

测绘科技专著出版基金资助

自适应动态导航定位

Adaptive Navigation and Kinematic Positioning

杨元喜 著

测绘出版社

· 北京 ·

前 言

动态导航定位是航空和航天飞行器导航与定轨、航海舰船和陆地车辆导航与定位、远程武器巡航与控制的重要手段,也是一种快速的大地测量定位手段。国内外已广泛开展动态导航与定位理论、方法与器件的研制。动态导航定位的质量不仅取决于导航手段、器件的精度和可靠性,同时也取决于导航计算理论和方法的严密性、合理性和可靠性。

运动导航定位一般应用 Kalman 滤波算法。但是标准 Kalman 滤波有两个明显的缺点:一是当载体本身发生突变或产生较大扰动加速度时,载体的先验状态方程不可能可靠地预测载体的未知状态;二是 Kalman 滤波受到参数初值的影响十分明显,初值不可靠,则最终解必然受到歪曲。针对 Kalman 滤波存在的问题,许多学者提出了多种改进措施,如序贯统计检验与修复技术,单历元观测信息平差技术,附加模型参数误差补偿技术,随机模型不确定度重估技术,遗忘记忆滤波技术等。

序贯统计检验并未从本质上解决问题。首先,状态扰动和观测异常非常复杂,难以判别,而且异常误差常使统计检验量和置信域异常,以此为基础很难检验出载体的运动状态和观测信息的异常;其次,大宗动态数据流很难用统计检验法逐一加之检验和剔除,所以,序贯误差检验技术也很难进行实时导航与定位计算。

单历元平差技术是一种根本不考虑动力学模型方程信息的导航数据处理技术。它不考虑载体的运动方程所提供的先验位置或运动信息,而仅利用当前历元的观测信息。如此,载体的非平稳扰动将不对当前载体的状态估计产生明显影响,而且参数的初值也不明显影响当前状态的求解。然而,利用这种单历元平差技术不能充分利用载体的运动状态的有利信息。尤其当载体处于平稳状态时,这种数据处理技术会大大损失精度。另一方面,这种单历元平差技术要求载体每个运动历元都必须有足够的观测信息,即必须至少能同时获得 6 个以上可靠观测信息(假设只求解动态载体的三维位置和三个速度分量)。若观测信息不足,则状态参数的解算将会出现秩亏。所以这种平差技术往往造成部分历元无解。

附加模型误差补偿技术是一种解决模型误差的较理想的方法,即在模型方程中附加参数补偿模型误差对动态载体导航结果的影响。但是增加多少参数,如何增加参数均具有不确定性,且增加参数后必然增加方程解算负担。

随机模型补偿一般采用前 m 步残差序列或新息序列估计观测向量的协方差矩阵和动力模型误差协方差矩阵。这种协方差矩阵重估技术适合于载体运行的平稳状态,当载体处于高动态且具有较大扰动时,这种开窗估计法求得的协方差矩阵有时不能可靠表征动力学模型的误差状态。

基于上述问题,本书首先分析了函数模型误差补偿和随机模型误差补偿法;讨论了 Kalman 滤波的残差向量、新息向量及状态预报值残差向量的解析关系及协方差矩阵之间的关系;分析了基于新息向量、残差向量和状态预报值残差向量的自适应协方差估计存在的问题;对抗差滤波、Sage 自适应滤波进行了综合比较与分析。

创建了一套全新的动态自适应抗差滤波理论体系,研究了相应解的性质,其理论模型兼容了最小二乘平差、抗差平差、动态滤波、抗差滤波、自适应滤波。该理论与方法除自适应地平衡动态观测信息和动态模型信息对导航解的贡献外,还能自适应地估计任意历元观测量的权。在单因子自适应滤波的基础上,探讨了多因子自适应滤波和分类因子自适应滤波理论。

构造了三种动态自适应因子,即三段函数、两段函数和指数函数。它们分别适合于整体解模型和递推解模型,均能控制载体动力模型误差的影响。构造了三种不同的学习因子,即方差比函数、状态不符值函数和预测残差函数。它们分别适合于有多余观测和无多余观测情形,均具有学习功能,均能判断动态载体的运动状态。在此基础上创建了最优自适应滤波理论。

构造了 Sage 滤波与自适应滤波组合的导航解算方法,使状态在平稳运动时自适应地采用 Sage 自适应滤波法,而当载体运动不平稳时则自动采用自适应因子进行调整。

构造了基于方差分量估计的自适应滤波理论,该理论将方差分量估计与自适应滤波有机融合在一起,吸收了 Sage 滤波和方差分量估计的双重优点,保证了高精度的滤波结果。

建立了卫星轨道的自适应定轨理论与方法,提出了一种综合 Sage 滤波和自适应抗差滤波的新的轨道计算方法。它包容了几何定轨、动力学定轨和半动力学定轨方法。结果表明,新的抗差自适应定轨理论与算法不仅计算简单,而且能有效地控制观测异常和卫星动力学模型误差对卫星轨道参数估值的影响。

最后对融合导航理论进行了介绍,首先介绍了国内外常用的联邦滤波理论,讨论了我们新建立的动静态滤波技术,基于局部传感器抗差导航解的数据融合技术,基于方差分量估计的多传感器融合导航技术,自适应融合导航技术等。

本书尽管是一本研究专著,但对常用导航理论和算法具有很强的继承性和兼容性。本书适合于从事导航理论与算法研究的科研人员和工程技术人员参考,也适合于从事大地测量和导航的研究生和高年级本科生阅读。

本书在撰写过程中,得到国家杰出青年基金 NO. 49825107 和多项国家自然科学基金的大力支持,得到西安测绘研究所领导与同事们的极大支持与鼓励,郑州测绘学院的宋力杰、何海波教授阅读了原稿,并提出了许多有价值的修改意见,徐天河、高为广、崔先强、张双成、冯来平及许多其他未提及的同学和朋友给予作者许多宝贵的帮助,我的研究生们作了大量的试验、计算和文字录入工作。在此一并表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,错误、遗漏和其他不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

目 录

第一章 概论	(1)
§ 1.1 卫星导航系统的发展及其影响	(1)
§ 1.2 惯性导航	(12)
§ 1.3 融合导航	(17)
§ 1.4 导航计算方法综述	(20)
第二章 贝叶斯估计理论	(27)
§ 2.1 贝叶斯定理	(27)
§ 2.2 参数的先验密度函数	(29)
§ 2.3 参数无先验信息的贝叶斯估计	(32)
§ 2.4 参数具有先验信息的贝叶斯估计	(34)
第三章 序贯导航定位解算原理	(37)
§ 3.1 一般性描述	(37)
§ 3.2 序贯静态最小二乘参数平差	(38)
§ 3.3 序贯最小二乘条件平差	(39)
§ 3.4 具有运动方程的序贯最小二乘导航解	(42)
§ 3.5 各观测历元均有独立参数的序贯导航解	(43)
§ 3.6 部分增加参数的序贯导航解	(46)
§ 3.7 顾及状态方程及增加参数的序贯导航解	(47)
§ 3.8 顾及状态方程及减少参数的序贯导航解	(49)
第四章 Kalman 滤波	(51)
§ 4.1 滤波的基本概念	(51)
§ 4.2 动力学模型和观测模型	(54)
§ 4.3 Kalman 滤波一般解算原理	(56)
§ 4.4 Kalman 滤波新息向量及其性质	(59)
§ 4.5 噪声互相关情况下的滤波	(62)
§ 4.6 Kalman 滤波简单小结	(66)

第五章 运动载体的动态模型	(69)
§ 5.1 概述	(69)
§ 5.2 CV 模型	(70)
§ 5.3 CA 模型	(73)
§ 5.4 变加速模型	(74)
§ 5.5 基于多种观测信息的状态方程	(76)
第六章 导航解算中的误差探测、诊断与修复	(78)
§ 6.1 概述	(78)
§ 6.2 误差探测	(79)
§ 6.3 误差诊断	(82)
§ 6.4 模型修复	(85)
§ 6.5 动态 Kalman 滤波模型误差的影响	(86)
§ 6.6 Kalman 滤波异常误差检测	(90)
第七章 抗差估计理论介绍	(95)
§ 7.1 抗差估计综述	(95)
§ 7.2 抗差 M 估计原理及影响函数	(97)
§ 7.3 参数平差模型的抗差解	(99)
§ 7.4 抗差估计的验后方差-协方差估计	(101)
§ 7.5 双因子相关观测抗差估计理论	(104)
第八章 动态抗差导航解算理论	(111)
§ 8.1 概述	(111)
§ 8.2 静态序贯抗差估计解	(113)
§ 8.3 动态序贯抗差估计解	(114)
§ 8.4 抗差贝叶斯估计	(116)
§ 8.5 抗差 Kalman 滤波	(121)
第九章 随机模型误差补偿法	(127)
§ 9.1 概述	(127)
§ 9.2 附加方差协方差矩阵滤波算法	(128)
§ 9.3 模型误差协方差矩阵的自适应估计	(132)
§ 9.4 先验协方差矩阵的开窗估计法——Sage-Husa 滤波法	(136)
§ 9.5 渐消滤波原理及其理论分析	(141)

第十章	函数模型误差补偿法	(146)
§ 10.1	附加补偿参数的滤波模型	(146)
§ 10.2	附加补偿参数滤波的解算策略	(148)
§ 10.3	系统模型误差对导航解的影响分析	(150)
§ 10.4	观测模型系统误差的开窗拟合	(152)
§ 10.5	动力学模型系统误差的开窗拟合	(153)
§ 10.6	动力学模型误差的加权开窗拟合	(155)
§ 10.7	系统误差开窗拟合计算与分析	(156)
§ 10.8	GPS 导航解算中几种非线性 Kalman 滤波算法及比较	(160)
第十一章	含有色噪声的滤波	(168)
§ 11.1	白噪声和有色噪声基本概念	(168)
§ 11.2	系统噪声为有色噪声而观测噪声为白噪声情形	(169)
§ 11.3	系统噪声为白噪声而观测噪声为有色噪声情形	(170)
§ 11.4	动态定位有色噪声影响函数	(172)
§ 11.5	动态定位中的有色噪声拟合	(178)
第十二章	抗差自适应滤波	(186)
§ 12.1	概述	(186)
§ 12.2	抗差自适应 Kalman 滤波原理	(187)
§ 12.3	自适应滤波解的性质	(194)
§ 12.4	自适应滤波与 Sage 滤波组合	(199)
§ 12.5	抗差自适应滤波与渐消滤波的综合比较分析	(204)
§ 12.6	多因子抗差自适应滤波	(208)
第十三章	自适应因子模型	(216)
§ 13.1	概述	(216)
§ 13.2	自适应学习因子——模型误差判别统计量	(217)
§ 13.3	自适应因子函数及分析	(224)
§ 13.4	综合计算比较	(226)
§ 13.5	最优自适应因子求解	(229)
第十四章	抗差自适应滤波理论在导航定位中的应用	(238)
§ 14.1	抗差自适应滤波在车载 GPS 道路修测中的应用	(238)
§ 14.2	自适应卫星定轨	(240)

§ 14.3	抗差自适应 Kalman 滤波应用于机载 GPS 导航定位	(247)
§ 14.4	自适应联合平差算法	(250)
第十五章	GPS 导航若干实际问题	(255)
§ 15.1	GPS 观测函数模型	(255)
§ 15.2	双差观测值的统计模型	(261)
§ 15.3	具有整周模糊参数的动态 GPS 序贯导航解及滤波解	(268)
§ 15.4	GPS 动态测量周跳检验	(272)
第十六章	融合导航理论	(281)
§ 16.1	联邦滤波原理及其分析	(281)
§ 16.2	几种最优融合导航算法	(285)
§ 16.3	动静态滤波融合导航	(290)
§ 16.4	基于多传感器观测信息抗差估计的自适应融合导航	(294)
§ 16.5	基于多传感器局部几何导航结果的自适应融合导航	(298)
§ 16.6	基于方差分量估计的自适应融合导航	(303)
§ 16.7	IMU/GPS 组合导航系统自适应 Kalman 滤波算法	(307)
参考文献		(313)

Contents

Chapter 1	Introduction	(1)
§ 1.1	Progress and effects of satellite navigation system	(1)
§ 1.2	Inertial navigation	(12)
§ 1.3	Integrated navigation	(17)
§ 1.4	Summary of navigation algorithms	(20)
Chapter 2	Bayes estimation theory	(27)
§ 2.1	Bayes theorem	(27)
§ 2.2	Priori density function of parameters	(29)
§ 2.3	Bayes estimation without priori information	(32)
§ 2.4	Bayes estimation with priori information	(34)
Chapter 3	Principle of sequential navigation and positioning	(37)
§ 3.1	General description	(37)
§ 3.2	Sequential static parameter adjustment	(38)
§ 3.3	Sequential condition adjustment	(39)
§ 3.4	Sequential adjustment for navigation with dynamic equation	(42)
§ 3.5	Sequential adjustment for navigation with independent parameters at each epoch	(43)
§ 3.6	Sequential adjustment for navigation with partial additional parameters	(46)
§ 3.7	Sequential adjustment for navigation considering the state equation and additional parameters	(47)
§ 3.8	Sequential adjustment for navigation considering the state equation and reduced parameters	(49)
Chapter 4	Kalman filtering	(51)
§ 4.1	Basic concept	(51)
§ 4.2	Dynamic models and observational models	(54)
§ 4.3	General principle of Kalman filtering	(56)
§ 4.4	Innovation vector of Kalman filter and its properties	(59)
§ 4.5	Kalman filtering with correlated noises	(62)
§ 4.6	Conclusions on Kalman filtering	(66)

Chapter 5	Dynamic model of kinematic vehicle	(69)
§ 5.1	General description	(69)
§ 5.2	CV model	(70)
§ 5.3	CA model	(73)
§ 5.4	Variation acceleration model	(74)
§ 5.5	State equations with various observational information	(76)
Chapter 6	Error detection, diagnosis and repair in navigation solution	(78)
§ 6.1	General description	(78)
§ 6.2	Error detection	(79)
§ 6.3	Error identification	(82)
§ 6.4	Model adaptation	(85)
§ 6.5	Error influence of dynamic model on Kalman filtering	(86)
§ 6.6	Outlier detection of Kalman filtering	(90)
Chapter 7	Introduction of robust estimation theory	(95)
§ 7.1	General description of robust estimation	(95)
§ 7.2	Principle of robust M-estimation and its influence function	(97)
§ 7.3	Robust parameter estimation	(99)
§ 7.4	Robust estimation for posterior variance-covariance	(101)
§ 7.5	Robust estimation for correlated observations based on bi-factor equivalent weights	(104)
Chapter 8	Kinematic robust algorithm for navigation	(111)
§ 8.1	General description	(111)
§ 8.2	Static sequential robust estimation	(113)
§ 8.3	Kinematic sequential robust estimation	(114)
§ 8.4	Robust Bayes estimation	(116)
§ 8.5	Robust Kalman filtering	(121)
Chapter 9	Error compensation by stochastic model	(127)
§ 9.1	General description	(127)
§ 9.2	Filtering algorithm with additional variance-covariance matrices	(128)
§ 9.3	Adaptive estimation of variance matrices of model errors	(132)
§ 9.4	Estimation of priori variance matrices by windowing—Sage-Husa filtering	(136)
§ 9.5	The theory and capability analysis of fading filtering	(141)

Chapter 10	Error compensation by functional model	(146)
§ 10.1	Kalman filtering with additional compensating parameters	(146)
§ 10.2	Computation strategy of filtering with additional compensating parameters	(148)
§ 10.3	Influence analysis of systematic model errors on navigation results	(150)
§ 10.4	Fitting of systematic observation error by window method	(152)
§ 10.5	Fitting of systematic dynamic model error by window method	(153)
§ 10.6	Weighted fitting of systematic dynamic model error by window method	(155)
§ 10.7	Calculation and analysis for systematic error fitting	(156)
§ 10.8	Some strategies and comparison for nonlinear Kalman filtering in GPS navigation	(160)
Chapter 11	Filtering with colored noises	(168)
§ 11.1	General description for white noise and colored noise	(168)
§ 11.2	Case of colored kinematic model noises and white measurement noises	(169)
§ 11.3	Case of white kinematic model noises and colored measurement noises	(170)
§ 11.4	Influence function of colored noise in kinematic positioning	(172)
§ 11.5	Colored noise fitting in kinematic positioning	(178)
Chapter 12	Adaptively robust filtering	(186)
§ 12.1	General description	(186)
§ 12.2	Principle of adaptively robust Kalman filtering	(187)
§ 12.3	Properties of adaptive filtering solution	(194)
§ 12.4	Combination of adaptive filtering with Sage filtering	(199)
§ 12.5	Comparison and analysis of adaptively robust filtering and fading filtering	(204)
§ 12.6	Adaptively robust filtering with multy adaptive factors	(208)
Chapter 13	Models of adaptive factors	(216)
§ 13.1	General description	(216)
§ 13.2	Adaptively learning factors—statistics for model errors	(217)
§ 13.3	Adaptive factor functions and analysis	(224)
§ 13.4	Calculation and comparison	(226)

§ 13.5	Optimal adaptive factors	(229)
Chapter 14	Application of adaptively robust filtering theory in navigation and positioning	(238)
§ 14.1	Application of adaptively robust filtering in GPS road information updating	(238)
§ 14.2	Adaptive satellite orbit determination	(240)
§ 14.3	Application of adaptively robust filtering in aircraft GPS navigation and positioning	(247)
§ 14.4	Adaptively combined adjustment algorithm	(250)
Chapter 15	Some practical considerations for GPS positioning	(255)
§ 15.1	GPS observational model	(255)
§ 15.2	Statistic model of double differential observations	(261)
§ 15.3	Sequential adjustment for navigation and filtering for kinematic GPS positioning with ambiguity parameters	(268)
§ 15.4	Cycle slip detection in kinematic GPS measurements	(272)
Chapter 16	Integrated navigation theory	(281)
§ 16.1	Federal filtering theory and its analysis	(281)
§ 16.2	Some optimal integrated navigation algorithms	(285)
§ 16.3	Integrated navigation by kinematic and static filtering	(290)
§ 16.4	Adaptive integrated navigation based on robust estimation outputs of multi-sensor measurements	(294)
§ 16.5	Adaptive integrated navigation based on local navigation outputs of multi-sensor measurements	(298)
§ 16.6	Adaptive integrated navigation by using variance component estimation	(303)
§ 16.7	Adaptive Kalman filtering algorithm in IMU/GPS integrated navigation system	(307)
Reference		(313)

第一章 概 论

§ 1.1 卫星导航系统的发展及其影响

全球卫星导航系统的发展,一方面正以令人难以置信的速度改变着航天、航空、陆地、海洋等运动载体的导航方式、导航手段和导航精度;另一方面也以令人难以置信的速度改变着人们的生活方式,以及天体、卫星、陆地、海洋的测量方式。无论是科学技术的发展,还是国民经济的发展都包含卫星导航事业的发展所带来的巨大贡献。于是世界各主要大国和地区都积极发展自己的卫星导航系统。美国的全球定位系统(GPS)、俄罗斯的全球导航卫星系统(GLONASS),以及欧洲共同体即将建成的伽利略(Galileo)卫星导航定位系统等都将对人们的生活方式产生不可估量的影响。

利用人造地球卫星进行导航定位,是无线电通信技术、电子计算机技术、测量技术和空间技术相结合的高技术产物,是现代军事和空间技术的一大突破和飞跃。美国的 GPS 全球定位系统历时 20 余年,耗资逾百亿美元,于 1993 年 6 月正式投入使用。1995 年将预设的 24 颗星全部配齐(包括 3 颗在轨备用卫星)(Hewish and Wilson,1997)。

俄罗斯的 GLONASS 导航系统也早在 20 世纪 70 年代就已开始筹划。首次组星发射于 1982 年 10 月 12 日,到 1996 年底,总共有 27 次发射(含 2 颗不成功的发射),总共发射了 71 颗 GLONASS 卫星(含 8 颗伪卫星及所有的 GLONASS 卫星均可进行激光测距)(Langley,1997)。

无论是 GPS 还是 GLONASS 都已显现出巨大的经济效益和军事效益。欧洲正试图分享卫星导航的巨大商业效益,并期望建立独立于军事用途的民用无缝全球导航卫星系统 GNSS(Global Navigation Satellite System)。预计 GNSS-2 系统投入运行后将大大加强全球民用导航服务。

1.1.1 GPS 导航系统的现行政策及基本对策

美国的 GPS 导航系统可为美国以及部分盟国的各类用户(如飞机、导弹、舰船、坦克和单兵)提供全球、全天候、连续、实时高精度的三维(经度、纬度和高度)的导航定位服务。其主要特点是:

- (1) 可以在全球 24 小时连续实施三维定位;

(2) 定位精度高；

(3) 定位速度快,数据更新可达每秒一次或数十次以上,不仅可以满足车辆、单兵等慢速运动载体的导航定位要求,同时也适用于飞机、导弹等高速运动载体的导航要求；

(4) 受天气等条件的影响小。

由于上述特点,GPS 的军事应用范围正在不断扩大。因此人们也越来越关心它的安全性、抗干扰性、反诱骗性和完好性。

1983 年 6 月 28 日,美军首先公布了 GPS 保密政策,其目的在于防止敌方或非特许用户获得实时高精度的定位信息,并确保只有美国及其盟国和特许用户才能获得高精度的 GPS 数据,以维持美军及盟军的军事优势。这项政策的核心是将 GPS 的定位精度分为两个等级,即标准定位服务(Standard Positioning Service, SPS)和精密定位服务(Precise Positioning Service, PPS)。标准定位服务用户可以利用 C/A 码进行导航,正常定位精度为 25 m。但由于美国军方 1990 年 3 月起开始实施 SA(Selective Availability)政策,其目的在于限制大多数非军事用户使用该系统的高精度服务。SA 使 GPS 的 C/A 码的定位精度降到了 100 m 左右(Hewish and Wilson,1997),精密定位服务提供给美国及其盟军军事单位以及其他特许机构以全精度服务,包括使用未加密的 P 码及消除 SA 影响的 C/A 码,定位精度约为 5 m。

为了减弱美国 SA 政策的影响,也为了卫星导航的精确度、完好性、连续性和可用性,世界许多国家和地区都已广泛开展了局域增强系统(Local Area Augmentation Systems, LAAS)的研究,如地基(Ground-Based Augmentation System, GBAS)、星基(Satellite-Based Augmentation System, SBAS)差分 GPS(DGPS)的研究与开发。DGPS 是在精确已知位置的点上使用接收机采集 GPS 卫星数据,然后通过数据链发送误差改正信息。流动用户可将此改正信息用于改正本接收机接收的信息。20 世纪 90 年代初美国联邦航空局(FAA)提出建立旨在增强 GPS 导航性能的广域增强系统(Wide Area Augmentation System, WAAS)。其后,欧洲提出建立欧洲地球静止卫星导航重叠服务(European Geo-stationary Overlay Service, EGNOS),日本提出建立多功能卫星增强系统(Multifunction Satellite Augmentation System, MSAS)(魏子卿,1999; Kovach and Dyke,1997)。这些系统有些已经建成,而且未来还会不断扩展。其他用于特殊工程的差分 GPS 网络也已部分建成,并将继续建设。这些广域增强系统可以极大地削弱美国的 SA 政策的影响,从而可使机载 DGPS 达到 3 m 以内的精度,舰载、车载 DGPS 可获 2 m 以内的精度(Hewish and Wilson,1997)。

1.1.2 GPS 政策的变化及其影响

鉴于 GPS 的商业、民用背景以及广域增强系统和其他独立的卫星导航系统的

挑战,美国政府及民间用户痛感现行 GPS 政策已根本不能适应新形势的发展,所以不得不重新评估美国的 GPS 政策。1995 年美国两个权威研究机构——国家公共管理研究院(NAPA)和国家科学研究委员会(NRC)共同向国会提交了一份名为“全球定位系统:描绘未来”的研究报告。NAPS/NRC 的报告主张取消 SA 政策。因为 SA 的作用已日益减弱。他们认为今后美国应重点研究其他手段来防止敌方获取 GPS 信号,NRC 建议国防部应优先开发和布置能直接接收军用信号的接收机,使 C/A 码和 P 码脱钩。这份报告还建议通过其他措施来提高民用 GPS 定位的精度,主要是在 L2 频率上加载 C/A 码。这样民间用户就可以有更多的多余观测,也利于电离层延迟的改正,可望使 C/A 码 GPS 定位精度提高到 5 m 左右。

然而,美国政府为保护其美国在卫星导航领域的绝对优势,扼制其他相关导航系统的发展,美国制定了新的 GPS 政策,其目标为(Gibbons,1996):

- (1) 提高和维护国家安全;
- (2) 鼓励在全球范围内将 GPS 用于民用、商用和科学研究;
- (3) 鼓励私营企业对 GPS 技术及服务进行投资和应用;
- (4) 提高交通和其他一些领域的安全性和效率;
- (5) 促进 GPS 的国际合作;
- (6) 提高美国的科技能力。

基于上述目标,美国政府确定 GPS 政策的指导原则,见文献(Gibbons,1996)。它们包括① 关闭 SA;② 增设第二个民用频率;③ 保证 24 颗卫星星座另加 3 颗备用卫星(24+3);④ 为了军用目的,而增设高于 30 dB 的抗干扰性能;⑤ 增设用户测距误差(User Range Error, URE)为 2.5 m 的空间在线信号(Signal-in-Space, SIS)。

GPS 系统的上述五大变化将对全球导航卫星系统(GNSS)的导航性能(Required Navigation Performance,RNP)产生重大影响。RNP 主要性能一般分为四项指标,即精确度(Accuracy)、完好性(Integrity)、连续性(Continuity)和可用性(Availability)(Kovach and Dyke,1997)。现将上述 GPS 政策的五大变化与 RNP 性能的四项指标的关系列于表 1.1.1。

表 1.1.1 GPS 政策的五大变化与 RNP 性能相关关系

	精 度	完 好 性	连 续 性	可 用 性
SA=0	主要改进	主要改进	次要改进	次要改进
L ₂ C/A 码	主要改进	主要改进	次要改进	次要改进
24+备用星	次要改进	次要改进	次要改进	主要改进
30 dB 反干扰	不改进	不改进	次要改进	次要改进
2.5 m SIS URE	主要改进	主要改进	不改进	次要改进

上述 GPS 政策的五大变化将使 GPS 系统更完美,从而也更容易增强(Kovach and Dyke, 1997)。尽管 GPS 系统已日臻完善,但对于军用或民用用户仍有许多不定因素,现根据部分参考文献将其归纳如下。

(1) 美国尽管许诺关闭 SA,但美国每年都将审议一次 SA 政策,即在美国认为适当的时候,SA 政策仍可使用(Kovach and Dyke, 1997)。

(2) 美国现行的“双用途政策”既遭到包括美国在内的全世界民间用户的强烈反对,也得不到美国军方的支持。军方声称,目前的 GPS 政策影响美国的国家安全利益。因此随时都有可能改变 GPS 政策(谢世杰,赵利生,1999)。

(3) GPS 系统信号的结构组成尚不能完全满足精密导航的需要。例如,在高纬度地区经常出现盲区,严重影响导航和定位。在中低纬度地区,每天也有两次盲区,每次盲区历时 20~30 min,盲区时 PDOP(位置精度衰减因子)值远大于 20,给导航和定位带来很大误差(谢世杰,赵利生,1999)。

(4) 美国国防部曾在一份报告中强调,由于广域增强系统损害了 SA 的军事效果,因此建议军方切实将注意力放在“GPS 的利用”方法上,重点研究限制敌方在战时利用 GPS 的方法,而不是平时降低 GPS 信号。

1.1.3 GPS 现代化

1. GPS 现代化的目标和措施

GPS 现代化是美国 20 世纪 90 年代末提出的,主要目标有两个:一是要加强 GPS 对美军现代化战争中的保障作用;二是通过对民用 GPS 导航技术的改进,保持 GPS 在全球民用导航领域中的主导地位。为了达到其目标,美国采取了多种措施,在民用方面:停止 SA 的播发,将使民用实时定位和导航的精度提高 3 至 5 倍;在 L2 频道上增加第二民用码,这样用户就可以有更丰富的多余观测,以提高定位精度,并有利于电离层的改正;增加 L5 民用频率(1 176.45 MHz),这有利于提高民用实时定位的精度和导航的安全性。在军事方面:增加 GPS 卫星发射的信号强度,以增强抗电子干扰能力;在 GPS 信号频道上,增加新的军用码(M 码),并与民用码分开,M 码将有更好的抗破译保密和安全性能;军事用户的接收设备要比民用的有更好的保护装置,特别是抗干扰能力和快速初始化功能;探索新的技术,以阻止或阻挠敌方使用 GPS(Hothem, 2006;尹志忠等,2004)。

2. GPS 现代化的计划进程

GPS 现代化计划的进程大体分为 3 个阶段(陈俊勇,2005)。

(1) GPS 现代化第 1 阶段。计划发射 12 颗改进型的 GPS BLOCK IIR 型卫星,它们具有一些新的功能,如能发射第二民用码,即在 L2 上加载 C/A 码;在 L1 和 L2 上播发 P(Y) 码的同时,在这两个频率上还试验性地同时加载新的军码(M 码);IIR 型的信号发射功率,不论在民用通道还是军用通道上都有很大提高。第

一颗 IIR 型卫星已于 2005 年 9 月 26 日成功发射,新的民用信号于同年 10 月 3 日开始发播。

(2) GPS 现代化第 2 阶段。计划发射 6 颗 GPS BLOCK IIF 型卫星。GPS IIF 型卫星除了有上面提到的 GPS IIR 型卫星的功能外,还进一步强化发射 M 码的功率和增加发射第三民用频率,即 L5 频道。GPS IIF 型卫星的第一颗的发射计划始于 2006 年,即 2006 年开始 GPS L5 频道的试验。计划到 2010 年在空中运行的 GPS 卫星中,至少有 18 颗 IIF 型 GPS 卫星,以保证 M 码的全球覆盖。计划到 2020 年 GPS 卫星系统将全部以 IIF 卫星运行,在轨 IIF 卫星至少 27 颗。

(3) GPS 现代化计划的第 3 阶段。发射 GPS BLOCK III 型卫星,在 2006 年前完成代号为 GPS III 的 GPS 完全现代化计划设计工作。目前正在研究未来 GPS 卫星导航的需求,讨论制定 GPS III 的系统结构、系统安全性、可靠程度和各种可能的风险。计划在 2010 年发射 GPS III 的第一颗试验卫星,并用近 20 年时间完成 GPS III 计划,取代目前的 GPS II。

除了空间信号部分的现代化外,GPS 地面站的现代化也在进行当中,GPS 地面站的现代化主要是指整合美国空军和国家地理空间情报局(NGA)的监控数据以减少由卫星轨道、卫星等因素引起的用户导航定位误差(Hothem,2006)。截至 2004 年 11 月,已经有 6 个 NGA 的 GPS 跟踪站加入到美国空军的监控网络,这 6 个站分别设在华盛顿特区、英国、阿根廷、厄瓜多尔、巴林以及澳大利亚。这 6 个站与目前空军的 6 个站相结合,可以保证至少有 2 个站可以观测到任意 1 颗卫星,从 2005 年 9 月 7 日开始,这 6 个站的数据将参与到主控站的数据处理中。到 2006 年 NGA 还将有 5 个跟踪站(分别设在阿拉斯加、塔希提岛、新西兰、韩国、南非)加入到 GPS 监控网中,届时将能保证至少有 3 个站可以观测到任意 1 颗卫星。由于 GPS 地面监控网络的增强,民用用户的实时导航精度将提高 15%~20%左右。

3. GPS 现代化及其技术所带来的影响

(1) GPS 现代化及其技术在军用方面的影响。

M 码能使用已经存在的 L1 和 L2 频段,同时又能保持与载波 L1 和 L2 上的 C/A 码有明显不同的特征。另外,新的军用信号码结构增加了密码的保密性,优化了广播星历的传输。基于军用信号需要高的信号强度,未来的卫星在进行 M 码传输时,其功率将可以根据需要设计为 2 158 dBW,比现有的 P(Y) 码的功率(2 138 dBW)大 20 dBW。这些改进将会给美国及其盟国提供具有抗干扰能力的强 GPS 信号,并能为美国的全球军事行动提供安全的 GPS 信号。

(2) L2 载波上增加民用码对 GPS 技术应用的影响(魏二虎,柴华等,2005;魏二虎,史冠军等,2005)。

虽然有关 GPS 技术革命的白皮说明书上介绍,L2 载波调制的民用码就是 C/A 码。但是由于现在调制在 L1 载波上的 C/A 码序列太短,实验证明利用这样

的 C/A 码会造成公共通道信号交叉的相关影响、信号捕获能力和观测定位能力受到损害。这样,短序列的 C/A 码限制了使用 GPS 卫星数量的增加,因为卫星越多就增加了同时观测的同频数据,造成更多的互相干扰。因此,计划在 L2 上调制一种新的民用码 C 码来代替 C/A 码。新的 C 码的码序列更长,而且新的 C 码上不调制导航电文数据,信号强度比 C/A 码强,抗误差影响力更强。因此 GPS 卫星在 L2 载波上调制民用码有其特殊意义:① 能充分获得 GPS 卫星的信号资源。使得双频 GPS 接收机能在真正意义上独立接收到双频载波相位和双频伪随机码,充分获得的 GPS 卫星的信号资源,为 GPS 技术的进一步应用和发展创造了重要条件。② 双频电离层延迟改正。GPS 卫星在 L2 载波上调制民用码,双频 GPS 接收机能够采用码相关法独立重建双频载波和双频载波上的伪距。这样,民间用户将能够采用双频电离层伪距改正模型,实现精确而实时的电离层延迟改正。③ 消除多路径影响。L1C/A 码和 L2C 码所受到的多路径影响相同,所以 L2 上调制 C 码可以有效地消除观测值中多路径效应影响。对 GPS 在城市、山区、河流和海洋中精密测量和导航创造了有利条件。④ 提高测量精度和效率。GPS 卫星在 L2 载波上调制民用码,双频 GPS 接收机能够采用码相关法独立重建高信噪比双频载波,观测到高精度的双频载波相位和伪距,从而获得精确而实时的电离层延迟改正,这将有效消除多路径影响,大大降低双频载波相位观测值的周跳发生率。对于静态测量、快速静态测量、准动态测量、RTK 测量和放样等测量模式带来了高质量、高精度和高效率。

(3) 加入第三民用频率 L5 的影响(魏二虎,柴华等,2005;魏二虎,史冠军等,2005)。

由于考虑到地面雷达等设备会潜在地干扰 GPS 接收机对 L2 信号的跟踪,因而仅仅在 L2 上加入 C/A 码难以满足民航部门涉及“生命安全”应用的需要。鉴于此, GPS 现代化计划加入第三民用频率 L5。L5 最初将在 BLOCK IIF 型卫星上发送,其发射功率将会比当前的 L1 信号提高约 6 dB,并且被分为同相数据通道(I)和正交无数据通道(Q),这样的设计能提高信号的抗干扰能力。对于测量用户而言,利用 L1、L2 和 L5 信号的不同线性组合,将可以得到波长比 L1、L2 双频宽巷观测值更长的组合,这将更加有利于整周模糊度的确定。此外,我们还可以寻找出某些既有合理波长,又具有较小的测量噪声,同时电离层影响相对较弱的线性组合,这将有效减少整周模糊度的搜索时间,提高定位精度。

1.1.4 其他独立的卫星导航系统的发展

由于美国 GPS 系统完全由美国国防部控制,而美国 GPS 导航系统又缺乏明确的、永久性的政策,致使其他国家在开发使用 GPS 方面心存疑虑,缺乏安全感、信任感。为摆脱对美国 GPS 的依赖,世界许多国家和地区相继开始研制开发独立