

GNSS

测量数据处理

王爱生 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

GNSS 测量数据处理

王爱生 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书从实用的角度系统地论述了应用 GPS 在地球上进行测量的理论和方法。全书共分 13 章,第 1 章到第 3 章介绍 GPS 基本知识、坐标系统和时间系统、卫星轨道理论;第 4 章介绍 GPS 观测量及其线性组合;第 5 章回顾参数估计方法,包括序贯平差等内容;第 6 章讲述单点定位、相对定位的平差模型;第 7 章给出一般性偏差的计算公式,包括电离层对流层的改正、钟差等;第 8 章介绍观测数据的预处理方法,主要是周跳和粗差;第 9 章简述初始相位模糊度解算的方法;第 10 章和第 11 章介绍现阶段流行的精密单点定位和网络 RTK 技术,其中又增加了精密计算时的偏差改正和模糊度的快速解算方法;第 12 章和第 13 章介绍几个常用的 GPS 数据处理软件,有 TEQC、Bernese、GAMIT 等,并且对 IGS 的作用和功能进行简单的描述。

图书在版编目(CIP)数据

GNSS 测量数据处理 / 王爱生著. — 徐州:中国矿业大学出版社,2010.2

ISBN 978 - 7 - 5646 - 0607 - 7

I. ①G… II. ①王… III. ①卫星导航—全球定位系统—数据处理 IV. ①TN967.1②P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 027921 号

书 名 GNSS 测量数据处理

著 者 王爱生

责任编辑 潘俊成 褚建萍

责任校对 赵朋举

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

排 版 中国矿业大学出版社排版中心

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

经 销 新华书店

开 本 787×960 1/16 印张 14 字数 274 千字

版次印次 2010 年 2 月第 1 版 2010 年 2 月第 1 次印刷

定 价 25.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

继美国的 GPS 和俄罗斯的 GLONASS 之后,欧洲和中国正在建设各自的全球卫星导航定位系统 Galileo 和北斗,这些系统统称为 GNSS。GNSS 不仅在保障各国的国家安全、打赢全球和局部战争方面有着至关重要的作用,而且渗透到国民经济的各个领域,对人们的日常生活也有着越来越重要的影响。如今,大范围的地面控制测量已经完全被 GPS 取代,图根控制测量也逐渐被 RTK 或 CORS 取代,人们发现出行时越来越离不开 GPS 导航仪了。随着全球卫星导航系统的应用日趋广泛,将会有越来越多的人开始对其发生兴趣,研究它的基本原理,开发应用软件,尤其是会有越来越多的研究生从事这方面的研究工作。这些研究生在本科阶段已经学习了 GPS 的基本原理,对 GPS 的基本概念有了一个比较全面的了解,但是由于本科阶段学习的目的是掌握 GPS 的测量方法,并没有时间和精力从事 GPS 的一些深层次的运算,因此,当他们在研究生阶段从事这方面的研究时感觉比较棘手,从数据的来源、格式到计算公式的获取都比较茫然。本书力求为他们寻求捷径,有关 GPS 数据处理中的文件类型、文件格式、坐标转换、观测值的改正模型、观测方程的列立、粗差和周跳探测、平差方法等都能在本书中找到。本书可以作为本科生和研究生学习 GPS 的参考书,也可以作为从事卫星导航定位的工程技术人员参考书。

本书的重点放在静态单点定位和单基线相对定位的数据处理上,以此为基础,对精密单点定位(PPP)、RTK 和网络 RTK 等技术进行了概略的介绍,最后介绍几个常用的 GPS 数据处理软件。为了便于

阅读资料和下载数据,本书中给出很多常用的网址,还对 IGS 进行了一定的介绍。书中的参考文献具有一定的权威性和代表性,读者不妨一读。本书偏重于应用,但并不缺乏公式推导,尤其是坐标系统和轨道理论部分,作者认为只有通过一定的公式推导,读者才会对相关内容有一个比较清楚的理解和认识。对那些没有经过推导直接给出的公式,我们对其中的符号尽量进行详细的说明,以期读者拿来就能使用。

本书的出版得到了徐州师范大学科研基金项目(09XLR18)和国家自然科学基金项目(40874011)的资助,在此表示感谢。

由于作者水平所限,不足之处还请各位同仁指正。读者如有问题或意见请联系作者本人,我的邮箱是 wanggaisheng58@sohu.com。

作者

2009年10月

目 录

第 1 章 GPS 基本知识	1
1.1 GPS 卫星和星座	2
1.2 GPS 卫星信号	4
1.3 GPS 信号处理	7
1.4 GLONASS 描述	8
第 2 章 坐标系统和时间系统	13
2.1 坐标变换	14
2.2 天球参考系统	17
2.3 地球参考系统	19
2.4 时间系统	23
2.5 地球坐标到天球坐标的转换	30
2.6 本地坐标系统	31
2.7 星固坐标系统	32
2.8 IERS 简介	34
第 3 章 卫星轨道理论	40
3.1 开普勒轨道的描述	40
3.2 卫星的无摄运动	41
3.3 卫星的状态向量	51
3.4 有摄卫星运动	54
3.5 GPS 广播星历	58
3.6 轨道的表格化和内插	66
3.7 GPS 精密星历	67
第 4 章 GPS 观测值及其线性组合	72
4.1 基本观测方程	72

4.2	电离层和对流层的延迟	74
4.3	差分观测方程	75
4.4	观测值的线性组合	79
4.5	RINEX 观测文件及格式说明	84
第 5 章	参数估计	92
5.1	最小二乘估计	92
5.2	序贯最小二乘估计	93
5.3	参数的消去和回代	95
5.4	参数的约束	97
5.5	解算结果的统计检验	99
第 6 章	平差模型	101
6.1	几何距离的线性化	101
6.2	单点定位	102
6.3	相对定位	104
第 7 章	一般性偏差的计算	112
7.1	卫星信号发射时刻	112
7.2	地球自转改正	113
7.3	电离层偏差	113
7.4	对流层偏差	115
7.5	卫星钟差	117
7.6	坐标的天线高改正	118
7.7	相对论效应	118
第 8 章	粗差和周跳探测	120
8.1	选举多数法探测码粗差	120
8.2	基于拟准检定法的粗差探测	122
8.3	基于低阶多项式的粗差和周跳探测	124
8.4	基于电离层残差线性组合的周跳探测	125
8.5	基于 MW 线性组合的周跳探测	127
8.6	基于无电离层线性组合的周跳探测	128
8.7	用高阶差分的时序特征探测周跳	129

8.8	利用双低通滤波器探测周跳	134
8.9	利用多普勒观测值探测周跳	136
8.10	利用三差解的残差探测和修复周跳	137
8.11	预处理方法的选择	141
第 9 章	模糊度解算策略	143
9.1	解算模糊度的必要性	143
9.2	模糊度解算策略	145
9.3	解算策略的选择	152
第 10 章	精密单点定位	154
10.1	PPP 模型	155
10.2	施加的各种精密改正	158
第 11 章	RTK 和网络 RTK	166
11.1	差分 GPS(DGPS)概述	166
11.2	差分技术的分类	166
11.3	网络 RTK	168
11.4	OTF 技术	172
第 12 章	常用 GPS 数据处理软件介绍	176
12.1	TEQC	176
12.2	Bernese GPS 软件	180
12.3	GAMIT/GLOBK	190
第 13 章	IGS 简介	197
参考文献	203
附录一	本书中的英文缩写	211
附录二	本书中的计量单位	214
附录三	GPS 计算时的常用常数	215

第 1 章 GPS 基本知识

1973 年,美国国防部决定建立、发展、实验、开发一个航空器的全球定位系统(GPS)。这个决定导致了 NAVSTAR GPS 的诞生。Wooden 对 GPS 的定义是这样描述的:“NAVSTAR 全球定位系统(GPS)是由美国国防部开发的一个全天候的空基导航系统,目的是要满足军队需求,以便在地球上或地球附近连续地精确确定在一个通用参考系统下的位置、速度和时间”(Wooden, 1985)。

从上述定义可以清楚地看出,发展 GPS 的基本目的是要满足军方的需要。但是,美国国会已经允许民间用户有条件地使用这个系统。在近 20 年间,民间用户对 NAVSTAR GPS 的使用得到迅猛的发展。随着 2000 年 5 月 2 日 SA 的取消,对民间用户来说系统的有用性更加被肯定。对于高精度的 GPS 民间使用来说,最重要的事件之一就是 1994 年国际 GNSS 服务机构的建立(IGS)(Muel-ler et al, 1992; Beutler, 1992; Beutler et al, 1999)。IGS 的建立和运行,使我们能够使用全球的 GNSS 资源来精确确定卫星轨道、获取精确的卫星钟信息、计算精密的地面点位置和速度,并且使精密单点定位成为可能。

其他一些全球导航卫星系统(GNSS)正在运行或在建设。GLONASS 是俄罗斯建立的与 GPS 对应的系统。本章我们将会给出有关这两个 GNSS 系统的更多信息,并比较它们之间的异同。

所有的导航系统(GNSS)都由三部分组成,即空间部分、地面监控部分和用户设备部分。空间部分(卫星)的核心部件是高精度的时钟(铷原子钟或铯原子钟)、导航电文存储器、双频发射和接收机以及微处理器,它接收地面主控站通过注入站发送到卫星的导航电文,并用无线电波连续地发布给广大用户。地面监控部分由分布在地面的若干个监测站、注入站和一个主控站组成,监测站用信号接收机对卫星进行测量,并将测量的数据传给主控站进行处理,编算出导航电文再传送给注入站注入到卫星上。用户设备部分捕获卫星并跟踪这些卫星的运动,对接收到的信号进行变换、放大和处理,以便测量出卫星信号从卫星天线到接收机天线的传播时间或相位差,解译出卫星所发射的导航电文,从而实时地计算接收机天线的位置或通过后处理计算出两台接收机天线之间的基线向量。

1.1 GPS 卫星和星座

出于财政预算上的考虑, GPS 星座发生了几次变化。目前全部的星座名义上有 24 颗卫星, 在全球范围内可以观测到高度角 15° 以上的 4 到 8 颗卫星。卫星位于 6 个几乎是圆形的轨道平面内, 距地球表面高度是 20 200 km, 轨道相对于赤道的倾角是 55° , 卫星运行周期大约是 11 小时 58 分钟(半个恒星日), 如图 1.1。这样设计的结果是, 几乎相同的地球—卫星结构在第二天会重复出现, 但提前 4 分钟。

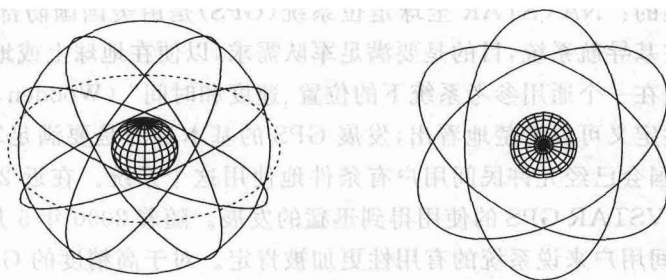


图 1.1 GPS 星座

(a) 从纬度 35° 处看; (b) 从纬度 90° 处看

第一个 GPS 卫星 PRN-4 发射于 1978 年 2 月 22 日。PRN-4 是 Block I 系列卫星中的第一个。Block I 卫星相对于地球赤道的倾角大约为 63° 。实验证明这个配置对于北美地区是最优的, 因为在一天中的大多数时间段, 可以观测到 4 个或更多的卫星。而在其他地区却不是很好。今天所有的 Block I 和 Block II 卫星已经不再使用了。第一颗 Block II 卫星是在 1989 年 2 月发射的。表 1.1 是 GPS 卫星在 6 个轨道上的分布列表。从表中可以看出, 目前 (2009 年 7 月) 正在运行的星座是由 Block II A、Block II R-A、Block II R-B 和 7 个现代化的 Block II R-M 卫星构成的, 星座中有 32 颗卫星。表中的 SVN 是按发射顺序对卫星的编号。

GPS 卫星提供一个平台来安装无线电发射机、原子钟、计算机和其他用于定位的各种设备以及用于军事目的的其他一系列设备(如原子闪烁探测器), 如图 1.2 所示。卫星上的电子设备允许用户操作一个接收机来准同步地测量地面点到 3 颗以上卫星的距离。每个卫星的广播信息允许用户识别卫星并且确定它在任意时刻空间的位置。卫星上安装有太阳能板来提供动力, 安装有反应轮进行姿态控制, 安装有推进系统来进行轨道的调整。

表 1.1 GPS 星座的情况(2009 年 7 月 27 日)

轨道面	SVN	PRN	Block	启用时间	轨道面	SVN	PRN	Block	启用时间
A-1	39	09	II A	1993-06-26	D-1	61	02	II R-B	2004-11-06
A-2	52	31	II R-M	2006-09-25	D-2	46	11	II R-A	1999-10-07
A-3	48	07	II R-M	2008-03-15	D-3	45	21	II R-A	2003-03-31
A-4	38	08	II A	1997-11-06	D-4	34	04	II A	1993-10-26
A-5	27	27	II A	1992-09-09	D-5	24	24	II A	1991-07-04
A-6	25	25	II A	1992-02-23					
B-1	56	16	II R-A	2003-01-29	E-1	51	20	II R-A	2000-05-11
B-2	30	30	II A	1996-09-12	E-2	47	22	II R-B	2003-12-21
B-3	44	28	II R-A	2000-07-16	E-3	40	10	II A	1996-07-16
B-4	49	01	II R-M	2009-03-24	E-4	54	18	II R-A	2001-01-30
B-5	35	05	II A	1993-08-30	E-5	23	32	II A	2006-12-02
B-6	58	12	II R-M	2006-11-17					
C-1	36	06	II A	1994-03-10	F-1	41	14	II R-A	2000-11-10
C-2	33	03	II A	1996-03-28	F-2	26	26	II A	1992-07-07
C-3	59	19	II R-B	2004-03-20	F-3	43	13	II R-A	1997-07-23
C-4	53	17	II R-M	2005-09-26	F-4	60	23	II R-B	2004-06-23
C-5	57	29	II R-M	2007-12-20	F-5	55	15	II R-M	2007-10-17

注:本表中的信息来自:ftp://ftp.unibe.ch/aiub/BSWUSER50/GEN/SATELLIT.I05。

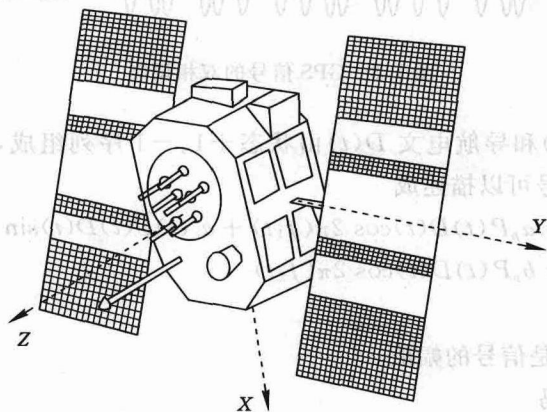


图 1.2 Block II 卫星和星固坐标系

1.2 GPS 卫星信号

所有的由卫星发射的信号均来自卫星振荡器的基本频率 f_0 (表 1.2)。两个正弦曲线的载波 f_1 和 f_2 ($\lambda_1 \approx 19 \text{ cm}, \lambda_2 \approx 24 \text{ cm}$) 被右旋极化, 其上双向调制着码和导航电文, 如图 1.3 所示。

表 1.2 卫星信号的组成

组成成分	频率/MHz
基本频率	$f_0 = 10.23$
载波 L_1	$f_1 = 154f_0 = 1\,575.42 (\lambda_1 = 19.03 \text{ cm})$
载波 L_2	$f_2 = 120f_0 = 1\,227.60 (\lambda_2 = 24.42 \text{ cm})$
P-码 $P(t)$	$f_0 = 10.23$
C/A-码 $C(t)$	$f_0/10 = 1.023$
导航电文 $D(t)$	$f_0/204\,600 = 50 \times 10^{-6}$

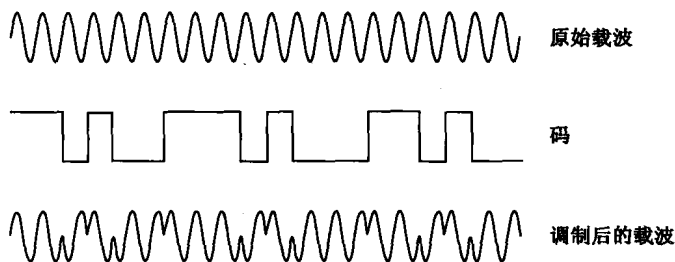


图 1.3 GPS 信号的双相调制

码 $P(t)$ 、 $C(t)$ 和导航电文 $D(t)$ 由状态 $+1$ 、 -1 序列组成, 根据 Bauersima (1982) 生成的信号可以描述成

$$\begin{cases} L_1(t) = a_p P(t) D(t) \cos 2\pi(f_1 t) + a_c(t) C(t) D(t) \sin 2\pi(f_1 t) \\ L_2(t) = b_p P(t) D(t) \cos 2\pi(f_2 t) \end{cases}$$

(1.2.1)

这里 a_p 、 a_c 和 b_p 是信号的幅值。

(1) 伪随机码

这两个码和是由伪随机噪声序列构成的。这些序列由抽头式反馈移存器的硬件设备产生。C/A 码由两个 10 bit 的抽头式反馈移存器的组合生成, 两个寄

存器的输出再次根据二进制相加而产生码序列。每个卫星上安排一个唯一的码序列,序列长 1 023 bit,因为基本频率是 1.023 MHz,所以每毫秒就会重复一次。序列的两个 bit 之间的时间间隔大约相当于 300 m。

P 码是用相似的方法产生的,但是产生的序列长度大约是 2.3547×10^{14} bit,相当于大约 266 天的时间长度。整个码被分成 37 周的小段。每个小段被安排到一个卫星上,依次来定义卫星的 PRN 数。例如,PRN13 是指发射 PRN 码的第 13 周的那段。P 码每隔一周重复一次。该序列比特之间的时间间隔比 C/A 码小 10 倍。因此,精度比 C/A 码大约高 10 倍。P 码可以被加密,这个过程叫做 AS,并且将 P 码转换为 Y 码,而只有将一个保密的转换算法安置在接收机上时,Y 码才是可用的,但是对于民间用户的接收机来说,不会安装这个算法。从 1995 年开始,对所有的卫星都采用了加密技术,该技术大大限制了 GPS 的应用,不过现在有一种码恢复技术可以一定程度恢复 P 码的精度。因此,在数据处理时要注意 P 码伪距的测量精度是不是确实高于 C/A 码伪距[王爱生,2008]。

(2) 导航电文

导航电文是 1 500 bit 长,包含有关卫星钟、卫星轨道、卫星健康状况的信息和其他各种数据。电文分成 5 个子帧。每个子帧包含 10 个字。第一个字被称为遥测码(TLM),包含一个同步模式和一些其他诊断信息。每个子帧的第二个字是转换码(HOW)。这个字中包含 Z 计数,它给出了从当前 GPS 周开始有多少个 1.5 s。接收机据此可以将时钟精确对准 GPS 时间。Z 计数和 P 码给出了在信号发射时刻卫星钟的读数。第一个子帧包含多种标识和定义卫星钟改正的多项式系数(表 1.3)。

表 1.3 广播的钟参数

参 数	说 明
码标识 L_2	在 L_2 上的 C/A 码或 P 码的指示器
周数	GPS 周
L_2 -P-数据标识	在 L_2 -P 码上的数据标识
SV-精度(URA)	距离测量的精度
SV-健康	卫星健康指标
T_{GD}	L_1 - L_2 上的 P 码之间的群延迟差
AODC	钟的数据龄期
t_{0c}	钟的参考历元
a_0, a_1, a_2	卫星钟改正多项式系数,零阶项、一阶项和二阶项

第二个和第三个子帧包含卫星的广播星历,包括三类参数:时间 2 参数,开普勒轨道 6 参数和轨道摄动 9 参数(表 1.4)。时间 2 参数是星历的数据龄期和星历的参考历元;轨道 6 参数是轨道长半径的平方根、轨道的偏心率、升交点赤经、轨道的倾角、近地点角距和升交角;轨道摄动的 9 参数是卫星平均角速度改正数、倾角变化率、升交点赤经变化率、对近地点角距、地心距离、倾角的摄动改正项系数,在第 3.5 节有更详细的说明。

表 1.4 广播星历

参 数	说 明
AODE	星历数据龄期
t_{0e}	星历参考历元
$\sqrt{a}, e, M_0, \omega_0, i_0, \Omega_0$	在 t_{0e} 时的开普勒轨道参数
Δn	卫星平均运行速度之差
\dot{i}	倾角变化率
$\dot{\Omega}$	升交点赤经变化率
C_{uc}, C_{us}	改正系数(近地点角距)
C_{rc}, C_{rs}	改正系数(地心距离)
C_{ic}, C_{is}	改正系数(倾角)

根据 Dierendonck et al(1978),使用广播星历,卫星的地固地心坐标(WGS-84)可以被计算出来。第 4 个和第 5 个子帧包含军事用途的数据、关于电离层的信息和被称为历书的数据(所有 GPS 卫星的低精度轨道信息)。

GPS 用户在处理时可以决定是否使用广播星历或由 IGS 生产的精密星历。广播星历是实时时可获得的,但是,它们“仅有”几米的精度。精密星历有几个厘米的精度,但是在时间上有一定的延迟,最终产品有两周的延迟,快速产品有一天以下的延迟,超级快速产品有三个小时的延迟,超级快速产品是预报的,因此可以用在实时的或近实时的应用中。预报的星历也有小于 1 dm 的精度,大大好于广播轨道。

在处理时要求对卫星钟进行改正。在广播星历中这个信息的精度被人为地降低(SA),但是在 2000 年 5 月 2 日之后,这种人为的做法被美国取消了。图 1.4 说明取消 SA 后对 GPS 卫星钟的影响。SA 政策对单点定位尤其是实时定位有重大影响,在大地测量应用中仅当估计接收机的相对位置时 SA 的影响可以被完全消除,因为在数据处理时采用了接收机间求差的方法,求差后的观测值中消去了卫星钟差参数。IGS 精密轨道中也包含更高精度的卫星钟改正

信息。

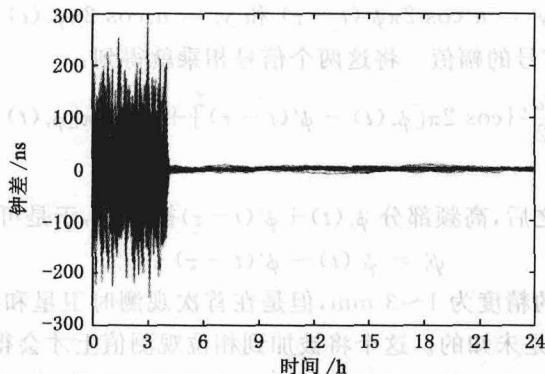


图 1.4 SA 在 2000 年 5 月 2 日关闭时对 GPS 卫星钟的影响

1.3 GPS 信号处理

接收机包含接收信号和处理信号的元件[天线、前置放大器、无线电频率(RF)部分、微处理器、存储设备、控制装置和电源]。信号从天线输入后,就按卫星分开了。一般,这一步是通过 C/A 码来完成的,因为 C/A 码对于每一个卫星是唯一的。RF 部分的基本元件是振荡器,用于产生一个参考频率,通过滤波滤去不需要的频率,并且混合。伪距测量通过下面的过程实现:在接收机中产生一个参考载波并且用已知的 PRN 码的复制码进行调制。调制后的参考信号和接收到的卫星信号进行相关运算。忽略接收机和卫星钟差,这个相关性直接给出了传播时间 τ (或乘上光速 c , $c \cdot \tau$ 就被称为伪距)。

相位测量基于对重建载波信号的处理。这个信号总是通过对接收到的信号和接收机产生的复制信号之间进行相关性运算的码解调技术获取的。对于在 C/A 码接收机上的 L_2 相位或者对于在无码接收机上的两个相位,必须采用其他的技術。一个技术叫做平方技术,对接收到的信号进行自乘,因此所有的“ $\pm\pi$ 调制”被去掉了。结果使没有被调制的平方后的信号有一半的周期。从平方的相位中,正弦波被提出来,其波长是原来波长的一半。另外一种可能的技术是被称为互相关性的技术。现在还有其他更好的跟踪技术被用到大地型接收机里。

接收机在时刻 t 收到信号。这个信号是卫星在时刻 $t-\tau$ 发射的。在时刻 $t-\tau$, 卫星振荡器的相位等于 $\phi^s(t-\tau)$, 而在时刻 t , 接收机振荡器的相位等于

$\phi_r(t)$ 。因此接收机比较下面两个信号：

$$y^s = a^s \cos 2\pi\phi^s(t - \tau) \text{ 和 } y_r = a_r \cos 2\pi\phi_r(t) \quad (1.3.1)$$

这里 a^s 和 a_r 是信号的幅值。将这两个信号相乘就得到：

$$y_r^s = y^s y_r = \frac{a^s a_r}{2} \{ \cos 2\pi[\phi_r(t) - \phi^s(t - \tau)] + \cos 2\pi[\phi_r(t) + \phi^s(t - \tau)] \} \quad (1.3.2)$$

经过低通滤波器之后，高频部分 $\phi_r(t) + \phi^s(t - \tau)$ 被消去，于是可以测量得到

$$\psi_r^s = \phi_r(t) - \phi^s(t - \tau) + n_r^s \quad (1.3.3)$$

相位观测值的精度为 $1 \sim 3$ mm，但是在首次观测时卫星和接收机之间的确切的整波长数 n_r^s 是未知的。这个将被加到相位观测值上才会得到伪距，因此未知的整周数 n_r^s 被称为初始相位模糊度。只要接收机保持对卫星发射的相位的锁定，这个相位模糊度就有相同的值。

1.4 GLONASS 描述

GLONASS 卫星星座像 GPS 一样，GLONASS 是基于卫星的无线电导航系统，能给用户定位和定时信息，它由俄罗斯国防部操纵。GLONASS 的名义星座包含 24 颗卫星，平均分布在三个轨道平面上，这三个轨道在赤道平面内相差 120° 。GLONASS 卫星(见图 1.5)在 19 130 km 的高度上运行，比 GPS 卫星(20 200 km)低大约 1 000 km。这使得轨道周期为 11 小时 15 分 44 秒，相当于一个恒星日的 $8/17$ 。GPS 卫星轨道周期实际上是地球自转周期的一半，但是 GLONASS 卫星不是这样的：GLONASS 卫星在每个恒星日转 $2 \frac{1}{8}$ 周，而 GPS 卫星则转两周。假设星座上全部的 GLONASS 卫星的几何图形每个恒星日重复一次，此时，每一个单独的卫星在轨道平面内要移动 45° 。在 8 个恒星日后，每个 GLONASS 卫星已经完成了 17 次的轨道面旋转，出现在地固坐标系统的相同的位置。图 1.6 比较了一个 GLONASS 卫星和一个 GPS 卫星的地面跟踪。当 GPS 卫星的地面跟踪在一个恒星日重复时，GLONASS 的地面跟踪重复需要 8 个恒星日。图 1.6 中还表示了 GLONASS 轨道面有较大的倾角 ($i=64.8^\circ$)，这使得比 GPS 卫星 ($i=55^\circ$) 在高纬度地区有大的覆盖面。

GLONASS 和 GPS 的主要不同列在表 1.5 中。由于经济的原因，GLONASS 的未来是不确定的。在过去的几年中可操作的卫星的数量一直在减少。在停止 3 年之后，1998 年 11 月发射了 3 颗新的 GLONASS 卫星。又过了两年多，直到 2000 年 10 月又发射了多于 3 颗的 GLONASS 卫星。此后每年都要发

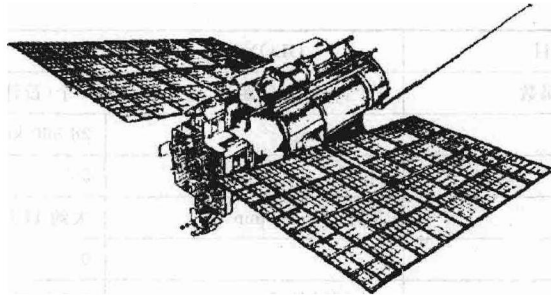


图 1.5 GLONASS 卫星

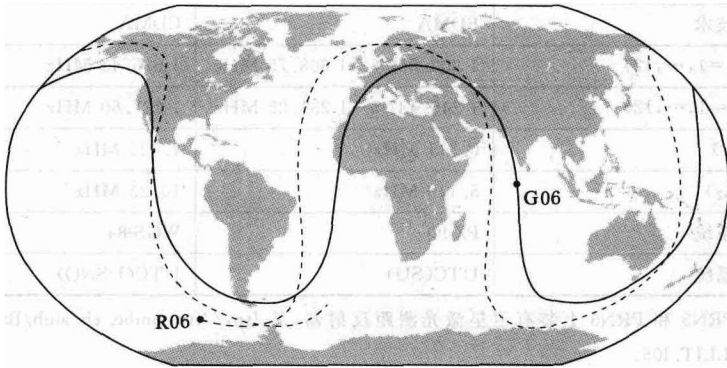


图 1.6 一个恒星日中 GLONASS 卫星(R06)的地面跟踪与 GPS 卫星(G06)的地面跟踪的比较

射 3 颗新的 GLONASS 卫星(从 2001 年 11 月到 2006 年 11 月)。2009 年 8 月 14 日,全部 20 颗卫星中有 17 颗正在使用,除了第 9 号卫星只有 L_1 频率外,其他都提供两个频率上的信号。卫星中有 19 个是新型的 M 类卫星。

GLONASS 当前的星座状态列在表 1.6 中。可以看出,大多数在轨卫星都是 2005 年以后发射的。

表 1.5 GPS 和 GLONASS 卫星的比较

项 目	GLONASS	GPS
卫星数	24(名义上)	24(名义上)
可用的卫星(2009 年 8 月)	17(实际上)	32(实际上)
轨道面	3 个(相隔 120°)	6 个(相隔 60°)