



后 GPS 和 GPS 后时代的 卫星导航系统

施许立 景贵飞 崔君霞 著



科学出版社

后 GPS 和 GPS 后时代的 卫星导航系统

施浒立 景贵飞 崔君霞 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

基于 GPS 类卫星导航系统的发展和新导航技术的出现, 本书率先提出和探讨了后 GPS 和 GPS 后时代的卫星导航系统向何处去的发问. 内容涉及卫星导航和卫星通信的融合技术; 空间卫星导航通信与地面移动通信、局域传感网的合作和增强技术; 多频多星多模卫星通信导航系统的兼用和互用技术; 室内和室外的无缝导航技术, 以及入向通信定位和双向通信定位新导航体制等.

本书可供从事和关注导航和通信的本科生、研究生、科技工作者在开展导航和通信技术学习、研究、开发和应用时参阅.

图书在版编目(CIP)数据

后 GPS 和 GPS 后时代的卫星导航系统/施浒立, 景贵飞, 崔君霞著.
—北京: 科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-033931-7

I. ①后… II. ①施… ②景… ③崔… III. ①卫星导航-导航系统-研究 IV. ①TN967.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012) 第 054890 号

责任编辑: 李 欣 赵彦超 / 责任校对: 林 梅

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 陈 敬

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>

北京彩虹伟业印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 5 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2012 年 5 月第一次印刷 印张: 16 3/4

字数: 357 000

定价: 78.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

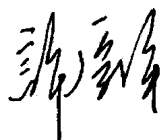
序

卫星导航技术已经发展了近半个世纪, 其中美国于 1973 年开始至 1992 年建成的全球卫星定位系统 GPS(global positioning system) 最为成功. 它具有覆盖范围广、定位精度高、功能全和性能优良等优势, 至今已在全球众多地区、众多领域得到广泛应用, 甚至走进亿万家庭的日常生活之中, 成为导航、定位和授时历程中新的里程碑, 成为造福人类的航天工程之一.

正当 GPS 全球卫星定位系统备受青睐、如日中天之际, 施浒立研究员及景贵飞、崔君霞博士提出后 GPS 时代和 GPS 后时代的卫星导航定位技术发展向何处去的发问和命题, 引人思考, 耐人寻味, 很有意义!

施浒立研究员近年曾两度来武汉作学术交流, 第一次是 2009 年 2 月. 他在全测地会议上交流了题为“毫米量级位移形变实时精密监测方法”的学术报告. 第二次是 2010 年 8 月, 他在中国科学院测量与地球物理研究所召开的卫星导航定位学术交流会上作了“有关地壳监测的几点想法”的学术报告, 提出了“入向卫星导航定位监测技术”以及“双向卫星导航定位监测技术”的设计理念和办法, 引起广泛关注.

施浒立等在从事卫星导航技术研发过程中, 不断地思考, 不断地求索, 这种勇于探索、敢于探索的精神面貌令人欣喜. 最近, 他们把有关工作整理成书, 衷心祝愿他们勇往直前, 有更多的探索与收获.



(許厚澤)

2011 年 7 月于武汉

前 言

记得在 2005 年参与国家中长期科技发展规划起草时, 我认识了景贵飞博士, 出于对卫星导航的关注和热爱, 我们常常在一起交流各自的想法, 共同探讨我国卫星导航的发展. 那时, 我们已直面世界即将出现的多卫星导航系统, 提出了建成兼容多系统多种信号的多模增强系统的探索和利用问题; 那时也意识到了卫星导航与通信相结合的重要性, 希望能探索基于通信技术基础上的导航技术等.

后来, 他具体从事中欧 Galileo 卫星导航系统的国际合作, 我从事基于通信卫星的转发式卫星导航系统的研发, 各自都很忙, 但由于都是从事卫星导航事业, 所以碰面以后, 总是会讨论一些卫星导航中的技术问题, 如室内定位、室内外无缝导航定位、网络定位、导航与通信的融合、手机定位等, 甚至还讨论卫星导航的某些局限性, 想象互联网时代的导航定位技术等.

崔君霞博士是我的学生, 自 2004 年她被保送到中国科学院国家天文台攻读博士学位以来, 一直从事导航与通信融合的研究, 曾作为主要的研究人员参与基于同步通信卫星的转发式卫星导航系统的研发; 利用小倾角倾斜同步轨道 (slightly inclined geostationary orbit, SIGSO) 卫星和微小终端实现定位信息的短信回传和低信息速率语音双向传输的研发. 获得博士学位以后, 她开始对导航信号体制和导航通信信号体制融合进行研究.

我们老、中、青三代人, 通过这些有益的探索和讨论, 加上平时工作的积累, 丰富了我们对于卫星导航的认识, 萌发了一些对卫星导航的想象. 为了让已有的想法和知识能有益于卫星导航和卫星通信融合技术的发展和繁荣, 2008 年, 我们有了把相关内容整理成书的想法, 希望借此能与更多的同仁进行广泛的交流, 共同开展导航定位融合课题的探索. 时至今日, 经过三年的努力, 当我和景贵飞博士、崔君霞博士共同完成本部专著时, 我们由衷地高兴, 因为在本书中讲述了我们三人对后 GPS 时代和 GPS 后时代卫星导航的某些想法. 虽然这些想法还停留在理念阶段或处于初步试验期间, 但我们希望通过与大家的交流和讨论, 能对卫星导航和卫星通信融合的发展, 以及对微小型卫星通信终端的应用起到一些促进作用.

全书分五篇共 11 章.

第一篇为引论, 其中第 1 章是对卫星导航技术发展历程的回眸与思考, 分别介绍了卫星导航的兴起、Geostar 系统的昙花一现和 GPS 的兴旺发展情况. 第 2 章提出了后 GPS 时代和 GPS 后时代的卫星导航系统向何处去这一重要命题, 为了探讨和解决这一方向性问题, 在第 2 章里介绍了多模卫星导航定位系统的兼用和

互用, 转发式卫星导航系统原理试验验证成功的情况, 导航通信天地系统间的合作趋势, 低信息速率卫星短信通信技术的研发, 以及双向卫星通信定位融合系统的研发情况。

第二篇提出了卫星导航通信融合系统。全篇有两章, 其中第 3 章介绍了“导航通信融合”的设计理念, 从现有卫星导航通信集成系统的基础出发, 探讨了导航通信融合的系统设计理念, 并介绍了导航通信融合系统的功能要求。第 4 章阐述了导航通信融合的一体化信号体制设计, 包括网络结构、多址方式、扩频体制、低信息速率传输、信道编码、复合电文、调制方式和导航通信融合的一体化信号。

第三篇为天地合作的多频通信导航融合系统, 全篇也分两章。第 5 章介绍了地面网络定位情况, 主要包括地面局域无线传感网络定位原理、地面移动通信网定位原理以及提高地面移动网定位精度的方法。随后, 重点介绍了用地面移动网辅助 GPS(A-GPS) 的情况。第 6 章主要阐述了我们研究探索的天地合作的导航通信系统的情况, 内容为: 由卫星辅助地面移动网基站的时间同步, 由地面基点监测误差提高精度的差分技术, 由卫星和地面移动网组合的卫星辅助手机定位系统 (A-MPS), 以及天地合作无缝定位导航通信系统。

第四篇介绍了双向卫星通信导航融合系统, 全篇共分三章。其中第 7 章介绍了双向卫星通信导航融合系统结构, 包括双向卫星传输网的网络结构, 双向卫星传输链路结构, 以及双向卫星通信定位融合系统组成型式例。第 8 章重点介绍双向卫星通信导航融合传输链路, 包括出局卫星传输链路和入局卫星传输链路。还结合双向转发式卫星定位系统的实际情况进行了链路的实际计算, 并对传输链路的特性进行了分析。第 9 章介绍了双向卫星通信导航融合系统测量传输方程和模型, 包括伪距测量方法和模型、定位测量方法及模型、卫星轨道测量方法及模型、测速测量方法及模型、授时测量方法及模型、姿态测量方法及模型, 以及在双向通信导航融合系统中较有特色的比对测量方法。

第五篇为最后篇, 也有两章。第 10 章对双向卫星导航通信融合系统的性能进行了分析。在测量算法原理和模型分析的基础上, 分析了时延误差、伪距测量精度、定位精度、测速精度、测姿精度和频谱密度, 以及通信速率、用户量的初步估算等, 最后还介绍了邻星协调中对频谱密度的相关规定要求。第 11 章是最后一章, 讨论了通信导航融合系统的特色和长处, 展望了新系统的应用前景以及它能否成为普适定位基石的可能性。

在探索的过程中, 我们经常请教有关专家, 这里衷心感谢帮助我们的专家, 他们有: 陈吉斌、孔宪正、陆绥熙、柯树人、杨大宝、谢有才、孙传礼、阎跃鹏、汪立新、白明、冷铁铮、王晓杰、梁夫彘、肖巍等。特别是陈吉斌研究员和孔宪正研究员, 他们是我在石家庄通信研究所工作时的前辈与领导, 曾为我国通信事业的发展做出过卓越的贡献, 贡献了毕生的智慧和精力。

2010年本书成稿以后,作为研究生教材试用,学习过程中经过与学生共同讨论,年轻的研究生们再次整理了书稿,其中胡超整理了第1章,万庆涛整理了第2章,范江涛整理了第3章,张杰整理了第4章,刘成整理了第5章,杜晓辉、胡正群整理了第6章,张杰、庞峰整理了第7章,范江涛、李婧华整理了第8章,王萌整理了第9章,季海福、张丽荣整理了第10章,王晓岚整理了第11章.对学生们认真的学习和细致的工作,表示谢意.

书稿最后请过静珺、吕子平、邓中亮、蔚保国等教授审阅,在此深表感谢.

本书得到国家重点基础研究发展计划(973)项目:基于通信卫星的卫星导航系统的基础研究和理论探索(2007CB815500),以及国家自然科学基金项目:导航通信一体化的信号结构研究(61001109)、GNSS信号用于双/多基地无源雷达目标探测方法研究(61162007)、多径干扰下新一代导航信号无模糊精密跟踪算法研究(61062003)资助.

封面图片为中国卫星通信集团公司的中星10号卫星.

由于作者所接触工作的局限性,实际经验积累不足,知识又有欠缺,所以本书中一定存在着许多不足或疏漏之处,敬请专家和读者不吝指正.

施浒立

2011年5月1日

目 录

序 前言

第一篇 引 论

第 1 章 卫星导航技术发展历程的回眸与思考	3
1.1 卫星导航的兴起	3
1.2 Geostar 系统的昙花一现	4
1.3 GPS 的兴旺发达	5
参考文献	6
第 2 章 卫星导航系统的发展向何处去	8
2.1 多模卫星导航系统的兼用和互用	9
2.2 转发式卫星导航系统原理性验证成功	10
2.3 导航通信天地系统间的联姻	13
2.3.1 LBS 服务系统	14
2.3.2 卫星导航与地面移动通信网的合作与互补	15
2.4 双向卫星通信导航系统的萌动	17
2.4.1 研发低信息速率卫星短信通信技术	17
2.4.2 创新双向卫星通信导航融合系统	17
参考文献	19

第二篇 通信导航融合系统

第 3 章 通信导航融合的系统设计理念和功能	25
3.1 通信导航融合的系统设计理念	25
3.2 天地系统合作的系统设计理念	26
3.3 采用双向链路的系统设计理念	26
3.4 新系统功能	27
参考文献	28
第 4 章 通信导航融合信号体制设计	30
4.1 世界上典型卫星导航系统信号体制概述	30

4.1.1	GPS 的信号体制介绍	30
4.1.2	GLONASS 的信号体制介绍	31
4.1.3	GALILEO 的信号体制介绍	32
4.2	网络结构和多址方式	32
4.2.1	网络结构	32
4.2.2	多址方式	35
4.2.3	信道分配方式	36
4.3	超宽带伪码扩频测距体制	37
4.3.1	香农信道公式	37
4.3.2	最佳相关接收	39
4.3.3	扩频系统的分类	39
4.3.4	干扰容限	41
4.3.5	关于扩频码速率的考虑	41
4.3.6	伪随机码序列的选取	41
4.3.7	扩频系统的特点	42
4.3.8	以短精码为例分析相关函数	42
4.4	低信息速率传输	43
4.4.1	信息传输速率的选择	44
4.4.2	应用例	47
4.5	信道编码	48
4.5.1	传输信道中常见的错误分析	48
4.5.2	差错控制方式	49
4.5.3	信道编码方式	50
4.6	通信导航复合电文	51
4.7	通信导航融合信号结构	52
4.7.1	导航和通信融合的信号结构设计理念	52
4.7.2	导航和通信融合的信号结构设计	53
4.8	调制方式	57
	参考文献	58

第三篇 天地合作的多频通信导航融合系统

第 5 章	地面网络定位情况	63
5.1	地面移动通信和广播网络的定位技术	63
5.2	地面局域无线通信和传感网络的定位技术	66

5.3	地面网络的定位原理	69
5.3.1	传播模型	69
5.3.2	室内外网络定位基本原理	70
5.4	局域无线网络定位的典型应用例	78
5.4.1	基于 Wi-Fi 的室内定位系统	78
5.4.2	ZigBee 室内定位技术	82
5.4.3	其他室内定位技术	86
5.5	地面移动通信网络辅助 GPS 技术 (A-GPS)	87
5.5.1	地面移动通信网络辅助 GPS 的设计理念	88
5.5.2	地面移动通信网络辅助 GPS 的长处	89
	参考文献	89
第 6 章	天地合作的导航通信系统	92
6.1	由卫星授时辅助地面移动通信网基站的时间同步	92
6.1.1	地面移动通信网基站的时间同步	92
6.1.2	由导航卫星授时实现地面移动通信网基站的时间同步	95
6.1.3	利用通信卫星授时实现基站的时间同步	99
6.2	由地面基站监测特征量的差分改正系统	102
6.2.1	用地面基站实现伪距和位置差分改正	102
6.2.2	用地面基站实现气压和其他参量差分改正	107
6.3	由卫星辅助地面移动网的组合定位系统	115
6.3.1	用卫星信号增强地面移动网的定位方法	115
6.3.2	基准分布的改善	199
6.4	天地系统合作导航通信系统	121
6.4.1	电子地图的室外室内标注	121
6.4.2	室外导航通信系统和定位算法	124
6.4.3	室内通信定位系统和定位算法	128
	参考文献	135

第四篇 双向卫星通信导航融合系统

第 7 章	双向卫星通信导航融合系统结构	141
7.1	双向卫星传输网的网络结构	141
7.2	双向卫星通信导航融合系统的组成	142
7.2.1	空间段 (卫星)	142
7.2.2	地面站	152

7.2.3 终端网	154
7.3 双向卫星通信导航融合传输链路	156
7.3.1 入局卫星通信导航融合链路组成	158
7.3.2 出局卫星通信导航融合传输链路组成	158
7.4 双向卫星通信导航融合系统的组成型式例	159
参考文献	162
第 8 章 双向卫星通信导航融合传输链路	164
8.1 入局卫星通信导航融合传输链路	165
8.1.1 入局卫星通信导航融合链路传输能力	165
8.1.2 通信导航中心站天线口径选择	166
8.1.3 入局卫星通信导航融合链路信号扩频带宽的选择	168
8.1.4 卫星参数对入局通信导航融合链路的影响分析	171
8.1.5 入局卫星通信导航融合链路预算	174
8.1.6 入局卫星通信导航融合链路的特点	177
8.2 出局卫星通信导航融合传输链路	178
8.2.1 通信导航融合用户终端接收能力	179
8.2.2 出局卫星通信导航融合下行链路分析	179
8.2.3 出局卫星通信导航融合上行链路分析	180
8.2.4 出局卫星链路融合信号扩频带宽的选择	180
8.2.5 出局卫星通信导航融合传输链路预算	181
8.2.6 出局卫星通信导航融合链路的特点	184
8.3 双向卫星通信导航融合传输链路特性分析	184
参考文献	185
第 9 章 双向卫星通信导航融合系统测量传输模型	187
9.1 伪距测量方法及模型	187
9.1.1 伪距测量方法及模型	187
9.1.2 采用测载波相位和相位差测伪距的方法及模型	191
9.1.3 辅以载波相位测量的组合测伪距的方法及模型	191
9.2 定位测量方法及模型	192
9.2.1 出站定位测量原理	192
9.2.2 入站定位测量原理	193
9.3 卫星轨道测量方法及模型	195
9.3.1 转发式卫星测轨原理概述	195
9.3.2 虚拟测轨网	196
9.4 测速方法及模型	199

9.4.1	转发式双向卫星通信导航融合下行载频生成原理	199
9.4.2	双频频差测速方案和差频多普勒测速原理	203
9.5	授时方法及模型	205
9.5.1	转发式卫星导航授时概述	205
9.5.2	转发式卫星时间传输测量方法	206
9.5.3	讨论	219
9.6	姿态变化监测算法的原理和模型	210
9.7	比对测量方法及模型	210
9.7.1	双向时间比对测量方法求时钟差	211
9.7.2	入向基线端点变化相对比对测量方法	212
9.7.3	用户单点震动相对比对测量方法	214
9.7.4	实时差分应用比对测量方法	216
9.7.5	多点误差闭合比对测量方法	218
9.7.6	多频比对测量方法	218
9.7.7	实现发指令、遥控、遥测	218
	参考文献	219

第五篇 讨论和展望

第 10 章	系统性能分析	223
10.1	时延误差分析	223
10.2	测距精度(分辨率)分析	227
10.2.1	伪距观测和伪距变化相对测量精度分析	227
10.2.2	载波相位测量精度分析	230
10.3	测点定位精度分析	230
10.4	测速精度分析	233
10.5	测姿精度分析	234
10.6	用户量的初步估算	234
10.7	满足邻星协调中有关规定的分析	235
10.7.1	国际电联对于上行站载波的限制	235
10.7.2	国际电联对到达地面的功率频谱密度的限制	237
	参考文献	239
第 11 章	新系统的特色和应用展望	242
11.1	新系统的特色	242
11.1.1	双向卫星通信导航融合系统的特点和长处	242

11.1.2 普适定位的要求和特点	244
11.2 通信和导航融合系统的应用展望	246
11.2.1 高精度测量领域	246
11.2.2 应急救援领域	247
11.2.3 设备实时监测领域	249
11.2.4 智能交通领域	250
参考文献	252

第一篇 引 论

第 1 章 卫星导航技术发展历程的回眸与思考

1.1 卫星导航的兴起

人类早期的导航是目视导航,靠人眼观测有规律运动的目标来确定自身的位置及运行方向,是直接利用纯自然现象——星座和太阳方位的变化来进行的,如用北斗星指引航向;利用日起日落安排生产劳作和生活起居.在其后时期,人们开始利用专用的人造系统来满足定位导航的需要,如利用灯塔的光作为标志导航.但早期的定位导航由于靠目视观测,易受天气影响,不能全天候和全天时导航.

第二次世界大战前后,开始出现利用无线电波的导航系统,这时,无线电载波上已调制有信息,从而使导航的质量发生了根本性的变化.利用无线电技术实现导航定位是具有历史意义的发展,如广泛使用的 Loran-C^[6,7]等无线电导航系统,已能实现全天候导航.

1957年10月4日,苏联发射了世界上第一颗人造卫星以后,苏联和美国的科学家产生了把无线电导航信源从地面导航塔搬到卫星上去的想法^[2,21].这样便解决了建设无线电导航塔高度受限,造成导航覆盖范围较小的问题.由于卫星覆盖范围大,所以维持一定的卫星数量,并采用广播式通信方式,把测距码和导航电文广播至地面,便可以实现覆盖全球的导航定位;还可以把两维平面定位推进到可以实现三维定位,从而使无线电导航的功能与精度发生了根本性的变革.

最早期的卫星导航系统中采用了多普勒(Doppler)原理,即测量卫星信标的多普勒频移,对时间积分用以测定观测点的位置,但这类系统测量精度较差,不能全时连续定位.1960年4月美国发射了世界上第一颗导航卫星“子午仪(TRANSIT)”1B,1964年7月组成了美国海军导航卫星系统 NNSS(Navy Navigation Satellite System)^[2,3],为核潜艇和各类海面船舰提供全天候的导航定位服务.1967年开始民用,较广泛地应用于海上商船导航.系统的主要参数见表 1.1.

1967年11月27日,苏联发射入轨了第一颗导航卫星“宇宙-192”.1979年前苏联建成第一代蝉(Tsikada)卫星导航系统^[4,21].系统由四颗导航卫星组成,卫星位于高度约为1000km的圆轨道上,轨道面倾角 83° ,运行周期为106min,卫星轨道面沿赤道面均匀分布,导航卫星在整个寿命期内不间断地发射频率为150MHz和400MHz的无线电导航信号.它允许用户平均每1.5~2h与导航卫星中的一颗进行一次无线电联系,并在5~6min长的导航联络中确定自身位置的坐标.那时卫星

表 1.1 NNSS 系统的主要参数

项	参数
轨道	近极圆轨道
轨道高度	约 1000km
周期	约 100min
卫星数	6 颗
频率	150MHz, 400MHz
调制方式	相移键控调制 (PSK 调制)
定位方式	利用多普勒效应定位
用途	船舶导航, 测地基准点

定位均方根误差已能达到 250~300m。在后来的“蝉”系统卫星上还装备了用于发现发生灾难目标的测量接收机。用户设备上装备有专用的无线电示位标, 可以发射 121.5~243MHz 和 406MHz 频率的灾难信号, 这些信号被系统的卫星接收后传输到专门的地面站, 在那里计算出发生灾难目标 (船、飞机等) 的准确位置。装备了灾难发现设备的卫星组成了“卡司帕司”(COSPAS) 系统, 后来它和美国-法国-加拿大的系统“萨尔萨特”(SARSAT) 共同形成了统一的发现灾难和救助的服务系统, 近年来, 已挽救了数千条生命^[5]。

上述两类初期的卫星导航系统的不足之处主要有两点: 一点是信号只能间断可用, 因为系统只有 5~7 颗低高度轨道运动卫星, 对地球上的一点来说, 会经常出现没有卫星信号覆盖的时间段, 这对于长期性的测量、船舶导航以及大地测量等还可以用, 但对于像飞机、火箭等高速运行载体的导航, 则是致命的缺陷, 甚至完全不能使用; 另一点是由于系统对用户的速度敏感不足, 仅能二维定位, 因此不适合航空等多种领域的应用, 但作为卫星导航系统的先驱, 它功不可没。

从对早期卫星导航系统的回眸中, 可以看到无论在定位、授时或完成搜救功能时, 卫星导航系统都已成功地利用了通信传输中的有特色的技术和方法, 如相移键控调制技术等。因此说卫星导航一开始就与通信结了缘, 也正是卫星通信技术的进步一直促进着卫星导航定位系统的发展, 所以说, 导航与通信的姻缘关系源远流长。

1.2 Geostar 系统的昙花一现

随着卫星技术的发展, 20 世纪 60 年代出现了利用同步卫星的卫星通信技术。那时, 科学家就想到了利用同步通信卫星来实现导航, 改变类子午仪卫星导航系统只能在运动卫星过境时段内才能实现定位这一状况。为此美国研发和建设了 Geostar 卫星定位系统, 欧洲建成了 Locstar 卫星定位系统, 我国也研制了“北斗一号”卫星定位系统^[1,6,7]。遗憾的是, 这类系统采用了应答式通信方式, 由导航中心站发布信