



测绘地理信息科技出版资金资助

CEHUI DILI XINXI KEJI CHUBAN ZIJIN ZIZHU

Theory and Methods of Undifference GNSS
Network RTK between Long Range at Single

祝会忠 著

长距离单历元非差 GNSS网络RTK 理论与方法



测绘出版社

014057804

P228.4
55

测绘地理信息科技出版资金资助

长距离单历元非差 GNSS 网络 RTK 理论与方法

Theory and Methods of Undifference GNSS
Network RTK between Long Range at Single

祝会忠 著



测绘出版社

· 北京 ·



北航

C1742487

P228.4
J5

108520110

© 祝会忠 2014

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

内 容 简 介

本书对网络 RTK 算法的定位理论和各类误差处理方法做了系统的介绍和研究。主要内容有:讨论了 GNSS 网络 RTK 定位的有关理论基础;介绍了 GNSS 定位中各种误差的特性及其误差处理方法,重点分析了网络 RTK 定位中各种误差的处理方法;着重介绍了长距离网络 RTK 基准站间双差整周模糊度单历元确定的理论和算法;提出了区域误差非差改正方法,并详细地给出了利用长距离基准站整周模糊度,计算大区域范围内非差误差改正数的方法和公式推导过程;提出了长距离网络 RTK 流动站整周模糊度单历元解算方法。

本书的主要读者对象为从事卫星大地测量,特别是高精度 GNSS 实时动态定位算法方面的研究人员以及从事测绘技术和相关专业的高等学校师生。

图书在版编目(CIP)数据

长距离单历元非差 GNSS 网络 RTK 理论与方法/祝会忠

著. —北京:测绘出版社, 2014.6

ISBN 978-7-5030-3481-7

I. ①长… II. ①祝… III. ①卫星导航—全球定位系统 IV. ①P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 090944 号

责任编辑	田 力	封面设计	李 伟	责任校对	董玉珍	责任印制	喻 迅
出版发行	测绘出版社	电 话	010—83543956(发行部)				
地 址	北京市西城区三里河路 50 号		010—68531609(门市部)				
邮政编码	100045		010—68531363(编辑部)				
电子信箱	smp@sinomaps.com	网 址	www.chinasmp.com				
印 刷	北京柏力行彩印有限公司	经 销	新华书店				
成品规格	169mm×239mm						
印 张	8.5	字 数	162 千字				
版 次	2014 年 6 月第 1 版	印 次	2014 年 6 月第 1 次印刷				
印 数	0001—1000	定 价	28.00 元				

书 号 ISBN 978-7-5030-3481-7/P·724

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

前言

网络 RTK 作为 GNSS 高精度实时动态定位的重要手段得到了广泛应用。国内网络 RTK 系统中基准站间距一般在 $30\sim 80\text{ km}$, 且基准站的建设成本较高, 选址要求比较严格。长距离网络 RTK 不仅可以减少建设基准站网的成本, 还可以解决建设基准站较困难地区的网络 RTK 系统建设问题。单历元网络 RTK 算法使系统在单历元即可启动, 流动站用户仅利用单历元数据即可实现厘米级定位。使用观测值的非差误差改正数, 流动站用户不需要选择主参考站进行双差观测值的组合, 能够更好地对与距离相关的误差进行模型化; 且各基准站的误差改正数是独立的, 可以方便地通过网络播发和接收; 利用非差误差改正数可以使网络 RTK 的作业方式更加灵活, 兼容性好, 在用户端可以很方便地与精密单点定位方法进行统一。

本书介绍长距离单历元非差网络 RTK 算法, 能够利用长距离基准站网建立高精度非差误差改正模型, 并利用非差误差改正数实现流动站的单历元厘米级定位。可以促进国内网络 RTK 技术的发展, 能够使网络 RTK 和精密单点定位这两种主要的 GNSS 高精度实时动态定位手段得到统一, 具有非常重要的理论意义和现实意义。

本书共分七章。第 1 章为概论, 简要介绍了网络 RTK, 对 RTK 技术和 PPP 技术做了较为系统的总结, 使读者对两种技术有概要了解; 第 2 章为长距离网络 RTK 中使用到的 GNSS 定位理论知识; 第 3 章介绍长距离网络 RTK 中涉及的定位误差; 第 4 章为长距离网络 RTK 的基准站模糊度解算方法, 首先介绍了比较具有代表性的基准站模糊度解算方法, 然后重点介绍长距离网络 RTK 基准站整周模糊度单历元解算方法; 第 5 章为长距离基准站间的非差误差改正方法, 首先介绍了已有的以双差为主的误差改正方法, 然后介绍本书区域误差的非差改正方法和分类区域误差非差改正方法; 第 6 章为长距离网络 RTK 流动站的整周模糊度解算, 主要介绍已有的流动站模糊度解算方法和长距离网络 RTK 流动站整周模糊度单历元解算方法; 第 7 章为基于非差误差改正数的长距离单历元网络 RTK 的综合实验。通过以上七章系统地介绍, 使读者对长距离单历元非差 GNSS 网络 RTK 理论和方法有一个较为全面的了解。

本书的主要读者对象为从事卫星大地测量, 特别是高精度 GNSS 实时动态定

位算法方面的研究人员以及高等学校从事测绘技术和相关专业的师生。由于作者水平有限,加之时间仓促,书中难免存在诸多不足与不妥之处,敬请读者批评指正。本书是以作者博士期间的研究成果为主体内容编写的,在此感谢我的恩师刘经南院士,以及葛茂荣、唐卫明、高星伟三位老师的教诲。本书编写过程中得到了徐爱功教授的支持和帮助,在此表示诚挚感谢。

本书在编写过程中,参考了国内外许多文献,特别是刘经南院士、葛茂荣、唐卫明、高星伟三位老师的著作,以及徐爱功教授的相关论文,在此表示诚挚感谢。本书在编写过程中,得到了徐爱功教授的支持和帮助,在此表示诚挚感谢。

本书在编写过程中,参考了国内外许多文献,特别是刘经南院士、葛茂荣、唐卫明、高星伟三位老师的著作,以及徐爱功教授的相关论文,在此表示诚挚感谢。本书在编写过程中,得到了徐爱功教授的支持和帮助,在此表示诚挚感谢。

目 录

第 1 章 概 论	1
§ 1.1 长距离单历元非差网络 RTK 的发展背景与意义	1
§ 1.2 GNSS 高精度实时动态定位	5
§ 1.3 网络 RTK 的算法	9
§ 1.4 本书的研究内容	14
第 2 章 长距离 GNSS 网络 RTK 中的定位理论与方法	15
§ 2.1 长距离 GNSS 网络 RTK 中的观测值及观测方程	15
§ 2.2 差分定位的数学模型	16
§ 2.3 观测方程的线性化	19
§ 2.4 长距离 GNSS 网络 RTK 中的观测值线性组合	25
第 3 章 长距离网络 RTK 中的定位误差	27
§ 3.1 与卫星有关的误差	27
§ 3.2 与接收机和测站有关的误差	31
§ 3.3 与信号传播有关的误差	33
第 4 章 长距离网络 RTK 基准站的整周模糊度解算	39
§ 4.1 基准站间整周模糊度解算方法	39
§ 4.2 长距离网络 RTK 基准站整周模糊度的单历元解算	45
§ 4.3 长距离网络 RTK 基准站的整周模糊度单历元解算实验	52
第 5 章 长距离基准站间区域误差非差改正方法	58
§ 5.1 网络 RTK 流动站误差改正方法	58
§ 5.2 区域误差的非差改正方法	62
§ 5.3 分类区域误差非差改正方法	68
§ 5.4 长距离基准站间区域误差非差改正方法实验	77
第 6 章 长距离网络 RTK 流动站的整周模糊度解算	92
§ 6.1 流动站实时动态整周模糊度解算方法	92

§ 6.2	长距离网络 RTK 流动站整周模糊度的单历元解算方法	99
§ 6.3	长距离网络 RTK 流动站模糊度单历元解算实验	106
第 7 章	基于非差误差改正数的长距离单历元网络 RTK 算法综合实验	113
参考文献	.....	123
1	.....	
2	.....	
3	.....	
4	.....	
5	.....	
6	.....	
7	.....	
8	.....	
9	.....	
10	.....	
11	.....	
12	.....	
13	.....	
14	.....	
15	.....	
16	.....	
17	.....	
18	.....	
19	.....	
20	.....	
21	.....	
22	.....	
23	.....	
24	.....	
25	.....	
26	.....	
27	.....	
28	.....	
29	.....	
30	.....	
31	.....	
32	.....	
33	.....	
34	.....	
35	.....	
36	.....	
37	.....	
38	.....	
39	.....	
40	.....	
41	.....	
42	.....	
43	.....	
44	.....	
45	.....	
46	.....	
47	.....	
48	.....	
49	.....	
50	.....	
51	.....	
52	.....	
53	.....	
54	.....	
55	.....	
56	.....	
57	.....	
58	.....	
59	.....	
60	.....	
61	.....	
62	.....	
63	.....	
64	.....	
65	.....	
66	.....	
67	.....	
68	.....	
69	.....	
70	.....	
71	.....	
72	.....	
73	.....	
74	.....	
75	.....	
76	.....	
77	.....	
78	.....	
79	.....	
80	.....	
81	.....	
82	.....	
83	.....	
84	.....	
85	.....	
86	.....	
87	.....	
88	.....	
89	.....	
90	.....	
91	.....	
92	.....	
93	.....	
94	.....	
95	.....	
96	.....	
97	.....	
98	.....	
99	.....	
100	.....	

Contents

Chapter 1 Introduction	1
§ 1.1 Development Background and Significance of Long Range Undifferenced Network RTK at Single Epoch	1
§ 1.2 GNSS Real-time Dynamic High Precision Positioning	5
§ 1.3 Algorithms of Network RTK	9
§ 1.4 Research Details	14
Chapter 2 Positioning Theory and Methods of Long Range GNSS Network RTK	15
§ 2.1 Observations and Those Equations of Long Range GNSS Network RTK	15
§ 2.2 Mathematical Models of Differential Positioning	16
§ 2.3 Linearization of Observation Equations	19
§ 2.4 Linear Combination of Observations in Long Range GNSS Network RTK	25
Chapter 3 Positioning Errors of Long Range Network RTK	27
§ 3.1 Errors Relating to Satellite	27
§ 3.2 Errors Relating to Station and Receiver	31
§ 3.3 Errors Relating to Signal Propagation	33
Chapter 4 Ambiguity Fixing between Base Stations of Long Range Network RTK	39
§ 4.1 Methods of Ambiguity Fixing between Base Stations	39
§ 4.2 Algorithm of Integer Ambiguity Resolution between Long Range Network RTK Base Stations at Single Epoch	45
§ 4.3 Test of Integer Ambiguity Resolution between Long Range Network RTK Base Stations at Single Epoch	52

Chapter 5	Method of Undifferential Regional Error Correction between Long Range Base Stations	58
§ 5.1	Methods of Error Correction of Network RTK Rover	58
§ 5.2	Methods of Undifference Regional Errors Correction	62
§ 5.3	Methods of Undifference Classified Regional Error Correction	68
§ 5.4	Test of the Method of Undifferential Regional Error Correction between Long Range Base Stations	77
Chapter 6	Integer Ambiguity Resolution of Long Range Network RTK Rover	92
§ 6.1	Methods of Real Time Dynamic Ambiguity Resolution of Rover	92
§ 6.2	Methods of Ambiguity Resolution at Single Epoch of Long Range Network RTK Rover	99
§ 6.3	Test of Ambiguity Solution at Single Epoch of Long Range Network RTK Rover	106
Chapter 7	Comprehensive Tests of Long Range Network RTK Algorithm at Single Epoch Using Undifference Error Corrections	113
References		123

第1章 概 论

§ 1.1 长距离单历元非差网络 RTK 的发展背景与意义

1.1.1 长距离单历元非差网络 RTK 的发展背景

从 20 世纪 70 年代开始,全球导航卫星系统(GNSS)逐步发展起来,卫星导航定位技术也随之成为人类获取位置信息和时间信息的重要手段。GNSS 卫星导航定位技术是采用 GNSS 导航卫星对地面、海洋、空中和空间用户进行导航定位的技术。GNSS 卫星导航定位技术能够实现全球性、全天候、高精度的导航定位,并在军事、空间技术、国民经济建设等领域得到了广泛的应用。GNSS 卫星导航定位会受到卫星钟差、接收机钟差、中性大气延迟误差、电离层延迟误差、卫星轨道误差等误差的影响,从而降低了 GNSS 定位的精度。为了满足高精度实时动态定位的需求,高精度实时动态定位技术成为 GNSS 卫星导航定位技术的研究热点。

目前,载波相位动态实时差分(RTK)技术和精密单点定位(PPP)技术是比较重要的 GNSS 高精度实时动态定位手段。RTK 定位技术分为常规 RTK 定位技术和网络 RTK 定位技术,常规 RTK 定位技术是一种基于单基准站和高精度载波相位观测值的实时动态定位技术,主要利用单基准站进行差分定位,以削弱或消除各种观测误差的影响,但其流动站作业范围一般在基准站周围 15 km 以内,并且作业成本大、操作烦琐。为了克服常规 RTK 定位技术的不足,随着网络技术、计算机技术、无线通信技术的迅速发展,就出现了网络 RTK 定位技术,此技术成为 GNSS 高精度实时动态差分定位的典型代表。网络 RTK 是在一个区域内建立多个基准站,然后利用基准站网高精度的载波相位观测数据对流动站用户观测值的误差进行改正,并得到高精度的流动站定位结果。PPP 技术是在一般单点定位的基础上发展起来的一种新的定位方式,主要利用精密卫星轨道、卫星钟差和非差载波相位观测值,估计出一些系统误差后直接得到用户高精度的地心参考系统坐标。

由于网络 RTK 有许多优点,能够实时为覆盖区域内的各种工程、科研、社会经济等需求提供可靠的服务,因此,网络 RTK 技术得到了广泛的应用。同时,连续运行基准站(CORS)系统作为网络 RTK 系统的重要基础设施,在国内外许多国家和地区纷纷建立起来。如美国、加拿大、德国、日本等都建立了自己的国家

CORS 系统,我国许多省市也都建立或正在建设自己的 CORS 系统。网络 RTK 算法作为网络 RTK 技术的最核心部分,受到国内外许多 GNSS 高精度实时动态定位研究者的关注,研究者在此方面取得了很多成果。

网络 RTK 的算法可以分为三个关键内容:一是基准站间实时观测值的整周模糊度解算,主要是基准站观测值误差的计算;二是区域误差模型的建立,也就是流动站大气等环境误差和观测值误差的计算与消除;三是流动站用户处整周模糊度的确定,即进行流动站高精度动态定位(高星伟,2002)。只有准确确定基准站的模糊度,才能得到高精度的基准站综合误差,或是建立高精度的区域误差改正模型,从而很好地消除流动站的观测误差影响,以至快速进行流动站整周模糊度的解算,得到流动站的厘米级定位结果。因此,网络 RTK 算法的首要前提条件是基准站载波相位观测值整周模糊度的准确确定。由于网络 RTK 系统中 CORS 站的间距一般都在 30~80 km,所以基准站间的相对电离层延迟误差和中性大气延迟误差等误差对双差观测值的影响较大,即使在使用双频观测数据和基准站坐标已知的情况下,利用直接取整的方法确定整周模糊度也很困难。因此需要一些特殊的方法来进行基准站整周模糊度的解算,例如三步法、单历元搜索方法等。在基准站模糊度确定之后,就可以采取一些方法建立区域误差模型进行流动站误差改正,例如虚拟参考站法、区域误差改正参数法、综合误差内插法等。流动站观测值的误差得到改正之后,就可以确定流动站载波相位观测值的整周模糊度,由于消除了流动站的大部分观测误差,因此可以采用整周模糊度解算方法确定流动站载波相位观测值的整周模糊度,例如整数最小二乘法及其降相关平差算法等。

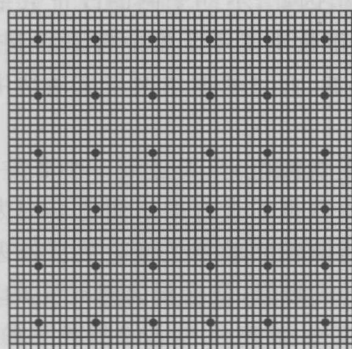
电离层延迟误差等主要系统误差具有随距离的增加相关性降低的特性,所以目前建立和使用的 CORS 网基准站间距大都在 30~80 km 之间。现有比较成熟的商业化软件主要是在基准站间距为几十千米的网络 RTK 系统中应用。长距离基准站间整周模糊度的确定以及大范围内区域误差的高精度误差改正数确定比较困难,这是限制基准站间距离不能太远的重要原因。现有的网络 RTK 系统所采用的软件需要一段时间才能启动系统,即完成基准站间整周模糊度的确定,新升起卫星的模糊度确定也需要十几分钟或几分钟。并且随着观测时间的增加,还需要考虑基准卫星变化的问题。流动站用户也需要一段时间来进行初始化。网络 RTK 和 PPP 作为目前高精度实时动态定位的重要手段,由于它们的定位模式不同,目前还尚未找到两者相统一的方法。

1.1.2 长距离单历元非差网络 RTK 的意义

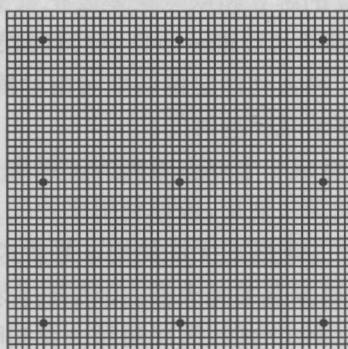
目前,网络 RTK 技术已经成为 GNSS 高精度实时动态定位领域一种不可替代的定位方法,并且得到了广泛的应用。但 GNSS 网络 RTK 技术在作业距离和定位速度方面还有待进一步提高。如何增加网络 RTK 的作业距离,缩短系统启

动和流动站初始化的时间,是网络 RTK 技术需要解决的问题。而对于网络 RTK 和 PPP 这两种比较重要的 GNSS 高精度实时动态定位技术,寻找到两者相统一的方法,克服两者的缺点,并将其优点结合起来,是当前高精度实时动态定位研究的热点问题之一。

基准站网的使用使得利用网络 RTK 方法可以建立中性大气延迟误差、电离层延迟误差、卫星轨道误差等误差的高精度区域改正模型。由于区域内的中性大气延迟误差、电离层延迟误差、单颗卫星的轨道误差等系统误差随基准站间距离的增加而相关性降低,基准站载波相位观测值整周模糊度的解算和区域误差改正模型的精度势必受基准站间距的影响,这也就限制了网络 RTK 的有效作业距离。如果在 $240\text{ km} \times 240\text{ km}$ 的范围内使用网络 RTK 系统,按 40 km 的站间距离布设基准站需要 36 个,若按 100 km 的站间距布设则只需要 9 个基准站,如图 1.1 所示。如果按照 200 km 的站间距进行布站,只需 4~5 个站就可以完成对该区域的覆盖。因此,在不以损失定位精度为代价的情况下,使用长距离网络 RTK 算法,增加网络 RTK 的有效作业距离,可以成倍地降低网络 RTK 系统的建设和维护成本,而且可以解决建设基准站比较困难地方的网络 RTK 系统建设问题。



(a) 40 km 站间距离(36个)



(b) 100 km 站间距离(9个)

图 1.1 相同范围内的不同站间距离的 CORS 网布设

单历元网络 RTK 的方法,需要单历元确定基准站整周模糊度,网络 RTK 基准站网在单历元即可启动,新升起卫星的整周模糊度确定也只需一个历元,不需要考虑基准卫星变化的问题。而且还可以提供适用于单历元网络 RTK 用户的实时高精度区域电离层延迟误差及中性大气延迟误差等误差改正,流动站用户也仅需利用单历元数据即可实现厘米级定位,无须长时间观测数据进行初始化。单历元的网络 RTK 方法可以将系统启动和流动站初始化的时间缩短到最小,即单历元就可完成系统启动和流动站整周模糊度解算工作。

网络 RTK 方法和 PPP 方法作为目前高精度实时动态定位的重要手段,有其

各自的优缺点。

1. 网络 RTK 的优缺点

网络 RTK 技术利用基准站网的观测值建立区域误差改正模型,区域内任意位置的误差改正数都可根据误差模型计算出来,网络 RTK 流动站用户的观测值经过误差改正之后可用于高精度动态定位。流动站用户不需要自己建立误差模型或使用国际 GNSS 服务(IGS)的精密星历和卫星钟差对各种误差进行改正或估计,流动站定位解算的未知参数较少,仅包括位置参数和整周模糊度参数。网络 RTK 技术进行实时定位的定位精度高,能够实时得到厘米级的定位精度,并且流动站用户的初始化时间短,甚至可以实现流动站的单历元厘米级定位。同常规的单站 RTK 技术相比,网络 RTK 技术覆盖范围更大、作业成本较低,并且提高了流动站定位精度和减少了流动站用户定位的初始化时间。

目前网络 RTK 中一般都使用传统的双差方法进行流动站双差观测值误差改正,定位精度与作业距离密切相关,需要从基准站网中选择一个基准站作为主参考站进行差分观测值的组成,如果流动站在基准站网中不断地移动,有时还需要重新选择主参考站。整个基准站网按照双差模式进行双差误差改正,各子网独立进行双差模糊度的解算和双差误差改正数的计算,因此,不同子网的改正数是不一致的,或者说整个 CORS 网同一时刻的误差改正数不是基于统一模型得到的,可能造成不同子网流动站定位结果间相对精度降低,而且基准站网与流动站用户间的数据传输要消耗一些时间。

此外,组成一个双差观测值需要四个非差观测值,只要丢失一个非差观测值,其他三个就无法使用,数据利用率较低。一些数据质量好的观测值会因为与之配对的数据出了问题而无法使用。再者,双差观测值间的相关性给数据处理增加了难度,若不顾及双差相关性,仍将其视为独立观测值,就会损害理论上的严密性。组成双差观测组合时,需要选择一观测时间较长、高度角合适的基准卫星,当基准卫星下落到低高度角或是在视场中消失时,就会出现变换基准卫星的问题。

2. PPP 的优缺点

PPP 有许多优点,例如可使用的观测值多、保留了较完整的观测信息、能直接得到测站坐标、不同测站的观测值不相关、测站与测站之间无距离限制等,但其不利之处是未知参数较多,无法采用差分方法消除误差的影响,需要利用完善的误差改正模型加以改正。另外,开始作业时初始定位收敛时间长,必须有高精度的 IGS 卫星轨道和卫星钟差产品,还需估计天顶对流层延迟误差等参数。初始定位需要较长的观测时间,是因为伪距观测值的精度不高(主要是所利用的 M-W 组合观测值受噪声影响比较大),窄巷相位组合观测值的波长较短导致模糊度难以确定。并且在实时定位方面 PPP 的精度不如网络 RTK,特别是在高程方向定位精度较差。

如何克服双差网络 RTK 与 PPP 的缺点,使两者对作业者来说能够很好地统

一起来,充分发挥出各自的优点,一直是高精度实时动态定位研究者关心的问题。使用观测值的非差误差改正数进行网络 RTK 定位,既可以充分利用基准站网进行区域内流动站用户的高精度误差改正,又可以在基准站网覆盖区域内利用观测值的非差误差改正数进行 PPP,该问题就可迎刃而解。如果在网络 RTK 中使用非差误差改正数,则流动站用户不需要选择主参考站来进行双差观测值的组合,所有基准站都一样,没有主辅之分;一个基准站上一颗卫星的误差改正数包含了所有的误差改正信息;各基准站的误差改正数是独立的,可以方便地通过网络进行播发和流动站接收;利用非差误差改正数可以使网络 RTK 的作业方式更加灵活、兼容性更好,在用户端可以很方便地与 PPP 方法统一。

基于非差误差改正数的长距离单历元网络 RTK 算法,可以实现长距离网络 RTK 定位,扩大网络 RTK 系统的作业距离,降低系统建设和维护的成本;可以在单历元启动系统和实现流动站厘米级定位,使系统的初始化时间和流动站定位时间缩小到最短;能够综合网络 RTK 和 PPP 的优点,克服两者的缺点,实现这两种高精度实时动态定位技术的统一;可以促进网络 RTK 技术和 PPP 技术的进一步发展和应用。采用非差误差改正数进行网络 RTK 定位,而不使用双差定位模式,可以在理论上实现不同 CORS 网之间的融合,提高资源利用率。因此,基于非差误差改正数的长距离单历元网络 RTK 算法的研究具有十分重要的理论意义和现实意义。

§ 1.2 GNSS 高精度实时动态定位

由于 GNSS 卫星和接收机的硬件问题及接收环境问题,卫星信号的生成和接收会产生误差,同时,卫星信号经过电离层、对流层等传播介质的时候会发生折射、反射,使信号中包含误差,这些误差的存在会大大减低 GNSS 定位的精度。消除或削弱 GNSS 定位中各种误差影响是高精度实时动态定位需要完成的一项非常重要的工作。目前,RTK 技术和 PPP 技术正是通过各种误差的确定和消除来实现 GNSS 高精度实时动态定位的。

1.2.1 常规 RTK 技术

常规 RTK 进行定位作业时,以一个已知坐标的测站为基准站,流动站用户在基准站周围作业,两站相距一般不超过 15 km。由于卫星轨道误差、电离层延迟误差和中性大气延迟误差等具有空间相关性,因此,基准站和流动站的同步观测值受到相近的卫星轨道、电离层延迟和中性大气延迟等误差影响。将基准站和流动站的同步观测数据做双差组合后,消除了接收机钟和卫星钟误差,而流动站的卫星轨道误差、电离层延迟误差和中性大气延迟误差被大大削弱,从而获得高精度的双差

观测值,可进行流动站双差整周模糊度的解算,得到厘米级的定位结果。常规 RTK 定位系统当中的硬件除了基准站和流动站的 GNSS 信号接收设备外,还需要有数据通信设备。基准站实时地将基准站坐标和载波相位观测数据通过数据通信链路播发给在周围工作的流动站用户。流动站用户使用动态双差定位的作业模式计算出流动站坐标。常规 RTK 系统如图 1.2 所示。

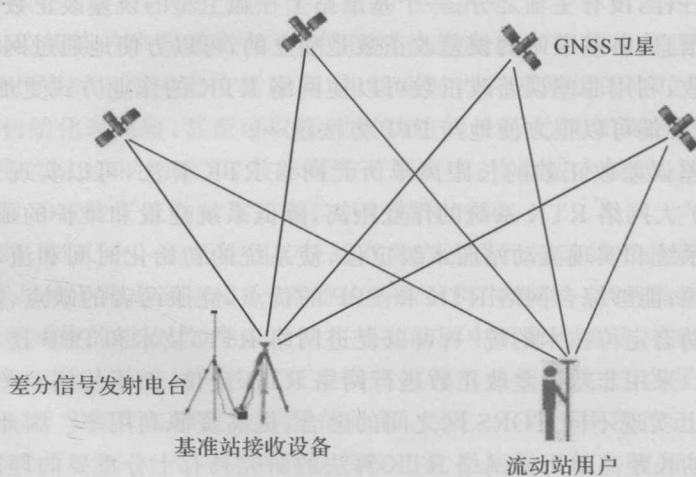


图 1.2 常规 RTK 系统示意

1.2.2 网络 RTK 技术

GNSS 网络 RTK 又称为多基准站 RTK,是在一定的区域内建立多个(一般为三个或三个以上)GNSS 基准站,对该地区构成网状覆盖,并以这些基准站为基准,计算和发播改正信息,对该地区内的流动站用户进行实时误差改正的定位方式(刘经南等,2000)。网络 RTK 技术包括了为覆盖范围内的流动站用户实时提供高精度 GNSS 定位结果的一系列技术,主要是连续运行 GNSS 基准站网络、计算机网络通信、无线通信、GNSS 高精度定位和实时定位技术等。

网络 RTK 系统由基准站网、数据处理中心、数据通信链路和用户部分组成。基准站网一般由多个基准站组成,基准站上大部分情况下都配备双频 GNSS 接收机、数据通信设备和气象观测仪器等。可以利用高精度的 GNSS 数据处理软件采用静态定位方法获得基准站的精确坐标。基准站上的高质量接收机全天候不断地进行连续观测,然后使用数据通信设备实时地将观测数据传送给数据处理中心,数据处理中心首先对各基准站的数据进行处理,待基准站整周模糊度确定之后,实时建立区域误差改正模型。网络 RTK 系统的通信方式可分为单向数据通信和双向数据通信。基准站网与数据处理中心之间的数据通信可采用数字数据网(DDN)

或无线通信等方法进行。流动站用户和数据处理中心之间的数据通信则可通过 GSM、GPRS、CDMA 等方式进行。网络 RTK 系统如图 1.3 所示。

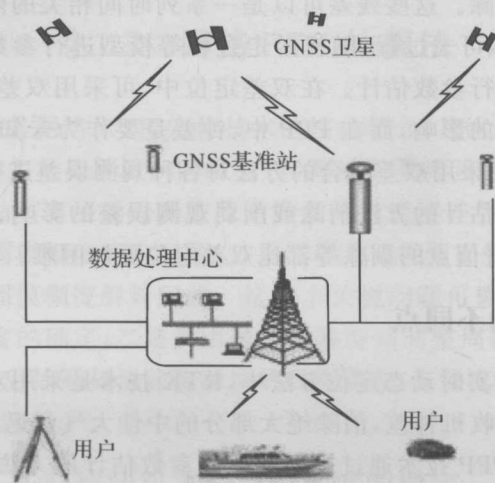


图 1.3 网络 RTK 系统示意

1.2.3 PPP 技术

通常 GNSS 单点定位指利用伪距观测值及广播星历的卫星轨道参数和相关改正对单台接收机进行定位。由于伪距的观测噪声、广播星历的轨道精度、卫星钟差改正精度的影响,这种单点定位精度较低,仅能满足一般的导航定位需求。PPP 技术是在一般单点定位的思想发展起来的一种高精度定位方式,主要是利用精密卫星轨道、卫星钟差及双频测码伪距和载波相位观测值,估计出一些系统误差后得到精密定位结果。根据卫星轨道和卫星钟差的精度及观测数据质量等不同,定位精度由亚米到几个厘米不等。

PPP 技术在低轨卫星定轨、大范围的科学考察、国土资源调查等方面具有广泛的应用。PPP 如果采用最小二乘估计方法只适合于静态定位方式,不能很好地描述系统的动态特征。卡尔曼滤波估计方法引入了状态空间的概念,借助系统的状态转移方程,根据前一时刻的状态估值和当前时刻的观测值递推估计新的状态估值,更加准确地反映了系统的运动状态,更适合于 PPP 的参数估计。与双差定位模式相比,PPP 的可用观测值多,保留了较多的观测信息,不同测站的观测值不相关,测站之间无距离限制。由于无法采用差分定位的方式消除或削弱观测误差影响,因此,必须利用完善的误差改正模型对各种误差加以改正。

PPP 中,如果没有周跳发生,则模糊度参数是不变的,而卫星钟差、接收机钟差、电离层延迟误差、中性大气延迟误差等是随时间变化的。在 PPP 的数据处理

中,主要考虑中性大气延迟和钟差参数的随机模型,电离层延迟误差可以使用双频数据的无电离层组合消除或削弱。中性大气延迟误差利用模型进行改正后,还存在一部分残差无法消除。这些残差可以是一系列时间相关的随机过程的叠加,可以采用一阶高斯-马尔可夫过程、随机游走过程等模型进行参数估计,也可采用分段线性估计的方法进行参数估计。在双差定位中,可采用双差组合的方法消除卫星钟差和接收机钟差的影响,而在 PPP 中,钟差是要作为未知参数来进行处理或估计的。因为 PPP 不采用双差组合的方法对各种观测误差进行消除或削弱,只能利用模型改正和参数估计的方法消除或削弱观测误差的影响。所以,PPP 观测值周跳的探测和修复、野值点的剔除等都比双差定位更加困难。

1.2.4 两种技术的不同点

在 GNSS 高精度实时动态定位方法中,RTK 技术是采用双差的定位模式,可以消除卫星钟差和接收机钟差,消除绝大部分的中性大气延迟误差、电离层延迟误差、卫星轨道误差。PPP 技术通过模型改正和参数估计的方法进行误差处理。因此,二者的定位模式是不相同的,RTK 技术与 PPP 技术的不同点有:

(1)作业方面不同。RTK 用户定位需要的初始化时间短,只需几分钟甚至单历元即可完成,PPP 的初始化需要十几分钟或是几十分钟。

(2)观测数据利用率不同。RTK 采用双差模式,数据利用率较低,四个非差观测值才能组成一个双差观测值,保留的观测信息少;PPP 数据利用率高,可以保留更多的观测信息,在某些特殊的应用中,如时间传递就必须采用非差的 PPP 模式来确定接收机的钟差。

(3)观测模型不同。RTK 采用双差定位模式,可利用差分定位的方式消除和削弱观测值中的各种误差影响;PPP 不采用双差定位模式,观测模型比较复杂,除了需考虑参数解算的数学模型外,还需考虑各种更复杂的误差改正模型。

(4)观测值周跳探测与修复的工作量不同。RTK 定位时,一般是利用双差观测值进行周跳的探测与修复,在双差观测值中,大部分误差已经消除或削弱,仅包含观测噪声,因此,其探测与修复周跳比较容易,如果是单历元网络 RTK 定位则不需要进行周跳的探测与修复;而 PPP 只能利用单站数据进行周跳的探测与修复,其测码伪距观测值的质量决定了周跳探测与修复质量的好坏。

(5)定位参数数量不同。RTK 定位当中需要估计的参数较少,经过双差组合后,各种误差的影响已经较小,不需要对各种误差进行估计,待估参数中只有位置参数和整周模糊度参数;PPP 需要估计的参数比较多,除了需估计坐标位置、接收机钟差和模糊度参数外,还需要估计中性大气延迟误差等,并且由于受观测误差残差的影响,PPP 的模糊度确定问题也更加复杂。

综上所述,网络 RTK 技术与 PPP 技术有诸多不同之处,这也使它们的优缺点