



测绘地理信息科技出版资金资助

CEHUI DILI XINXI KEJI CHUBAN ZIJIN ZIZHU

Error-Estimating Theory of Ionosphere and
Orbit in Satellite Positioning

郭英 高星伟 著

卫星定位中 电离层与轨道的 误差估计理论



测绘出版社

测绘地理信息科技出版资金资助

卫星定位中电离层与轨道的 误差估计理论

Error-Estimating Theory of Ionosphere and
Orbit in Satellite Positioning

郭 英 高星伟 著

测 绘 出 版 社

• 北京 •

© 郭 英 高星伟 2015

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 简 介

本书系统地阐述了电离层的物理性质和估计理论,详细叙述了基于 GPS 观测数据和掩星数据反演电离层的方法、电离层折射指数的影响、中性大气和综合误差对信号的影响、GNSS 完备性参数的基本概念,重点总结了基于 GPS 数据反演电离层空间结构的相关理论、电离层反演地磁北极的方法、利用 Chapman 和球谐函数反演电离层的算法、Galileo 与 WASS/EGNOS 完备性参数的定义和估计方法。

本书是从事电离层理论与应用和 GNSS 完备性研究的师生和研究人员的参考书,对于电离层空间结构和北斗卫星导航系统完备性的研究有很好的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

卫星定位中电离层与轨道的误差估计理论 / 郭英,
高星伟著. —北京:测绘出版社,2015.6

ISBN 978-7-5030-3597-5

I. ①卫… II. ①郭… ②高… III. ①卫星导航—全
球定位系统—应用—电离层探测—误差估计—研究
IV. ①P352.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 299945 号

责任编辑	巩 岩	封面设计	李 伟	责任校对	董玉珍	责任印制	喻 迅
出版发行	测绘出版社			电 话	010—83543956(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—68531363(编辑部)		
电子信箱	smp@sinomaps.com			网 址	www.chinasmp.com		
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司			经 销	新华书店		
成品规格	169mm×239mm						
印 张	11.25			字 数	221 千字		
版 次	2015 年 6 月第 1 版			印 次	2015 年 6 月第 1 次印刷		
印 数	0001—1000			定 价	39.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-3597-5/P·778

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 定位技术在相关领域的广泛应用,电离层物理性质理论和应用的研究得以迅速发展。理论方面从全球性的预测发展到区域性监测,从单层模型的建立发展到空间三维模型的研究。目前,国内外学者们正积极致力于空间模型的建立。GPS 掩星观测数据亦为电离层的空间研究提供了丰富的数据。

利用 GPS 连续运行基准站和掩星技术反演电离层的空间结构、探测和预测电离层活动及其变化规律,可以更好地消除其影响,或者合理地估计电离层异常变化,研究其异常原因;再者,地震预报和预测部门利用地震—电离层耦合性质,根据电离层异常的规律性变化,反演地质结构的变化,进一步预测地震的震源、时间和震级等。

GNSS 高精度导航和定位除了需要准确估计大气层对信号的影响外,还需要正确估计卫星正常的工作状态和用户位置等信息,即 GNSS 完备性。GNSS 完备性包括地面监控站部分、卫星信号及轨道部分、空间大气部分和地面定位部分,不同的卫星导航系统,其完备性参数描述与方法有所不同。目前,尚未形成一套完整的、系统的完备性理论。

本书结合当前电离层与 GNSS 完备性研究和应用的需求,分析了其国内外发展现状,深入研究了电离层相关估计理论和实际应用,完善了 GNSS 完备性理论和方法。全书共分为 10 章:第 1 章为绪论,系统叙述了电离层探测技术与理论模型的发展现状,总结了 GNSS 完备性概念与理论的研究现状;第 2 章介绍了电离层的物理现象、空间分布规律、异常性变化,总结了地震与电离层之间的耦合性;第 3 章介绍了电离层对 GPS 无线电信号的折射指数和电离层的估计、探测和预报理论;第 4 章剖析了电离层折射指数的具体表达形式及其不同阶项对 GPS 观测数据的不同线性组合的影响;第 5 章研究了 Chapman 函数和球谐函数联合建立电离层层析模型的过程,并通过数据进行了验证;第 6 章根据电离层与地磁的关系研究利用克罗布歇(Klobuchar)模型反演了地磁北极的算法与可行性分析,并进行了数据验证;第 7 章分析了中性大气延迟的几种模型估计的精度、网络 RTK 定位中综合误差的影响,以及北斗卫星导航系统和 GPS 联合定位情况;第 8 章介绍了 Galileo 和 WAAS/EGNOS 系统完备性参数空间信号误差与用户保护水平的基本概念;第 9 章详细叙述了 Galileo 系统中空间信号误差和用户保护水平的完备性监测机理、完备性风险的概念和概率统计算法;第 10 章介绍了空间信号误差的变化规律和预报方法,叙述了最差用户位置的估计方法。

本书的研究和撰写,得到了国家测绘产品质量检验测试中心程鹏飞研究员、山东科技大学海洋测绘研究院的卢秀山教授和刘国林教授的指导和支持,在此深表感谢;感谢山东科技大学科研创新团队项目(空间大地测量)中各位研究人员的大力支持和资助;感谢本书中引文的作者。

由于作者水平有限,时间仓促,书中难免存在一些缺陷或不妥之处,敬请读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪 论	1
§ 1.1 引 言	1
§ 1.2 电离层研究现状与发展	2
§ 1.3 GNSS 及其完备性理论	5
第 2 章 电离层物理特性及其影响	10
§ 2.1 电离层的基本概况	10
§ 2.2 电离层的时空变化特征	12
§ 2.3 电离层异常现象	13
§ 2.4 地震与电离层耦合现象	16
第 3 章 电离层探测理论与分析	22
§ 3.1 电离层折射指数及其对 GPS 信号的影响	22
§ 3.2 基于 GPS 的电离层估计理论	25
§ 3.3 基于掩星电离层探测理论	29
§ 3.4 电离层短期预报理论	34
第 4 章 电离层折射高阶项模型的应用	37
§ 4.1 电离层单层模型中穿刺点位置分析	37
§ 4.2 基于 GPS 连续运行基准站的电离层穿刺点的密度分析	39
§ 4.3 电离层延迟高精度估计的数学模型	46
§ 4.4 不同线性组合的残差分析	51
第 5 章 利用 GPS 连续运行基准站及掩星反演电离层	56
§ 5.1 连续运行基准站 2000 国家大地坐标系的估计	56
§ 5.2 基于空间格网化的球谐反演方法	63
§ 5.3 基于 Chapman 模型和球谐函数建立电离层反演模型	69
§ 5.4 利用 GPS 掩星 TEC 反演三维电离层	78

第 6 章 基于 GPS 电离层模型估计地磁北极	83
§ 6.1 地磁北极与地理位置之间关系	83
§ 6.2 利用 Klobuchar 模型估计地磁北极	84
第 7 章 GNSS 的中性大气误差分析与高精度定位	88
§ 7.1 中性大气对 GPS 定位的影响与模型改正分析	88
§ 7.2 连续运行基准站定位技术的误差分析	96
§ 7.3 北斗卫星导航系统与 GPS 融合定位	101
第 8 章 全球导航卫星系统的完备性	110
§ 8.1 基于 Galileo 系统的完备性基本概念	111
§ 8.2 EGNOS/WAAS 的完备性	118
§ 8.3 接收机自动完备性监测	120
第 9 章 Galileo 系统完备性监测	123
§ 9.1 Galileo SISE 的完备性理论	123
§ 9.2 Galileo 用户保护水平的完备性理论	129
§ 9.3 Galileo 的完备性风险	131
第 10 章 Galileo 系统卫星轨道完备性	134
§ 10.1 卫星轨道误差和钟差分析	134
§ 10.2 基于时间序列预测卫星轨道误差	137
§ 10.3 基于卡尔曼滤波预测卫星轨道误差	142
§ 10.4 Galileo 空间信号算法中最大用户位置的有效估计	153
参考文献	162
缩略语	170

Contents

Chapter 1	Introduction	1
§ 1.1	Foreword	1
§ 1.2	Status and Development of Ionospheric Research	2
§ 1.3	GNSS and Its Integrity Theory	5
Chapter 2	Physical Properties and Influenc of Ionosphere	10
§ 2.1	Basic Overview of Ionosphere	10
§ 2.2	Time-Space Variation Characteristics	12
§ 2.3	Abnormal Phenomenon of Ionosphere	13
§ 2.4	Phenomenon of Earthquakes-Ionosphere Coupling	16
Chapter 3	Theory and Analysis of Ionosphere Detecting	22
§ 3.1	Ionospheric Refraction Index and Its Impact on GPS Signals	22
§ 3.2	Ionospheric Estimating Theory Based on GPS	25
§ 3.3	Ionospheric Detecting Theory Based on Occultations	29
§ 3.4	Short-Term Prediction Theory of Ionosphere	34
Chapter 4	The Application of the High-Order-Term Model of Ionospheric Refraction	37
§ 4.1	Pierce Point Location Analysis of Ionospheric Single Model	37
§ 4.2	Density Analysis of Ionospheric Pierce Point Based on GPS CORS	39
§ 4.3	High-Precision Estimating Model of Ionospheric Delay	46
§ 4.4	Residual Analysis after Different Linear Combination	51
Chapter 5	Inversion Ionospheric Space Structure Based on GPS CORS/ Occultation data	56
§ 5.1	Coordinate Estimate of CORS CGCS2000	56
§ 5.2	Spheric Harmonic Inversion Method Based on Space Grid	63
§ 5.3	Establish Ionospheric Inversion Model Based on Spherical Harmonic and Chapman	69

§ 5.4	Inversing Three-Dimension Ionospheric on GPS Occultation TEC	78
Chapter 6	Estimate the Magnetic North Pole Using GPS/TEC Ionospheric Model	83
§ 6.1	Relationship Between Magnetic North Pole and Geographic Location	83
§ 6.2	Estimating Magnetic North Pole Using Klobuchar Model	84
Chapter 7	Neutral-Atmosphere Error Analysis and High Precision Positioning Based on GNSS	88
§ 7.1	Neutral Atmospheric Influence on GPS Positioning and Correction Model	88
§ 7.2	Error Analysis Based on CORS Positioning	96
§ 7.3	BDS and GPS Positioning Based on Time-Space	101
Chapter 8	Integrity of GNSS	110
§ 8.1	Basic Concept of Integrity on Galileo System	111
§ 8.2	Integrity of EGNOS/WAAS	118
§ 8.3	Receiver Automatic Integrity Monitoring	120
Chapter 9	Integrity Monitoring of Galileo System	123
§ 9.1	Integrity Theory of Galileo SISE	123
§ 9.2	Integrity Theory of Galileo XPL	129
§ 9.3	Integrity Risk of Galileo	131
Chapter 10	Satellite Orbit Integrity of Galileo System	134
§ 10.1	Analysis of Satellite Orbit Error and Clock Error	134
§ 10.2	Predicting Satellite Orbit Error Based on Time Series	137
§ 10.3	Predicting Satellite Orbit Error Based on Kalman Filter	142
§ 10.4	Effectively Estimating WUL in Galileo SISE Algorithm	153
References		162
Abbreviations		170

第1章 绪 论

§ 1.1 引 言

电离层是一个不断变化的、复杂的、围绕在地球外面的大气层,它对现代无线电系统和人类的空间活动有着重要影响。20 世纪中期以来,随着现代通信科学、计算机科学、空间科学、海洋科学、地球科学等学科在相关领域的交叉研究和应用的迅速发展,电离层对人类生产与生活的影响,显得更为突出。尤其是在全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)、多里斯系统(Doppler prbitograph and radiopositioning integrated by satellite, DORIS)、甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry, VLBI)及低轨地球卫星(low earth orbit, LEO)等多种基于无线电技术的卫星定位与跟踪系统中,电离层已成为影响定位精度的主要因素,也是相关领域研究的热点。

电离层延迟的影响最先被全球定位系统(Global Positioning System, GPS)实现高精度定位及导航领域关注,人们研究减弱或消除电离层对测量成果影响的方法,确保 GPS 高精度定位和安全导航;在空间物理和大气领域,利用 GPS 连续运行基准站(continuously operating reference station, CORS)或低轨地球卫星反演电离层结构、探测和预测电离层活动及其变化规律,以便更好地消除其影响,合理地估计电离层异常变化,研究其异常原因;在地震研究方面,地震预报和预测部门利用地震—电离层耦合性质,根据电离层异常的规律性变化,反演地质结构的变化,进一步预测地震的震源、时间和震级等。

GNSS 性能指标可用四个参数描述:精度、持续性、有效性和完备性。GNSS 正确的导航和定位除了需要准确估计电离层延迟量外,还需要卫星正常的工作状态和用户位置的正确估计等信息,即 GNSS 完备性。GNSS 完备性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警告信息的能力,是保证用户安全性的重要参数。GNSS 完备性研究包括地面监控站部分、卫星信号及轨道部分、空间大气部分和地面定位部分,不同的卫星导航系统,其完备性参数的描述与方法有所不同。目前,尚未形成一套完整、系统的完备性理论。

§ 1.2 电离层研究现状与发展

整体而言,电离层的研究由实验发展到理论,再由理论指导新的实验,以便不断完善理论。从探测电离层的手段而言,电离层探测由地面探测仪发展到空间探测仪。GPS 定位技术和掩星探测技术发展起来之后,为电离层的探测增添了新的技术,这些探测技术的发展反过来也推动了电离层理论与应用的研究。下面简要叙述其研究现状。

1.2.1 电离层探测技术与方法

1. 地面探测技术

电离层探测主要是借助于电离层等离子体表现出来的各种电磁现象,获取有关电离层的组成及其电子含量、电子密度等,进一步分析它们的时空变化规律和特征,如全球和区域分布、周日、季节和太阳周期等的变化及垂直剖面 and 漂移运动等(袁运斌,2002;章红平,2006)。

早期电离层信息主要利用地面探测仪,通过垂直入射的方式获取。该探测技术起于 20 世纪 20 年代,随着探测与反演技术的进一步发展,发现该技术不能探测电离层顶部,而且很难精细探测出电离层 D 层及 E 层和 F 层的谷区,原因是这些区域中中性分子密度大而电子密度小,因此不能满足电离层研究的需要。到 20 世纪 50 年代后,大功率雷达、激光雷达、长波段等地面探测技术得到了极大发展,如波的相互作用、部分反射探测、月球反射技术和非相干散射技术等(Evans et al, 1983;熊年禄 等,1999;都享 等,1998)。20 世纪 70 年代末,数字式地面探测仪的出现使得以地面为基础的测量方法有了更大的发展和应用(万卫星 等,1993)。

2. 卫星探测技术

20 世纪 50 年代,人类第一颗人造地球卫星的成功发射为电离层的研究提供了海量数据,卫星探测技术成为电离层和相关空间物理研究领域的主要数据来源。电离层的卫星探测技术是通过在应用卫星上搭载电离层探测仪或发射专门用于探测电离层和其他空间环境的卫星,实现了对电离层顶部的探测,同时直接测量电离层电子总含量(total electron content, TEC),如 2000 年之后发展起来的地震电磁卫星,包括美国 2003 年和 2007 年发射的 QuakeSat 卫星、法国 2004 年发射的 DEMETER 卫星、俄罗斯 2006 年发射的 COMPASS-2 卫星,计划和研制之中的还有俄罗斯的“火神”(Vulkan)、美国的全球地震卫星观测系统(GESS)、日本的 ELMOS、英国的 SSTL、意大利的 ESPERIA 和中国的地震电磁探测试验卫星(CSES)等。除此之外,人们还将多普勒频移、差分多普勒和基于同步卫星的无线电信标等技术应用于电离层的探测(Bowhill,1983;Dabas et al,1990)。国内学者

在上述领域进行了大量的相关研究,得出了一些有益的结论(万卫星等,1993;吴健等,1998)。

3. GPS 与掩星技术

近20年来,许多新的地面和空间探测技术及电子计算机等现代数据处理手段的出现、发展和应用,进一步推动了电离层研究的深入发展。特别是利用卫星和飞船等现代科技手段在地球空间的探测方面显示出了重大的作用(刘振兴,1998)。自美国建立GPS以来,电离层对无线电波传播的影响更为有关学者关注。GPS探测电离层技术的兴起和发展,给电离层研究带来了飞跃式发展。一方面,消除电离层影响实现GPS高精度定位;另一方面,利用GPS观测数据探测电离层结构。大量文献(袁运斌,2002;章红平,2006;Wen Debao,2010)已经证明,GPS探测电离层技术具有其他探测技术无法可比的优点。

另外,近年来兴起的基于GPS的掩星技术,克服了地基电离层层析技术(computerized ionosphere tomography, CIT)无法探测电离层顶部的不足,大大提高了电离层垂直方向TEC分布的分辨率的估计(吴小成等,2008;李征航等,2009;赵莹等,2010),对促进电离层研究的发展具有重大的意义。

多种卫星航天器与各类顶部或底部探测技术手段的有效结合,为电离层整体和细部结构的分布状况、时间变化及其异常状况等方面的研究提供了充足的数据。

1.2.2 电离层模型与应用研究

正常情况下,电离层状态存在一定规律的变化,可以通过构建电离层模型进行预测,以便更好地利用电离层信息。不同因素会使电离层产生异常,异常现象的变化亦有一定的规律性,可以利用具体的数学模型进行合理的描述,然后根据异常显示的规律性变化,研究产生异常的原因。

电离层空间成分的状态分布研究主要包括:①电离层各分层的离子成分及变化特征,主要指平静条件下正常的周日变化与季节及太阳周期的影响等相关的更广泛的变化(袁运斌,2002;章红平,2006);②磁层过程与电离层行为之间相互作用,以及电离层与低层大气层之间的耦合(Fremouw et al,1992;Leitinger et al,1996;程征伟,2007;魏勇,2008);③电离层等离子体的动力学效应和热结构,主要指由地球内部的重力、压力梯度力和电场引起的离子运动学效应,以及不同热源和各种等离子体成分的温度与热汇的热结构(Song et al,1995;Lui et al,2005;濮祖荫等,2005)。

1. 电离层模型构建

电离层模型构建是描述电离层状态分布的主要途径之一,目前成熟的算法主要分为经验模型、单层模型和层析模型三种(章红平,2006;李征航等,2009;杨哲等,2012)。经验模型主要利用多种探测手段,获取电子密度和离子密度的实

际观测数据,得到电离层在正常情况下的分布,著名的模型有:国际电离层参考模型(international reference ionosphere model, IRI)、本特(Bent)模型和 NeQuick 模型等(章红平,2006;杨哲等,2012)。基于 GPS 卫星观测量的单层模型有:球谐函数、三角级数函数、多项式模型(程鹏飞等,2001;袁运斌,2002;章红平,2006),该类模型通过一定区域内 GPS 观测量计算电离层的延迟量,然后假定电离层在某一层面的分布遵循上述某一种模型,进而估计模型的系数,再利用确定的模型计算区域电离层的分布状况。电离层层析技术根据采用的 GPS 数据不同分为两种模型:①掩星数据反演模型,主要有阿贝尔(Abel)方法、“洋葱”分层法、最小二乘法等(吴小成,2008;徐晓华等,2009;赵莹等,2010),这些模型利用掩星观测数据,估计电离层中电子密度在垂直方向形成的廓线或者其在空间的三维分布,并借助地面垂测仪的观测数据作为已知检核数据;②GPS 或 GPS/掩星反演的模型,主要利用代数迭代法、傅里叶(Fourier)变换法、经验正交法和球谐函数法等(Fremouw et al,1992;邹玉华,2004;Wen Debao et al,2007;施闯等,2010;郭英等,2013),该方法均利用 GPS 地面观测数据或掩星观测量得到的电离层延迟量,或者利用 GPS CORS 和掩星联合观测得到的延迟量,估计电离层的空间分布,并与 IRI2001 模型或者 IRI2007 模型进行比较。

比较而言,理论模式能够从理论上分析和考察影响电离层参数变化特征的各种因素,以及磁暴和太阳活动对它们的影响,而不同理论模式容易与电离层的实际分布实现一定程度的耦合。在 GPS 定位的基础上,有效结合快速飞行卫星和层析成像技术,研究电离层二维或三维电子密度分布,是目前相关学者研究的热点。又因电离层层析技术具有可实现全球尺度上电离层时空演变的优势,所以为电离层研究、无线电通信和射电天文学等领域的众多工作者所关注。

层析技术不仅推动了电离层研究的发展,也为全球大气监测和其他空间区域的遥测技术提供了有益的启示。在通信导航定位、导弹发射监测及地震预报等实际应用领域,层析技术也具有潜在的应用价值。

2. 电离层异常现象及应用

因受到太阳黑子、地球极光、地磁和其他冲击波的影响,大气中电离层经常发生扰动(异常)现象。电离层扰动现象包括:电离层突然骚扰、电离层行扰和电离层爆等(王劲松等,1994;刘瑞源等,2004;陈斌等,2005;徐文耀等,2008)。人们一般通过探测电离层异常的时间和变化规律,分析产生这类现象的原因。

目前,已有大量文献验证地震与电离层扰动存在一定的耦合关系(丁鉴海等,2006;朱荣,2007;何宇飞等,2009;焦其松等,2011)。俄罗斯、日本、美国、法国、中国台湾等多个国家和地区已经开展了地震电离层异常扰动研究。部分国家已经发射地震电磁卫星进行地震电离层异常扰动监测。大量学者对地震—电离层异常扰动特征进行了大量的数据分析,还有一些专家(Pulinets et al,2004;Parrot,

2006a,2006b)对地震电离层扰动的物理机理进行了深入探讨。由于受多种因素的影响,地震—电离层耦合关系很难合理描述。

3. 电离层反演地磁北极

地球的南北磁场是地球固有的天然资源,为航空和航海提供了天然的坐标。但是,地球的磁场南北极与地理南北极之间存在一定的偏差,且该偏差随时间向西缓慢移动(Xu Wenyao,2003;Xu Wenyao et al,2004;Olsen et al,2007;Chulliat et al,2010;郭才发等,2009)。该变化会影响到航空、通信和国防建设等诸多领域的导航工作。

目前,确定地磁北极常用的估计算法主要有:①由相应地面观测站的磁力计直接测定;②利用全球地磁场模型和地面观测站的地磁数据计算得到;③利用低轨卫星(如测磁重力微卫星 CHAMP、Ørsted、SAC-C 卫星)的地磁观测数据(Olsen et al,2006,2007),计算得到地磁场强度矢量,然后进一步计算得到结果。上述方法各有其特点,但在估计方法和精度方面均需进一步研究。

电离层中电子的分布与地球磁场之间存在着一定的耦合关系,不仅 GPS 观测量可以较为准确地估计电离层中的 TEC,而且在有关 GPS 技术估计电离层的模型中,存在着地磁坐标和地理坐标之间的联系,还有不同时间段的 GPS 观测量为 TEC 提供了丰富的数据。因此,如果能够利用 TEC 有效地估计地磁北极的地理坐标,将为地磁北极的准确估计提供一种新的手段,但是目前尚未有该方面的研究和成果。

§ 1.3 GNSS 及其完备性理论

GPS 进入使用阶段后,系统的优越性和实用性越来越被认可,但是系统在卫星结构设计、信号的数量和质量等方面,存在的不足亦逐渐显露。为此,很多国家在安全性方面采取相应的增强系统,著名的有美国的广域增强系统(wide area augmentation system, WAAS)、欧洲静地卫星导航重叠服务(European geostationary navigation overlay service, EGNOS)、日本的多功卫星增强系统(multi-functional satellite augmentation system, MSAS)。另外,有些国家也在发展或完善自己的卫星定位系统,如美国的 GPS 现代化系统、欧洲的 Galileo 卫星定位系统、俄罗斯的 GLONASS 系统和中国的北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS),上述系统正在研制或完善之中,它们均在完备性方面进行了深入而又全面的设计和 research。

GNSS 完备性研究主要从地面监测站的分布、卫星轨道的设计、信号的稳定性和用户四个部分的硬条件研制,以及完备性理论两个方面进行系统研究,下面分别叙述之。

1.3.1 GNSS 及其完备性研制的发展现状

1. GPS 现代化系统(GPS Ⅲ)

2000 年以后完善的 GPS 现代化系统在以下几个方面进行完善。

1) 卫星空间分布及信号

新一代 GPS 计划将由分布在 3 个轨道面上的 30 颗中高轨道和同步轨道卫星组成。系统选择新型的优化设计方案,加强系统的完备性;提高导航信号的地面接收功率,同时增强 2 个指定区域的信号功率;采用高性能的空间原子钟,提高卫星的使用寿命;改变传统的 GPS 内部和外部接口,以提高系统工作效率;在军民两用系统中增加 GPS 两个新的民用频率,提高 GPS 卫星集成度,增强 GPS 无线电信号强度,保护 GPS 不受干扰,增加 GPS 军用信号的抗干扰能力;设计新的 GPS 卫星型号(F 型)、信号结构,增加相应的频道,将民用频道 L1、L2、L5 和军用频道 L3、L4 分开。

2) 地面监控站部分

国际 GNSS 服务(International GNSS Service, IGS)观测站由原来的 60~70 个发展到目前的 200 多个,IGS 观测站的分布也比原来有很大的改善,大大提高了卫星轨道的定轨精度,广播星历定轨的精度由原来的 5 m 多提高到现在的 2 m 以内(刘伟平等,2010);地面测控站将由原来的 5 个发展至 15 个之多,以提高卫星轨道和钟差预报精度,增强信号完备性监测能力,同时采用新的算法和软件,提高测控系统的数据处理与传输能力等。

2. 俄罗斯的全球卫星导航系统现代化计划

2001 年,俄罗斯政府批准了俄罗斯的全球卫星导航系统 2002 年至 2011 年发展计划。第一颗经现代化改进的卫星(GLONASS-M)已经于 2004 年 12 月发射,并已经完成在轨调试与验证工作,投入服务。GLONASS-M 卫星主要改进的地方包括:增加 L3 频率的民用导航信号;选用新的铯钟,提高导航、定位与授时精度;提高星上系统的可靠性和寿命,消除了一定波段内的信号干扰,增加了搜索和救援载荷,改善系统的完好性,卫星将满足全球无间隙覆盖(<http://www.gloanss-ianc.rsa.ru/pls/htmltdb>)。

3. Galileo 系统计划

欧盟在 1999 年初提出 Galileo 导航定位系统构建计划,将提供以下几种服务:一是公开服务,面向大众的免费定位、导航和定时的服务,没有完备性服务;二是商业服务,在世界范围内保证亚米级的定位服务,若有局域增强服务,精度可以提高到 10 cm,该服务有完备的保障系统;三是公共管制服务有稳定的信号,保证成员国对 Galileo 导航定位系统的特殊使用;四是生命安全服务和搜索与救援服务,符合国际民航组织和国际海事组织,在求救信号探测方面有公开服务和生命安全服

务的系统参数。

Galileo 系统运行后除对固定的民用汽车、轮船、飞机等交通工具导航外,也可以运用于地质勘探、考古、天气预报等多个领域,还能够为军舰、远程作战部队及巡航导弹等提供导航服务,甚至还能完成导弹的跟踪监测任务。

4. 北斗卫星导航系统

中国同欧洲一样已致力于发展自主的北斗卫星导航系统。2000 年之后,中国相继发射了第一颗和第二颗导航试验卫星,与 2003 年 5 月发射成功的第三颗卫星组成了中国的北斗卫星导航系统,成为世界上第三个拥有卫星导航系统的国家。未来的北斗卫星导航系统提供两种服务方式,即开放服务和授权服务。开放服务是在服务区免费提供定位、测速和授时服务,定位精度为 10 m,授时精度为 50 ns,测速精度为 0.2 m/s;授权服务是向授权用户提供更安全的定位、测速、授时和通信服务信息。该系统与 GPS 和 GLONASS 最大的不同在于它不仅使用户知道自己所在的位置,还可以告诉别人自己的位置,特别适用于需要导航与移动数据通信的场所,如交通运输、调度指挥、搜索营救、地理信息实时查询等。该系统还充分考虑系统的完备性,包括卫星的地面系统设计、卫星轨道和钟信息的完备性等。

GNSS 及其完备性的作用和价值已经被许多国家确认,于是各国力争发展自己的卫星定位和增强系统。目前,除了 GPS、GLONASS、Galileo 和北斗卫星导航系统以外,日本也在发展自己的准天顶卫星系统(quasi-zenith satellite system, QZSS),印度亦研制本国的区域卫星导航系统(Indian regional navigation satellite system, IRNSS)。QZSS 以 3 颗卫星通过时间转移完成全球定位系统的区域性功能卫星扩增系统,系统在两方面增强其效能,即增进 GPS 信号的可用性和增加 GPS 导航的准确度与可靠度(林剑等,2009)。IRNSS 是印度政府 2006 年正式批准建设的一套独立的区域导航卫星系统,系统由 7 颗卫星组成,包括 4 颗同步轨道卫星和 3 颗大椭圆轨道卫星,地面设有控制系统。系统能为印度及其边境周边 1 500~2 000 km 范围内的用户提供精确定位、导航及授时服务,且提供两种类型的服务,即标准服务和有限/授权的增强服务。

1.3.2 GNSS 完备性理论

GNSS 的精度、持续性、有效性和完备性的性能参数中,精度是指系统为运动载体所提供的位置与真实位置的重合度;连续性是指导航系统在给定的使用条件下,在规定的时间内,以规定的性能完成其成功率的百分比;有效性是指系统能为运动载体提供可用导航服务时间的百分比;完备性是指导航系统发生任何故障或者误差超限时,系统及时发出警告的能力。

系统的精度可以根据需要和可能进行调整与控制,但系统的完备性信息在什么时候都是不可少的。就此而言,系统完备性比系统的精度具有更为重要的意义,

它是用户对系统所提供信息的可信程度的一种度量,是一个保证用户安全性的重要参数。

GPS 在应用的过程中,用户根据自己的需求,建立相应的增强系统,以便提高定位或导航的精度与可靠性;Galileo 系统、北斗卫星导航系统及其他卫星导航系统不仅在研制阶段已经从硬件和软件等多方面考虑系统的完备性,而且在完备性理论和参数描述方面也会有差别。下面就其完备性理论做简要叙述。

1. GPS 完备性增强系统

根据地区增强性质的不同,GPS 增强系统分为定位技术的增强——GPS 差分定位系统(differential global position system,DGPS)、地基增强系统(ground based augmentation system,GBAS)、空间信号的增强——空基增强系统(satellite based augmentation system,SBAS)和基于接收机冗余观测信息的用户自主式完备性监测(receiver autonomous integrity monitoring,RAIM)(秘金钟等,2010)。

GPS 差分定位技术没有考虑信号的有效性。大量应用已经证明,当 GPS 出现信号异常、电离层闪烁或遇到电离层风暴等现象时,即使使用差分技术,也难以保证系统导航的精度需求,从而影响导航用户的安全。为了克服此类现象的发生,人们开始研制完备性增强技术,当信号的误差超过规定的阈值时,在规定的告警时间内提出警告。

基于地面伪卫星的增强系统是在地面设置发射少量信号的伪卫星,改善 GPS 卫星的几何配置,用户定位精度和可靠性明显提高。例如,1997 年美国开发了 II 类、III 类精密进场的增强系统,用户可以获取 0.7 m 的垂直精度和 0.34 m 的水平精度。

空间信号的增强系统是在设置地面遥测站(ground sense station,GSS),对系统的完备性能进行监测,在对系统误差信息充分改正的同时,对空间信号进行质量监测,提供空间信号监测结果。用户接收机可以接收系统播发的信息,提高定位精度,同时计算保护水平等,广域增强系统和欧洲静地卫星导航重叠服务采取了这种增强模式。

GPS 广域增强系统和欧洲静地卫星导航重叠服务通过地面监测系统和用户导航系统的预测,实现整个导航系统的完备性,包括:用户差分距离误差(user differential range error,UDRE)、格网电离层垂直误差(grid ionosphere vertical error,GIVE)、水平/垂直方向保护水平(horizontal/vertical protection level,XPL)和完备性风险(integrity risk,IR)。

目前,估计用户差分距离误差、格网电离层垂直误差、水平/垂直方向保护水平和完备性风险的方法很多文献都有介绍。Schempp 等(2002)、陈金平(2001)采用的电离层、对流层改正及接收机噪声等误差的改正方法已成熟,其统计理论采用了零均值正态分布。陈金平(2001)、袁运斌(2002)对电离层球面的选择、格网点的估