

GPS 动态滤波的 理论、方法及其应用

江苏科学技术出版社

Theory and Method of GPS
Dynamic Filtering and its Application

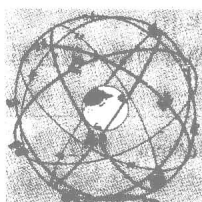
万德钧 房建成 王 庆 著



Theory and Method of GPS Dynamic Filtering and its Application

GPS 动态滤波的理论、 方法及其应用

万德钧 房建成 王庆 著



江苏科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

GPS 动态滤波的理论、方法及其应用/万德钧等著.
南京:江苏科学技术出版社,2000.12

ISBN 7-5345-3239-6

I. G... II. 万... III. 全球定位系统(GPS)-滤波技术 IV. P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 58284 号

GPS 动态滤波的理论、方法及其应用

著 者 万德钧 房建成 王 庆
责任编辑 宋 平

出版发行 江苏科学技术出版社
(南京市湖南路 47 号,邮编:210009)
经 销 江苏省新华书店
照 排 南京展望照排印刷有限公司
印 刷 扬州印刷厂

开 本 850mm×1168mm 1/32
印 张 9.25
字 数 230 000
版 次 2000 年 12 月第 1 版
印 次 2000 年 12 月第 1 次印刷
印 数 1—1 000 册

标准书号 ISBN 7-5345-3239-6/TN·55
定 价 35.00 元

图书如有印装质量问题,可随时向我社出版科调换。

致读者

社会主义的根本任务是发展生产力,而社会生产力的发展必须依靠科学技术。当今世界已进入新科技革命的时代,科学技术的进步不仅是世界经济发展、社会进步和国家富强的决定因素,也是实现我国社会主义现代化的关键。

科技出版工作肩负着促进科技进步,推动科学技术转化为生产力的历史使命。为了更好地贯彻党中央提出的“把经济建设转到依靠科技进步和提高劳动者素质的轨道上来”的战略决策,进一步落实中共江苏省委、江苏省人民政府作出的“科技兴省”的决定,江苏科学技术出版社于1988年倡议筹建江苏省科技著作出版基金。在江苏省人民政府、省委宣传部、省科委、省新闻出版局负责同志和有关单位的大力支持下,经省政府批准,由省科学技术委员

会、省出版总社和江苏科学技术出版社共同筹集,于1990年正式建立了“江苏省金陵科技著作出版基金”,用作支持自然科学范围内的符合条件的优秀科技著作的出版补助。

我们希望江苏省金陵科技著作出版基金的建立,能为优秀科技著作在江苏省及时出版创造条件,以通过出版工作这一“中介”,充分发挥科学技术作为第一生产力的作用,更好地为我国社会主义现代化建设和“科技兴省”服务;并能带动我省科技图书提高质量,促进科技出版事业的发展 and 繁荣。

建立出版基金是社会主义出版工作在改革中出现的新生事物,期待得到各方面给予热情扶持,在实践中不断总结经验,使它逐步壮大和完善。更希望通过多种途径扩大这一基金,以支持更多的优秀科技著作的出版。

这次获得江苏省金陵科技著作出版基金补助出版的科技著作的顺利问世,还得到江苏联合信托投资公司的赞助和参加评审工作的教授、专家的大力支持,特此表示衷心感谢!

江苏省金陵科技著作出版基金管理委员会

序

车辆作为交通工具,在人们日常生活中起着重要的作用。然而,全球因公路堵塞造成的直接和间接的经济损失惊人。在高速公路上,恶劣气象条件下较低的能见度常常引发交通事故;在市区内,许多公共服务和重要车辆,为了提高效率和保障安全,需要进行导航、监控、管理和调度。因此,对车辆进行导航,实现交通运输管理的信息化和智能化势在必行。

在国外,随着 ITS(智能运输系统)技术的发展,道路堵塞和交通管理得到了很好的改善,目前,我国 ITS 技术的研究与应用已经受到社会的广泛关注。车辆导航定位技术是 ITS 系统的核心部分,是其他各种功能应用的基础。GPS 以及基于 GPS 的组合导航系统是目前最实用、最有发展前途的车辆导航手段。

GPS 动态滤波理论与方法是在增加硬件配置的条件下,运用先进的滤波技术和软件方法提高动态定位精度的经济、有效的途径。GPS/DR 和 GPS/DR/MM 组合导航定位系统运用了系统集成与滤波方法提高 GPS 定位的准确性、连续性与可靠性。多年来,作者不仅在上述领域内进行了卓有成效的理论研究工作,而且还将理论成果应用于实际工程项目中。这本专著在理论上属导航学科的前沿,在技术上属国内车辆导航的先驱。在这一领域的研究成果不仅能够带来巨大的经济效益和社会效益,而且还具有广阔的应用前景。

中国工程院 院士
东南大学 校长

顾冠群

2000 年 11 月

前 言

由美国国防部于 1973 年提出的全球定位系统 (Global Positioning System, 简称 GPS) 经过历时二十余年的分阶段建设, 终于在 1993 年建成。自投入使用以来, GPS 在导航与定位技术领域内, 以其全球性、全天候、低成本等优点显示出强大的生命力与竞争力。目前, GPS 的应用已扩展到海、陆、空、天各种军、民用领域, 包括车船导航与定位、大地测量、野外勘察、海洋测量、石油勘探、管道与电缆铺设、飞机导航与进场着陆、空中交通管制、弹药准确投掷、导弹制导与定位、空间飞行器的精密定轨、各种运载器的航姿测量以及人们的日常生活。

GPS 也有其致命弱点——动态性能较差、GPS 卫星发射的信号受阻挡后引起失锁和定位精度尚不敷各种需求等。因此, GPS 在某些场合的应用, 例如高动态的运载器、

行驶在繁华城市与隧道中的车辆导航和不间断的精确定位,还受到限制。因此,虽然 GPS 的新应用层出不穷,接收器产品不断推陈出新,但要进一步高效、经济地推广使用 GPS,还有不少研究课题有待解决。

随着全球经济高速增长,交通运输常常跟不上时代发展的步伐。据资料报道,全世界公路堵塞造成的直接和间接的经济损失惊人,仅美、日、法三国每年的此类损失超过 11 000 亿法郎,德国每年因汽车行错路线而造成的经济损失达几十亿美元;在高速公路上,恶劣气象条件下较低的能见度常常引发交通事故,威胁到公路用户的安全;在市区,许多公共服务车辆(如公交车、出租车、救护车、消防车等)及警车、银行运钞车等特种车辆需要特别服务。为提高效率、保障安全,就需要发展智能运输系统(Intelligent Transportation System,简称 ITS),实现对车辆的导航、监控、管理和调度。

提高 GPS 的定位精度既可着眼于改进硬件,也可从开发先进的软件入手。作者基于国内的现有条件,倾向于运用先进的软件和系统集成技术来提高 GPS 的使用性能,扩大其应用范围。

车辆在行进中的定位属于动态过程,在 GPS 动态定位数据中存在着影响定位精度的随机误差。国内外有些学者在将最优估计方法应用于 GPS 动态滤波方面已做了不少的研究工作,但是有关如何更合理、更准确地建立车辆的运动模型,提高滤波器的动态性能以适应车辆的高机动性及简化整个滤波模型,提高实时性等方面,尚未取得实

质性进展。

系统集成在导航领域中的发展即为组合导航。组合导航的基本含义为利用计算机将各子系统(或称传感器)有机地结合在一起,运用最优估计理论与方法进行多种导航信息的综合处理,包括对未来状态随机信号的预测、随机信号与随机噪声的分离和对分离后的随机信号的检测等。基于速率陀螺仪与里程表信息的航位推算(Dead Reckoning,简称DR)和GPS的组合导航系统,即GPS/DR系统,可以弥补GPS信息在短期内因受高楼、隧道遮挡而无法正常定位的缺陷,又可以避免DR信息因陀螺漂移而产生误差积累,从而组成经济、实用的车辆导航系统。对一些定位精度要求特别高的车辆导航系统,单独使用GPS定位和使用GPS/DR组合定位时,都难以保证车辆位置准确地显示在监控用或制导用电子地图上,将地图匹配(Map Matching,简称MM)技术与GPS/DR集成在一起,构成GPS/DR/MM组合定位系统,可实现连续、可靠、精确地定位。GPS在车辆导航中的应用是20世纪90年代开始兴起的,基于GPS的车辆组合导航及其动态滤波的研究方兴未艾,有关研究成果很少见诸报道。

为了适应我国发展ITS的需要,提高GPS的使用效能,研究动态滤波理论及方法在导航领域内的应用,作者近年来申请并承担了若干项GPS动态滤波、车辆组合导航与定位方面的研究课题,其中包括:江苏省科委批准的应用基金课题“车船卫星导航与监控系统”、教育部批准的高新技术重点研究项目“基于GPS/DR/MM/SMS的车辆导航

技术研究”、公安部交通管理科学研究所委托开发项目“基于 GPS/DR/MM 的车辆电子地图与导航系统”,有些研究还作为东南大学“211”工程的子项目“车辆运行信息采集、监控及分析系统”得到资助。

几年来,经过作者所在课题组全体成员的艰辛努力,研究工作取得了可喜的成果,其中理论成果获教育部 1998 年科技进步三等奖,研制的 Track-3 型 GPS/DR 车载组合定位系统于 1998 年底通过江苏省科委主持的技术鉴定。

美国政府于 2000 年 5 月 1 日宣布取消 SA (Selective Availability) 政策后,作者曾于同年 5 月 5 日进行了测试条件与一周前相同的实验,结果表明:SA 政策取消后有利于消除 GPS 定位误差中的一部分,另一部分误差无法消除;取消 SA 政策后,采用本书提出的强跟踪卡尔曼滤波器后的定位精度比不采用滤波时提高 48%~74%(仿真结果)。因此,本书提出的动态滤波理论与方法,在 SA 政策取消后对 GPS 导航应用依然具有重要的指导意义与参考价值。

全书共分 8 章。第 1 章介绍 GPS 的组成和定位基本原理。第 2 章针对 GPS-OEM 系统所存在的冗余观测信息,深入讨论了动态系统的冗余度、冗余理论及其应用,提出了对观测信息进行粗差探测、剔除和提高系统可靠性的原理和方法。第 3 章结合具有机动载体的动态滤波问题,从提高滤波器的动态跟踪能力、滤波精度和鲁棒性出发,提出了改进的自适应扩展卡尔曼滤波、改进的强跟踪卡尔曼滤波器以及带有速度观测量的 GPS 动态滤波方法。第 4 章介绍适用于车辆导航的 GPS/DR 组合系统的基本原理

与一般卡尔曼滤波算法。第 5 章专门讨论了 DR 系统和 GPS/DR 组合导航系统的非线性自适应卡尔曼滤波模型,给出了仿真和实验结果。第 6 章论述了 GPS/DR 组合导航系统的最优综合校正问题,研究了联合卡尔曼滤波及其最优综合算法,设计了 GPS/DR 组合系统最优综合的联合卡尔曼滤波器。第 7 章介绍了作者所在课题组研制成功的 Track-3 型低成本 GPS/DR 车载组合定位系统及其联合卡尔曼滤波算法,分析了系统跑车试验的结果。第 8 章在介绍地图导航数据的建立和地图匹配方法的基础上,给出了 GPS/DR/MM 的降阶卡尔曼滤波模型。

本书内容是课题组全体成员辛勤劳动的结晶。参加研究的有关人员除作者以外有隋绍昆、柏钢、吴秋平、傅弢、张小国、卢大伟、刘炳云、刘云、许江宁、王宁、王文珊、龚福祥、黄海华、陈晓惠等同志。作者衷心希望在本书出版之际,课题组全体成员共享研究成果推向社会的欣慰。

公安部交通管理科学研究所、国营 459 厂和深圳市恒昌通电子有限公司为 GPS/DR 组合系统定位试验给予了大力支持,在此一并表示谢意。

本书的撰写得到教育部、江苏省科委、公安部交通管理科学研究所和东南大学、江苏科学技术出版社领导的关心与支持,在此一并衷心感谢。

迄今,在国内外尚未见到有关 GPS 动态滤波方面的专门著作。作者要特别感谢江苏省金陵科技著作出版基金管理委员会为本书的顺利出版提供了资金保证、精神鼓励和技术指导。江苏科学技术出版社的宋平副编审为本书

的编辑与出版付出了辛勤的劳动,他的高度责任感、忘我的工作精神、熟练的业务技能和一丝不苟的科学态度为本书的质量提供了重要的保证,谨向他致以诚挚的谢意。

本书难免有不妥和错误之处,欢迎批评指正。

作 者

2000 年 11 月

目 录

1 GPS 卫星定位的基本原理	1
1.1 GPS 的组成	2
1.1.1 空间星座部分	2
1.1.2 地面监控部分	3
1.1.3 用户设备部分——GPS 接收机	4
1.2 GPS 信号结构及电文	6
1.2.1 GPS 的信号结构	6
1.2.2 GPS 的测距码	7
1.2.3 GPS 的导航电文	7
1.3 GPS 定位系统的坐标系及其转换	9
1.3.1 地心直角坐标系和大地坐标系	9
1.3.2 坐标系转换	12
1.4 GPS 定位原理	16
1.4.1 绝对定位原理	16
1.4.2 相对定位原理	17

2 GPS 动态滤波的理论、方法及其应用

1.4.3	载波相位测量	20
1.4.4	SA 政策	25
2	GPS 卫星定位的冗余技术与测量粗差的探测	26
2.1	冗余观测信息与冗余度	27
2.2	动态系统冗余理论	28
2.2.1	动态系统的纵向平滑	28
2.2.2	动态系统纵向平滑的函数模型	29
2.2.3	动态系统纵向平滑器的设计	31
2.2.4	动态系统纵向平滑结果的精度评定	32
2.3	GPS - OEM 卫星定位系统的冗余技术	33
2.3.1	一般性问题	33
2.3.2	纵向平滑器的设计	34
2.3.3	试验结果分析	35
2.3.4	几点结论	37
2.4	GPS 定位结果的可靠性与粗差探测	38
2.4.1	静态平差系统的可靠性	39
2.4.2	动态系统的可靠性	44
2.4.3	动态系统的粗差探测	50
2.4.4	GPS 动态定位系统的可靠性分析	55
2.4.5	GPS 动态定位系统的粗差探测	60
2.5	本章小结	62
3	GPS 动态定位的滤波理论与方法	64
3.1	引言	64
3.1.1	GPS 定位原理	64
3.1.2	GPS 定位误差	66
3.1.3	最优估计理论与方法在 GPS 动态滤波中的应用	67
3.2	运动载体动态模型的建立	67
3.2.1	CA 模型	68

3.2.2 一阶时间相关模型(Singer 模型)	68
3.2.3 机动载体的“当前”统计模型	69
3.2.4 机动载体加速度的“当前”概率密度模型	70
3.3 自适应扩展卡尔曼滤波器在 GPS 动态定位中的应用	73
3.3.1 GPS 动态定位非线性模型的建立	73
3.3.2 扩展卡尔曼滤波方程的建立	75
3.3.3 σ_x^2 、 σ_y^2 和 σ_z^2 的自适应算法	79
3.3.4 自适应算法的物理意义	80
3.4 改进的自适应扩展卡尔曼滤波算法	81
3.4.1 改进的自适应扩展卡尔曼滤波器	83
3.4.2 次优渐消因子的确定	86
3.4.3 带次优渐消因子的扩展卡尔曼滤波器在 GPS 动态定位滤波中的应用	89
3.5 一种 GPS 动态定位滤波的新方法	90
3.5.1 GPS 动态定位数学模型的建立	91
3.5.2 自适应卡尔曼滤波方程的建立	94
3.5.3 自适应算法的改进	97
3.5.4 分散卡尔曼滤波在 GPS 动态定位滤波中的应用	99
3.5.5 计算机半物理仿真结果	100
3.6 改进的强跟踪卡尔曼滤波器及其在 GPS 动态定位中的应用	103
3.6.1 强跟踪滤波器的概念	103
3.6.2 GPS 动态定位系统模型的建立及可观测性分析	104
3.6.3 改进的强跟踪卡尔曼滤波器及其应用	106
3.6.4 仿真及实验结果	108
3.7 带有速度观测量的 GPS 动态滤波方法	110
3.7.1 载体运动模型的建立	110
3.7.2 观测方程的建立及可观测性分析	111
3.7.3 引入速度观测量提高跟踪精度的理论分析	112

4 GPS 动态滤波的理论、方法及其应用

3.7.4 计算机仿真结果	116
3.8 本章小结	117
4 GPS/DR 车辆组合导航系统	119
4.1 民用车辆导航的发展与研究状况	119
4.1.1 车辆导航的目的与意义	119
4.1.2 车辆导航与定位技术的发展	120
4.1.3 国内外研究动态	122
4.1.4 车辆组合导航定位系统的主要研究内容	123
4.2 车载 GPS 组合导航系统的基本原理	125
4.2.1 GPS 接收机的性能	125
4.2.2 惯性传感器的性能	127
4.2.3 GPS/DR 组合系统的基本卡尔曼滤波模型	128
4.3 GPS/DR 组合导航方法	131
4.3.1 状态变量	132
4.3.2 转移矩阵	133
4.3.3 观测矩阵	133
4.3.4 初始化	134
4.3.5 数据的时间同步	135
4.3.6 GPS/DR 组合导航卡尔曼滤波算法实例	136
5 GPS/DR 组合导航系统卡尔曼滤波模型的建立	144
5.1 DR 导航系统原理	145
5.1.1 航位推算原理	145
5.1.2 车辆航位推算导航的误差因素及对策	146
5.1.3 DR 系统组成方案的选择	147
5.2 DR 系统非线性自适应卡尔曼滤波模型及其仿真分析	148
5.2.1 航位推算系统中非线性卡尔曼滤波模型的建立	149
5.2.2 扩展自适应卡尔曼滤波方程的建立	152