垂直定位精度平均值为 5.2 米,最大不超过 6 米。

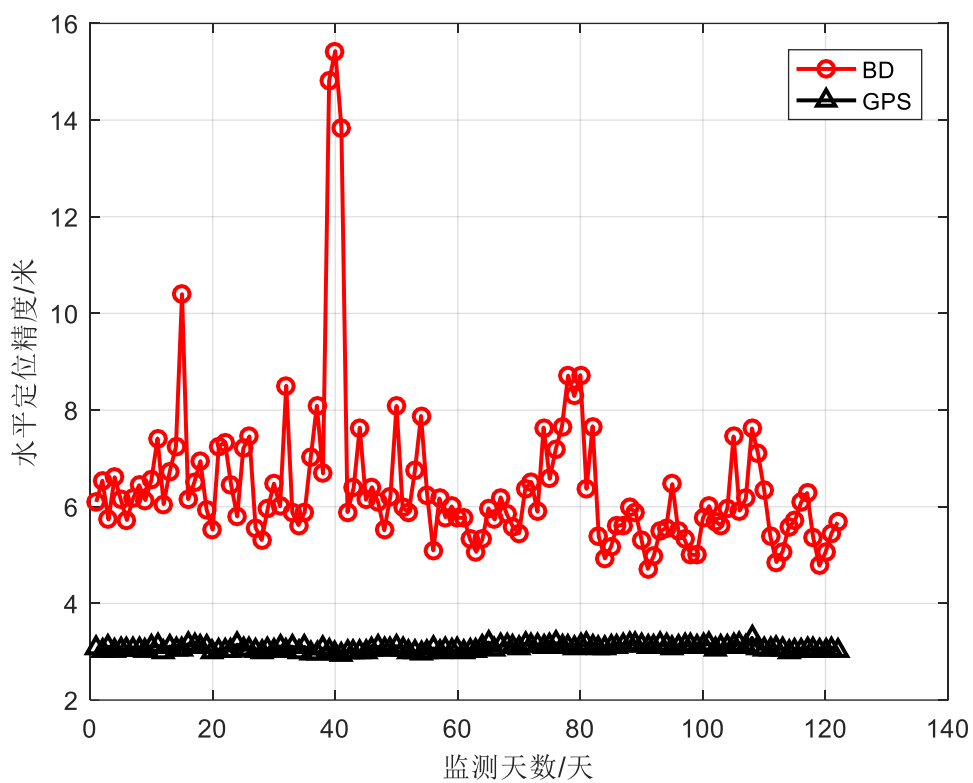


图 4.19 北京监测站 95%水平定位精度

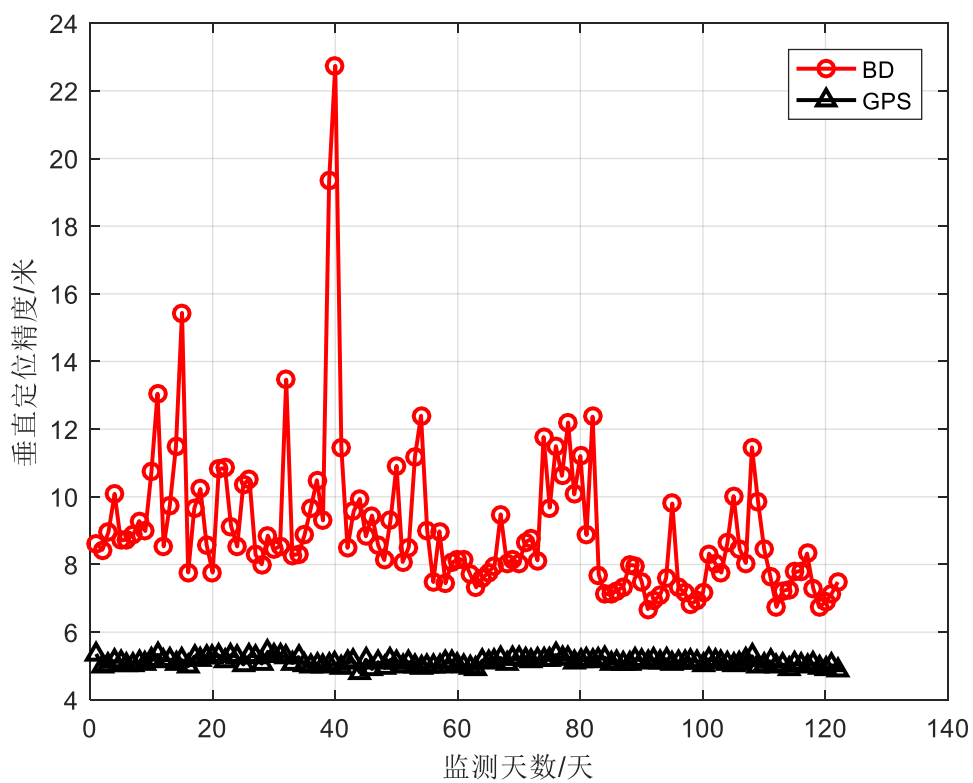


图 4.20 北京监测站 95%垂直定位精度

4.2.6. 温州监测站

水平定位误差分布如图 4.21 所示。温州监测站 BDS 水平定位误差集中在 0-5 米，GPS 水平定位误差主要分布在 0-3 米。

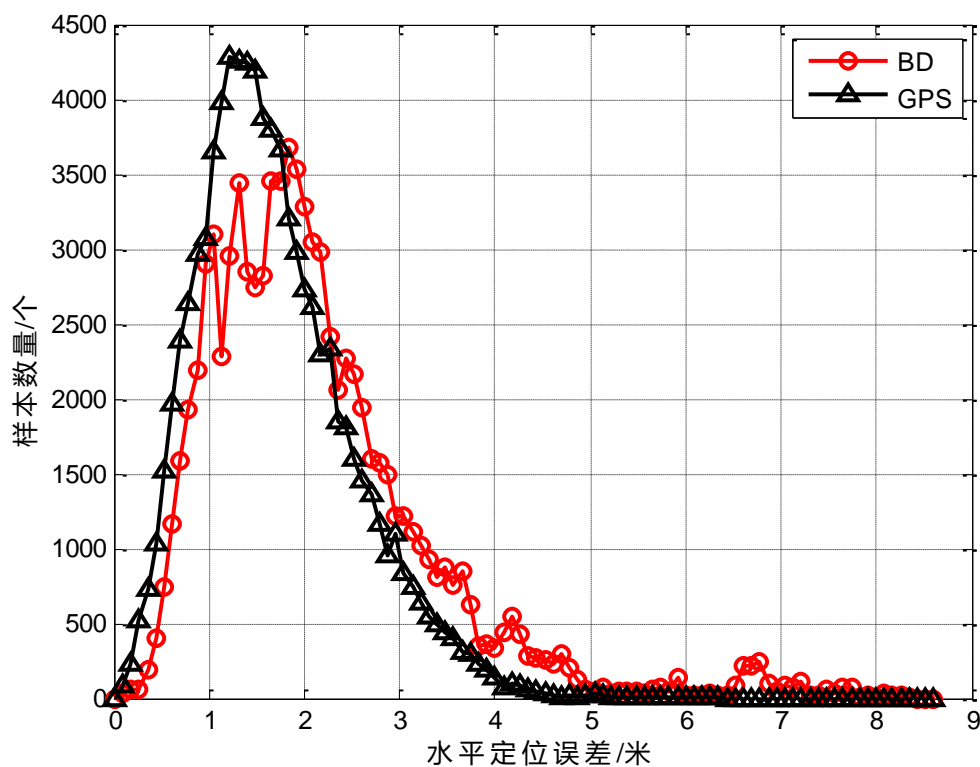


图 4.21 温州监测站水平定位误差分布

同水平定位误差分析类似，垂直定位误差分布如图 4.22 所示。BDS 的垂直定位误差分布集中在 0-8 米，GPS 垂直定位误差主要分布在 0-5 米。

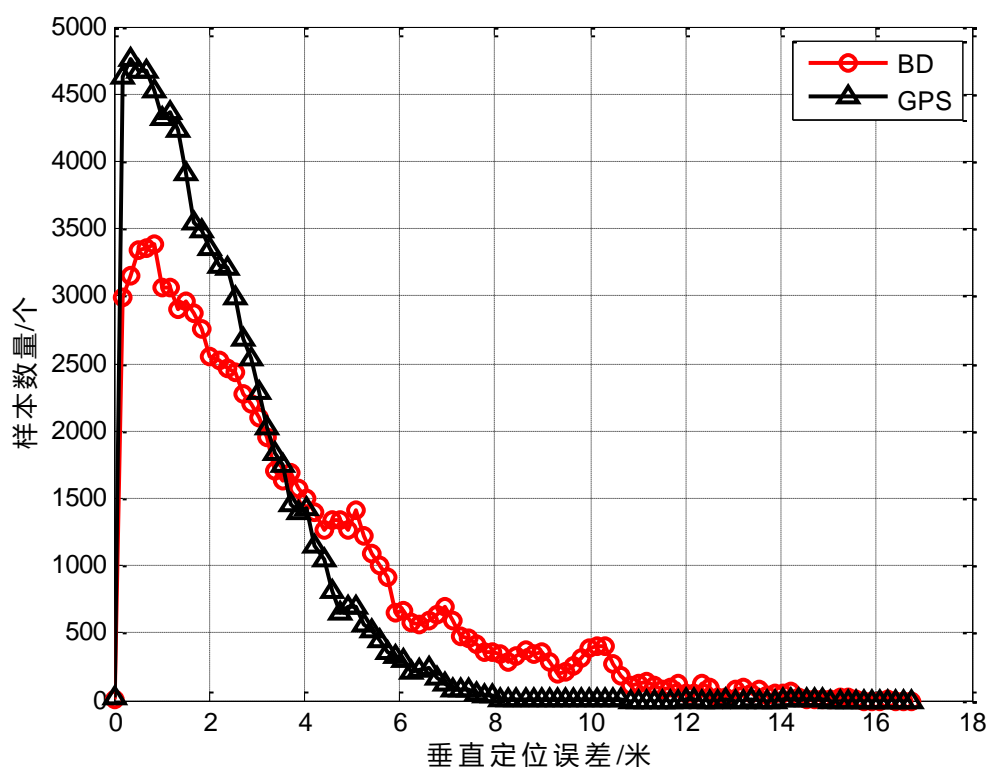


图 4.22 温州监测站垂直定位误差分布

图 4.23、图 4.24 展示了温州监测站以天为单位的 95%水平、垂直定位精度情况。经统计计算,BDS 的水平定位精度平均值为 4.7 米,最大不超过 6 米;GPS 的水平定位精度平均值为 3.2 米,最大不超过 5 米。BDS 的垂直定位精度平均值为 7.9 米,最大不超过 14 米,GPS 的垂直定位精度平均值为 5.3 米,最大不超过 6 米。

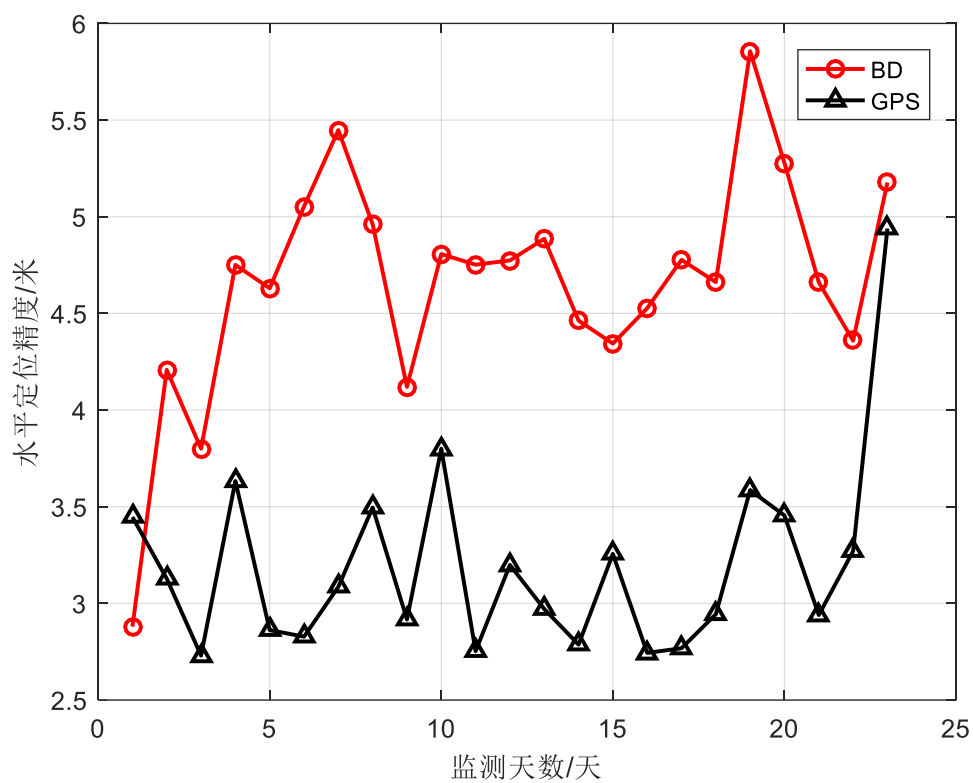


图 4.23 温州监测站 95%水平定位精度

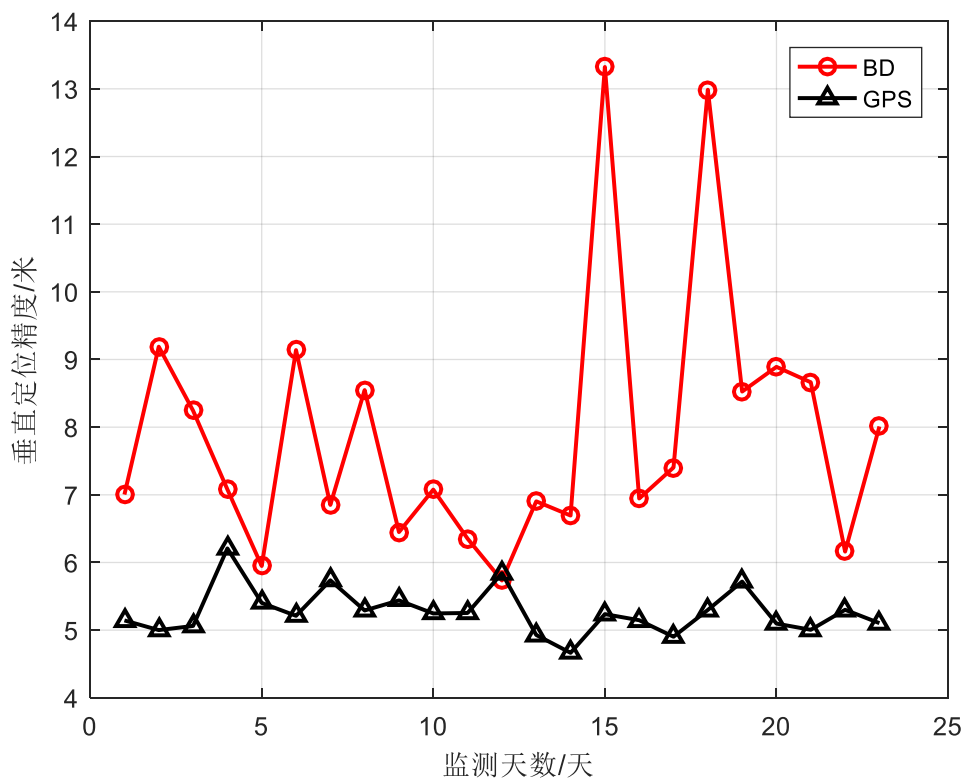


图 4.24 温州监测站 95%垂直定位精度

4.2.7. 大理监测站

水平定位误差分布如图 4.25 所示。大理监测站 BDS 水平定位误差集中在 0-4 米，GPS 水平定位误差主要分布在 0-5 米。

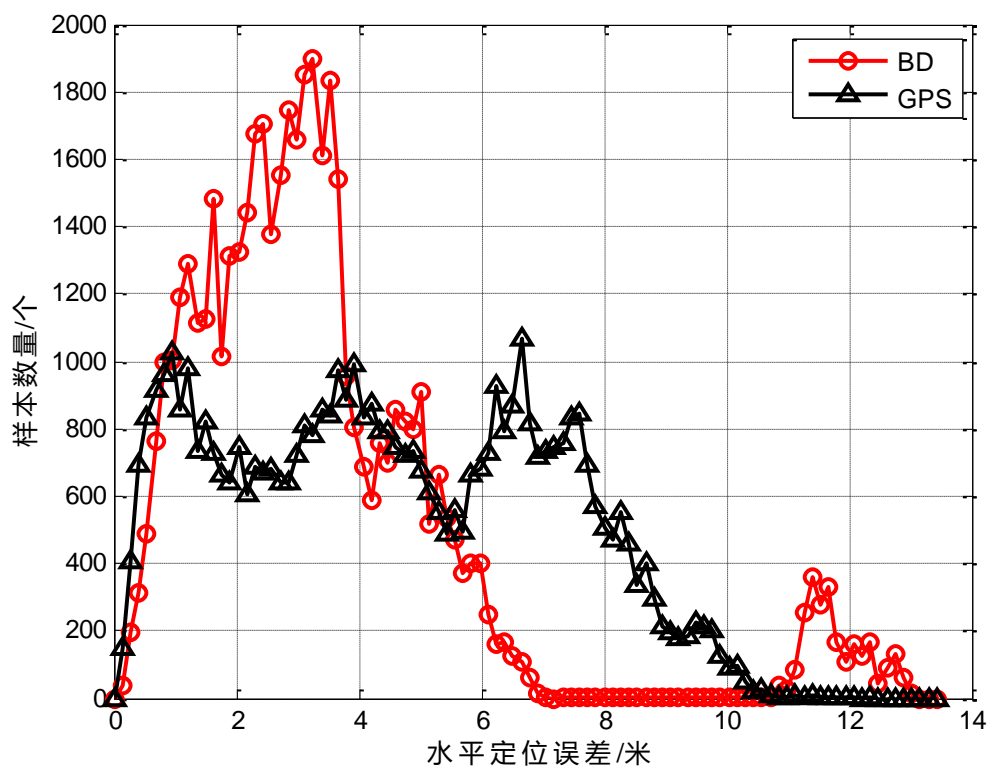


图 4.25 大理监测站水平定位误差分布

同水平定位误差分析类似，垂直定位误差分布如图 4.26 所示。BDS 的垂直定位误差分布集中在 0-9 米，GPS 垂直定位误差主要分布在 0-6 米。

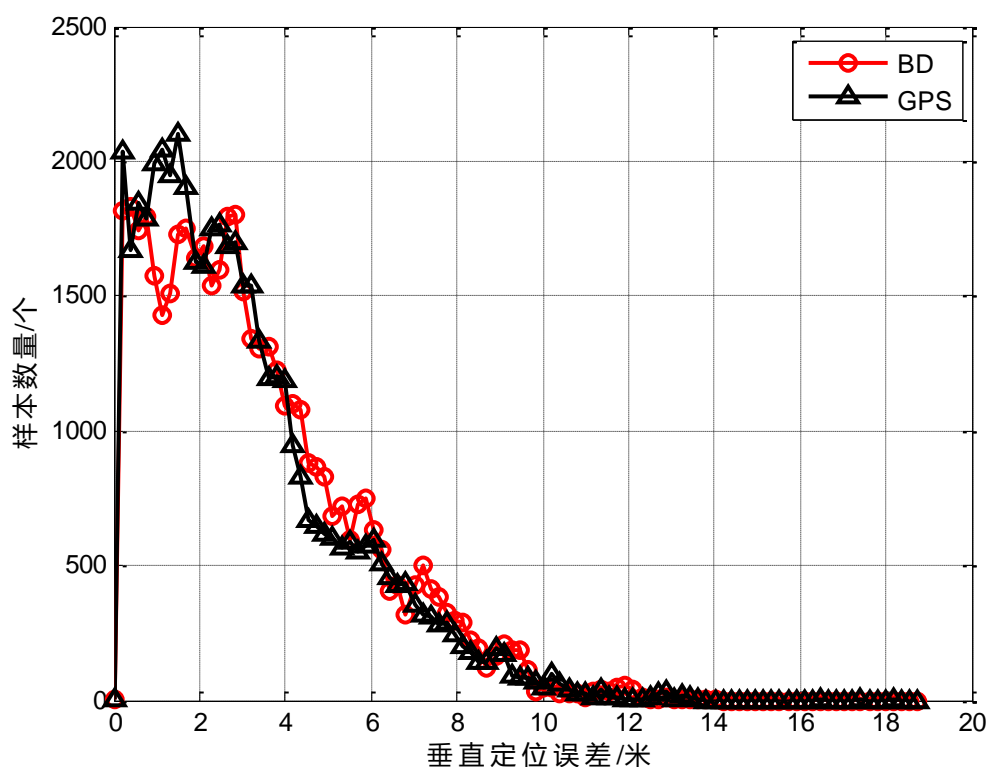


图 4.26 大理监测站垂直定位误差分布

图 4.27、图 4.28 展示了大理监测站以天为单位的 95%水平、垂直定位精度情况。经统计计算,BDS 的水平定位精度平均值为 3.6 米,最大不超过 11 米;GPS 的水平定位精度平均值为 4.7 米,最大不超过 9 米。BDS 的垂直定位精度平均值为 8.5 米,最大不超过 22 米,GPS 的垂直定位精度平均值为 6.4 米,最大不超过 9 米。

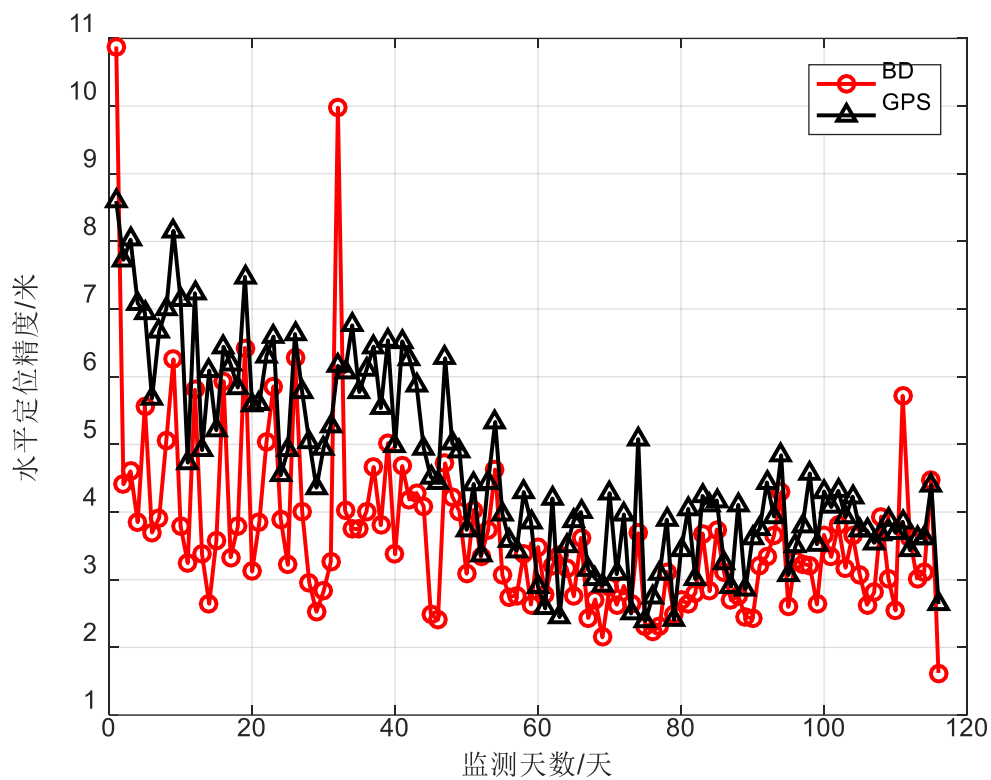


图 4.27 大理监测站 95%水平定位精度

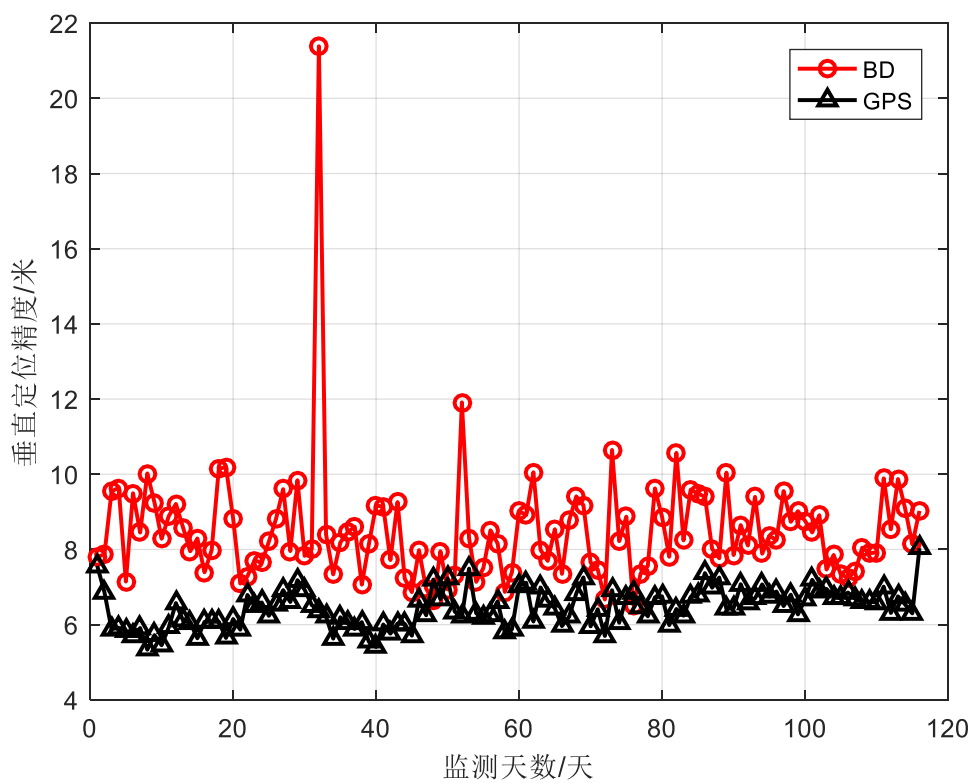


图 4.28 大理监测站 95%垂直定位精度

4.2.8. 台州监测站

水平定位误差分布如图 4.29 所示。台州监测站 BDS 水平定位误差集中在 0-3 米，GPS 水平定位误差主要分布在 0-5 米。

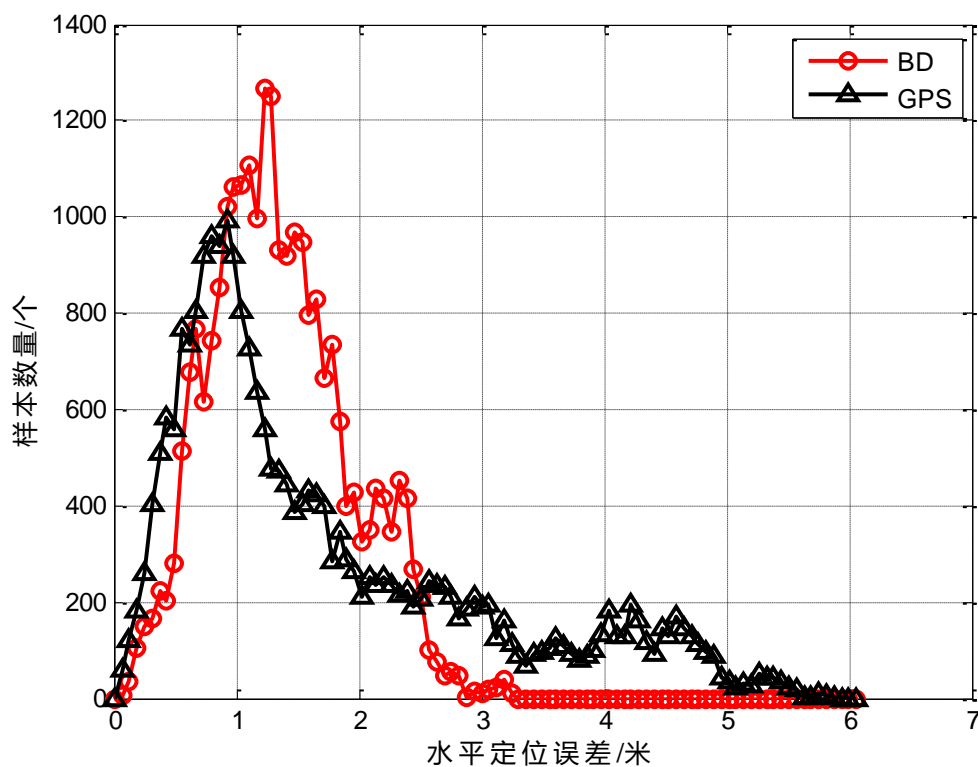


图 4.29 台州监测站水平定位误差分布

同水平定位误差分析类似，垂直定位误差分布如图 4.30 所示。BDS 的垂直定位误差分布集中在 0-7 米，GPS 垂直定位误差主要分布在 0-5 米。

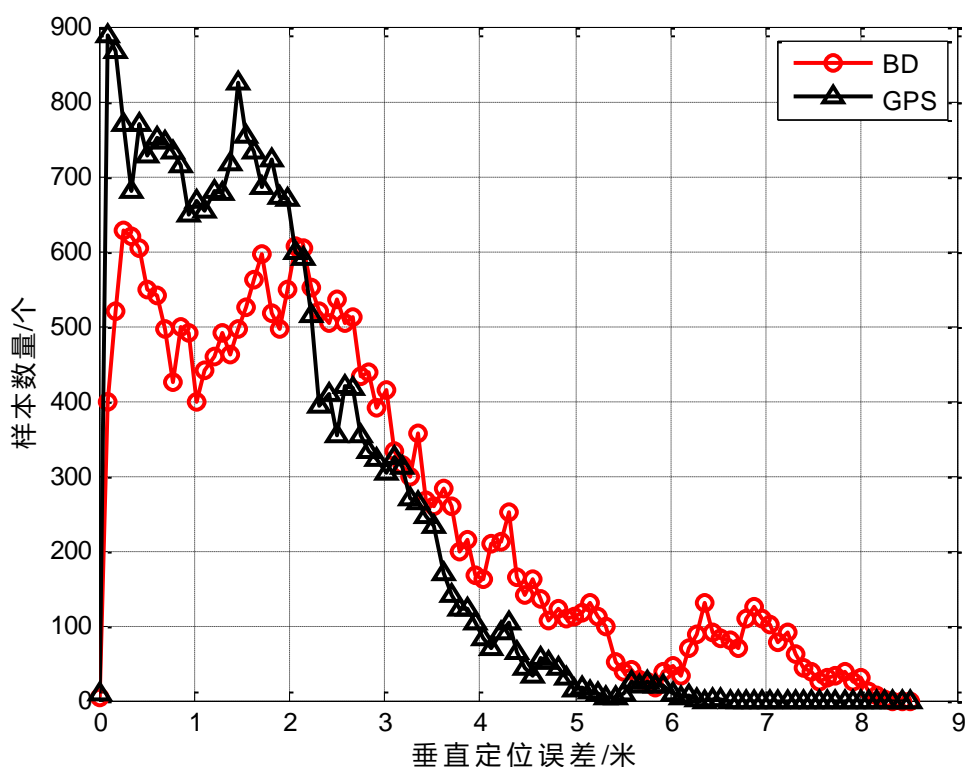


图 4.30 台州监测站垂直定位误差分布

图 4.31、图 4.32 展示了台州监测站以天为单位的 95%水平、垂直定位精度情况。经统计计算,BDS 的水平定位精度平均值为 3.1 米,最大不超过 8 米;GPS 的水平定位精度平均值为 5.1 米,最大不超过 11 米。BDS 的垂直定位精度平均值为 6.7 米,最大不超过 20 米,GPS 的垂直定位精度平均值为 4.8 米,最大不超过 9 米。

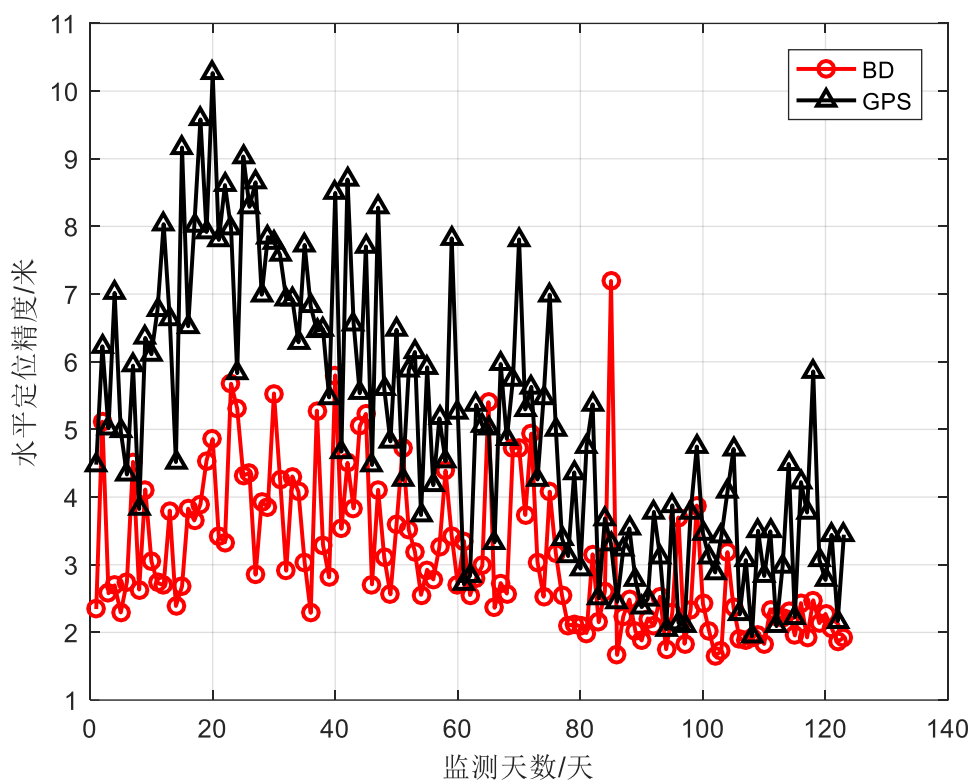


图 4.31 台州监测站 95%水平定位精度

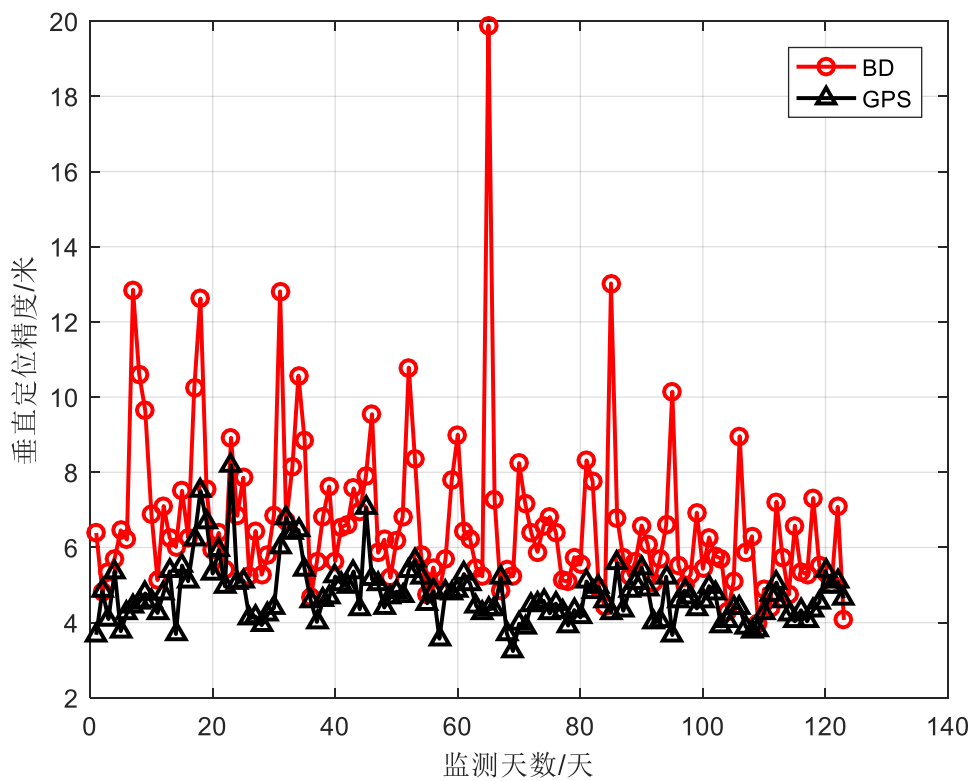


图 4.32 台州监测站 95%垂直定位精度

4.2.9. 成都监测站

水平定位误差分布如图 4.33 所示。成都监测站 BDS 水平定位误差集中在 0-4 米，GPS 水平定位误差主要分布在 0-3 米。

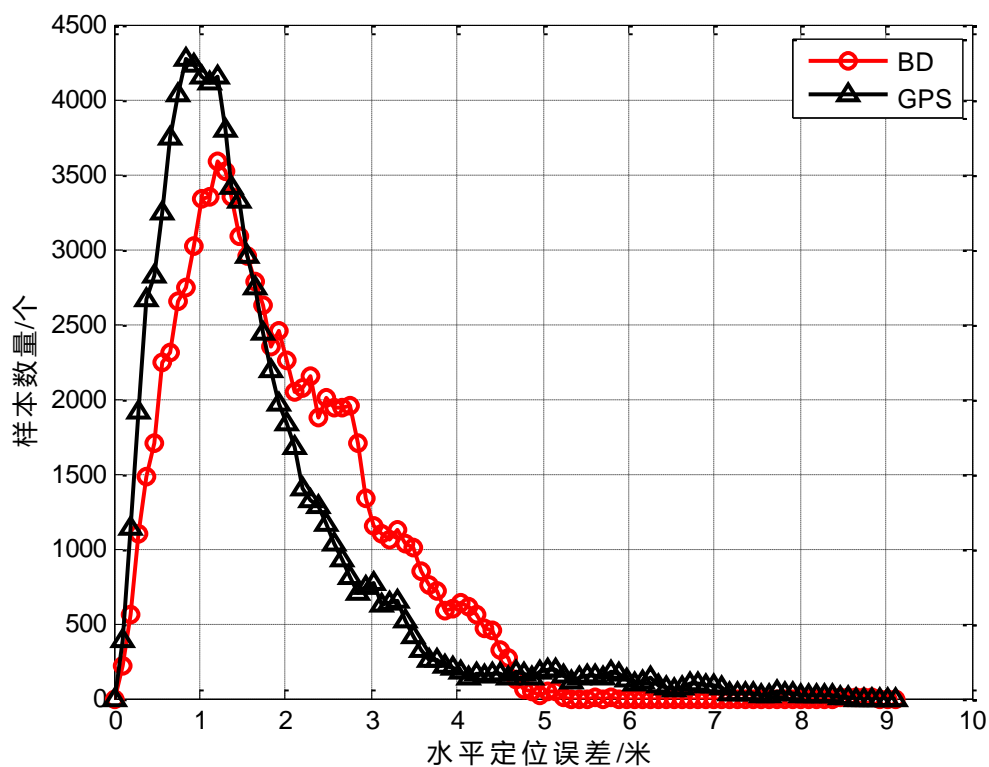


图 4.33 成都监测站水平定位误差分布

同水平定位误差分析类似，垂直定位误差分布如图 4.34 所示。BDS 的垂直定位误差分布集中在 0-9 米，GPS 垂直定位误差主要分布在 0-5 米。

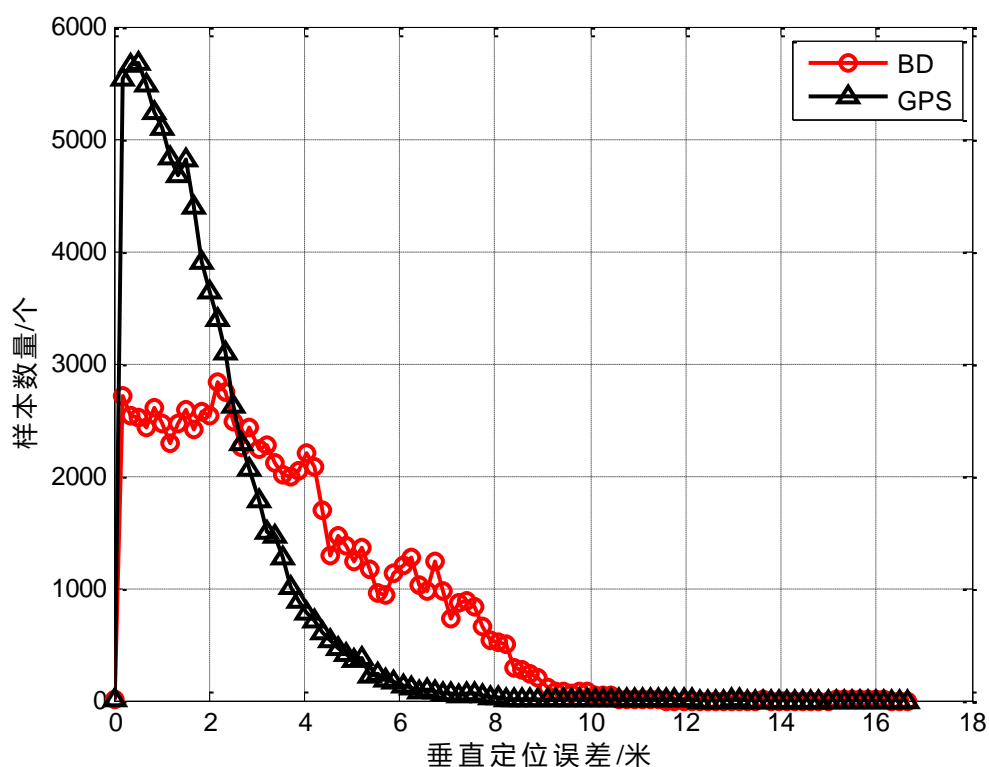


图 4.34 成都监测站垂直定位误差分布

图 4.35、图 4.36 展示了成都监测站以天为单位的 95%水平、垂直定位精度情况。经统计计算,BDS 的水平定位精度平均值为 3.9 米,最大不超过 10 米;GPS 的水平定位精度平均值为 3.3 米,最大不超过 8 米。BDS 的垂直定位精度平均值为 8.9 米,最大不超过 22 米,GPS 的垂直定位精度平均值为 4.7 米,最大不超过 7 米。

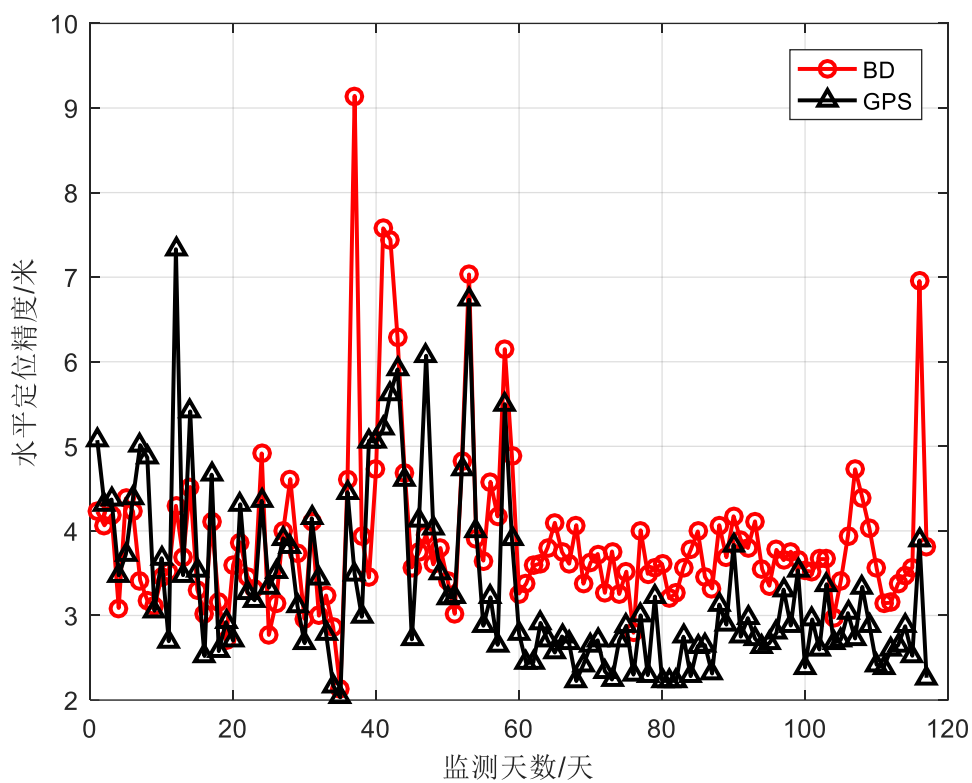


图 4.35 成都监测站 95%水平定位精度

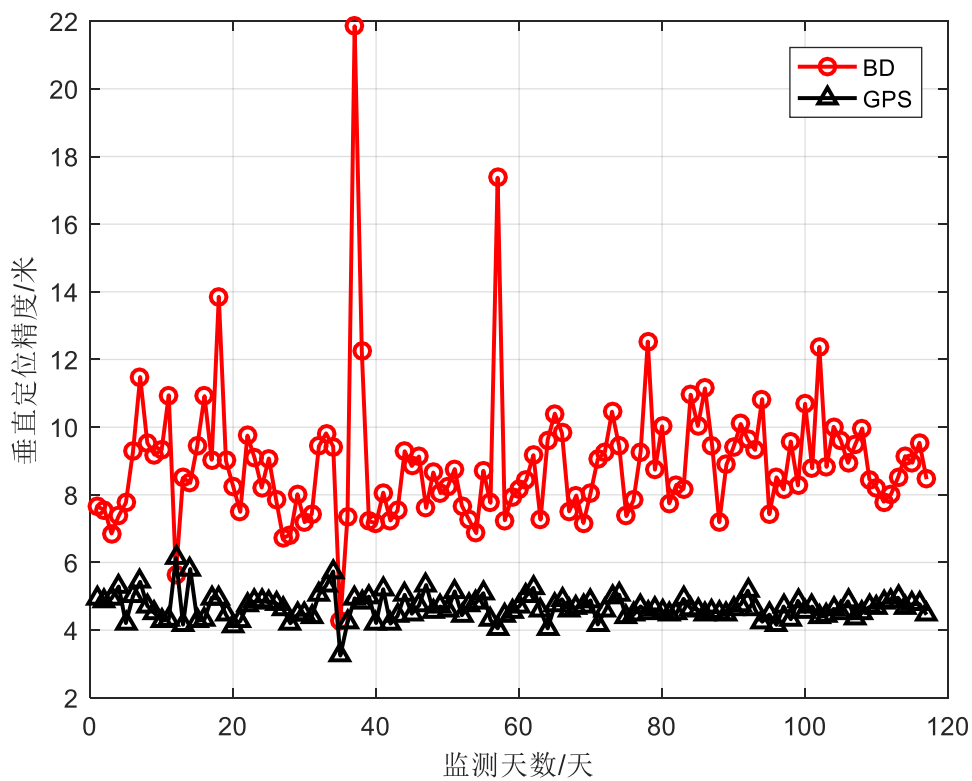


图 4.36 成都监测站 95%垂直定位精度

4.2.10.海口监测站

水平定位误差分布如图 4.37 所示。海口监测站 BDS 水平定位误差集中在 0-6 米，GPS 水平定位误差主要分布在 0-6 米。

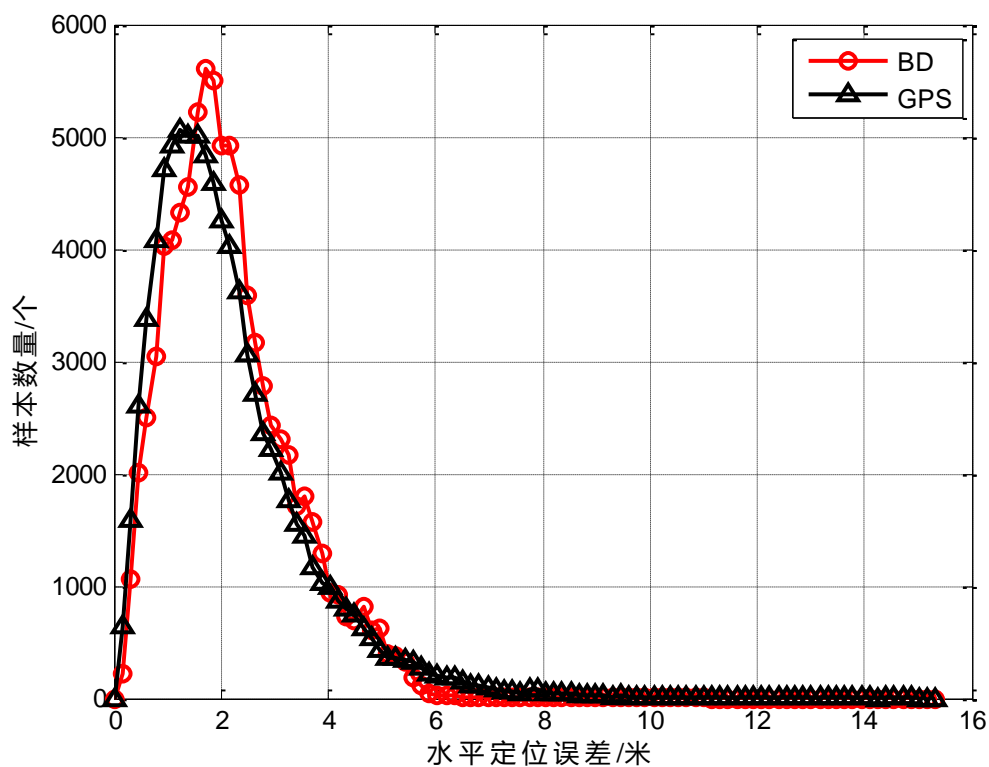


图 4.37 海口监测站水平定位误差分布

同水平定位误差分析类似，垂直定位误差分布如图 4.38 所示。BDS 的垂直定位误差分布集中在 0-12 米，GPS 垂直定位误差主要分布在 0-10 米。

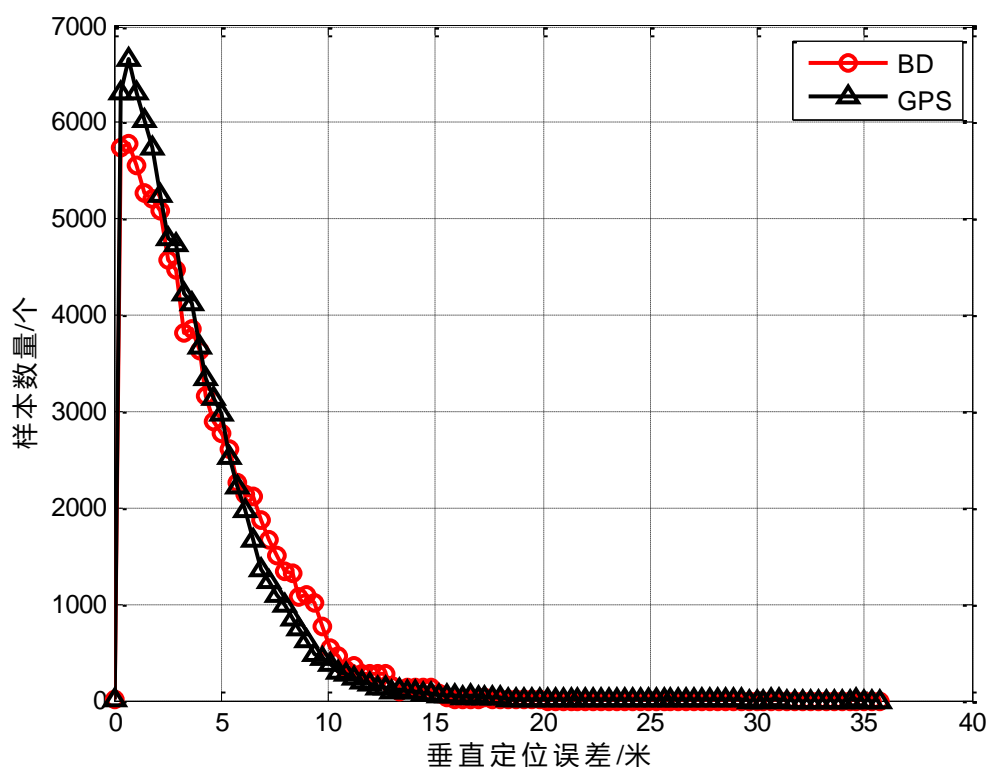


图 4.38 海口监测站垂直定位误差分布

图 4.39、图 4.40 展示了海口监测站以天为单位的 95%水平、垂直定位精度情况。经统计计算，BDS 的水平定位精度平均值 5.9 米，最大不超过 8 米；GPS 的水平定位精度平均值为 6.2 米，最大不超过 8 米。BDS 的垂直定位精度平均值为 11.8 米，最大不超过 18 米，GPS 的垂直定位精度平均值为 10.0 米，最大不超过 14 米。

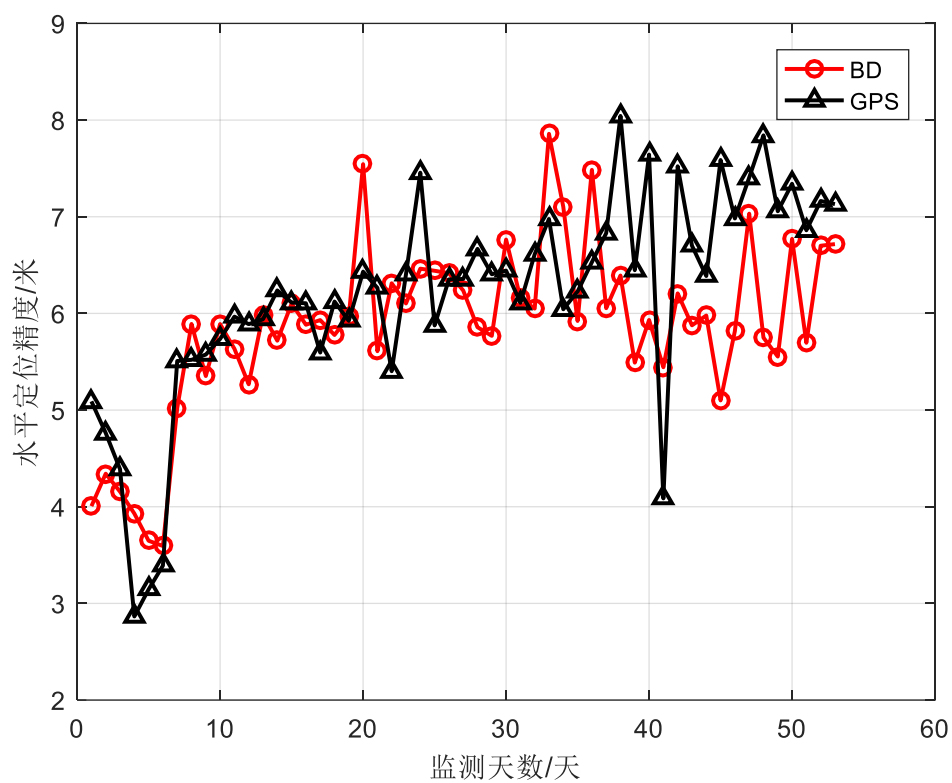


图 4.39 海口监测站 95%水平定位精度

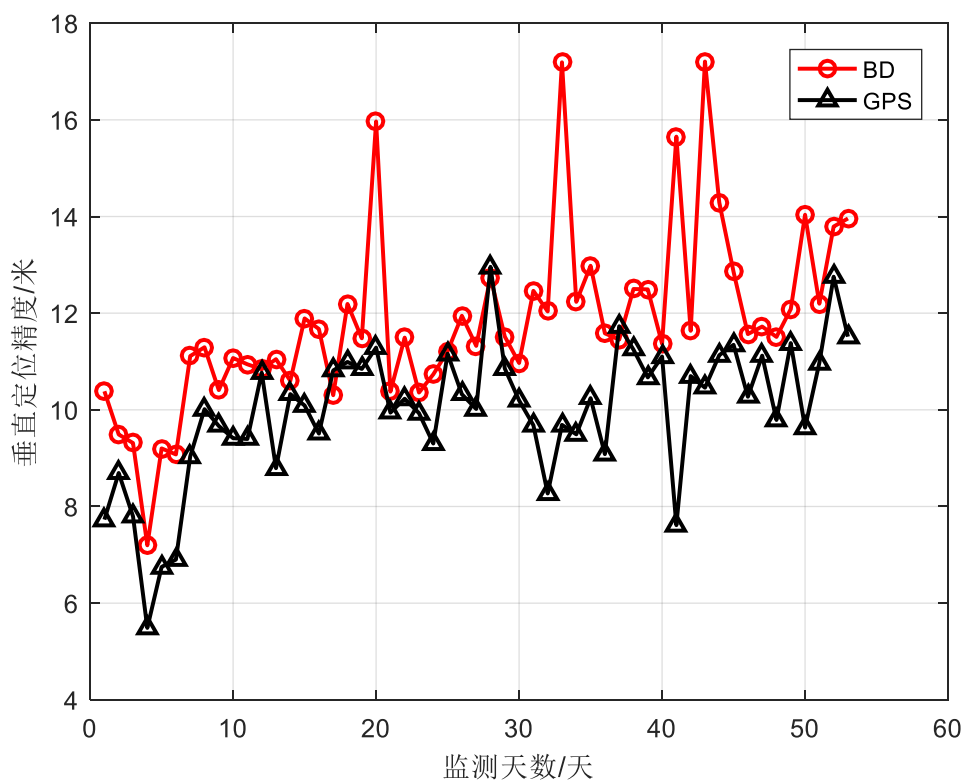


图 4.40 海口监测站 95%垂直定位精度

4.2.11. 三亚监测站

水平定位误差分布如图 4.41 所示。三亚监测站 BDS 水平定位误差集中在 0-4 米，GPS 水平定位误差主要分布在 0-4 米。

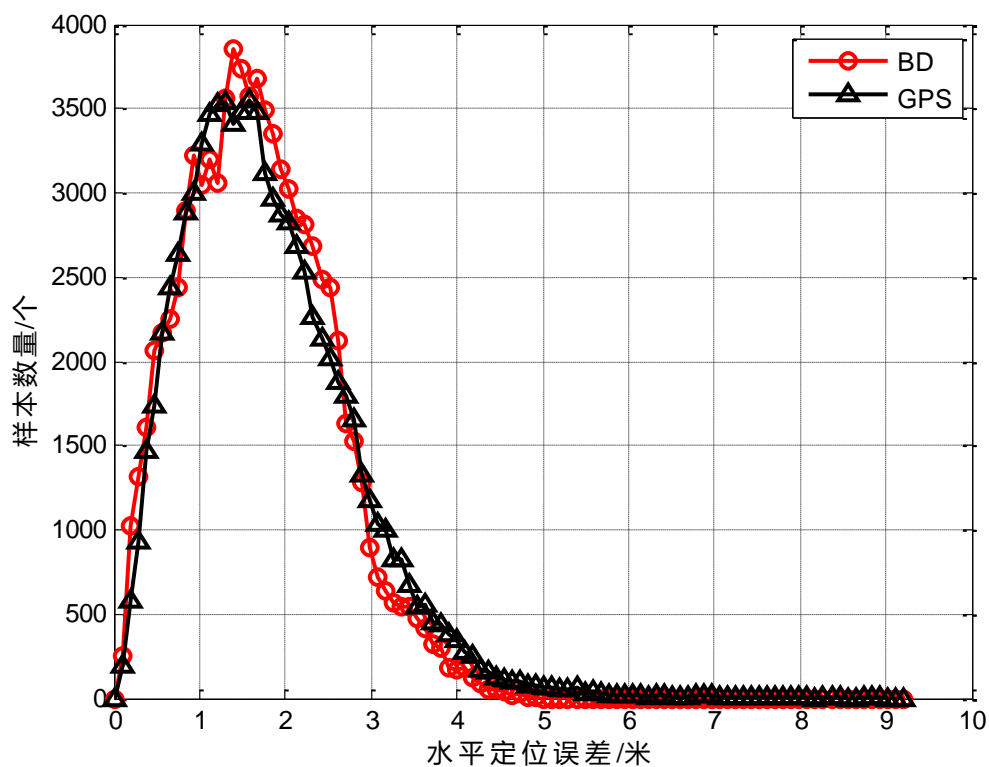


图 4.41 三亚监测站水平定位误差分布

同水平定位误差分析类似，垂直定位误差分布如图 4.42 所示。BDS 的垂直定位误差分布集中在 0-8 米，GPS 垂直定位误差主要分布在 0-7 米。

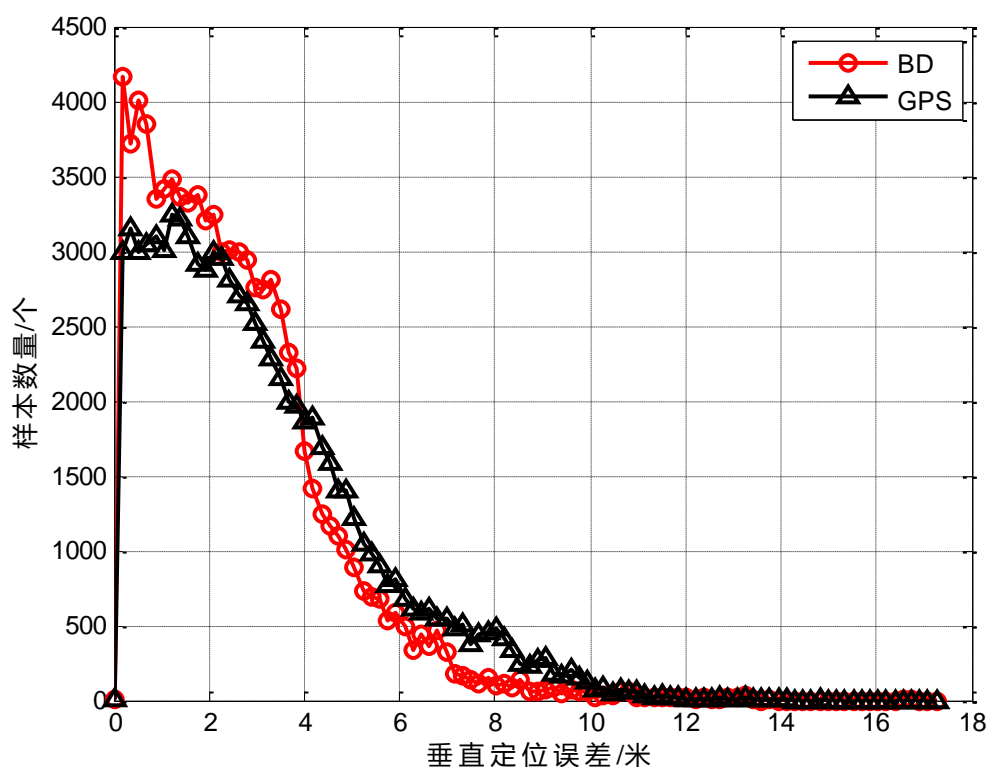


图 4.42 三亚监测站垂直定位误差分布

图 4.43、图 4.44 展示了三亚监测站以天为单位的 95%水平、垂直定位精度情况。经统计计算，BDS 的水平定位精度平均值 3.7 米，最大不超过 10 米；GPS 的水平定位精度平均值为 3.6 米，最大不超过 5 米。BDS 的垂直定位精度平均值为 7.5 米，最大不超过 18 米，GPS 的垂直定位精度平均值为 7.1 米，最大不超过 12 米。

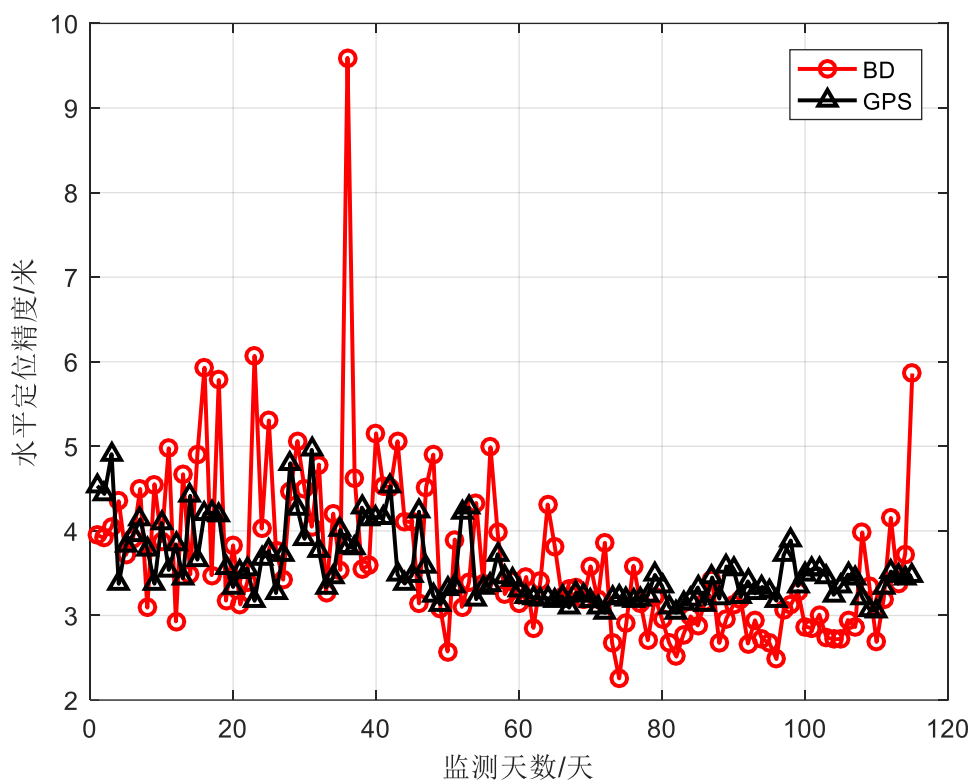


图 4.43 三亚监测站 95%水平定位精度

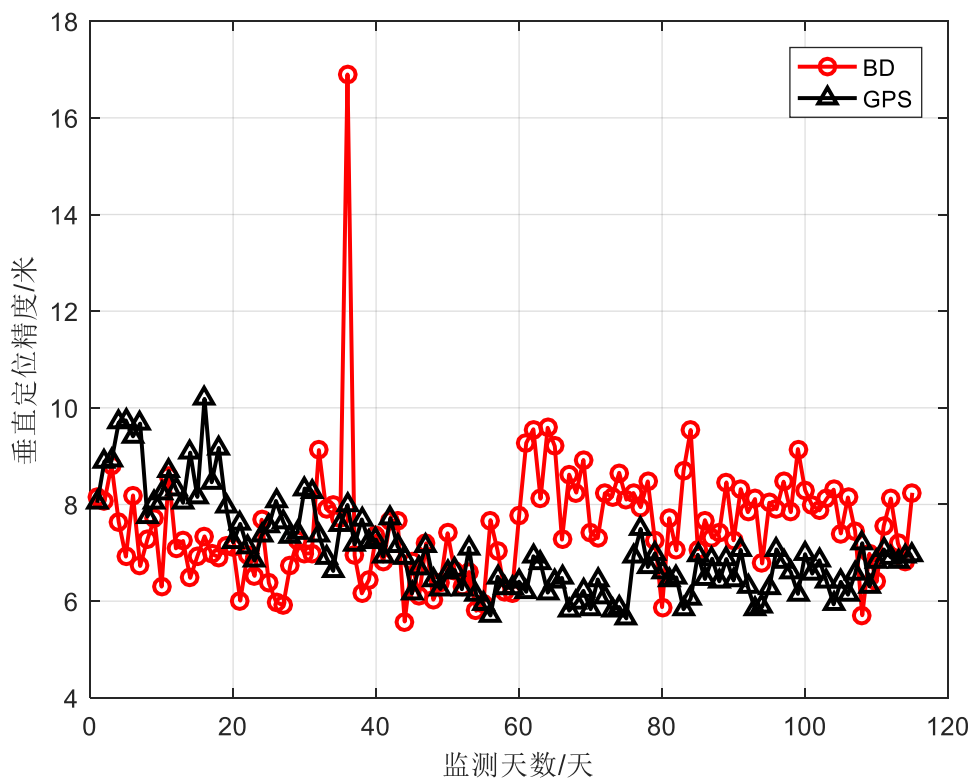


图 4.44 三亚监测站 95%垂直定位精度

4.2.12. 东营监测站

水平定位误差分布如图 4.45 所示。东营监测站 BDS 水平定位误差集中在 0-4 米，GPS 水平定位误差主要分布在 0-4 米。

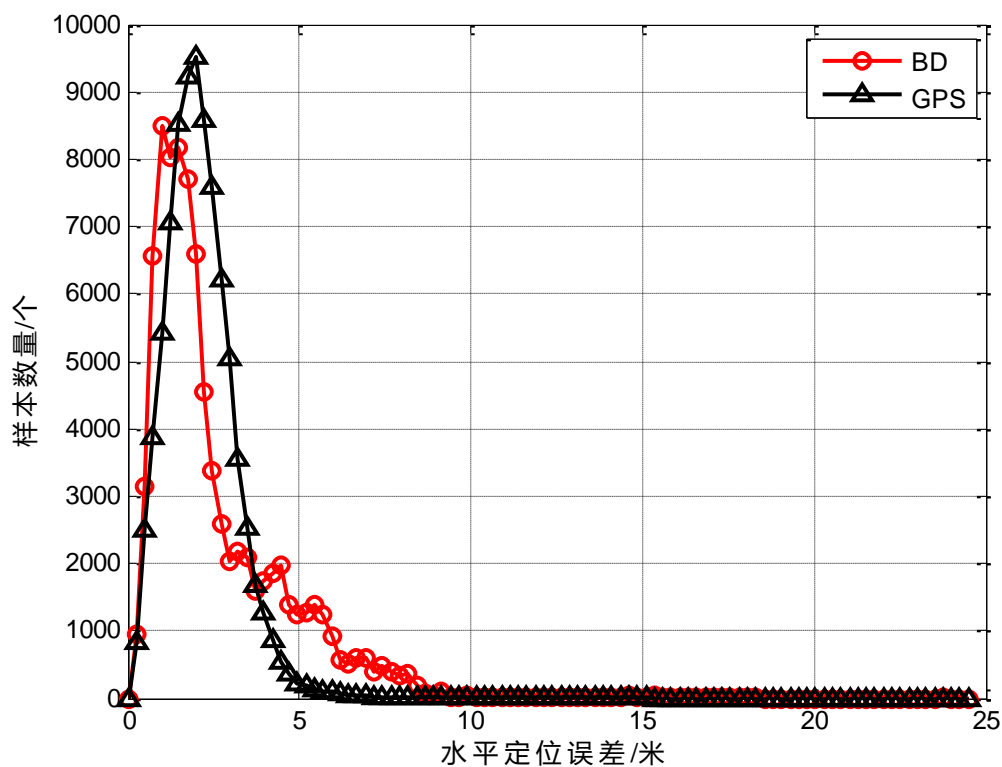


图 4.45 东营监测站水平定位误差分布

同水平定位误差分析类似，垂直定位误差分布如图 4.46 所示。BDS 的垂直定位误差分布集中在 0-9 米，GPS 垂直定位误差主要分布在 0-6 米。

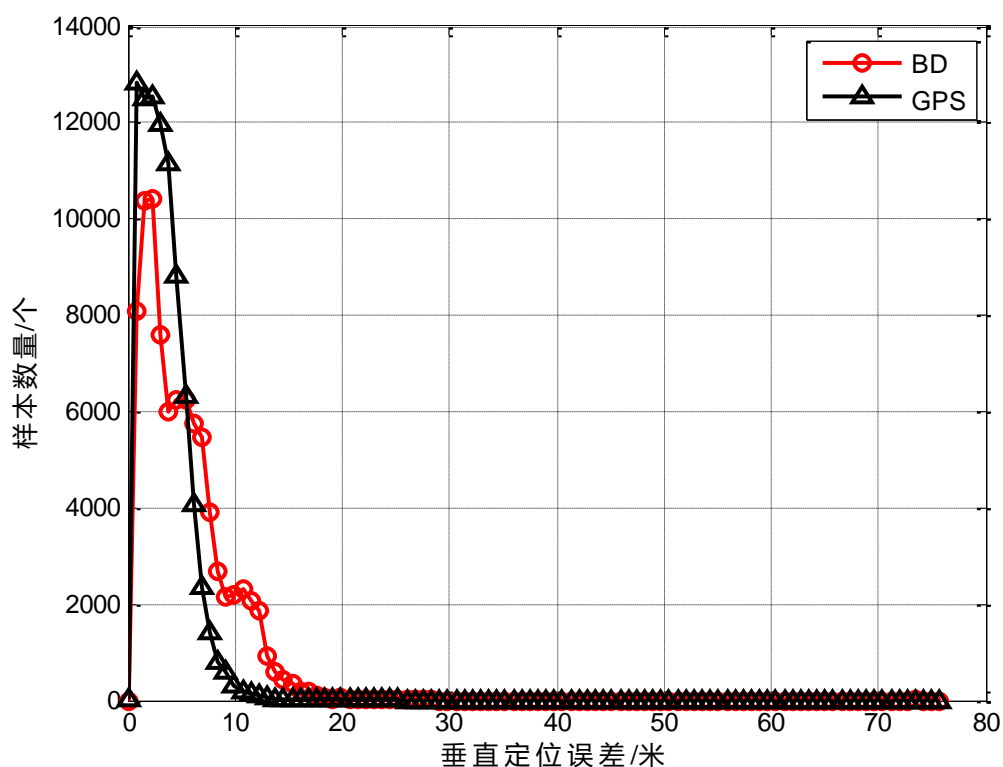


图 4.46 东营监测站垂直定位误差分布

图 4.47、图 4.48 展示了东营监测站以天为单位的 95%水平、垂直定位精度情况。经统计计算，BDS 的水平定位精度平均值 3.6 米，最大不超过 7 米；GPS 的水平定位精度平均值为 3.7 米，最大不超过 5 米。BDS 的垂直定位精度平均值为 8.5 米，最大不超过 12 米，GPS 的垂直定位精度平均值为 6.1 米，最大不超过 7 米。

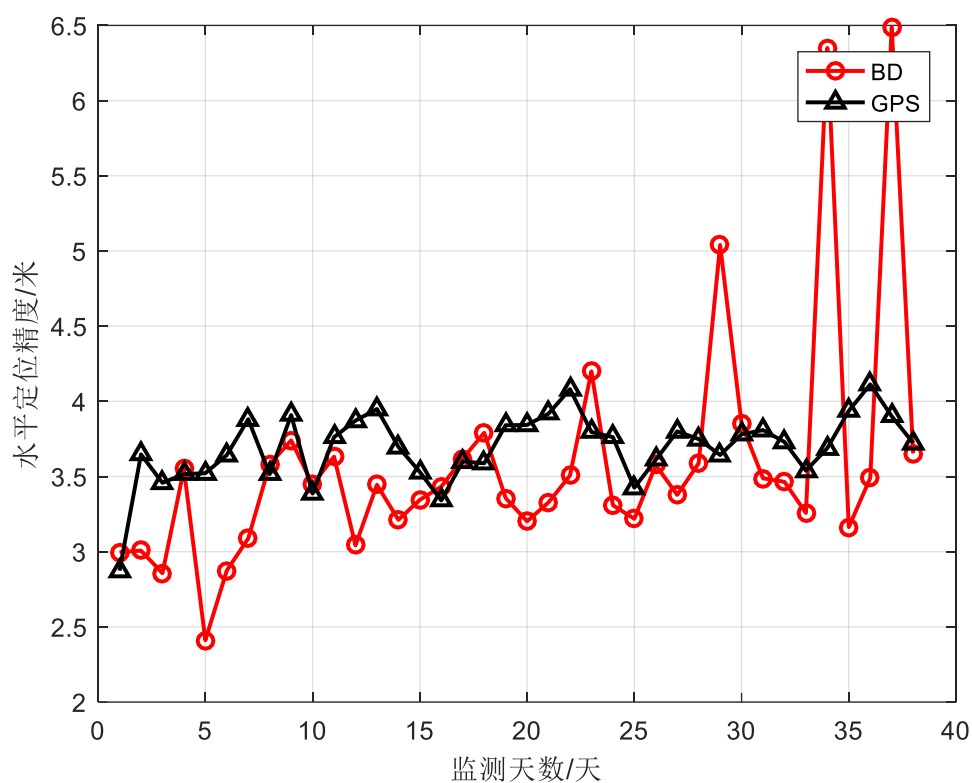


图 4.47 东营监测站 95%水平定位精度

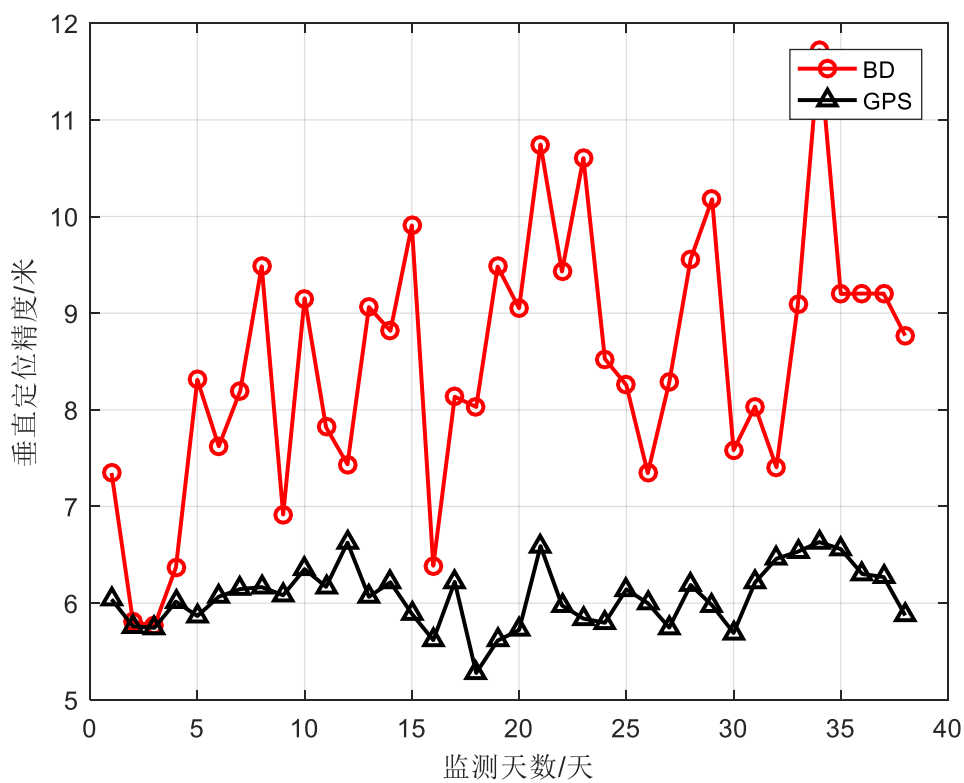


图 4.48 东营监测站 95%垂直定位精度

4.2.13. 武汉监测站

水平定位误差分布如图 4.29 所示。武汉监测站 BDS 水平定位误差集中在 0-3 米，GPS 水平定位误差主要分布在 0-4 米。

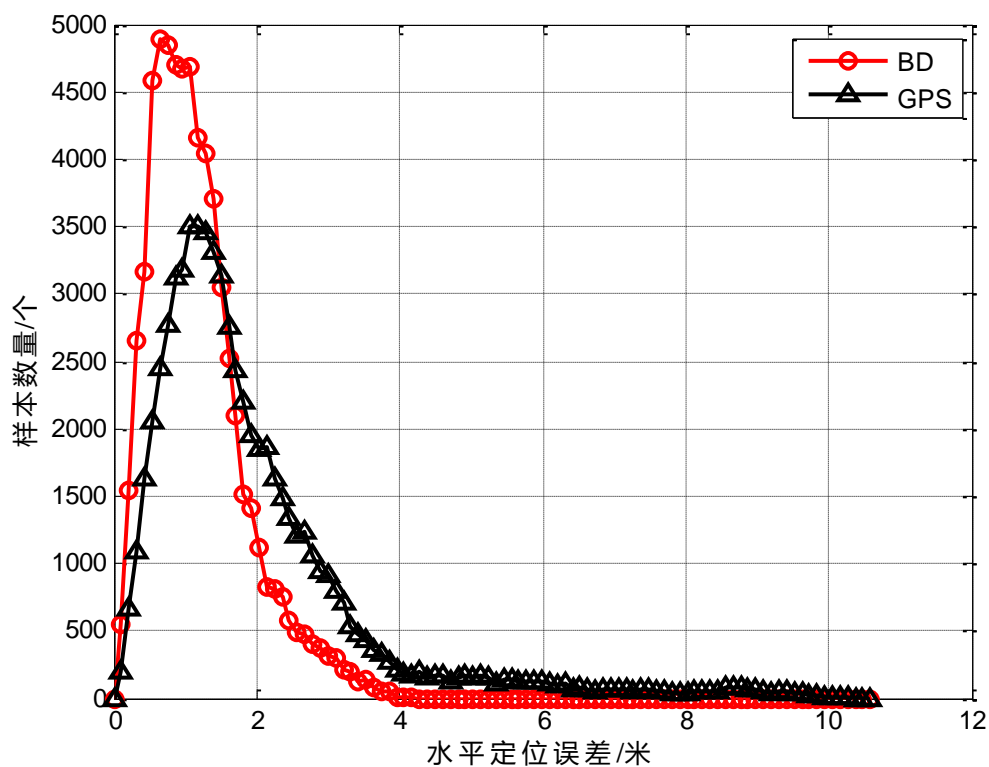


图 4.29 武汉监测站水平定位误差分布

同水平定位误差分析类似，垂直定位误差分布如图 4.30 所示。BDS 的垂直定位误差分布集中在 0-7 米，GPS 垂直定位误差主要分布在 0-6 米。

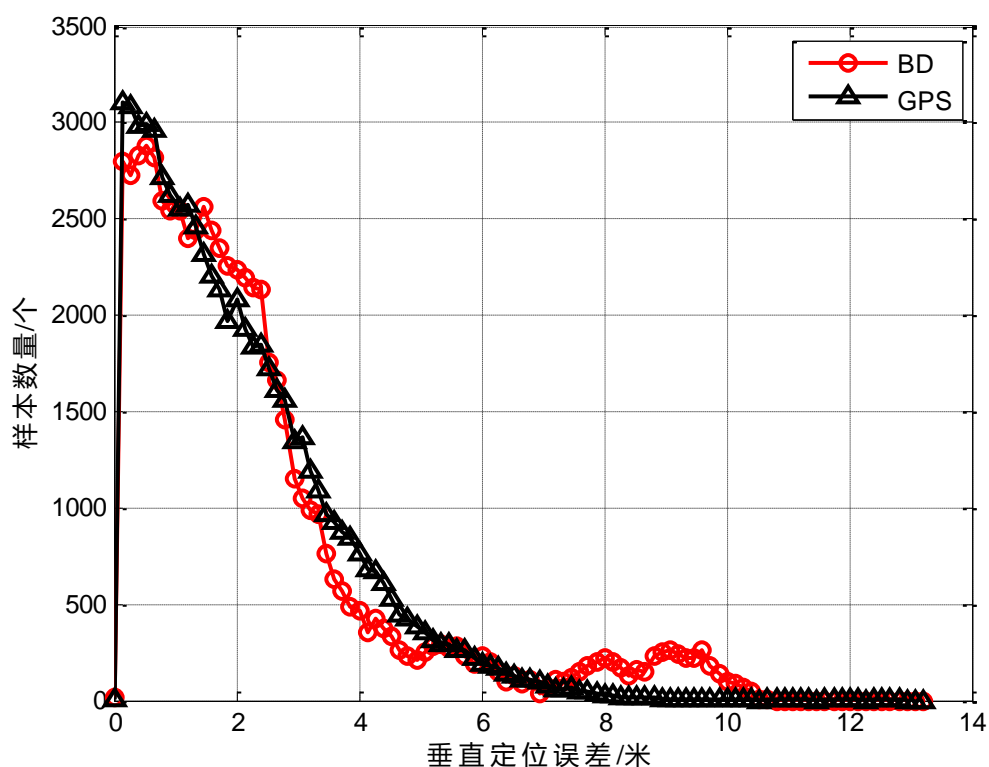


图 4.30 武汉监测站垂直定位误差分布

图 4.31、图 4.32 展示了武汉监测站以天为单位的 95%水平、垂直定位精度情况。经统计计算，BDS 的水平定位精度平均值 3.0 米，最大不超过 10 米；GPS 的水平定位精度平均值为 4.4 米，最大不超过 12 米。BDS 的垂直定位精度平均值为 7.4 米，最大不超过 25 米，GPS 的垂直定位精度平均值为 5.6 米，最大不超过 10 米。

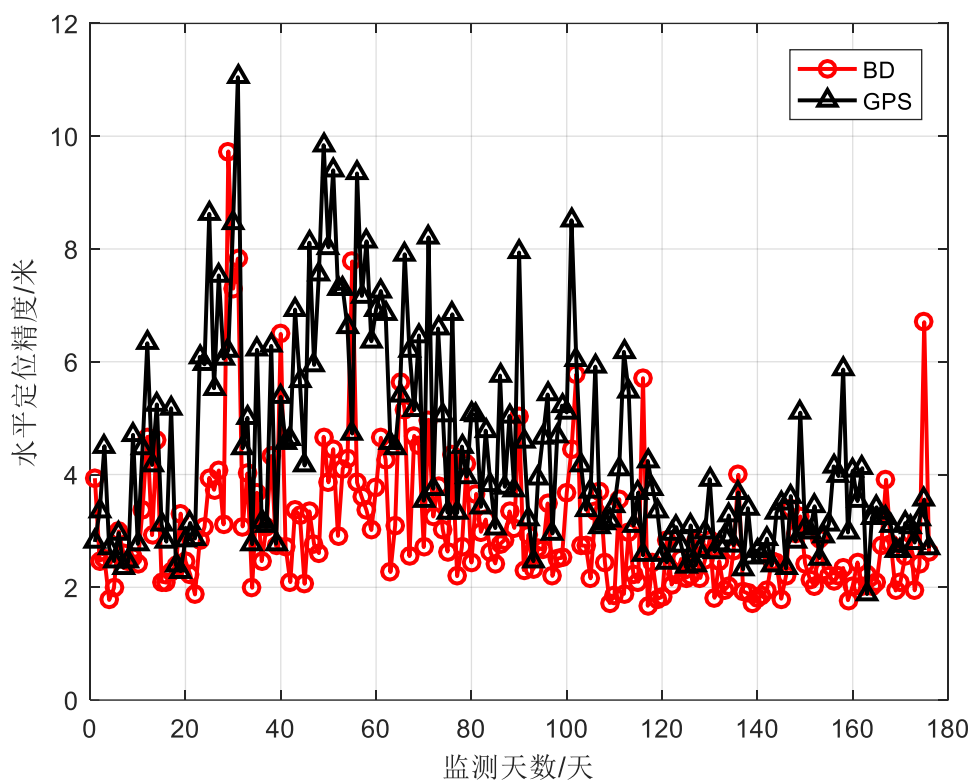


图 4.31 武汉监测站 95%水平定位精度

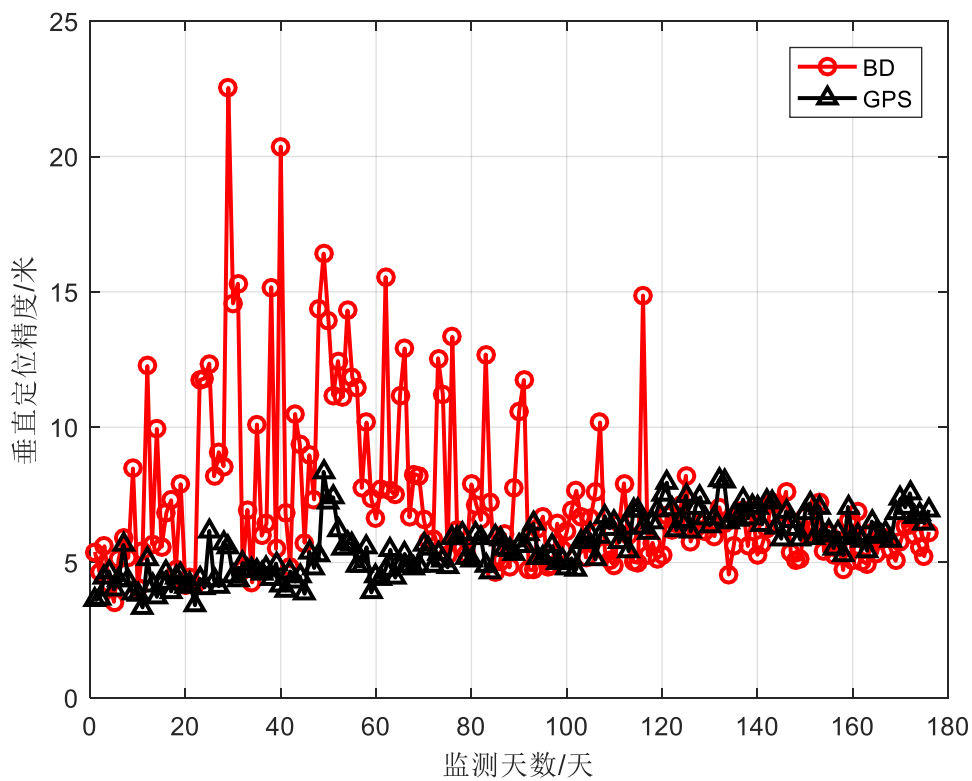


图 4.32 武汉监测站 95%垂直定位精度

4.3. 其他性能分析

4.3.1. 拉萨监测站

(1) 完好性分析

依据完好性评估方法，拉萨监测站监测周期共 122 天，在观测周期内 BDS 和 GPS 的最大水平定位误差远远小于 HAL，均没有出现定位精度超限的情况。所以，BDS 和 GPS 的完好性指标评估为 100%，均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

(2) 连续性分析

依据连续性评估方法，拉萨监测站观测周期内，BDS 出现 RAIM 不可用事件共计 310680 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 1496 次，GPS 出现 RAIM 不可用事件共计 1196 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 26 次，观测周期内 BDS 和 GPS 没有出现计划中断。经计算，BDS 的连续性指标评估为 99.986%，GPS 的连续性指标评估为 99.9998%，GPS 的评估结果满足 NPA 阶段 ICAO 要求，BDS 的评估结果略低于 NPA 阶段 99.99% 以上的连续性要求。

(3) 可用性分析

依据可用性评估方法，拉萨监测站观测周期内，BDS 出现 RAIM 不可用事件共计 310680 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 1496 次，可用性损失事件持续时间 279443 秒；GPS 出现 RAIM 不可用事件共计 1196 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 26 次，可用性损失事件持续时间 779 秒。经计

算，BDS 的可用性指标评估为 97.4%，GPS 的可用性指标评估为 99.993%，GPS 的评估结果满足 NPA 阶段的 ICAO 要求，BDS 的评估结果不满足 NPA 阶段 99%以上的可用性要求。

4.3.2. 乌鲁木齐监测站

(1) 完好性分析

依据完好性评估方法，乌鲁木齐监测站监测天数共 122 天，在观测周期内 BDS 和 GPS 的最大水平定位误差远远小于 HAL，均没有出现定位精度超限的情况。所以，BDS 和 GPS 的完好性指标评估为 100%，均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

(2) 连续性分析

依据连续性评估方法，乌鲁木齐监测站观测周期内，BDS 出现 RAIM 不可用事件共计 425545 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 2562 次，GPS 出现 RAIM 不可用事件共计 53 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 0 次，观测周期内 BDS 和 GPS 没有出现计划中断。经计算，BDS 的连续性指标评估为 99.98%，GPS 的连续性指标评估为 100%，GPS 的评估结果满足 NPA 阶段 ICAO 要求，BDS 的评估结果略低于 NPA 阶段 99.99% 以上的连续性要求。

(3) 可用性分析

依据可用性评估方法，乌鲁木齐监测站观测周期内，BDS 出现 RAIM 不可用事件共计 425545 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 2562 次，可用性损失事件持续时间 377592 秒；

GPS 出现 RAIM 不可用事件共计 53 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 0 次，可用性损失事件持续时间 0 秒。经计算，BDS 的可用性指标评估为 96.5%，GPS 的可用性指标评估为 100%，GPS 的评估结果满足 NPA 阶段的 ICAO 要求，BDS 的评估结果不满足 NPA 阶段 99%以上的可用性要求。

4.3.3. 哈尔滨监测站

(1) 完好性分析

依据完好性评估方法，哈尔滨监测站监测天数共 153 天，在观测周期内 BDS 和 GPS 的最大水平定位误差远远小于 HAL，均没有出现定位精度超限的情况。所以，BDS 和 GPS 的完好性指标评估为 100%，均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

(2) 连续性分析

依据连续性评估方法，哈尔滨监测站观测周期内，BDS 出现 RAIM 不可用事件共计 1157150 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 7643 次，GPS 出现 RAIM 不可用事件共计 107 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 0 次，观测周期内 BDS 和 GPS 没有出现计划中断。经计算，BDS 的连续性指标评估为 99.94%，GPS 的连续性指标评估为 100%，GPS 的评估结果满足 NPA 阶段 ICAO 要求，BDS 的评估结果略低于 NPA 阶段 99.99% 以上的连续性要求。

(3) 可用性分析

依据可用性评估方法，哈尔滨监测站观测周期内，BDS 出现 RAIM 不可用事件共计 1157150 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 7643 次，可用性损失事件持续时间 269544 秒；GPS 出现 RAIM 不可用事件共计 107 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 0 次，可用性损失事件持续时间 0 秒。经计算，BDS 的可用性指标评估为 98.0%，GPS 的可用性指标评估为 100%，GPS 的评估结果满足 NPA 阶段的 ICAO 要求，BDS 的评估结果不满足 NPA 阶段 99%以上的可用性要求。

4.3.4. 昆明监测站

（1）完好性分析

依据完好性评估方法，昆明监测站监测天数共 365 天，在观测周期内 BDS 和 GPS 的最大水平定位误差远远小于 HAL，均没有出现定位精度超限的情况。所以，BDS 和 GPS 的完好性指标评估为 100%，均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

（2）连续性分析

依据连续性评估方法，昆明监测站观测周期内，BDS 出现 RAIM 不可用事件共计 169112 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 1467 次，GPS 出现 RAIM 不可用事件共计 10706 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 45 次，观测周期内 BDS 和 GPS 没有出现计划中断。经计算，BDS 的连续性指标评估为 99.995%，GPS 的连续性指标评估为 99.99986%，均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

（3）可用性分析

依据可用性评估方法，昆明监测站观测周期内，BDS 出现 RAIM 不可用事件共计 169112 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 1467 次，可用性损失事件持续时间 114002 秒；GPS 出现 RAIM 不可用事件共计 10706 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 45 次，可用性损失事件持续时间 9328 秒。经计算，BDS 的可用性指标评估为 99.6%，GPS 的可用性指标评估为 99.6%，均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

4.3.5. 北京监测站

（1）完好性分析

依据完好性评估方法，北京监测站监测天数共 122 天，在观测周期内 BDS 和 GPS 的最大水平定位误差远远小于 HAL，均没有出现定位精度超限的情况。所以，BDS 和 GPS 的完好性指标评估为 100%，均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

（2）连续性分析

依据连续性评估方法，北京监测站观测周期内，BDS 出现 RAIM 不可用事件共计 224906 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 1544 次，GPS 出现 RAIM 不可用事件共计 71 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 0 次，观测周期内 BDS 和 GPS 没有出现计划中断。经计算，BDS 的连续性指标评估为 99.99%，GPS 的连续性指标评估为 100%，均满足 NPA 阶段的连续性 ICAO 要求。

（3）可用性分析

依据可用性评估方法，北京监测站观测周期内，BDS 出现 RAIM 不可用事件共计 224906 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 1544 次，可用性损失事件持续时间 114620 秒；GPS 出现 RAIM 不可用事件共计 71 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 0 次，可用性损失事件持续时间 0 秒。经计算，BDS 的可用性指标评估为 99%，GPS 的可用性指标评估为 100%，均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

4.3.6. 温州监测站

（1）完好性分析

依据完好性评估方法，温州监测站监测天数共 23 天，在观测周期内 BDS 和 GPS 的最大水平定位误差远远小于 HAL，均没有出现定位精度超限的情况。所以，BDS 和 GPS 的完好性指标评估为 100%，均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

（2）连续性分析

依据连续性评估方法，温州监测站观测周期内，BDS 出现 RAIM 不可用事件共计 741 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 14 次，GPS 出现 RAIM 不可用事件共计 1434 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 19 次，观测周期内 BDS 和 GPS 没有出现计划中断。经计算，BDS 的连续性指标评估为 99.9994%，GPS 的连续性指标评估为 99.9992%，均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

（3）可用性分析

依据可用性评估方法，温州监测站观测周期内，BDS 出现 RAIM 不可用事件共计 741 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 14 次，可用性损失事件持续时间 424 秒；GPS 出现 RAIM 不可用事件共计 1434 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 19 次，可用性损失事件持续时间 684 秒。经计算，BDS 的可用性指标评估为 99.98%，GPS 的可用性指标评估为 99.97%，均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

4.3.7.大理监测站

（1）完好性分析

依据完好性评估方法，大理监测站监测天数共 116 天，在观测周期内 BDS 和 GPS 的最大水平定位误差远远小于 HAL，均没有出现定位精度超限的情况。所以，BDS 和 GPS 的完好性指标评估为 100%，均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

（2）连续性分析

依据连续性评估方法，大理监测站观测周期内，BDS 出现 RAIM 不可用事件共计 13074 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 37 次，GPS 出现 RAIM 不可用事件共计 6387 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 20 次，观测周期内 BDS 和 GPS 没有出现计划中断。经计算，BDS 的连续性指标评估为 99.9996%，GPS 的连续性指标评估为 99.9998%，均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

(3) 可用性分析

依据可用性评估方法，大理监测站观测周期内，BDS 出现 RAIM 不可用事件共计 13074 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 37 次，可用性损失事件持续时间 243 秒；GPS 出现 RAIM 不可用事件共计 6387 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 20 次，可用性损失事件持续时间 282 秒。经计算，BDS 的可用性指标评估为 99.998%，GPS 的可用性指标评估为 99.997%，均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

4.3.8. 台州监测站

(1) 完好性分析

依据完好性评估方法，台州监测站监测天数共 123 天，在观测周期内 BDS 和 GPS 的最大水平定位误差远远小于 HAL，均没有出现定位精度超限的情况。所以，BDS 和 GPS 的完好性指标评估为 100%，均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

(2) 连续性分析

依据连续性评估方法，台州监测站观测周期内，BDS 出现 RAIM 不可用事件共计 16149 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 38 次，GPS 出现 RAIM 不可用事件共计 4764 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 13 次，观测周期内 BDS 和 GPS 没有出现计划中断。经计算，BDS 的连续性指标评估为 99.9996%，GPS 的连续性指标评估为 99.99988%，均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

(3) 可用性分析

依据可用性评估方法，台州监测站观测周期内，BDS 出现 RAIM 不可用事件共计 16149 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 38 次，可用性损失事件持续时间 186 秒；GPS 出现 RAIM 不可用事件共计 4764 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 13 次，可用性损失事件持续时间 75 秒。经计算，BDS 的可用性指标评估为 99.998%，GPS 的可用性指标评估为 99.9993%，均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

4.3.9. 成都监测站

(1) 完好性分析

依据完好性评估方法，成都监测站监测天数共 117 天，在观测周期内 BDS 和 GPS 的最大水平定位误差远远小于 HAL，均没有出现定位精度超限的情况。所以，BDS 和 GPS 的完好性指标评估为 100%，均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

(2) 连续性分析

依据连续性评估方法，成都监测站观测周期内，BDS 出现 RAIM 不可用事件共计 34364 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 118 次，GPS 出现 RAIM 不可用事件共计 20522 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 39 次，观测周期内 BDS 和 GPS 没有出现计划中断。经计算，BDS 的连续性指标评估为 99.9988%，GPS 的连续性指标评估为 99.9996%，均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

(3) 可用性分析

依据可用性评估方法，成都监测站观测周期内，BDS 出现 RAIM 不可用事件共计 34364 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 118 次，可用性损失事件持续时间 652 秒；GPS 出现 RAIM 不可用事件共计 20522 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 39 次，可用性损失事件持续时间 189 秒。经计算，BDS 的可用性指标评估为 99.994%，GPS 的可用性指标评估为 99.998%，均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

4.3.10.海口监测站

(1) 完好性分析

依据完好性评估方法，海口监测站监测天数共 53 天，在观测周期内 BDS 和 GPS 的最大水平定位误差远远小于 HAL，均没有出现定位精度超限的情况。所以，BDS 和 GPS 的完好性指标评估为 100%，均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

(2) 连续性分析

依据连续性评估方法，海口监测站观测周期内，BDS 出现 RAIM 不可用事件共计 505 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 12 次，GPS 出现 RAIM 不可用事件共计 16706 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 396 次，观测周期内 BDS 和 GPS 没有出现计划中断。经计算，BDS 的连续性指标评估为 99.9997%，GPS 的连续性指标评估为 99.991%，均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

（3）可用性分析

依据可用性评估方法，海口监测站观测周期内，BDS 出现 RAIM 不可用事件共计 505 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 12 次，可用性损失事件持续时间 214 秒；GPS 出现 RAIM 不可用事件共计 16706 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 396 次，可用性损失事件持续时间 5717 秒。经计算，BDS 的可用性指标评估为 99.995%，GPS 的可用性指标评估为 99.88%，均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

4.3.11. 三亚监测站

（1）完好性分析

依据完好性评估方法，三亚监测站监测天数共 115 天，观测周期内 BDS 和 GPS 的最大水平定位误差远远小于 HAL，均没有出现定位精度超限的情况。所以，BDS 和 GPS 的完好性指标评估为 100%，均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

（2）连续性分析

依据连续性评估方法，三亚监测站观测周期内，BDS 出现 RAIM 不可用事件共计 6549 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 23 次，GPS 出现 RAIM 不可用事件共计 1195 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 3 次，观测周期内 BDS 和 GPS 没有出现计划中断。经计算，BDS 的连续性指标评估为 99.9998%，GPS 的连续性指标评估为 99.99997%，均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

（3）可用性分析

依据可用性评估方法，三亚监测站观测周期内，BDS 出现 RAIM 不可用事件共计 6549 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 23 次，可用性损失事件持续时间 99 秒；GPS 出现 RAIM 不可用事件共计 1195 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 3 次，可用性损失事件持续时间 193 秒。经计算，BDS 的可用性指标评估为 99.999%，GPS 的可用性指标评估为 99.998%，均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

4.3.12. 东营监测站

（1）完好性分析

依据完好性评估方法，东营监测站监测天数共 38 天，在观测周期内 BDS 和 GPS 的最大水平定位误差远远小于 HAL，均没有出现定位精度超限的情况。所以，BDS 和 GPS 的完好性指标评估为 100%，均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

（2）连续性分析

依据连续性评估方法，东营监测站观测周期内，BDS 出现 RAIM 不可用事件共计 21701 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 363 次，GPS 出现 RAIM 不可用事件共计 21117 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 190 次，观测周期内 BDS 和 GPS 没有出现计划中断。经计算，BDS 的连续性指标评估为 99.99%，GPS 的连续性指标评估为 99.994%，均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

(3) 可用性分析

依据可用性评估方法，东营监测站观测周期内，BDS 出现 RAIM 不可用事件共计 21701 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 363 次，可用性损失事件持续时间 1836 秒；GPS 出现 RAIM 不可用事件共计 21117 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 190 次，可用性损失事件持续时间 4848 秒。经计算，BDS 的可用性指标评估为 99.94%，GPS 的可用性指标评估为 99.85%，均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

4.3.13. 武汉监测站

(1) 完好性分析

依据完好性评估方法，武汉监测站监测天数共 176 天，在观测周期内 BDS 和 GPS 的最大水平定位误差远远小于 HAL，均没有出现定位精度超限的情况。所以，BDS 和 GPS 的完好性指标评估为 100%，均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

(2) 连续性分析

依据连续性评估方法，武汉监测站观测周期内，BDS 出现 RAIM 不可用事件共计 116 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 3 次，GPS 出现 RAIM 不可用事件共计 92 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 3 次，观测周期内 BDS 和 GPS 没有出现计划中断。经计算，BDS 的连续性指标评估为 99.99998%，GPS 的连续性指标评估为 99.99998%，均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

(3) 可用性分析

依据可用性评估方法，武汉监测站观测周期内，BDS 出现 RAIM 不可用事件共计 116 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 3 次，可用性损失事件持续时间 10 秒；GPS 出现 RAIM 不可用事件共计 92 次，其中出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件的次数为 3 次，可用性损失事件持续时间 8 秒。经计算，BDS 的可用性指标评估为 99.99993%，GPS 的可用性指标评估为 99.99995%，均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

4.4. BDS/GPS 导航性能统计结果

对上述 13 个监测站的导航性能评估数据进行汇总，并对北斗与 GPS 间的性能差异进行对比，分析结果如表 4.1 所示。

表 4.1 监测站 BDS/GPS 导航性能对比

地点	水平精度 (95%) BDS/GPS (米)	完好性 BDS/GPS	连续性 BDS/GPS	可用性 BDS/GPS
拉萨	6.0/3.3	100%/100%	99.986%/99.9998%	97.4%/99.993%
乌鲁木齐	7.9/3.0	100%/100%	99.98%/100%	96.5%/100%
哈尔滨	8.5/3.2	100%/100%	99.94%/100%	98.0%/100%
昆明	4.8/2.9	100%/100%	99.995%/99.99986%	99.6%/99.6%
北京	6.4/3.1	100%/100%	99.99%/100%	99%/100%
温州	4.7/3.2	100%/100%	99.9994%/99.9992%	99.98%/99.97%
大理	3.6/4.7	100%/100%	99.9996%/99.9998%	99.998%/99.997%

台州	3.1/5.1	100%/100%	99.9996%/99.99988%	99.998%/99.9993%
成都	3.9/3.3	100%/100%	99.9988%/99.9996%	99.994%/99.998%
海口	5.9/6.2	100%/100%	99.9997%/99.991%	99.995%/99.88%
三亚	3.7/3.6	100%/100%	99.9998%/99.99997%	99.999%/99.998%
东营	3.6/3.7	100%/100%	99.989%/99.994%	99.94%/99.85%
武汉	3.0/4.4	100%/100%	99.99998%/99.99998%	99.99993%/99.99995%

对上述 13 个监测站的定位精度取平均值可获得全国范围内 BDS 和 GPS 的定位精度的近似结果, 经统计, BDS 在 95% 概率下的水平定位精度为 5.0 米, GPS 在 95% 概率下的水平定位精度为 3.8 米; BDS 在 95% 概率下的垂直定位误差为 8.8 米, GPS 在 95% 概率下的垂直定位误差为 5.4 米。

本报告统计监测站监测天数共计 1645 天, 依据完好性评估方法, 观测周期内 BDS 和 GPS 的最大水平定位误差远远小于 HAL, 均没有出现定位精度超限的情况。所以, BDS 和 GPS 的完好性指标评估为 100%, 均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

本报告统计监测站监测天数共计 1645 天, 其中 BDS 出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件次数为 12047 次, GPS 出现持续 10s 以上的 RAIM 不可用事件次数为 754 次。依据连续性评估方法, BDS 的连续性指标评估为 99.99%, GPS 的连续性指标评估为 99.9994%, 均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

本报告统计监测站监测天数共计 1645 天, 在观测周期内 BDS 和 GPS 均没有出现计划中断, 其中 BDS 可用性损失事件持续时间为 619777 秒, GPS 可用性损失时间持续时间为 22108 秒。依据可用性

评估方法, BDS 的可用性指标评估为 99.6%, GPS 的可用性指标评估为 99.98%, 均满足 NPA 阶段 ICAO 要求。

综上所述分析结果, 可得以下结论:

(1) 由于目前 BDS 是区域服务系统, 受卫星覆盖和几何分布影响, 对于不同区域服务性能还存在差异。在中心服务区域(例如我国的中部、东部和南部地区), BDS 的服务性能和 GPS 处于同一水平; 在相对边缘的服务区域(例如我国的西部以及东北部地区), BDS 的定位服务水平和 GPS 还有一定的差距。随着北斗全球系统的建设, 这种差异会得到改善。

(2) 观测周期内, BDS 的 95%水平定位精度统计值为 5.0m, 以天为单位的 95%水平定位精度最大不超过 17m; 完好性指标评估为 100%, 连续性指标评估为 99.99%, 可用性指标评估为 99.6%, 已经能够满足民航 NPA 阶段的运行要求。