



测绘地理信息科技出版资金资助

CEHUI DILI XINXI KEJI CHUBAN ZIJIN ZIZHU

Theory and Applications of GNSS Integrity Monitoring

秘金钟 著

GNSS完备性监测 理论与应用



测绘出版社

© 秘金钟 2012

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

内容提要

本书系统介绍了适用于 GNSS 及其增强系统的一套 GNSS 完备性监测的理论和 技术体系,在介绍完备性监测定义、历史与发展、国内外现状的基础上,从 GNSS 系统及其增强系统的发展现状和 GNSS 导航定位误差与处理方法出发,将 GNSS 完备性监测分解为三级体系(系统级、监测站级、用户站级),利用提出的 GNSS 完备性监测体系中的各级各层次的关键技术,进行了 GNSS 完备性数据处理、数据分析和具体应用,最后提出 GNSS 完备性监测的进一步发展目标。本书希望通过系统介绍 GNSS 完备性监测,使读者对 GNSS 完备性监测有一个较为全面的了解。正文后还汇集列出了本书引用的缩写词,作为附录。

本书可作为导航领域相关专业科研人员、工程技术人员的参考书,也可作为高等院校相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

GNSS 完备性监测理论与应用 / 秘金钟著. —北京:测绘出版社, 2012. 7

ISBN 978-7-5030-2639-3

I. ①G… II. ①秘… III. ①卫星导航—全球定位系统—监测—研究 IV. ①TN967.1②P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 156535 号

责任编辑	田 力	封面设计	李 伟	责任校对	董玉珍
出版发行	测绘出版社	电 话	010—83060872(发行部)		
地 址	北京市西城区三里河路 50 号		010—68531609(门市部)		
邮政编码	100045		010—68531160(编辑部)		
电子信箱	smp@sinomaps.com	网 址	www.chinasmp.com		
印 刷	北京世汉凌云印刷有限公司	经 销	新华书店		
成品规格	169mm×239mm				
印 张	13.25	字 数	255 千字		
版 次	2012 年 7 月第 1 版	印 次	2012 年 7 月第 1 次印刷		
印 数	0001—1000	定 价	32.00 元		
书 号	ISBN 978-7-5030-2639-3/P·600				
本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。					

前 言

随着 GPS 导航系统的技术升级以及 GLONASS、Galileo 北斗导航系统全面开展建设,全球卫星导航系统(GNSS)呈现多极化发展,四大导航系统的发展趋势不可逆转。描述 GNSS 系统功能的指标包含精度、连续性、有效性和完备性。完备性是指导航系统发生任何故障或者误差超限,无法用于导航和定位时,系统向用户及时发出报警的能力。当前 GNSS 卫星导航用户定位精度显著提高,特别是一些新技术的出现,如精密单点定位 PPP 技术、网络 RTK 技术,达到了厘米量级甚至优于 1 厘米的精度,已基本满足绝大部分用户对精度的需求。与之相比,决定用户安全性能的导航系统完备性问题变得更加突出。目前民航系统将卫星导航作为飞机导航的辅助手段而不是单一的主控手段,就是从用户安全的角度考虑,导航系统的完备性要有着比精度更加重要的地位。

本书从 GNSS 系统定义和结构出发,特别是将 GNSS 完备性概念分别作用于 GNSS 结构中的全球设施、区域设施、外部设施以及用户部分等,按照 GNSS 信号从发射、传播到接收的整个链路,建立了适用于 GNSS 及其增强系统的一套 GNSS 完备性监测的理论和体系,对该技术体系中的若干关键技术进行了系统的研究,并将完备性监测实际应用于我国 GNSS 导航定位,保障用户使用的安全性。

全书共八章。第 1 章为绪论,简要介绍完备性监测定义,完备性监测的历史与发展,对完备性监测的国内外现状进行了较为系统的总结,使读者对 GNSS 完备性监测有一个概要了解;第 2 章为 GNSS 系统及其增强系统,主要介绍当前 GNSS 系统发展现状,包括 GNSS 系统结构,GNSS 增强系统与技术,为完备性监测的展开做好铺垫;第 3 章为 GNSS 导航定位误差与处理方法,由于完备性监测处理的粗差仍来自于 GNSS 误差,所以仍然需要向读者明确说明 GNSS 主要误差及其处理方法,作为完备性监测误差处理准备;第 4 章为 GNSS 完备性监测技术体系,主要介绍根据 GNSS 定义与结构建立的一套完整的 GNSS 完备性监测理论与技术体系,将 GNSS 完备性监测分解为系统级、监测站级与用户站级的完备性监测,同时还介绍了实用的 GNSS 完备性监测的整体流程、指标分析与数学基础等;第 5 章为 GNSS 系统级完备性监测理论与技术,主要对系统级的完备性监测关键技术(如空间信号精度、空间信号监测精度等)、卫星轨道完备性监测、卫星钟差完备性监测、卫星自主完备性监测等进行了阐述;第 6 章为 GNSS 监测站级完备性监测理论与技术,主要对监测站级的完备性监测关键技术(如利用监测站对差分信息进行完备性监测,保障监测站自身安全的监测站自主完备性监测等)进行了阐述;第 7 章为

GNSS 用户站级完备性监测理论与技术,主要讨论用户站级的完备性监测关键技术(如基于相关距离的新型 RAIM 算法与基于聚类分析的新型 RAIM 算法)进行了严格的证明;第 8 章为应用与展望,利用本书提出的 GNSS 完备性监测体系中的各级各层次的关键技术,采用 GPS 实际数据以及 Galileo 仿真数据进行数据处理、数据分析和应用,最后提出 GNSS 完备性监测的进一步发展目标。通过以上八章系统地介绍 GNSS 完备性监测,读者对 GNSS 完备性监测会有一个较为全面的了解。

GNSS 完备性监测是一个庞大的理论技术体系,它不仅对 GNSS 本身进行完备性监测,还要对 GNSS 增强系统如 LAAS、WAAS、网络 RTK 系统等进行完备性监测,同时还对未来实际应用的多模 GNSS 精密单点定位 PPP 进行完备性监测。本书在 GNSS 系统级完备性监测中主要针对 GPS 以及 Galileo,但其方法对北斗卫星导航系统同样适用,在 GNSS 监测站级与用户站级的完备性监测中主要针对 GPS 网络 RTK 系统以及 GPS PPP 定位,但其同样适用于 LAAS 以及 WAAS,仅仅在定位误差方程、差分信息以及完备性信息播发介质上略有不同。

作者编写本书的目的,主要在于解决全球卫星导航定位技术的迅猛发展而带来的完备性监测理论、方法、技术和应用的困扰,使广大读者对 GNSS 完备性监测有一个更全面的认识,而不仅仅对 GNSS 完备性监测仍停留在概念上。由于作者水平有限,书中错误与不当之处在所难免,诚恳欢迎读者批评指正。本书由作者在其博士论文的基础上修改、充实、完善而成,在此感谢两位恩师刘经南院士和施闯教授的教诲和培养。在本书的编写过程中,中国测绘科学研究院谷守周、方书山、李玮在资料的收集、翻译和整理等方面作了很多卓有成效的工作,在此表示诚挚感谢。

目 录

第 1 章 绪 论	1
§ 1.1 完备性监测定义	1
§ 1.2 完备性监测的历史与发展	2
§ 1.3 本书的研究内容	9
第 2 章 GNSS 及其增强系统	11
§ 2.1 GNSS	11
§ 2.2 GNSS 增强系统	33
第 3 章 GNSS 导航定位误差与处理方法	49
§ 3.1 与卫星有关的误差及其处理方法	49
§ 3.2 与卫星信号传播有关的误差及其处理方法	61
§ 3.3 与接收设备有关的误差及其处理方法	71
§ 3.4 其他误差	73
第 4 章 GNSS 完备性监测技术体系	75
§ 4.1 完备性监测技术体系	75
§ 4.2 完备性监测整体流程	77
§ 4.3 完备性监测指标分析	79
§ 4.4 完备性监测数学基础	80
第 5 章 GNSS 系统级完备性监测理论与技术	87
§ 5.1 SISA	87
§ 5.2 SISMA	93
§ 5.3 卫星轨道完备性监测	95
§ 5.4 卫星钟差完备性监测	99
§ 5.5 卫星自主完备性监测	101

第 6 章 GNSS 监测站级完备性监测理论与技术	103
§ 6.1 SNR 质量分析	103
§ 6.2 监测站完备性监测	108
§ 6.3 监测站自主完备性监测	112
§ 6.4 示警耗时	115
第 7 章 GNSS 用户站级完备性监测理论与技术	119
§ 7.1 RAIM 算法的多元统计分析基础	119
§ 7.2 RAIM 算法简介	125
§ 7.3 基于多元统计分析的 QR 奇偶检效法	129
§ 7.4 用户保护水平 XPL	138
第 8 章 应用与展望	146
§ 8.1 GNSS 系统级完备性监测数据处理与应用	146
§ 8.2 GNSS 监测站级完备性监测数据处理与应用	164
§ 8.3 GNSS 用户站级完备性监测数据处理与应用	172
§ 8.4 结束语与展望	188
参考文献	190
附 录 本书引用的缩写词	201

Contents

Chapter 1	Introduction	1
§ 1.1	Definition of integrity monitoring	1
§ 1.2	History and development of integrity monitoring	2
§ 1.3	Research detail	9
Chapter 2	GNSS and augmentation systems	11
§ 2.1	GNSS	11
§ 2.2	GNSS augmentation systems	33
Chapter 3	GNSS errors and treatment method	49
§ 3.1	Satellite biases	49
§ 3.2	Satellite signal propagation effects	61
§ 3.3	Receiver errors	71
§ 3.4	Other errors	73
Chapter 4	Technology system of GNSS integrity monitoring	75
§ 4.1	Technology system of integrity monitoring	75
§ 4.2	Integral processing of integrity monitoring	77
§ 4.3	Index analysis of integrity monitoring	79
§ 4.4	Mathematical basis of integrity monitoring	80
Chapter 5	Theory and technology of GNSS system-level integrity monitoring	87
§ 5.1	SISA	87
§ 5.2	SISMA	93
§ 5.3	Integrity monitoring of satellite orbit	95
§ 5.4	Integrity monitoring of satellite clock error	99
§ 5.5	Satellite autonomous integrity monitoring	101

Chapter 6	Theory and technology of GNSS monitor station-level integrity monitoring	103
§ 6.1	SNR quality analysis	103
§ 6.2	Integrity monitoring of monitoring station	108
§ 6.3	Autonomous integrity monitoring of monitoring stations	112
§ 6.4	TTA	115
Chapter 7	Theory and technology of GNSS user-level integrity monitoring	119
§ 7.1	Multivariate statistical analysis basis of RAIM algorithm	119
§ 7.2	Introduction of RAIM algorithm	125
§ 7.3	QR parity method	129
§ 7.4	XPL	138
Chapter 8	Application and prospect	146
§ 8.1	Application of GNSS system-level integrity monitoring	146
§ 8.2	Application of GNSS monitoring station-level integrity monitoring	164
§ 8.3	Application of GNSS user-level integrity monitoring	172
§ 8.4	Conclusion and prospect	188
References		190
Appendix	Abbreviations of this book	201

第1章 绪 论

随着全球定位系统(global positioning system, GPS)的技术升级以及 GLONASS、Galileo、北斗导航系统全面开展建设,卫星导航用户定位精度显著提高,特别是一些新技术的出现,如精密单点定位(precise point positioning, PPP)技术、网络 RTK(network real time kinematic, NRTK)技术,达到了厘米量级甚至优于 1 厘米的精度,已基本满足绝大部分用户对精度的需求,与之相比,决定用户安全性能的导航系统完备性问题变得更加突出。目前民航系统将卫星导航作为飞机导航的辅助手段而不是单一的主控手段,现从用户安全的角度考虑,导航系统的完备性要有着比精度更加重要的地位。

§ 1.1 完备性监测定义

1.1.1 完备性监测经典定义

完备性是指导航系统发生任何故障或者误差超限,无法用于导航和定位时,系统向用户及时发出报警的能力。GNSS(global navigation satellite system)的精度可以根据用户要求,采用不同的算法实现不同的精度控制,但系统的完备性信息无论在何时何地都是必需的,它是用户对系统所提供信息的可信程度的一种度量,包括系统给用户及时有效的警告信息的能力,是保证用户安全性的重要参数。

通常,完备性包括四个参数,分别是报警限(alarm limit, AL)、示警耗时(time to alarm, TTA)、示警能力、完备性风险(integrity risk, IR 又称失误几率)。

AL:当用户定位误差超过系统规定的某一限值,系统向用户发出警报,这一限值称为系统的报警限值。报警限值一般根据导航系统或者增强系统的精度而定,如广域增强系统(wide area augmentation system, WAAS)定为 1 m,网络 RTK 系统为 0.2 m。

TTA:当用户定位误差超过报警限值,系统向用户发出警报的时刻与系统向用户显示这一警报时刻的时间差,称为示警耗时。示警耗时一般应小于 2 s,最大不超过 6 s。

示警能力:指在系统覆盖区域内,系统不能向用户发出警报的面积百分比,在增强系统基准站作用范围内的示警能力应小于 0.5%。

IR:在示警能力以内的用户定位误差超过报警限值,且超过 TTA,而系统没有

向用户发出警报的现象的几率,称为完备性风险。WAAS 规定其系统的完备性风险应小于 1.61×10^{-6} /天。

1.1.2 Integrity 名词解释

Integrity 是一个外来词,作为导航系统的重要组成部分,这个概念伴随 GPS 广域增强 WAAS 进入中国。由于 GPS 在各行各业都得到广泛应用,但对于 Integrity 的理解与翻译也存在各种差异,就目前所见的各种释义来看,Integrity 至少包含完备性、完好性、完整性、完善性等四种解释。因此,有必要按照一定的规则,对 Integrity 这个词进行合理的解释。

对于完备的解释有几个含义,主要描述为齐全、应有尽有、完成。在导航系统中,侧重于描述导航系统在精度和可靠性的“无缝”表示。

对于完好的解释有几个含义,主要描述为完美,完整,没有残缺、损坏,好的,完成或达到完善的地步。侧重于描述导航系统的好坏,精度的表示。

对于完整的解释有几个含义,主要描述为没有残缺、损坏,含义在完好之内,可被完好代替。

对于完善的解释有几个含义,主要描述为完好,无缺损,使趋于完美,可被完好代替。

以上各项解释来自于对各个中文含义的描述,尤其要注意侧重于在导航系统的具体含义。在以上四个名词解释中,可以看到,基本上可以认为“完整”和“完善”可以归属于“完好”,而“完好”在导航系统的含义上还无法像“完备”那样完全表达“无缝”导航的意义,故此最终认定 Integrity 的名词解释为“完备性”。

1.1.3 完备性监测的实质

完备性监测的理论基础是粗差的探测和分离理论。它需要回答两个问题:①是否存在粗差;②若存在粗差,哪一颗卫星的观测值中含有粗差。要求系统必须能够识别出哪颗卫星有粗差,并把其从定位结果中删除掉,以保证运动载体(汽车、轮船、飞机等)能够在未受污染的卫星定位解下行驶。显而易见,判断哪颗卫星有粗差要比进行粗差探测困难得多,它要求尽可能多地应用多余观测值。

§ 1.2 完备性监测的历史与发展

现有导航系统包括 GPS、GLONASS、Galileo 以及中国的北斗系统,统称为全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS),多个导航系统的出现,为完备性监测的发展提供了良好的契机。GPS 系统设计本身没有考虑完备性,而是在其相应增强系统上加入了完备性的概念并开展实施。在欧洲发展的

Galileo 系统中,完备性已经作为一个明确的概念体现出来。故此,及时开展对 GNSS 卫星导航完备性监测研究既可以满足现实需求,又具有重大的科学意义。

完备性监测方法与技术发展,主要包括三方面的内容:一是 GPS 增强系统的完备性监测,二是 Galileo 系统完备性监测,三是完备性算法。

1.2.1 GPS 增强系统完备性监测

GPS 增强系统完备性监测方法与技术,目前主要包括三种形式。第一种是美国的 WAAS(Curtis,2005;Deane,2003;Gunter,1999;Wu J. T,2002)完备性监测方法,它基于星基增强系统(satellite based augmentation system,SBAS),整个系统以广域差分 GPS(wide area differential GPS, WADGPS)作为完备性监测技术的基础,地面布设参考站、播发站、主控站的同时,在地面设置监测站,通过四种手段共同实现完备性监测。这四种手段分别是:参考站在数据采集、数据滤波平滑过程中进行单站数据检核;主控站对各参考站数据处理过程中,对数据质量进行分析,剔除不合格的数据;在 WAAS 中适当分布若干监测站,监测站用于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,信息质量不好时,发出停止使用的警告信息;差分 GPS(differential GPS, DGPS)用户通过用户自主式完备性监测(receiver autonomous integrity monitoring, RAIM)方法进行质量检校,评价其实时 DGPS 定位的精度。从而实现系统整体对信号的完备性监测。欧洲静地星导航重叠服务(European geostationary navigation overlay service, EGNOS)(Derambure et al,1999;Mohamed,2000;Benoit,2001;Ventura,2002;陈刘成,2004),日本的多功能卫星增强系统(multi-functional satellite augmentation system, MSAS)(Atsushi,1999;Mami,2001)星基增强系统以及中国学者提出的分布式 WADGPS(刘经南等,1999)都是采用类似的完备性监测手段。

第二种 GPS 增强系统完备性监测是精密进近局域增强系统(local area augmentation system, LAAS)完备性监测方法(Alan,2000;Juan,2002;Irfan,2003;Xie,2004;Charles,2005),它基于地面伪卫星增强系统(ground based augmentation system, GBAS)或者是基于局域差分 GPS(local area differential GPS, LADGPS)系统的完备性监测,在局域差分地面设施的基础上,地面设置布设合理的伪卫星,改善 GPS 卫星的几何配置,从而明显提高用户定位精度和可靠性。目前的Ⅱ类、Ⅲ类精密进近的导航系统都采用这种工作模式。

第三种 GPS 增强系统完备性监测是利用接收机内部的卫星观测冗余信息,或载体上其他辅助信息如高度计、惯性导航系统(inertial navigation system, INS)等,来实现导航卫星故障的识别判断和剔除,此方法即是 RAIM(Parkinson et al,1988,1996;Gerald,1992;James,1995;Jong et al,2000),该方法目前在一些 DGPS 接收机中已经固化到硬件。

美国的 WAAS 于 2001 年初步建成,其相应的完备性监测系统也同步建成,欧洲的 EGNOS 和日本的 MSAS 目前仍然在建设试用中。美国科技人员于 20 世纪 80 年代末和 90 年代初,参照 INS 完备性监测研究经验,开始进行 GPS 导航系统完备性理论研究和试验。在 90 年代中期,开始把完备性监测技术应用于 LADGPS 和 WADGPS,进行了多次科学研究和试验。在 LADGPS 方面,获得了一系列的成功经验,并开始应用于实际的工程,如美国联邦航空管理局(federal aviation administration, FAA)的 E 系统,建成了 Cat III b 的自动着陆系统(auto landing system, ALS),应用于飞机进场(Ronald, 1995; James, 2000);在 WADGPS 方面,美国运输部利用双卫星系统 GPS/GLONASS(Gerald, 1997)和地球同步卫星的 WAAS 进行了国内的 Cat I 系统试验(Phuong, 2005),获得成功;Fugro 集团已推出可商业化服务的 Ominstar DGPS 服务系统,在亚太、北美、拉美和欧非等地区各建立了几十个参考站,在各个地区分别提供差分 GPS 服务,通过卫星发播差分改正信息,通过地区控制站计算差分改正,并进行各参考站完备性监测。

在中华人民共和国国防科学技术工业委员会和科学技术部的支持下,国家测绘局(现为国家测绘地理信息局)的科研人员于 1996~1997 年根据我国当时的国情,即受当时我国财力和通信部门带宽能力的限制,不能实现 WADGPS 各参考站之间要有高速实时准确的数据通信传输要求,因而我国还不能建立通常意义下的 WADGPS,故此提出一种“分布式 WADGPS”的技术体系,提高差分定位的精度,降低通常 WADGPS 对通信传输的技术要求,利用当时中国的通信技术水平,也可以建立精度不逊于通常 WADGPS 的广域差分系统,使之符合中国的实际情况。1999~2000 年,武汉大学与中国测绘科学研究院联合进行了分布式 WADGPS 试验以及后处理的完备性监测试验,取得了一定的成果。军方和民航系统也进行了卫星导航增强系统以及局域差分系统的建设和应用。科技部 2007 年启动了“863”重点项目“广域实时精密定位技术与示范系统”,旨在广域差分和 PPP 技术的基础上,利用我国现有的广域和城域卫星导航系统资源与基础设施,加强数据采集、播发技术以及运营服务的研究,突破实时高精度数据处理、精密定位终端集成等关键技术,集成卫星广播、地面广播、Internet 等技术,实现我国陆地、海洋和空中优于 1 m 定位精度的卫星导航增强示范服务,建立覆盖中国区域、实时定位精度优于 1 m 的示范系统,实现在典型行业的应用示范。

在 GNSS 系统完备性方面,我国学者也有所建树,如卫星定位总站的陈金平博士结合军方卫星导航增强系统在 2001 年就完成了有关增强 GPS 完备性 RAIM、WAAS 完备性监测和 LAAS 完备性监测等的系统设计、算法实现、卫星几何性能保证、可用性问题。中国人民解放军信息工程大学牛飞结合军方卫星导航 LAAS 完备性监测技术以及分米级广域精密定位服务系统项目,于 2008 年在

空基增强系统和地基增强系统(ground-based augmentation system, GBAS)中对卫星导航系统完备性增强展开研究,归纳总结了卫星导航系统完备性保障的理论与方法,研究了分米级空基增强系统的关键技术,研究分析了 WAAS 的电文系统等;同时依据中国伽利略测试环境关键技术项目支持,对欧洲 Galileo 卫星导航系统进行了系统仿真,分析了 Galileo 系统的性能和完备性保障方法;哈尔滨工程大学的甘兴利于 2008 年针对 GPS LAAS 的完备性技术进行研究,通过一些监测手段和算法的改进,以有效降低完善性监测存在的风险,特别提出了一些新的 RAIM 算法。中国测绘科学研究院秘金钟在科技部“863”和国家测绘局的支持下于 2000 年完成了广域差分系统的完备性监测研究,提出了 WADGPS 监测站完备性算法以及利用 Parity 算法实现多个粗差探测和分离,并进而于 2010 年科技部导航“863”与国家测绘局国家基础测绘项目的支持下,构建了 GNSS 完备性监测的理论技术体系,分别在系统级、监测站级以及用户站级对完备性进行了全面的分析,并以国际 GNSS 地球动力学服务(International GNSS Service, IGS)提供的数据,中国地壳运动观测网络数据、河北省连续运行参考站(continuously operating reference stations, CORS)网络数据以及仿真的 Galileo 数据进行了大量的数据处理和试验验证,重点研究 Galileo 系统提出的全球完备性监测和局域完备性监测的概念,并使用中国区域数据推动外部区域完备性系统(external regional integrity system, ERIS)计划在国内的应用;中国测绘科学研究院郭英与赵春梅对有关 Galileo 系统完备性指标进行了研究;北京大学卢德兼于 2009 年针对 GNSS RAIM 算法进行了阐述和研究。

在有关北斗及其技术和组合系统,国防科学技术大学王建瑜针对 GPS、北斗双模应用系统中的准确性与完备性技术进行了研究,西北工业大学的李飞研究了 GPS 接收机自主完备性监视算法研究及仿真,北京卫星信息工程研究所万祥研究了北斗高动态双频相对定位技术以及动态北斗双频载波相位差分工程化方法,中国电子科技集团公司 54 所刘雅娟研究了北斗局域差分定位技术,空军工程大学卢虎研究了北斗用户机自主完备性监测,武汉理工大学吴建华研究了差分技术在北斗导航定位系统中的应用,西安理工大学姜萍研究了基于北斗差分信息的 GPS 广域差分定位技术,南京航空航天大学刘建业研究了基于伪距差分的三星无源北斗/SINS 组合导航系统,空军工程大学杨春燕研究了基于中波导航机的“北斗二”差分数据传输研究,海军航空工程学院林雪原进行了双星定位系统的综合误差分析与仿真研究。

随着网络 RTK 的兴起,相应的完备性监测也开始出现,但还没有成体系的研究和试验。目前,我国已开始制定“北斗”系统陆基增强方案和完备性监测方案计划。

1.2.2 Galileo 完备性监测

Galileo 计划目前正在实施, Galileo 设计了与 GPS 不同的系统结构(Dellago, 2003)。在服务方面与 GPS 不同的是, Galileo 将各种服务分为了不同种类, 包括公开服务、人身安全服务、商务服务、公用管制服务和搜救服务等。公开服务为全球广大用户免费提供定位、导航和定时服务, 能够达到优于 GPS 的标准服务水平。人身安全服务依据航空、航海和铁路运输的安全要求, 为该三大领域的广大用户, 提供完全可靠的人身安全保障, 具有全球搜寻援救功能。Galileo 系统还向遇险用户发出援救安排通报, 以便遇险用户等待援救。商务服务以发送加密的相关导航数据的方式, 为导航和定时的特需用户, 提供优于公开服务的定位、导航和定时服务。公用管制服务为欧洲及其同盟国家提供国家安全保障服务, 它使用一种特定而被管制的导航定位信号, 实施公用管制服务(过静珺等, 2002; 党亚民等, 2007)。

由于完备性指标要比精度指标更加重要, 故此 Galileo 系统在设计之初, 与美国的 GPS 相比, 其系统的一大亮点就是完备性功能的提出, 作为保障用户安全的重要特征之一。故此在各种服务中, Galileo 特别强调完备性监测概念及其系统(Wolfgang et al, 2001, 2002; Cedric, 2003; Veit, 2004)。

Galileo 卫星在空间的位置和数量上更为合理, 在全球任何地方都可以接收不少于 10 颗的卫星; 卫星发射的信号数目增多, 有 6 种可用信号(L1F、L1P、E6C、E6P、E5A 和 E5B), 其中 3 种(L1F、E5A、E5B)全天候免费服务, 增强了信号的抗干扰能力, 提高了定位精度, 尤其是提高了信号的可靠性; 选用了更加先进的卫星钟, 其工作寿命延长, 稳定性更好(Merino et al, 2004; 陈智等, 2004)。

在 Galileo 系统的完备性指标设计里, 其与 GPS 增强系统传统意义上的完备性有很大不同。传统完备性监测, 例如 WAAS, 主要针对增强系统的差分信号进行实时监测, 虽然同时包括对卫星状况的监测, 但不作为重点出现。而 Galileo 系统的完备性监测特别重视对卫星状况的监测, 为了满足不同用户的时间和精度需求, Galileo 系统从信号本源出发, 设计了四个主要指标: 空间信号精度(signal-in-space accuracy, SISA)指标; 空间信号监测精度(signal-in-space monitoring accuracy, SISMA)指标, 以及完备性标志(integrity flag, IF)指标和 XPL(horizontal/vertical protection level)指标等。Galileo 系统按照既定的模型预报空间信号误差(signal in space error, SISE)与 SISA 参数(Carlos, 2002; Mozo et al, 2001), 对其进行实时监测, 进而发布监测的质量参数 SISMA(Helmut, 2003)。Galileo 的完备性监测从概念上颠覆了 GPS 的旧有参数用户差分距离误差(user differential range error, UDRE)。

Galileo 系统在全球设置 30 个 Galileo 遥测站 GSS(Galileo sensor stations,

GSS的功能类似于GPS的实时IGS CORS站点)(Helmut, 2005; Giraud, 2005; Carlos, 2008),使之布设的位置更加合理,密度均匀。为了照顾各个参与国家的利益,创造性地提出了全球完备性监测(Helmut, 2003)和局域完备性监测(Charles, 2003)的概念,建立了Galileo完备性测试基地(Marco et al, 2002; Mathias, 2004; Wolfgang et al, 2004; Pere, 2004)。但由于这些GSS站的空间分布的原因,还不足以对全球各个地区实现完全的完备性监测,故此欧洲启动了ERIS (external regional integrity system)计划,即在欧洲区域外建立相应的完备性监测系统,目前正在实施诸如澳大利亚ERIS计划(Aiden, 2007)和南美洲ERIS计划等,中国也正在积极推动ERIS计划在国内的应用。

1.2.3 完备性算法

完备性算法是完备性监测的核心,主要包括三部分内容:第一部分是有关GPS增强系统的完备性算法,第二部分是有关Galileo的完备性算法,第三部分是与完备性算法密切相关的粗差探测和可靠性理论及其算法。

在GPS增强系统完备性算法方面,许多学者进行了有益的探讨。Brown等(1986)提出定位解间隔最大法, Parkinson等(1988)和Sturza(1988)利用伪距多余观测实现GPS自动完备性监测,提出最小二乘残差法, Parkinson等(1988)提出了Parity算法,这三种算法统称快照法, Brown(1992)证明了三种快照算法的等价性。Chin和Kraemer等(1992)利用最坏的几何图形试图剔除坏的卫星组合实现RAIM。1995年之后,有关算法的研究越来越多,如Walter(1995)提出的加权平均RAIM算法, Langley(1999)提出的卡尔曼滤波法,特别是WAAS MOPS标准的提出,推荐了一系列完备性监测算法。我国学者在完备性算法方面也有建树,如秘金钟(2000)提出的WADGPS监测站完备性算法以及利用Parity算法实现多个粗差探测和分离。

在Galileo完备性算法方面,目前开展的研究包括陈金平(2001)和Peter(2005)通过对对流层延迟、电离层延迟改正实现UDRE的估计; Schempp(2001, 2002)、Comby等(2003)、Juan(2005)和Todd(2007)开展了用户保护水平XPL (user protection level)的研究; Wolfgang等(2001, 2002)、郭英等(2007)完成了Galileo系统完备性指标SISE的估计; Mozo等(2001)、Carlos(2002)和Su(2008)研究了Galileo系统完备性指标SISA的定义和估计方法, Werner(2001)、Blomenhofer等(2005)和Carlos(2008)讨论了Galileo系统完备性指标SISMA的定义和估计; Feng Shaojun等(2005)和郭英等(2007)研讨了SISA概念使用的用户最坏位置(worst user location, WUL)的估计; Blomenhofer等(2005)进行了IF估计研究; Cristina(2007)进行了Galileo/EGNOS组合完备性研究; Verhagen(2002)进行了GPS/Galileo组合定位研究, Young等(2004)和Hewitson(2006)进

行了 GNSS RAIM 的研究。

在完备性算法方面,特别是用户自主完备性监测算法,归根到底是探测和识别粗差的算法,即以粗差探测和可靠性理论为基础的算法。粗差探测及可靠性理论的进展中,可以从以下三个方面进行描述,包括粗差检验理论与方法、多维粗差探测方法与相关观测的粗差探测。与完备性算法相关的粗差探测和可靠性算法主要是多维粗差探测以及相关观测的粗差探测。

在粗差检验理论与方法方面,许多学者探索用各种数学方法来解决粗差的检验和定位,主要涉及陶本藻(1990)、欧吉坤(1994)和王新洲(1994)提出的基于均值漂移模型的一维和多维的粗差探测,沈云中等(1994)研究了虚拟误差方程及其在粗差探测中的应用,王福源等(1996)与章捷(2002)分别做了线性规划在粗差检测方面的应用以及线性回归中误差的特征值判别法及其应用,胡宏昌等(2002)利用小波分析进行粗差定位,冯小磊(2006)提出了利用观测值序列的粗差探测方法,归庆明等(2006,2007)提出了判断粗差的 Bayes 法——后验概率法以及改进的贝叶斯估计粗差探测法,李国重等(2006)提出了基于岭估计的粗差探测方法,吴国庆等(2008)进行了基于改进 MCD 的粗差判别方法及性能分析,杨晓云等(2009)与黄世斌等(2009)分别提出基于主成分分析法的 DEM 粗差定位和误差分布对 PCA 粗差探测算法的影响,景继等(2009)研究了数学形态滤波在大坝安全监控数据粗差检测中的应用,徐天河等(2009)研究了移动开窗检验法及其在 GOCE 数据粗差探测中的应用。在有关动态定位的粗差探测方面,主要包括王庆等(1997)提出的动态最优滤波系统的粗差探测,王国富等(2004)提出含有粗差观测值的自适应滤波等。宋迎春等(2006,2008)提出的动态定位解算中测量粗差的探测与修复以及 Kalman 滤波中测量粗差的探测与修复等。

在多维粗差探测方法方面,理论方法和数学模型众多,主要涉及王新洲(1995)提出的基于逐个搜索法的 GPS 基线向量网粗差定位方法,於宗涛和李明峰(1996)提出的多维粗差的同时定位与定值(LEGE)法,岑敏仪等(2003,2005)提出的多维粗差同时定位与定值的验前方法以及基于判断矩阵的观测量粗差发现和定位相关性分析方法,欧吉坤(1999~2008)提出并发展的基于拟稳平差思想的“拟准观测的真误差范数极小”的“粗差拟准检定法 QUAD”方法,归庆明等(2006)提出的基于方差膨胀模型的多个粗差的探测方法,刘利等(2008)使用条件方程式直接探测多维粗差的方法,张同刚等(2009)提出了 LZD 模型多维粗差发现和定位能力的分析方法。

在相关观测的粗差探测方面,相关文献不是很多,施闯(1998)提出了相关分析法,将残差向量表示成几个观测误差分量和可靠性矩阵的列向量的线性组合,建立每一分量与设计矩阵和观测量的权矩阵的关系,可进行相关观测的多维粗差探测,欧吉坤(1999)研究了基于可靠性度量的相关观测粗差检测,陶本藻(2004)利用相

关系数探测粗差,应用偏相关系数区分多维粗差,用复相关系数对多维粗差总体显著性进行检验并定位。

区域性 GPS 动态定位及其完备性监测主要依赖基准站与用户站的共视卫星的多少即多余观测量的多少,采用最小二乘法进行判断和识别。而当两站距离较远时,共视卫星不多即多余观测量不多,从而导致采用最小二乘法的统计基础(最小二乘法的统计基础在于大样本的正态分布)发生动摇。而 GNSS 卫星导航系统的共视卫星大大增加,便于进行粗差卫星的判断和识别,因此,GNSS 多模卫星导航系统也进一步完善了完备性监测的数学基础,具有重大科学意义。

§ 1.3 本书的研究内容

由完备性监测方法与技术发展的演进历程,GPS 在设计、研发、建设系统本身时主要考虑精度、覆盖度、连续性等指标,没有考虑完备性的问题,系统设计上存在的缺陷导致系统还不能满足高安全性能的需求。为了保证系统的完整,当发展 GPS 增强系统时,在 LADGPS 和 WADGPS 建设上加入了完备性的概念并开展实施。

欧洲发展的 Galileo 系统作为后发系统,借鉴了美国 GPS 系统的一些经验,特别将卫星定位系统完备性作为一个明确的概念重点推出,创造一些系统完备性监测的指标、概念、定义以及新的提法,提出了全球完备性系统和局域完备性系统。Galileo 完备性伴随 Galileo 系统的建设而不断完善。

中国发展的北斗系统目前进入“北斗二代”时期,同样面临完备性监测的问题。

但是到目前为止,导航系统的完备性还无法满足实用需要,且无论是在系统建设、标准规范还是算法研究、用户应用模式等方面,国内外 GNSS 的完备性监测研究还仍然处在进一步深化阶段,没有完全进入实用阶段。

为了解决完备性监测的一系列理论、方法、关键技术、核心算法等问题,本书试图建立完备性监测理论与技术体系,提出较为完善的完备性监测的算法和模型,并力争结合 GPS/Galileo 的数据处理实践,论证技术体系的可行性和科学性。

本书首先分析了 GNSS 系统以及 GNSS 增强系统的主要关键技术,继而从 GNSS 卫星导航系统特点出发,在系统的研究信号发射误差,信号传输误差和信号接收误差的基础上,通过对信号数据的观测和误差分析,来实现不同类型的完备性监测。这些类型包括:GNSS 卫星导航系统级完备性监测;GNSS 卫星导航系统监测站级完备性监测;GNSS 卫星导航系统用户站的完备性监测。

在 GNSS 卫星导航系统级完备性监测方面,从 GNSS 误差分析的角度出发,重点研究卫星轨道误差、卫星钟差。根据卫星轨道积分理论和时间序列分析理论实现卫星轨道完备性监测;利用地面 CORS 网络,实现卫星钟差估计,并对卫星钟