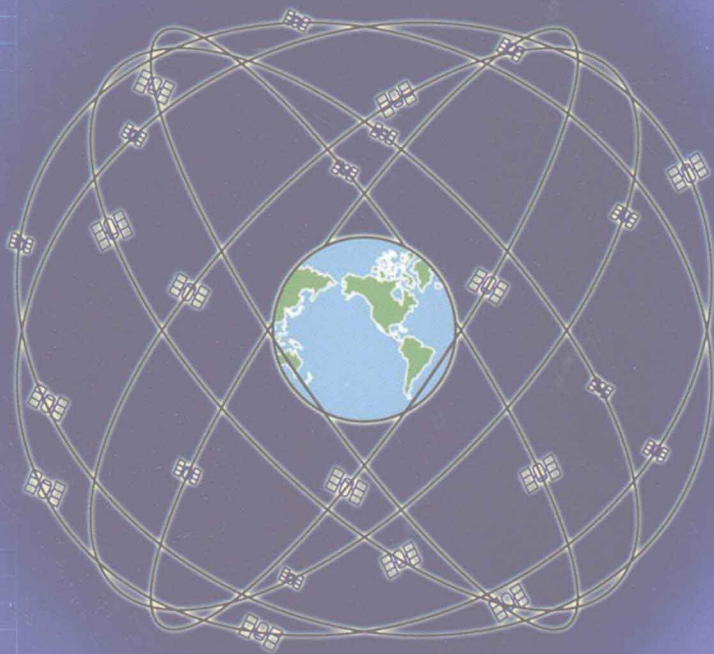




地球观测与导航技术丛书

GPS增强参考站 网络理论

黄丁发 周乐韬 李成钢 等 著



科学出版社

地球观测与导航技术丛书

GPS 增强参考站网络理论

黄丁发 周乐韬 李成钢 等 著

国家高技术研究发展计划（863）项目（2007AA12Z315）

国家自然科学基金项目（40771173、40271091）

联合资助

西南交通大学出版基金

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在总结作者多年科学研究成果的基础上,全面系统地论述了GNSS参考站网络系统的理论、数据处理方法与系统实现,使理论与实际应用相结合。全书内容共分9章,包括网络GNSS的现状和发展趋势、误差分析与建模、参考站网络的构建与定位模型、网络模糊度的快速解算理论、空间相关误差改正模型、网络改正数的播发模型、增强参考站网络系统实现与试验、完备性监测理论及CORS参考站网络建设等。

本书可作为测绘、国土、规划、土木、交通、农林、水利、地质、矿产、海洋、航空航天等部门从事勘测设计、信息系统、位置服务与导航等的工程技术人员的参考用书,也可作为大专院校相关专业研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

GPS增强参考站网络理论/黄丁发等著. —北京:科学出版社,2011
(地球观测与导航技术丛书)

ISBN 978-7-03-031085-9

I. ①G… II. ①黄… III. ①全球定位系统(GPS)-研究 IV. ①P228.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第089245号

责任编辑:韩 鹏 赵 冰 贺窑青/责任校对:赵桂芬

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

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>

新 蕾 印 刷 厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2011年6月第一次印刷 印张:17 1/4

印数:1—2 000 字数:382 000

定价:59.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《地球观测与导航技术丛书》出版说明

地球空间信息科学与生物科学和纳米技术三者被认为是当今世界上最重要、发展最快的三大领域。地球观测与导航技术是获得地球空间信息的重要手段，而与之相关的理论与技术是地球空间信息科学的基础。

随着遥感、地理信息、导航定位等空间技术的快速发展和航天、通信和信息科学的有力支撑，地球观测与导航技术相关领域的研究在国家科研中的地位不断提高。我国科技发展中长期规划将高分辨率对地观测系统与新一代卫星导航定位系统列入国家重大专项；国家有关部门高度重视这一领域的发展，国家发展和改革委员会设立产业化专项支持卫星导航产业的发展；工业与信息化部和科学技术部也启动了多个项目支持技术标准化和产业示范；国家高技术研究发展计划（863 计划）将早期的信息获取与处理技术（308、103）主题，首次设立为“地球观测与导航技术”领域。

目前，“十一五”计划正在积极向前推进，“地球观测与导航技术领域”作为 863 计划领域的第一个五年计划也将进入科研成果的收获期。在这种情况下，把地球观测与导航技术领域相关的创新成果编著成书，集中发布，以整体面貌推出，当具有重要意义。它既能展示 973 和 863 主题的丰硕成果，又能促进领域内相关成果传播和交流，并指导未来学科的发展，同时也对地球观测与导航技术领域在我国科学界中地位的提升具有重要的促进作用。

为了适应中国地球观测与导航技术领域的发展，科学出版社依托有关的知名专家支持，凭借科学出版社在学术出版界的品牌启动了《地球观测与导航技术丛书》。

丛书中每一本书的选择标准要求作者具有深厚的科学研究功底、实践经验，主持或参加 863 计划地球观测与导航技术领域的项目、973 相关项目以及其他国家重大相关项目，或者所著图书为其在已有科研或教学成果的基础上高水平的原创性总结，或者是相关领域国外经典专著的翻译。

我们相信，通过丛书编委会和全国地球观测与导航技术领域专家、科学出版社的通力合作，将会有一大批反映我国地球观测与导航技术领域最新研究成果和实践水平的著作面世，成为我国地球空间信息科学中的一个亮点，以推动我国地球空间信息科学的健康和快速发展！

李德仁

2009 年 10 月

前 言

随着全球导航卫星定位系统 (GNSS) 技术的高速发展, 基于 GNSS 的各类永久性监测网 (站) 和差分 GNSS 系统已在世界范围内广阔的大陆上覆盖, 成为不同用途的局域性网络, 以满足现代高精度、实时三维空间定位的需求。互联网技术为这类局域系统的信息和数据交换提供了基础平台, 并促进了网络 GNSS 的发展。网络 GNSS 服务体系理论的研究, 成为国际上本学科领域的研究热点。为此, IAG 建立了专门的网络 RTK 工作组 (即 IAG working group 4.5.1: network RTK), 基于参考站网络的 GNSS 服务体系, 如网络化 GNSS/VRS、FKP 等, 构成了全球导航卫星系统技术的前沿研究方向。

目前, 已有的网络 RTK 技术通过一个或多个数据中心来汇集和融合来自参考站网络的数据, 并对这些数据进行处理。其技术核心包括实时的网络整周模糊度解算, 严格的数据质量控制, 以及距离相关误差的建模和改正数的生成与发布技术。其工作方式与数据流可概括为: ①流动站直接接收其周围多个参考站的 RTCM 数据流; ②广播主参考站观测值及主辅站的观测值之差, 流动用户通过自主内插获得网络改正数; ③广播主参考站和距离相关误差改正模型系数; ④流动用户向数据中心发送概略坐标, 然后获得相关的 VRS 观测值。其中③和④构成了目前网络 RTK 技术应用的主流技术, 基于③和④形成的网络 RTK 应用系统有国际上的 TRIMBLE/GPSNET、LEICA/SPIDER, 以及由本课题组自主研发成功的“基于 INTERNET 的增强网络 GPS/VRS 卫星定位服务系统 (ARSNNet/VENUS)”, 推动了网络 RTK 技术的大发展。

本书是在总结我们十余年来取得的系列研究成果的基础上编写而成的。1997~2000 年, 我们研究了 GPS 在线解算理论, 提出基于小波理论的数据处理技术 (49771062); 2002~2006 年, 随着我国互联网技术的发展及 GPRS 无线数据通信技术的应用, 我们提出并完成了基于 WEB 和移动计算的 VRS 理论 (40271091), 并取得重要进展; 2007 年, 我们研究组进一步将网络计算扩展到中央差分 (40771173), 并提出增强参考站技术的理论 (2007AA12Z315), 完成了相关系统理论和系统软件的开发。目前已完成的具有我国自主知识产权的“基于 INTERNET 的增强网络 GPS/VRS 卫星定位服务系统 (ARSNNet/VENUS)”, 在与国际上仅有的两套系统 (GPSNET 和 SPIDER) 并行运行、比测的结果表明, 它们在精度和性能上相当。目前, 该系统已投入四川、海南等地 GPS 观测网络的运行, 在四川省 21 万平方公里的区域, 提供厘米级实时导航定位服务。

本书由黄丁发和熊永良负责大纲的制订和统稿, 参加本书编写工作的有周乐韬 (第 2、4、6、7、8 章)、李成钢 (第 1、3、5、6、7 章)、殷海涛 (第 2、5 章)、徐锐 (第 7 章)、周东卫 (第 8 章)、黄泽纯 (第 9 章)。博士研究生冯威、李萌、严丽等参与了

项目的部分研究工作；硕士研究生颜金彪、王晓波、禹信、熊菠林等在文献查阅和书稿校对中做了大量工作。

本书的出版得到国家高技术研究发展计划（863）项目（2007AA12Z315）、国家自然科学基金项目（40771173、40271091）及西南交通大学出版基金的资助，多年以来，承蒙恩师刘经南院士、宁津生院士的指导，以及“地球观测与导航技术”863领域专家施闯教授、程鹏飞教授的关心和帮助，使我们受益匪浅，在此表示衷心的感谢！

黄丁发

2011年3月18日

目 录

丛书出版说明

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 GPS 卫星定位技术的发展背景	1
1.1.1 GPS 的现代化	1
1.1.2 差分 GPS 技术的发展	3
1.1.3 连续运行参考站网络的建设与网络 RTK 技术应用	6
1.2 网络 RTK 技术研究的国内外现状及其发展前景	9
1.2.1 参考站网络模糊度解算技术 (AR)	10
1.2.2 距离相关误差建模 (改正数计算)	11
1.2.3 改正数发布	12
1.2.4 网络通信技术与网络 RTK 软件开发	14
第 2 章 误差分析与建模	16
2.1 GPS 观测方程	16
2.1.1 GPS 载波相位观测方程	16
2.1.2 GPS 码伪距观测方程	17
2.1.3 观测值的双频线性组合	17
2.2 对流层延迟	19
2.2.1 对流层造成的信号传播路径弯曲	19
2.2.2 对流层天顶延迟模型	20
2.2.3 对流层映射函数模型	29
2.3 多基站 GPS 网中对流层延迟的估计与建模	36
2.3.1 天顶对流层延迟估计	36
2.3.2 区域对流层非差拟合模型	38
2.3.3 大气梯度对 GPS 解算非差对流层的影响	44
2.3.4 双差对流层延迟分析	47
2.3.5 双差对流层区域内插模型	50
2.4 电离层延迟	53
2.4.1 电离层延迟经典模型	53
2.4.2 双差电离层延迟分析	53
2.4.3 双差电离层延迟估计	56
2.4.4 建立电离层区域内插模型	57
2.5 星历误差	59

2.5.1	星历误差分析	59
2.5.2	消除广播星历误差	62
2.6	多路径效应	63
2.6.1	多路径效应模型	63
2.6.2	多路径效应分析	64
2.6.3	估计和削弱参考站双差多路径效应	66
2.6.4	削弱参考站非差码伪距多路径效应	67
2.7	载波相位中心偏差	68
2.7.1	载波相位中心偏差分析	68
2.7.2	消除载波相位中心偏差	69
2.8	观测噪声	70
2.8.1	观测噪声分析	70
2.8.2	建立观测噪声随机模型	70
第3章	参考站网络的构建与定位模型	71
3.1	参考站网络的构建	71
3.1.1	网络分类	71
3.1.2	网络的自动构建	72
3.1.3	网络动态升级	77
3.1.4	广域大规模网络 GNSS 增强参考站动态网络构造	78
3.2	参考站网络的计算模型	82
3.2.1	FKP 计算模型	82
3.2.2	MAC 技术	83
3.2.3	虚拟参考站技术	86
3.3	增强参考站 (ARS) 网络 DGPS/RTK 的数学模型	90
3.3.1	相位 ARS 观测值数学模型	90
3.3.2	伪距 ARS 观测值数学模型	90
3.3.3	基于 ARS 模型的网络 DGPS/RTK 技术的通用性论证	91
第4章	网络模糊度的快速解算理论	94
4.1	概述	94
4.2	网络基线选择及其对模糊度解算效率的影响	95
4.2.1	网络基线选择	95
4.2.2	网络分块和基本解算单元	96
4.3	网络模糊度的快速解算	98
4.3.1	宽巷模糊度的快速解算	98
4.3.2	电离层无关组合模糊度的快速解算	103
4.3.3	估计 cell 参数	108
4.4	网络参数平差	110
4.4.1	对流层延迟湿分量网络平差	110
4.4.2	双差电离层延迟网络平差	112

4.5	R2U 基线上模糊度的实时解算	112
4.6	三频模糊度分解	113
4.6.1	三频模糊度分解的数学模型	113
4.6.2	三频信号模拟	114
4.6.3	模拟数据的正确性检验	114
4.6.4	利用模拟数据进行三频模糊度分解	116
第 5 章	空间相关误差改正模型	117
5.1	概述	117
5.2	电离层改正数计算模型	117
5.2.1	参考站网络电离层改正信息的提取	118
5.2.2	电离层改正数内插计算模型	119
5.2.3	电离层内插模型的比较研究	121
5.2.4	电离层预报模型	126
5.3	对流层延迟改正数计算模型	130
5.3.1	参考站网络对流层延迟信息的提取	130
5.3.2	高程方向偏差分析	131
5.3.3	自主修正高程方向偏差的距离相关模型	132
5.4	卫星星历的精度分析及其误差改正方法	135
5.5	多路径误差影响的削弱策略	138
5.5.1	参考站多路径误差影响的消除	138
5.5.2	多路径误差的消除	139
5.5.3	实验分析	140
5.6	非差修正模型	144
5.6.1	非差修正的数学模型	145
5.6.2	非差改正数	146
5.6.3	非差对流层误差实时建模精度分析	146
5.6.4	非差修正定位精度分析	147
第 6 章	网络改正数的播发模型	150
6.1	基于 RTCM 编码及 Ntrip 的改正数播发	150
6.1.1	RTCM 编码	150
6.1.2	数据传播链路	150
6.1.3	Ntrip 网络传输协议	151
6.1.4	数据播发模块总体设计	153
6.2	RTCM SC-104 标准电文编码及其实现	154
6.2.1	RTCM SC-104 电文分析与设计	154
6.2.2	RTCM 电文编码的实现	160
6.3	Ntrip 网络传输的设计和实现	161
6.3.1	Ntrip 结构分析与设计	161
6.3.2	基于 Ntrip 的 ARS/VRS 改正数网络播发系统的实现	163

第 7 章 增强参考站网络系统实现与试验	168
7.1 增强参考站系统设计与实现	168
7.1.1 系统结构	168
7.1.2 系统目标	170
7.1.3 系统设计	170
7.1.4 系统开发与实现	173
7.2 系统精度测试与评估	175
7.2.1 测试目标与内容	175
7.2.2 试验网络与测试点	175
7.2.3 差分改正数精度测试	177
7.2.4 同步及异步 RTK 静态测试	179
7.2.5 低动态 RTK 精度测试	182
7.2.6 车载高动态测试	186
7.3 测试结果分析及结论	188
7.3.1 RTK 初始化时间	188
7.3.2 系统精度评估	189
第 8 章 增强参考站网络系统的完备性监测	190
8.1 增强参考站系统完备性监测	190
8.1.1 参考站网络观测数据完整性	190
8.1.2 通信链路完备性监测	193
8.1.3 系统模型与可用性监测	193
8.2 电离层建模的完备性监测	194
8.2.1 双差电离层延迟分析	194
8.2.2 建立电离层区域内插模型	197
8.2.3 电离层残差完备性监测指标 (IRIM) 及其应用	200
8.2.4 电离层残差内插不确定性指标 (IRIU) 及其应用	202
8.3 对流层建模的完备性监测	204
8.3.1 双差对流层延迟分析	204
8.3.2 建立对流层延迟区域内插模型	208
8.3.3 对流层残差完备性监测指标 (TRIM) 及其应用	212
8.3.4 对流层残差内插不确定性指标 (TRIUI) 及其应用	214
第 9 章 CORS 参考站网络建设	217
9.1 CORS 体系架构	217
9.1.1 CORS 网络构成	217
9.1.2 CORS 网络功能	218
9.1.3 CORS 规范与标准	220
9.2 CORS 参考站建设	221
9.2.1 参考站布设原则	221
9.2.2 参考站选址	222

9.2.3	参考站天线墩建设	222
9.2.4	参考站机房建设	223
9.2.5	参考站设备与安装	224
9.2.6	参考站电源配置	225
9.2.7	参考站安全防护	226
9.3	CORS 通信网络建设	227
9.3.1	CORS 网络通信方式	227
9.3.2	CORS 服务网络总体框架	230
9.3.3	参考站与数据中心网络通信	230
9.3.4	用户端与服务中心网络通信	233
9.3.5	数据中心与 IGS 服务器网络通信	233
9.4	CORS 服务中心建设	234
9.4.1	CORS 服务中心网络结构	234
9.4.2	CORS 服务中心硬件	235
9.4.3	CORS 服务中心软件	237
9.4.4	CORS 服务软件: ARSNET/VENUS	239
9.5	CORS 运行管理	244
9.5.1	管理机构建立	244
9.5.2	设备维护管理	244
9.5.3	软件运行维护	247
9.5.4	网络状态监控	248
参考文献		250

第 1 章 绪 论

1.1 GPS 卫星定位技术的发展背景

1.1.1 GPS 的现代化

随着 GPS 卫星导航定位技术与现代通信技术的发展, GPS 技术引导了空间定位技术的革命性变化, 开创了以导航卫星为动态参考点的空基无线电导航定位技术的新时代。用 GPS 测定三维坐标的方法, 将测绘技术从陆地和近海扩展到整个海洋和外层空间, 从静态扩展到动态, 从单点定位扩展到局部与广域差分, 从事后处理扩展到实时(准实时)定位与导航。定位精度涵盖米级、厘米级乃至亚毫米级, 从而大大拓宽了 GPS 技术的应用范围(周忠谟, 1995)。目前, GPS 已在大地测量学、地球动力学、天体力学、载人航空航天及全球变化等各学科领域得到广泛应用。调查表明, 仅 2003 年全球的卫星导航终端产品年产值就接近 160 亿美元, 估计到 2020 年全世界卫星导航应用市场将达 3500 亿美元, 因此 GPS 也被称为 20 世纪影响人类的重大科学技术之一。

由于空间卫星导航技术的巨大市场和广阔发展前景, 世界各国都积极研制自己的导航卫星系统, 如 1995 年苏联建成 GLONASS 系统、2000 年中国基本建成第一代区域性导航系统——北斗导航卫星系统。但美国 GPS 系统是当前唯一运行正常的, 具有全球范围实时定位服务能力的空间卫星定位系统。目前正在发展的 GALILEO 卫星导航定位系统, 有可能打破 GPS 在全球民用导航领域的垄断地位。为了更好地满足民用导航、定位、大气探测等方面的需求, 强化 GPS 在全球民用导航领域的领导地位, 从 1999 年 1 月 25 日起, 美国政府分阶段开始实施民用“GPS 现代化计划”(Anon, 2000; Fontana and Latterman, 2000), 即

(1) 终止 SA 政策(selective availability, SA)。2000 年 5 月 1 日零点 SA 政策终止, 使民用实时定位和导航精度提高 3~5 倍, 目前 SPS 实时定位精度达 10m, 如图 1.1 所示。

(2) 增加第二民用 C/A 码。在 L2 载波频道上增加 C/A 码, 使民用用户可利用多余观测进行电离层改正以提高定位精度。

(3) 增加 L5 民用频道。增加新的 1176.45MHz 频率的载波信号频道并附加对应 P 码观测值, 可大大提高民用单点实时导航定位的精度和可靠性。GPS 现代化前后 GPS 信号的组成信息如图 1.2 及表 1.1 所示。

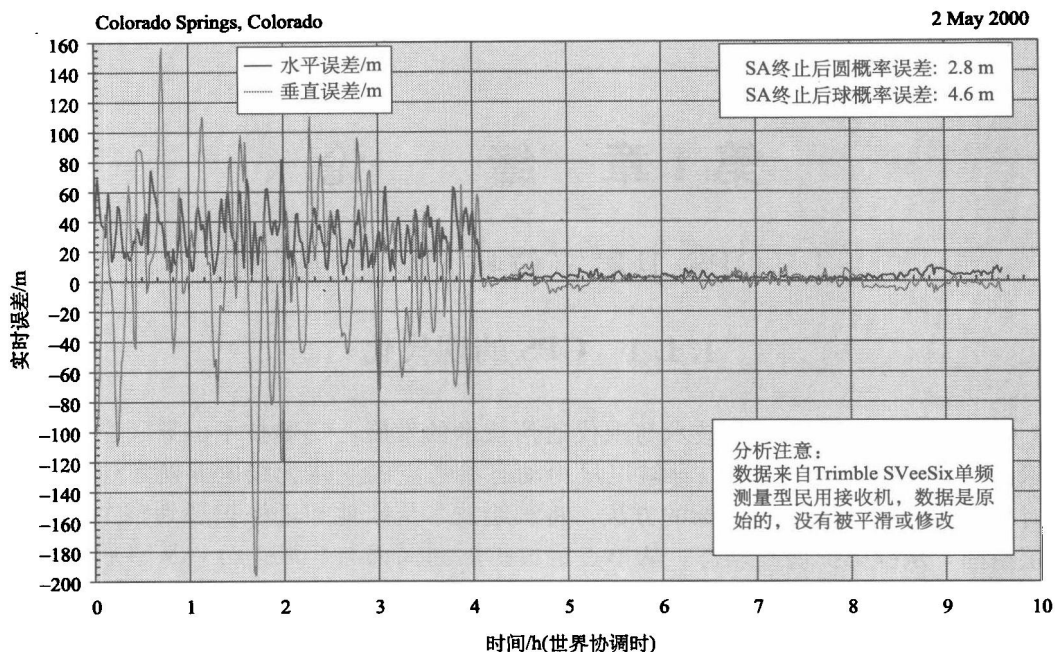


图 1.1 SA 技术中止前后 SPS 服务精度对比
(<http://ctas.arc.nasa.gov>)

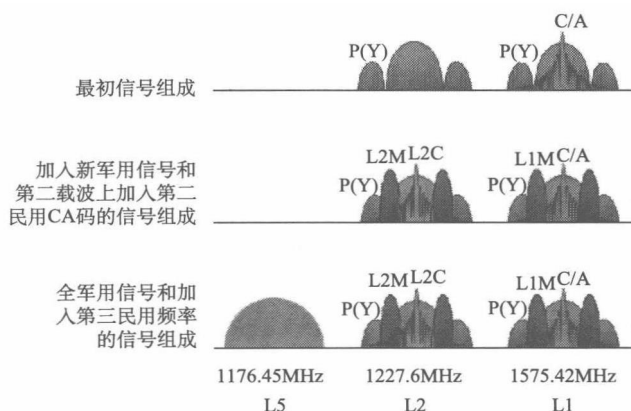


图 1.2 GPS 信号组成
(<http://ctas.arc.nasa.gov>)

表 1.1 GPS 信号组成信息

载波	频率/MHz	波长/cm	调制信息	频率/Hz	码长/m
L1	1575.42	19.03	C/A 码	1.023M	293
			P 码	10.23M	29.3
			导航电文	50bps	
L2	1227.60	24.42	P 码	10.23M	29.3
			导航电文	50bps	
L5	1176.45	25.48	P 码	10.23M	29.3
			导航电文	50bps	

1.1.2 差分 GPS 技术的发展

GPS 现代化，使民用 SPS (standard positioning service, SPS) 服务的实时导航定位精度提高到 10m 量级，大大拓展了 GPS 应用领域，但还远远无法满足如测绘、地壳板块运动监测、实时空间信息服务等领域高精度定位的需求。差分 GPS 技术的出现和快速发展，使 GPS 定位技术在精度和可靠性上均发生了质的变化，新的技术方法层出不穷。例如，DGPS 技术 (code-based differential GPS)、WADGPS (wide area differential GPS) 技术、RTK (real-time kinematic) 技术及网络 RTK (network RTK) 技术等，可适用于多种领域的不同需求。

根据数据处理方法、使用观测值类型及适用精度等级的不同，GPS 技术总体发展流程及其综合技术指标可归纳如图 1.3、表 1.2 所示。

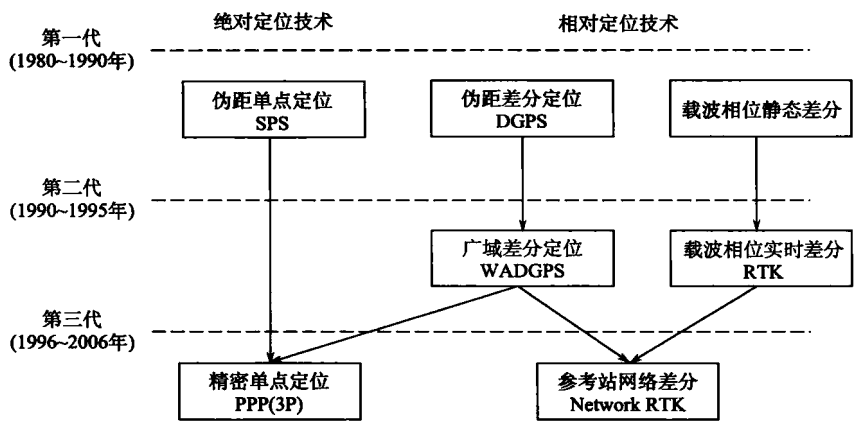


图 1.3 差分定位技术发展流程 (刘经南, 1999)

表 1.2 GPS 定位技术指标

定位模式	参考站数量	精度/m	作用距离/km	响应时间/h
单点定位	无	10~15	全球	实时
局域差分	多个	1~5	150	实时
广域差分	多个	1~5	1500	实时
RTK	单个	0.01~0.10	15	实时
网络 RTK	多个	0.01~0.10	70	实时
静态定位	1 个	0.001~0.05	10 000	0.5~24

1. 单参考站实时差分技术

20 世纪 80 年代末到 90 年代初，使用一台 GPS 参考站接收机和一台用户接收机，通过对同步观测值的求差处理，消除或削弱星历误差、大气传播误差、时钟误差、仪器信号延迟、SA 干扰等多种相关性公共误差源的影响，提高 GPS 定位精度。由于采用的是单一参考站的工作模型，因此，将这种使用伪距差分 (differential global positioning system,

DGPS) 及载波相位差分 (RTK) 的动态定位技术, 通称为常规实时差分技术。DGPS 技术可在上百公里半径范围内获得 1~5m 的精度; 而采用双频观测, RTK 技术可在 20km 范围内的基线上获得厘米级定位精度。由于 RTK 技术使用具有整周模糊度的载波相位观测值进行数据处理, 而 GPS 接收机仅能观测到卫星信号被捕获时刻相位差的小数部分, 卫星信号被捕获以后相位差随时间变化的整数部分, 且初始相位的整周数是未知的 (被称为整周模糊度)。整周模糊度解算技术也就成为厘米级 RTK 技术的核心研究内容和技术难点。常规差分技术虽满足了从米级到厘米级动态定位用户在定位精度方面的需求, 但其在实际应用中的精度、可靠性及可用性等方面均存在无法克服的缺陷。

1) 精度和可靠性低

由于受大气、轨道等距离相关误差“失相关”效应的影响, 并受差分观测值残余误差的影响, 常规差分技术的定位精度随流动用户站至参考站间基线长度的增加而降低, 因此, 常规差分技术的有效作用距离受到观测条件和服务等级的严格限制。对 DGPS 技术而言, 一般限制在 150km 左右。以 2000 年由中国海事局组织建立的“中国沿海信标 DGPS 系统”为例, 2m 定位精度服务限制在 100km 距离, 3m 定位精度限制在 200km 距离, 5m 定位精度极限距离在 300km 以内。而对于 RTK 技术而言, 双频 RTK 有效作用距离一般为 15~20km, 此时三维定位精度可维持在 1~5cm。而对单频用户, 由于无法消除电离层延迟误差, 作用距离仅为 6~10km。当 RTK 用户与参考站间距离超过上述指标, 不仅会造成定位精度下降, 同时因为观测值残差对整周模糊度解算的不利影响, 初始化时间大大增加, 严重时甚至无法确定整周模糊度的固定解, 浮点解的定位精度仅为分米级, 解的可靠性也大为降低。

2) 可用性低

差分技术的前提是流动站与参考站间具有同步观测的卫星数据, 而同步卫星数量及同步观测值的连续性是影响差分定位性能的重要因素之一。当参考站处发生大幅度电离层扰动、长时间数据缺失 (如信号遮挡)、多路径效应影响等情况时, 差分定位将无法进行。另外, 现有 DGPS/RTK 系统大多采用超高频 (UHF)、甚高频 (VHF) 信号、调频 (FM) 电台、无线电信标台等通信链路进行差分信号播发和接收, 因此差分用户除购买 GPS 信号接收机设备外, 还需购买公用 DGPS 数据源或专用差分通信设备, 这大大提高了 DGPS/RTK 系统成本。更为严重的是, 上述通信链路具有衍射性能差、信号不稳定、覆盖范围小等缺陷。通信数据错误和信号延迟均会导致定位精度下降及重新初始化等问题。

2. 广域差分技术

为克服上述常规实时差分系统在精度、可靠性等方面存在的问题, 在参考站网络实时差分技术诞生以前, 广域差分技术作为一种过渡技术被用来建设大尺度、国家甚至洲际的分米至米级精度的差分服务网络系统。以美国联邦航空局 (FAA) 开发的广域增强系统 (wide area augmentation system, WAAS) 为例, 如图 1.4 和图 1.5 所示。它是由 25 个基站、2 个主站和 3 颗地球同步卫星构成网络, 用于高精度空中导航, 在美国领空内的任何位置、任何环境下可实现实时定位精度优于 3m。WAAS 基于均匀分布的 GPS 参考站网络, 计算包括 GPS 卫星星历的修正量、时钟修正量、

电离层和对流层时延修正参数在内的、广域差分改正信息。然后，采用通信卫星作为可靠的数据通信链路，向用户转发高精度的导航定位差分改正信息，同时提供系统的完好性和可用性监测信息，确保用户使用安全可靠、连续完好的导航定位数据。WADGPS/WAAS使区域分米级/米级定位服务成为可能，但伪距观测值本身观测精度较低，限制了其在更高精度（如厘米级）领域的发展。

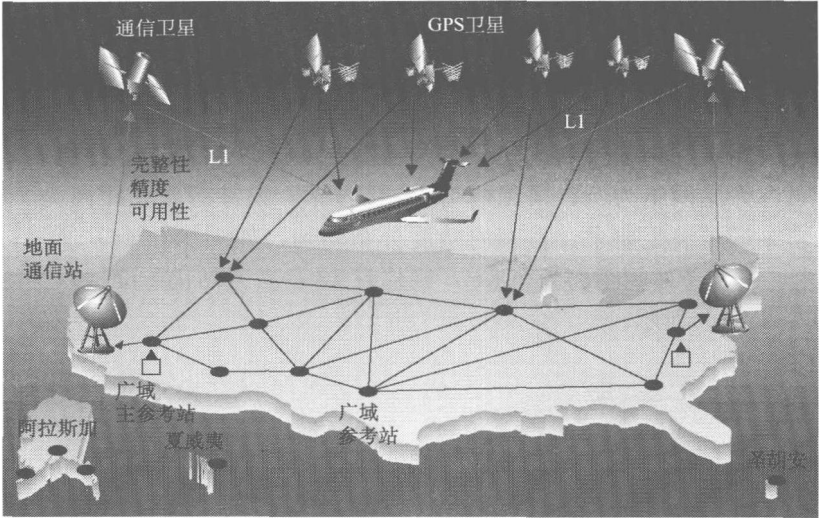


图 1.4 美国 WAAS 系统示意图

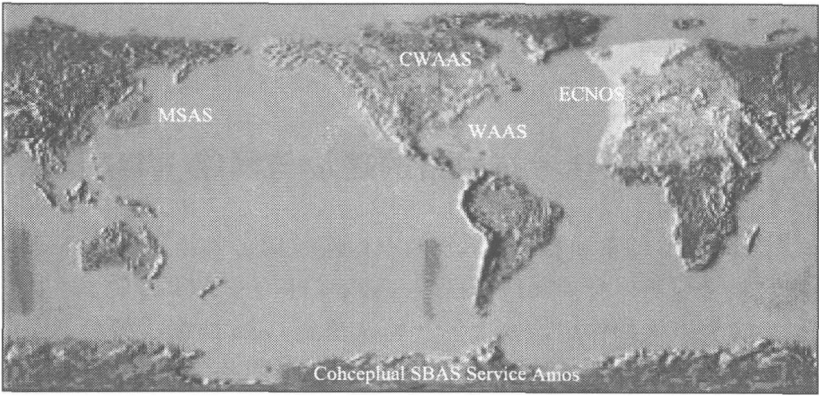


图 1.5 全球较为知名广域增强 GPS 网络分布图

(图 1.4、图 1.5 源自：<http://gps.faa.gov/programs.WAAS/waas.htm>)

3. 参考站网络实时定位技术（网络 DGPS/RTK 技术）

无线通信和互联网技术的蓬勃发展，带动了传统差分定位测量模式的新变革，为了满足高精度动态导航定位服务的要求，实现区域范围内厘米级、分布均匀、可靠性高的实时动态定位应用，基于区域连续运行 GPS 参考站网络的网络 RTK 定位技术应运而

生。网络 RTK 技术是指在一定区域均匀布设多个（三个或三个以上）连续运行参考站，在该地区构成网状覆盖，并利用互联网作通信链路，把参考站实时观测值传送到计算中心，根据各参考站精确已知的坐标信息，在计算中心完成对网络范围内的电离层、对流层、轨道误差等误差的建模，并实时生成流动站位置的改正信息。将此改正信息按 RTCM 差分电文进行编码，通过无线通信链路（GSM/GPRS/CDMA 等）向用户实时连续发布，从而在用户端实现高精度实时定位。

网络 RTK 技术实际上融合了常规 RTK 技术的简便工作模式及 WADGPS 技术的数据处理流程两个方面优点。通过采用精化误差模型和新的改正数计算及发布方法，网络 RTK 技术不仅能有效提高定位精度，也使 GPS 参考站网络的有效服务范围大大增加，而且精度分布更加均匀。以建立一个覆盖 5000km² 左右范围，提供厘米级实时定位服务的区域参考站网络为例，采用网络 RTK 技术，设参考站间距离为 70km，仅需建立 4 个参考站即可满足要求，且网内精度分布均匀，如图 1.6（a）所示；而采用常规 RTK 技术，设参考站间距离为 20km，则建设 13 个参考站仍只能覆盖全区约 79% 的区域，如图 1.6（b）所示。

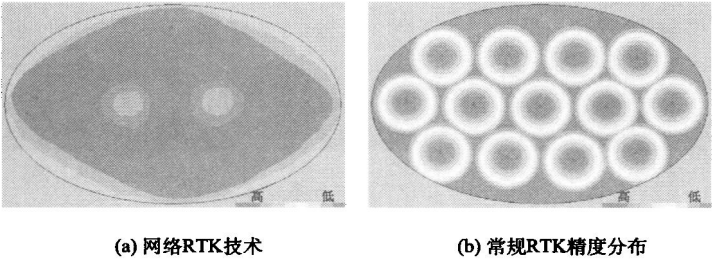


图 1.6 网络 RTK 技术与常规 RTK 技术定位精度比较

1.1.3 连续运行参考站网络的建设与网络 RTK 技术应用

1994 年，国际 GPS 服务机构（IGS）的全球跟踪服务网络正式运行，实现了 GPS 原始观测数据、精密星历、时钟和地球自转参数等信息的全球共享，其在大地测量和地球动力学领域发挥着巨大的作用，使人们开始认识到 GPS 连续运行参考站网络建设的重要性，欧美国家相继建立了大量面向经典大地测量应用及多功能实时定位服务的，基于连续运行参考站网络（continuously operating reference station，CORS）的综合服务系统，依据数据处理技术及应用领域的差别，最终发展成为以下两大技术体系。

1. 被动式 CORS 网络

被动式 CORS 网络采用静态/后处理模式，面向经典大地测量应用，如提供事后精密定位服务，以及精密星历、电离层和大气参数等产品和观测数据共享等。著名的被动式 CORS 网络有国际 GPS 服务机构、美国连续运行参考站网及加拿大控制网系统（CACS）等（图 1.7）。被动式 CORS 网络一个最大的特征是不支持实时动态数据服务，