

· 空间技术与应用学术著作丛书 ·

GNSS完好性监测 及辅助性能增强技术



战兴群 苏先礼 著

GNSS INTEGRITY MONITORING
AND ASSISTED PERFORMANCE ENHANCEMENT TECHNOLOGY



科学出版社

空间技术与应用学术著作丛书

GNSS 完好性监测及 辅助性能增强技术

战兴群 苏先礼 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统、深入地阐述了 GNSS 完好性监测的各项相关内容,包括其产生根源、评估指标、实现方法、辅助性能增强技术,提出 GNSS 完好性监测三级理论体系,构建其综合评估系统架构,研究在其他异质和同质导航信息辅助下其性能增强方法。本书研究内容丰富、图文并茂、结构严谨、论述清楚、材料充实。

本书适用于从事卫星导航技术及其相关领域的研究、设计、制造、使用、操作、维护等方面的科研和工程技术人员,也可供有关院校师生和科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

GNSS 完好性监测及辅助性能增强技术 / 战兴群, 苏先礼著. —北京: 科学出版社, 2016. 5
(空间技术与应用学术著作丛书)
ISBN 978-7-03-048307-2

I. ①G… II. ①战… ②苏… III. ①卫星导航—全球定位系统—监测 IV. ①P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 108610 号

责任编辑: 王艳丽

责任印制: 谭宏宇 / 封面设计: 殷 靓

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

南京展望文化发展有限公司排版

上海叶大印务发展有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 5 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 5 月第一次印刷 印张: 16 1/2 插页 6

字数: 336 000

定价: 89.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

随着卫星导航相关理论研究的深入和全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)的快速发展,GNSS 接收机作为实时的十参数传感器(三维位置、速度、姿态和一维时间)的导航服务性能(精度、可用性、完好性、连续性)得到了极大的提高,卫星导航应用领域也不断拓展,在国民经济和社会发展中发挥的作用更加明显。但 GNSS 固有脆弱性、差错存在的普遍性和不确定性及信号易受遮蔽等特性,限制了行业用户和大众用户对 GNSS 的应用。如果没有完好性的服务性能作保障,GNSS 只能充当辅助导航角色,也就是说 GNSS 作为主用导航设备必须跨越完好性这道门槛。GNSS 完好性监测相关领域的研究已经成为国内外 GNSS 研究热点之一。

本书针对当前国内外 GNSS 完好性监测和性能增强技术研究中存在的一些弱点和盲点问题,依托国家高技术研究发展计划(863 计划)项目“GNSS 脆弱性分析及信号传输环境研究”等课题研究成果,全面分析了 GNSS 完好性的根源和本质;深入研究了解决 GNSS 完好性问题的途径和方法;从全局角度提出了三级 GNSS 完好性监测的完整理论体系,构建了 GNSS 完好性监测综合评估系统架构,分别应用质量控制理论、信号分析理论和一致性检测理论,实现全球系统级星座完好性监测、区域增强级信息完好性监测和终端应用级用户完好性监测;提出了基于质量控制的 GNSS 星座完好性综合评估方法;设计和实现了 GNSS 信号质量伺服天线跟踪监测系统;改进了快速随机抽样一致完好性监测方法;在 GNSS 完好性监测性能增强技术研究方面,从 GNSS 之外的外源导航信息中分别选取异质(观测的不是同一个物理量)的惯导信息辅助和同质(传感器观测的是同一物理现象)的差分信息辅助为例,研究 GNSS 完好性服务性能增强的方法和程度。着重分析了终端用户接收机在有其他冗余信息可进行差分时的 GNSS 完好性监测方法及辅助性能增强技术;同时也开展了 GNSS 姿态测量领域的完好性监测研究。通过 GNSS 仿真和实际完好性监测数据验证了上述研究结果,可以为 GNSS 完好性监测和性能增强提供参考,具有重要的理论意义和工程实用价值。这种层次分析方法和结论对其他卫星系统(如通信、遥感、气象、资源、侦察)的各种服务性能监测和增强也有一定借鉴价值。

本书主体结构可分为“GNSS 完好性基本理论”“GNSS 完好性监测体系”和“GNSS 完好性辅助性能增强”三个主题。本书融入了作者近年来在 GNSS 完好性监

测领域的原创性科研成果,主要包括以下四个方面。

(1) 分析了 GNSS 完好性问题的产生机理、内涵及外延,按实施完好性监测的主体所在位置和特性,依据对应的分析方法理论分层次提出三级 GNSS 完好性监测的完整理论体系,并构建了 GNSS 完好性监测综合评估系统架构,可以为 GNSS 完好性监测的研究和实施提供参考,这种层次分析方法和结论对其他卫星系统的各种服务性能监测和增强也有一定的借鉴价值。

(2) 构造完好性最小可用性(MAI)和最小检测效果黑洞比(MDEHR)两个全球系统级星座完好性监测评测指标,提出一种涉及 GNSS 星座状态、观测条件、量测噪声和应用需求等多种因素,基于质量控制的 GNSS 星座完好性综合评估方法,从时空两个维度去预测和实时评估星座完好性。通过大量仿真分析 BDS、GPS、QZSS 和 IRNSS 等单个或混合星座在包括城市峡谷等极端条件下的完好性性能,得到很多量化的星座完好性评估结果。该完好性评估方法及仿真结果,对导航星座配置和实际 GNSS 应用中的完好性预测有参考价值。

(3) 按照用户接收机的射频、基带和量测解算三个监测位置,分别从射频环境、基带处理和一致性判断,详尽分析了各个阶段的终端应用级用户完好性监测,在随机抽样一致完好性监测(RANSAC-RAIM)的基础上进行改进,提出对卫星子集进行基于 GDOP 预检验排除法和动态无阈值 LOS 矢量预检验筛选的快速 FRANSAC-RAIM 方法,根据真实的民航飞行场景下仿真结果表明,改进的 FRANSAC-RAIM 方法不但具备检测多差错和小差错的能力,还将运算效率提高了 1 倍以上,且缩短了告警时间,对 RAIM 完好性告警需求意义重大。

(4) 改进姿态精度因子(ADOP)求解方式,提出基于 ADOP 选择卫星组的方法,分析 ADOP 与基线长度及卫星仰角关系,提出 GNSS 姿态测量(GNSS-AD)完好性监测中以姿态角为度量的姿态角告警限值(AAL)标准,给出将告警限值从距离域转换到姿态角域的近似方程,从而将定位中的完好性方法引入到 GNSS 测姿中,实现 GNSS 测姿完好性监测方法。利用更多种差分辅助,提出 GNSS-AD 完好性监测方法,构造两类单差在相邻时间历元间的差分(Delta SD-1S2A 和 Delta SD-2S1A)分别辅助增强检测和排除不同误差源引起的完好性问题,最终通过综合两者优势提出差分辅助完好性监测方法,实现完好性增强目的。

本书主要读者对象为从事卫星导航及其他相关领域的研究、设计、制造、使用、操作、维护等方面的科研人员和工程技术人员,也可供有关院校师生和科技工作者参考。

本书研究工作得到科学技术部国家高技术研究发展计划、国家自然科学基金及有关课题的资助,在此表示感谢;感谢上海交通大学及其航空航天学院良好的科研环境、丰富的信息资源、质朴的学术氛围,为本书的完成提供了充足保障;感谢科学出版社相关人员在封面设计、文字校对、出版安排等方面的工作使本书得以付梓。

由于作者能力水平有限,书中肯定存在一些不妥之处,敬请读者不吝赐教。读者可以通过邮箱 xqzhan@sjtu.edu.cn 或 sxlmy@163.com 与我们直接联系。

作者

2016 年 3 月

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 卫星导航系统现状及发展趋势	2
1.1.1 GNSS 的源起和格局	3
1.1.2 GNSS 优势及应用	6
1.1.3 GNSS 不足及发展趋势	6
1.2 GNSS 完好性监测及其研究现状	10
1.2.1 GNSS 完好性概念	10
1.2.2 国外研究现状	11
1.2.3 国内研究现状	15
1.2.4 国内外研究的弱点和盲点	16
1.3 本书的写作背景及主要内容	18
1.3.1 本书研究目的和意义	18
1.3.2 本书的内容和结构	18
第 2 章 GNSS 故障及完好性监测	22
2.1 GNSS 量测与 PVT 解算	23
2.1.1 三类 GNSS 量测	23
2.1.2 GNSS 观测方程	24
2.1.3 PVT 解算	25
2.1.4 几何精度因子	29
2.2 GNSS 故障分析	30
2.2.1 GNSS 导航链	30
2.2.2 GNSS 故障	31
2.3 GNSS 完好性性能及统计意义	39
2.3.1 GNSS 导航服务性能	39
2.3.2 GNSS 完好性统计意义	41

2.3.3	GNSS 完好性监测	44
2.4	GNSS 完好性需求	45
2.4.1	航空应用	45
2.4.2	其他民用行业应用	47
2.5	三级 GNSS 完好性监测体系	48
2.5.1	全球系统级星座完好性监测	49
2.5.2	区域增强级信息完好性监测	49
2.5.3	终端应用级用户完好性监测	50
2.5.4	GNSS 完好性监测综合评估系统架构	51
2.6	GNSS 完好性监测指标	52
2.6.1	完好性监测输入指标	53
2.6.2	用户完好性监测指标	54
2.6.3	完好性监测输出指标	57
第 3 章	全球系统级星座完好性监测	58
3.1	质量控制理论	59
3.2	全球系统级星座完好性监测评测指标	61
3.2.1	完好性最小可用性	62
3.2.2	最小检测效果黑洞比	62
3.3	基于质量控制的 GNSS 星座完好性综合评估方法	63
3.3.1	星座完好评估方法	63
3.3.2	星座完好评测区分	64
3.3.3	输入条件的阈值	68
3.4	单星座完好性评估	68
3.4.1	评估参数设置	68
3.4.2	单星座全球范围完好性评估	69
3.4.3	单星座亚太区域完好性评估	71
3.4.4	单星座连续时间完好性评估	73
3.4.5	单星座完好性评估总结	77
3.5	混合星座完好性评估	77
3.5.1	不同场景下各种混合星座完好性评测	77
3.5.2	亚太区域各种混合星座完好性评测	83
3.6	城市峡谷条件下混合星座完好性评估	86
3.6.1	评估参数设置	86
3.6.2	亚太区域各种掩蔽角下混合星座完好性	87
3.6.3	四个城市各种掩蔽角下混合星座连续时间完好性	89

3.6.4 城市峡谷条件下混合星座完好性总结	91
第4章 区域增强级信息完好性监测	93
4.1 信号分析理论	93
4.1.1 信息、信号和数据	94
4.1.2 信号完好性	96
4.1.3 数据完好性	105
4.2 区域增强级信息完好性监测评测方案	107
4.2.1 GNSS 高增益抛物面伺服跟踪天线系统作用	107
4.2.2 区域增强级信息完好性监测方案	108
4.3 GPTA-SQMS 设计与实现	110
4.3.1 国际 GNSS 监测抛物面天线简介	110
4.3.2 GPTA-SQMS 系统介绍	111
4.3.3 GNSS 卫星抛物面伺服跟踪天线系统设计	115
4.3.4 GNSS 卫星抛物面伺服跟踪天线系统安装与测试	121
4.4 真实 GNSS 信号监测分析	123
4.4.1 GPS 信号频谱监测分析	124
4.4.2 GLONASS 信号频谱监测分析	125
4.4.3 BDS 信号频谱监测分析	125
4.4.4 Galileo 信号频谱监测分析	126
4.4.5 QZSS 信号频谱监测分析	127
第5章 终端应用级用户完好性监测	128
5.1 终端应用级用户完好性监测展开位置及途径	129
5.1.1 射频环境完好性监测	130
5.1.2 基带处理完好性监测	132
5.1.3 量测解算完好性监测	135
5.1.4 小结	136
5.2 终端应用级用户完好性监测分类	137
5.2.1 接收机自主完好性监测	137
5.2.2 用户辅助完好性监测	138
5.3 一致性检测理论	139
5.3.1 一致性及一致性检测	139
5.3.2 解的最大距离法	140
5.3.3 残差矢量法	141
5.3.4 随机抽样一致性检测	145

5.4	随机抽样一致完好性监测	147
5.4.1	RANSAC - RAIM 方法	147
5.4.2	RANSAC - RAIM 参数选择	150
5.4.3	RANSAC - RAIM 算法运算量评估	151
5.5	快速随机抽样一致完好性监测	151
5.5.1	FRANSAC - RAIM 方法	152
5.5.2	子集预检验筛选	152
5.5.3	FRANSAC - RAIM 算法运算量比较	158
5.6	随机抽样一致完好性监测仿真验证	161
5.6.1	航空场景及仿真条件	161
5.6.2	差错仿真	164
5.6.3	结果比较	166
5.6.4	RANSAC 完好性监测方法总结	172
第 6 章	惯导辅助 GNSS 完好性监测	173
6.1	信息融合技术	174
6.1.1	信息融合技术的概念及发展	174
6.1.2	信息融合原理	175
6.1.3	信息融合的方法	176
6.2	惯性导航系统	178
6.2.1	惯导系统的组成	178
6.2.2	惯导系统优缺点	181
6.2.3	惯导系统误差	182
6.3	GNSS/INS 组合导航系统	184
6.3.1	松组合	184
6.3.2	紧组合	185
6.3.3	超紧组合	186
6.4	惯导辅助 GNSS 完好性监测	186
6.4.1	IAIM 研究现状	186
6.4.2	IAIM 三层结构	188
6.4.3	数据层增量比较法完好性监测	188
6.4.4	特征层连贯法完好性监测	189
6.4.5	决策层快照法完好性监测	190
6.4.6	惯导辅助 GNSS 完好性监测方案设计	191
第 7 章	差分辅助 GNSS 完好性监测	194
7.1	GNSS 姿态测量的完好性研究	195

7.1.1 GNSS 姿态测量性能介绍	195
7.1.2 GNSS 姿态测量中的完好性问题	196
7.2 姿态精度因子	197
7.2.1 几何精度因子	197
7.2.2 姿态精度因子	197
7.2.3 基于 ADOP 的姿态测量基线确定与选星算法	200
7.3 GNSS-AD 完好性监测的姿态角告警限值	204
7.4 差分辅助 GNSS 完好性监测算法	204
7.4.1 四类单差	205
7.4.2 差分辅助 GNSS 完好性监测	208
参考文献	213
缩略语	226
附录 A 卫星导航系统概况	234
A.1 全球卫星导航系统	234
A.1.1 全球定位系统	234
A.1.2 格洛纳斯系统	235
A.1.3 北斗卫星导航系统	236
A.1.4 伽利略卫星导航系统	237
A.1.5 法国朵丽丝定轨和定位系统	238
A.2 区域卫星导航系统	239
A.2.1 日本的区域卫星导航系统	239
A.2.2 印度的区域卫星导航系统	240
A.3 卫星导航增强系统	241
A.3.1 GNSS 星基增强系统	241
A.3.2 GNSS 地基增强系统	244
附录 B 随机抽样一致性	248
B.1 RANSAC 优缺点	248
B.2 RANSAC 基本假设	249
B.3 RANSAC 算法	249
B.4 RANSAC 参数选择	249
后记	251
彩图	

《文子·自然》称“往古来今谓之宙，四方上下谓之宇”，时间和空间是这个世界的本质属性，因此量测时空成为人类活动从古至今重要的主题。本书所说的导航(navigation)是指在陆海空天(land, marine, aeronautic and space navigation, LMAS)四种场景中通过几何学、天文学、无线电信号等手段测定位置、航向和距离，监测和控制(引导)运载工具航行(从某点到达另一点)的过程^[1]。科学技术发展拉近了时空，但人们对时空的检测却更加精细了，正像人们对时间需求已经从古人日升月落的粗糙时辰观测进步到在2010年2月美国国家标准局研制37亿年误差不超过1秒的铝离子光钟^[2]，导航紧随着人类由近到远的运动史和由粗略到精确的位置需求，经历了从作标记、观天象、用司南的初级导航逐步发展到惯性仪表、无线导航、卫星导航等高级导航过程。

当前，作为实时三维位置、速度、时间和姿态(position, velocity, time and attitude, PVTA)十参数传感器的全球卫星导航系统^①(global navigation satellite system, GNSS)，已经使普通接收机在全球全天候地获得米级的定位精度、每秒分米级的测速精度、几十纳秒级的授时精度和分度级的测姿精度。导航设备也终将会像手表一样随时地佩戴在人们手腕上，成为人类对外界感知的重要工具。GNSS^②应用也不断拓展，军事、民用、工业、商业和科学应用急剧增长，GNSS正日益深入地影响着人类社会方方面面，直接或间接地改变着人们生产生活方式和思维活动习惯。如今卫星导航的应用仅受限于人类的想象力^[3]，GNSS业已成为国家信息体系的重要基础建设设施，是直接关系到经济发展和国家安全以及国防现代化的关键性技术支撑系统，也是展示现代化大国地位和国家综合国力的重要标志。

① 本书均使用“全球卫星导航系统”作为“global navigation satellite system”的中文指代词。如果按照英文直接翻译是“全球导航卫星系统”，但此处中心语是“导航”，而“全球”和“卫星”两词都是修饰语，按照中文偏正词组位置之规定，修饰语放在前面更符合中文习惯。其他系统类似之处同此法处理。

② 在业界，GNSS通常不仅仅包含联合国GNSS国际委员会(ICG)所确认的全球4个核心供应商提供的4大全球卫星导航系统，还扩大到与其他相关的所有通过卫星实现导航功能的系统(如增强系统)。本书没作特别说明时也都采用这个广义的概念。

GNSS 也不是尽善尽美的。2013 年 1 月 24 日我国北斗卫星导航系统^①(BeiDou navigation satellite system, BDS)就曾经出现 4 分钟电文播发时间异常,导致依赖 BDS 授时的国家电网多点报错,因而 GNSS 完好性监测的必要性日益凸显。GNSS 完好性是指用户对 GNSS 提供的信息的信任程度。GNSS 导航精度可以通过很多增强系统和差分系统进一步提高到接近技术极限的程度,但 GNSS 存在固有的脆弱性、差错存在的普遍性、不确定性及信号易受遮蔽等不足,使很多用户对 GNSS 所提供服务的信任程度大大降低,GNSS 完好性问题也延伸至除航空、搜救等生命安全领域,以及电力、电信等国家基础设施领域之外的公路、货运、铁路等陆上交通及海事、测绘及授时等民用定位、导航和授时(positioning, navigation and timing, PNT)应用,它们也期待着更高的完好性性能。如果没有完好性的服务性能作保障,GNSS 只能充当辅助导航角色,也就是说 GNSS 作为主用导航设备必须跨越完好性这道门槛。GNSS 完好性也正在成为一个国内外新的热门研究领域,越来越多的人开始关注并致力于 GNSS 完好性研究。

本章首先在 1.1 节介绍 GNSS 卫星导航系统及其星基和地基增强系统现状,简单分析 GNSS 高精度、全球性、全天候的强大导航优势及在陆海空天领域的 PVT 十参数确定中广泛应用。但由于微弱 L 波段超高频分米波无线电信号的固有特点,本章也简要指出 GNSS 导航存在的脆弱性(易受干扰/阻塞和欺骗(interference/jamming and spoofing, IJS))、视距传播(易受遮蔽)和差错多样性等不足,今后 GNSS 必将沿着解决暗区和盲区、多源辅助的组合或差分融合及完好性方向发展,以提升 GNSS 完好性等导航服务性能;然后在 1.2 节由 GNSS 的三大漏洞引出 GNSS 完好性的概念及定义,随后介绍本书研究的“GNSS 完好性监测及辅助性能增强技术”主题的国内外研究现状,并归纳总结 GNSS 完好性监测技术途径,提出 GNSS 完好性监测研究中的弱点和盲点;1.3 节说明本书选题来源于所在 SJTU-GNC 实验室承担的“十二五”国家高技术研究发展计划(863 计划)课题“GNSS 脆弱性分析及信号传输环境研究”,介绍研究的目的是意义,并简要介绍本书研究的主要内容以及所取得的研究成果。为增加本书的可读性,对全书内容的组织及结构编排进行梳理并绘制了全书逻辑脉络图。

1.1 卫星导航系统现状及发展趋势

卫星导航系统是利用人造地球卫星进行导航的系统。整个系统由多个导航卫星、地

^① 2012 年 12 月 27 日中国卫星导航系统管理办公室(CSNO)正式公布的接口控制文档(ICD)规定,“北斗卫星导航系统”简称“北斗系统(BeiDou System)”,缩写为“BDS”。本书均采用此说法。新华社以前的英文通告中也曾经称其为“Compass Navigation System”,业界也曾先后普遍使用“COMPASS”或“BeiDou”作为其缩写,因而可用“COMPASS”和“BeiDou”分别指代中国卫星导航系统的区域性北斗卫星导航试验系统(北斗一号)和北斗卫星导航系统(北斗二号)在 2012 年底前建成的亚太区域系统。

面站和卫星导航定位设备组成。卫星导航系统是一种天基无线电导航定位和时间传递系统^[4]。

1.1.1 GNSS 的源起和格局

1. GNSS 创新思想

GNSS 融合了最新的现代科技创新,是迄今为止应用最为广泛,影响最为深远的人类空间科技成果。GNSS 的创新思维源于 1957 年 10 月 4 日苏联成功发射第一颗人造地球卫星“斯普特尼克一号”(Sputnik I)后的第 2 年(1958 年),观测 Sputnik I 的美国约翰霍普金斯大学(Johns Hopkins University)应用物理实验室研究人员提出:根据已知轨道的卫星和接收机之间的多普勒频移(Doppler shift,DS)反推接收机在地球上位置的光辉论断。基于此原理,世界上第一个卫星导航系统美国海军卫星导航系统(navi navigation satellite system,NNSS),也称为子午仪卫星导航系统(transit satellite navigation system)的第一颗用于导航的卫星于 1960 年 4 月 13 号成功发射。

2. GNSS 格局

此后,GNSS 巨大的军事和商业价值促使世界各国都不惜耗费巨资建造各种用于导航的卫星系统,现今地球上空分布着一百多颗专门用于导航的人造地球卫星。卫星导航系统分为全球卫星导航系统、区域卫星导航系统和各种卫星导航增强系统三大类,其中卫星导航增强系统又可分为星基增强系统(satellite based augmentation system,SBAS)和地基增强系统(ground based augmentation system,GBAS)两类。有关 GNSS 的详情参阅附录 A(卫星导航系统概况)。

表 1.1 卫星导航系统技术参数及状态一览表(截至 2013 年 5 月)

全球及区域卫星导航系统和增强系统		卫星数 (标称)		卫星数 (2013.05)		主要 服务区域	达到全运行 能力的时间	民用频点
全球 卫星 导航 系统	GPS	24		31		全 球	1995	当前: L1 C/A, L2C 将来: L1 C/A, L1C, L2C, L5
	GLONASS	24		24		全 球	1995 (GLONASS) 2011 (GLONASS-M)	当前: L1PT, L2PT 将来: L1PT, L2PT, L3PT, L1CR, L2CR, L5R
	BDS	GEO	5	14	5	全 球	2012(区域) 2020(全球)	1 559.052~1 591.788 M 1 166.22~1 217.37 M 1 250.618~1 286.423 M
		IGSO	3		5			
		MEO	27		4			
	Galileo	30		4		全 球	2014 (18 卫星) 2015 (26 卫星) 2019 (30 卫星)	E5 OS/SoL E6 CS/PRS E1 OS/SoL/PRS

续表

全球及区域卫星导航系统和增强系统			卫星数 (标称)		卫星数 (2013.05)		主要 服务区域	达到全运行 能力的时间	民用频点
区域 卫星 导航 系统	QZSS	QZSS	5	3	3	1	日本区域		L1 C/A, L1C, L2C, L5, L1 - SAIF, LEX
		MSAS		2		2		2007	L1
	IRNSS	IRNSS	7	7	1	0	印度区域	2014(预计)	S, L5 and L1
		GAGAN		3		2		2013(预计)	L5, L1
卫星 导航 星基 增强 系统	WAAS		3		3		北美区域	2003(IOC) 2008(FOC)	L1C/A, L5
	SDCM		3		1		俄罗斯	2014(预计)	SBAS L1 C/A
	EGNOS		3		3		欧洲区域	2009 (OS) 2010 (SoL)	L1C/A
	NIGCOMSAT		1		1			2008	L1, L5
	合 计		138		85				

表 1.1 列出了各个 GNSS 系统的有关技术参数和系统状态^[5]：截至 2013 年 5 月，全世界各种卫星导航系统在地球上空实际已经在轨运行 85 颗导航卫星。按照官方公布相关的标称星座合计卫星数量将达到 138 颗。

图 1.1(a)是所有的卫星导航系统标称集总星座 138 颗卫星在某时刻的仿真平面图。图 1.1(b)是在某时刻的仿真三维图。

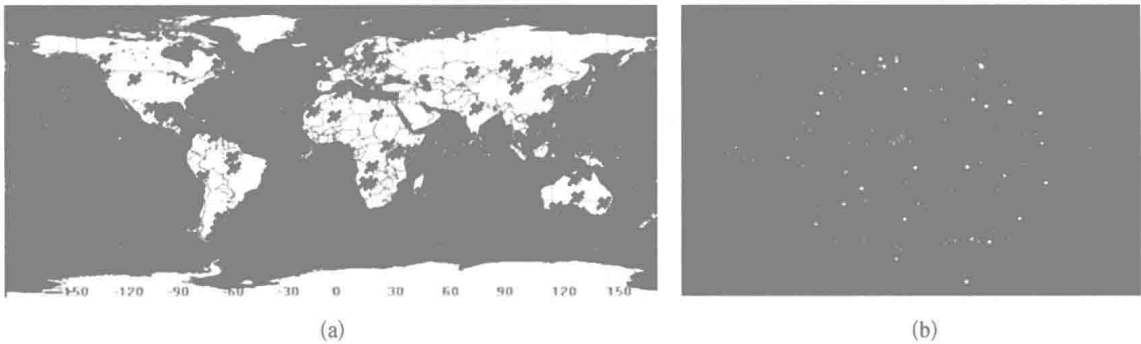


图 1.1 所有 GNSS 系统标称集总星座图

3. GNSS 卫星可见性

卫星在轨运动时地面静止用户的可见卫星数(number of visible satellites,NVS)和卫星视线角度也在变化。卫星可见性是所有 GNSS 导航系统的基本性能,是 GNSS 给用户提供服务的基础,因而 NVS 是卫星导航系统的基本问题。图 1.2(a)显示了所有的卫星导航系统标称集总星座 138 颗卫星在某时刻 5°掩蔽角时,以 0.5°经纬度分辨率绘制的全球 NVS 情况。全球平均值为 47 颗,最大值达到 68 颗,最小值也有 31 颗。由图 1.2 可知欧亚非地区 NVS 明显高于美洲地区,特别是亚洲地区,这是因为 BDS 在亚太区域卫星覆

盖较强,加之日本和印度的区域及增强系统作用所至。为更好地体现全球 NVS 的分布,图 1.2(b)是在 NVS 基础上先在经度上取平均值后绘制的全球 NVS 经度均值分布图,紫色线为根据 NVS 均值分布情况拟合的标准正态分布曲线(见彩图 1.2)。图中可见:有 80 个样点 NVS 为紫色线 42 颗,68 个样点 NVS 为 52 颗。

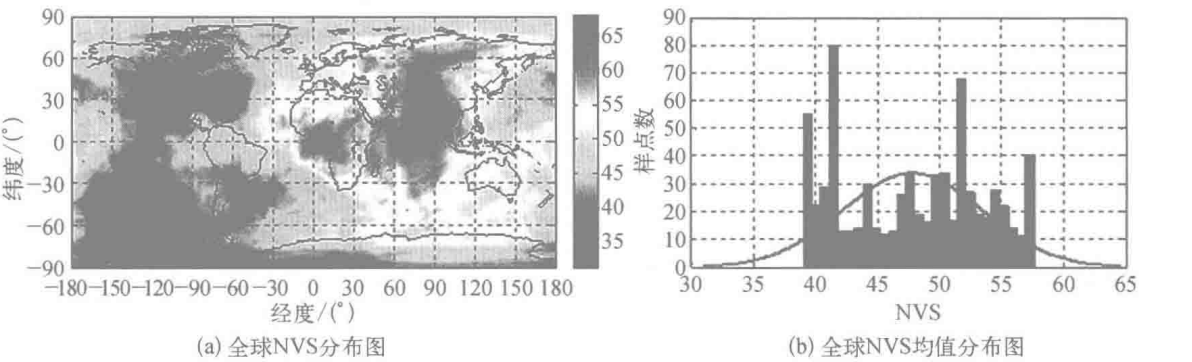


图 1.2 所有 GNSS 系统标称集总星座 NVS

以北京静止观测点(39. 91°N, 116. 39°E, 海拔 31. 2 m)在 5°掩蔽角时 NVS 为例,图 1.3(a)(b)绘制了北京对所有 GNSS 标称集总星座 138 颗卫星在 24 小时内(1 440 个时间采样点,采样间隔为 1 分钟)NVS,平均 NVS 为 54 颗(虚线所示),最大值、最小值分别为 66 颗和 41 颗,均远超过全球 NVS 相应指标。

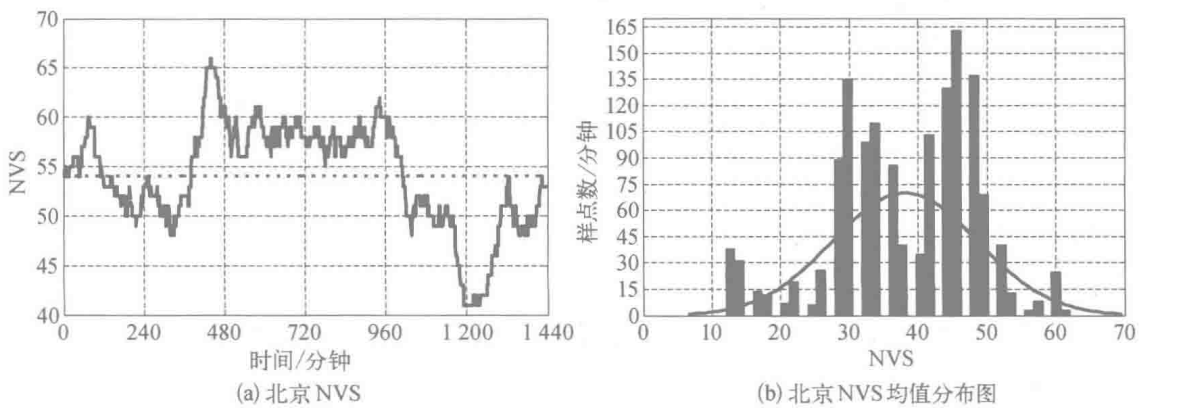


图 1.3 所有 GNSS 系统标称集总星座北京 NVS

尽管有如此众多的 GNSS 卫星在轨道运行,可以接收到的导航信号也很多,但实际卫星导航应用要综合利用空中的导航卫星资源还有诸多问题需要解决,如卫星导航完好性问题。随着卫星数量的增多,故障卫星出现的次数也增多,即接收机需要甄别接收到的导航信号究竟质量如何,接收到一个有差错的导航信号反而给定位、测速和授时带来更大的误差。在有很多导航信号的情况下,完好性显得更加重要。增强系统从某种意义上来说就是为解决卫星导航的完好性问题。纵观四大 GNSS 系统,都有自己的增强系统。

1.1.2 GNSS 优势及应用

1. GNSS 六大优势

GNSS 以其覆盖的广泛性(全球四重以上覆盖)、信息的全面性(PVTA 十参数)、应用的通用性(陆海空天、军民政科)、服务的全天候(昼夜晨昏、风霜雨雪)、性能的卓越性(PNT 高性能)、成本低廉(信号免费公开,机体嵌入集成)六大优点得到各界青睐。

2. GNSS 四大应用

目前,卫星导航系统已广泛应用于全球的各个行业,几乎影响到现代社会的所有方面,全世界的用户开发出数百种用途,而且新用途层出不穷,只怕想不到,不怕做不到^[6]。主要应用包括陆海空天四大应用场景的 PVTA 导航应用领域。

a. 陆地应用:主要包括车辆导航、铁路公路运控、精准农业、环境资源探测、公共安全与应急响应、精准授时、大气物理观测、地球物理资源勘探、测绘与工程测量、变形监测、地壳运动监测、市政规划控制等。

b. 海洋应用:包括远洋船最佳航程航线测定、船只实时调度与导航、海洋救援、海洋探宝、水文地质测量以及海洋平台定位、海平面升降监测等。GNSS 在航海中能够得到迅速、准确的定位、路线、速度等信息,通过合理的航线安排来节约导航时间及燃料;给船员提供精确的导航信息;改进港口集装箱管理的效率和经济效益;提高浮标安置、清理以及挖泥等操作的精确性及效率;使用自动身份识别系统(automatic identification system, AIS)提高船只的安全性。

c. 航空应用:包括飞机导航、航空遥感姿态控制等。GNSS 可以在全球范围内为飞行员提供起飞、飞行和降落,到机场的地面导航的所有飞行阶段精确的三维位置信息;减少昂贵的地面导航设施、系统和服务,为航空公司和飞行员提供灵活和节省燃料的航线;缩减航空最小间隔距离且更有效的航空交通管理,使航空能力得到提高,因而航班延误,特别是在恶劣天气条件下的延误可以减少。

d. 空间应用:包括从载人飞船的导航系统到对通信卫星群的管理、跟踪和控制,到从空间监视地球,还包括导弹制导、航空救援和载人航天器防护探测等。

1.1.3 GNSS 不足及发展趋势

1. GNSS 三大不足

辩证地看世间没有十全十美的事物,GNSS 同样如此。GNSS 存在固有的脆弱性、差错存在的普遍性、不确定性及信号易受遮蔽等不足(漏洞)限制了 GNSS 导航服务性能的发挥,在有些场合 GNSS 并不能提供稳定正常的导航服务。GNSS 漏洞也是导致 GNSS 完好性问题的直接原因,随着 GNSS 应用的深入和推广,GNSS 完好性监测相关领域的研

究也成为研究热点问题之一。

1) GNSS 固有脆弱性(易受 IJS)

GNSS 固有脆弱性源于其被噪底深深埋没的开放性 GNSS 信号。GNSS 接收机能接收的 GNSS 信号功率非常小。受太阳帆板功率及同频信号相互干扰的限制,例如, GPS 卫星在 L1 发射 C/A 码信号功率约为 27 W(14.3 dBW),穿越浩渺太空到达地球表面的 GPS 信号功率密度约为每平方米 -131 dBW,典型微带接收天线的 C/A 码接收功率为 -154.5 dBW,但对于 20 MHz 带宽的前级滤波带宽来说,引入噪声为 -128 dBW(GPS 的本底噪声谱密度都是 -201 dBW/Hz),所以说典型的 GPS 接收机接收到的信号功率(power of signal)比噪声功率(power of noise)还弱 26.5 dB,即信号比噪声功率还要弱 450 倍,信号是完完全全被噪声湮没的^[7]。这导致功率仅为 1 W 的机载干扰机就可阻碍 85 km 处远的 GPS 接收机锁定 GPS 信号。此外,所有 GNSS 提供的公开服务(open service, OS)的空间信号(signal in space, SIS)接口控制文档(interface control document, ICD)都是彻底透明的,极易受到 IJS,下面分别为 IJS 的近期典型实例。

(1) GNSS 干扰(光平方 4G-LTE 网络干扰)

GNSS 干扰(interference)导致 GNSS 接收机载噪比降低,从主观意愿上可分为无意干扰和有意干扰。无意干扰是其他 UHF、VHF、VOR 和 ILS 等工作频段对 GNSS 工作频点的影响;而有意干扰是为特定的目的人为生成的连续波或宽频噪声。从干扰信号特征分为连续波、宽频和脉冲干扰三种。4G-LTE 长期演进(long term evolution)计划是实现 3G 技术向 4G 技术平滑过渡的无线宽带网络技术。美国新兴移动运营商光平方公司(LightSquared)得到美国联邦电信委员会(Federal Communications Commission, FCC)批准:在 GNSS 的 L1(1 559~1 610 M)的紧邻频带(1 525 ~1 559 M)建设四万个地面基站进行手机通信的计划。但测试表明原型地面发射器的干扰会严重削弱航空和各种 GNSS 接收器的性能,构成对 GNSS 信号的潜在干扰。2012 年 2 月美国国家天基 PNT 执行委员会要求 FCC 撤销对光平方公司 4G-LTE 网络的批准并最终如愿。光平方干扰问题表明:在频率资源日趋紧张的条件下,通信与导航的兼容与协调已经成为必须解决的问题。卫星导航服务固有的脆弱性有可能制约或影响卫星导航服务的发展,这对我国 BDS 及其应用的发展具有重要的参考与借鉴意义。

(2) GNSS 阻塞(美国纽瓦克机场和海湾战争)

GNSS 阻塞(jamming)导致 GNSS 接收机工作在饱和状态,是指相对 GNSS 信号来说功率强得多,远远超过接收机正常的线性放大范围,导致接收机无法正常工作的其他信号。2009 年 11 月美国新泽西州纽瓦克机场的安装的局域增强系统(local area augmentation system, LAAS)发现每天都有不明射频干扰 GNSS 接收机,导致出现短暂的中断,并出现处理异常,美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration, FAA)经过 3 个月的调查后发现干扰来源于乘客随身携带的“个人隐私设备”(有个卡车司机为防止 GNSS 在卡车上的定位设备暴露个人隐私,每天会开着装载着小功率 GNSS 干扰发