

# 手册

## 卫星时间和频率传递与播发



2010版  
无线电通信局





# 手 册

## 卫星时间和频率 传递与播发

2010版本  
无线电通信局



## ITU无线电通信部门

无线电通信部门的职责是确保卫星业务等所有无线电通信业务合理、平等、有效、经济地使用无线电频谱，不受频率范围限制地开展研究并在此基础上通过建议书。

无线电通信部门的规则和政策职能由世界或区域无线电通信大会以及无线电通信全会在研究组的支持下履行。

### 无线电问题咨询

请联系：

ITU  
无线电通信局  
Place des Nations  
CH -1211 Geneva 20  
Switzerland

电话： +41 22 730 5800  
传真： +41 22 730 5785  
邮箱： [brmail@itu.int](mailto:brmail@itu.int)  
网址： [www.itu.int/itu-r](http://www.itu.int/itu-r)

### Placing orders for ITU publications

请注意，不能通过电话预定，需发送传真或电子邮件。

ITU  
销售和营销部门  
Place des Nations  
CH -1211 Geneva 20  
Switzerland

传真： +41 22 730 5194  
邮箱： [sales@itu.int](mailto:sales@itu.int)

ITU电子书店： [www.itu.int/publications](http://www.itu.int/publications)

## 序言

总体而言，技术的发展，特别是信息通信技术和应用的发展，日益要求不同电子设备的精确测时和同步。

国际电信联盟进行了研究并建立了相关测时度量及其在通信与计算机网络、电子导航系统等应用中的国际标准。

在1974年，国际无线电咨询委员会、与国际计量大会及国际时间局合作，制定了协调世界时（UTC）。

在1978年，CCIR批准了UTC用于“在所有国际电信活动和在所有国际电信联盟官方文件中指明时间”。CCIR还规定，UTC应该被用作“标准频率发射的终极参考”。

1979年ITU世界无线电行政大会（WARC-79）将UTC包括在具有国际条约地位的无线电规则中，并且从那时起，UTC已经被用作（有线和无线）电信网络及其他时间相关应用的主要时间标度。

通过一条具有方便建模时延的清晰、无阻碍路径提供时间和频率信号播发的现代卫星系统是精确时间与频率的主要来源，对海事和航空业务、导航与定位系统、以及对通信和计算机网络正常发挥功能是如此的必要。

本文件是第一部针对由卫星系统所提供的频率和测时信号的应用方法、技术、算法、数据结构和实际应用提供详尽信息的ITU手册。

特别的关注集中于属于无线电导航卫星业务的全球导航卫星系统（GNSS）。GNSS向地球上任何地点提供时间频率信号，并且在目前起着政府、商业、运输和科学应用事实上的主要精确测时信号源的作用。

Valery TIMOFEEV博士  
无线电通信局主任



## 目 录

	页码
序言 .....	iii
前言 .....	vii
致谢 .....	ix
引言 .....	xi
第1章 卫星与时间和频率传递及播发.....	1
第2章 全球定位系统.....	7
第3章 应用于GPS的星基增强系统 .....	21
第4章 GPS系统时间 .....	45
第5章 GLONASS导航卫星系统 .....	51
第6章 通信卫星系统.....	67
第7章 时间标度.....	73
第8章 国家授时中心.....	89
第9章 在卫星时间和频率传递与播发中的相对论效应.....	95
第10章 地球定向和大地测量系统.....	121
第11章 传播和环境因素.....	131
第12章 全球导航卫星系统 – 作为时间传递的一个主要工具.....	141
第13章 采用GPS相位和编码测量的大地测量技术 .....	157
第14章 双向卫星时间和频率传递 (TWSTFT) .....	185
第15章 时间和频率播发的总结.....	197





## 前言

负责科学服务的无线电通信第7研究组（SG 7）是通过1990年在杜塞尔多夫CCIR全体会议上的结构重组而建立的。当时，空间研究和射电天文学研究组（SG 2）与时间和频率标准研究组SG7合并构成了针对科学服务的新SG7。

在该科学服务研究组中的很多活动与推动为达到科学目标而在无线电频谱使用中的先进技术相关联。在这点上，本着为无线电频谱的使用制定建议书来促进精确时间参考的播发以及对这个播发的方法进行标准化的明确目的，时间与频率标准业界已经长期与国际电信联盟（ITU）联合起来。一个重要的必然结果就是确定精确频率标准及其实施的技术。

无线电通信部门SG 7（科学服务）包括4个无线电工作组（WP），它们处理与科学服务范畴之下特定学科相关的技术问题。工作组7A（时间信号和频率标准发射）关心的是由陆地和空间无线电通信业务所进行的时间与频率信号的产生与播发。在过去15到20年中，由卫星系统，主要是导航卫星，提供的精确时间与频率业务已经成为播发的主要方式，并且这些业务的能力已经被显著地提升。总体上说，形成的这些卫星系统的容量增长和发展已经使得很难跟上它们的发展、它们对时间和频率业界以及无线电和电信业界影响的步伐。

本手册提供了关于当前用于精确时间和频率信号播发的卫星系统的全面技术与操作信息。

作为SG 7的主席，将此手册呈现给以上所提到业界的用户是我最大的荣幸，我相信，他们将会发现它是他们自己工作上的一个重要参考。

本手册是多年准备与工作的结果，旨在涵盖卫星技术的发展和它们所导致的能力上的增长。没有来自参与到SG 7及其WP 7A中的很多管理部门的贡献，本手册是不可能完成的。特别的感谢还应给予WP 7A的主席Ronald BEARD先生，感谢他对本项目的领导。我们的特别感激同样给予无线电通信局的A. VASSILIEV先生，他在本手册的准备、编辑和出版中起到了重要的作用。



## 致谢

本手册各个章节起草人所做的工作极为出色，我们想对这些贡献者和很多其他为本手册付出了时间和努力的人表达我们的感谢。

### 卫星系统:

AXELRAD, P.  
KLEPCZYNSKI, W. J.  
BRUNET, M.  
IMAE, M.  
BARTENEV, V.  
KLIMOV, V.  
KOSSENKO, V.  
KRASILSCHKOV, M.  
REVNIVYKH, S.  
REINHARDT, V.  
VASSILIEV, A.

### 时间标度、计时和参考系统:

CORDARA, F.  
McCARTHY, D.  
NELSON, R.  
ARIAS, E.  
BAUCH, A.

### 技术:

LEWANDOWSKI, W. and AZOUBIB, J.  
KLEPCZYNSKI, W. J.  
KIRCHNER, D.  
De JONG, G.  
RAY, J.  
SENIOR, K.

传播与环境因素：

**KLOBUCHAR, John A.**

我们为WP 7A主席**Ronald BEARD**先生对于本项目的领导、对本手册的贡献和编辑给予特别的感谢，为无线电局无线电通信SG 7顾问**Alexandre VASSILIEV**先生对出版所提供的附加内容、编辑和准备给予我们的特别感谢。

**Vincent MEENS**

无线电通信第7研究组主席

## 引言

### 历史简介

很久以前，人们就已经通过太阳和其他恒星的移动、月相、季节的变换、以及世代的交替来标记时间。时间间隔曾经是通过填充了沙子的沙漏、水钟、和机械装置来测量的。乐器的频率是通过与音叉和定音笛的比较来调谐的。

历史记录了时间、时间间隔和频率测量的发明实例。追溯到大约公元前1500年，一个形状类似于一个弯曲丁字尺的埃及装置从其在非线性尺子上的投影测量时间的推移。该丁字尺在早上朝东。在中午，该装置被调转过来，使其能将影子投向夜晚的方向。

早在公元前1000年，中国人通过计数填充到一个管乐器音管中的豆粒数量来制定频率标准。对同样直径的音管，频率（音调）是由填充到该音管中所需的豆粒数量来确定的。

在13世纪的西班牙，时间间隔的测量是通过燃烧在杠杆臂上的蜡烛来测量的，随着蜡烛的燃烧，它们失去重量，移动杠杆臂就显示了时间的推移。

中国人焚烧作为钟的香，通过灌注了不同油的香层所散发出气味的变化，它们标记了时间。预测木星卫星月食的卡西尼表格被用来提供与位置无关联的时间测量，准确到数分钟，在1679年被用于法国的测绘。通过在1759年进行的完善，哈里森计时器使得能够在数周的时间段中以10秒范围的准确度在船上保持时间[Dana和Penrod, 1990年]。

早在1450年，天文学家已经建议，经度能够通过恒星相对于月亮的角度来确定，但是恒星表并不充分。在1675年，国王查尔斯二世命令修建了格林尼治天文台，并设立了格林尼治子午线。准备首个航海历书花费了100年。在历史的这个时期，对新世界的贸易是极为重要的。

在1707年，当由Admiral Sir Cloudsley Shovel指挥的一支舰队误闯进西西里岛 – 损失了四艘战舰和2000人时，确定经度的关键重要性才悲剧性地引起了人们的关注。英国国王以悬赏2万英镑（大约相当于今天的2百万美元）征求一个好到足以30英里的准确度来确定经度的一台经纬仪来做出响应。

来自约克夏的约翰哈里森当时21岁，他接受了这个挑战，花其毕生精力来打造木头和金属构成的经纬仪。他采用木头齿轮制造了一台在14年期间一个月变化不超过1秒的经纬仪。采用其第4号经纬仪的一个航行从普利茅斯驶向马德拉 – 提供了一个大约1英里的定位准确度。天文学家罗亚尔怀疑这个结果。在约翰70岁时，另外一个航行起航了， – 这次是驶往巴巴多斯。在海上渡过5个月之后，他的第4号经纬仪预测巴巴多斯的位置到10英里之内。他花费了另外10年痛苦的追求来收回作为回报的钱财 – 但他从未能完全收回。

尽管在哈里森的努力之后导航经纬仪有了显著的进步，但一直到1920年代才出现下一个重要的进步。这十年发现并发展了石英晶体振荡器。借助这个发现，制造出了石英钟，它可以检测出地球旋转速度UT1中的不稳定性。这些时钟使天文学的所有领域都向前迈进了重大一步 – 对于导航和其他类似领域[Allan, 1995年]。

在1930年代和1940年代中，雷达和极高频无线电通信的发展使能够产生出与原子相互作用所需的那种电磁波（微波）。旨在开发一个原子钟的研究首先关注于氨分子中的微波谐振。

第一个基于氨的原子钟是在1948年制造，并在1949年完成的。但是，其性能（大约 $1 \times 10^{-10}$ ）并不比已有的标准好多少，注意力几乎立即转向基于铯原子谐振的更有前途的原子束装置。1955年，在英格兰的国家物理实验室建立了第一个实用的铯原子频率标准。从那时起原子时一直被保持。

在ITU-R手册《精确频率和时间系统的选择与使用》中提供了对当前所使用的精确频率和时间标准、源及其特性、时间标度、测量方法、现存系统和运行经验的描述。

### 精确时间和频率与时间同步的重要性

精确频率和时间成为了很多技术与生活过程的基础。精确测时现在被用于：

- 所有通信系统；
- 大多数导航系统；
- 电信和计算机系统及其网络；
- 财会和银行系统；
- 航空和航海交通控制系统；
- 很多科学研究；
- 对电网的故障检测和效率监视；
- 大多数军用系统；
- 空间研究和探索；
- 地震检测和全球板块构造学；
- 环境遥感；
- 海平面和洋流测量；避免飞机碰撞和精确着陆；
- 货车车队跟踪；
- 自动路线绘图。

每年制造超过20亿个石英振荡器，并且使用中原子钟的数量大约为10万个。

尽管是一个重要的问题，但时钟的质量不是对时间测量有贡献的唯一因素。另外一个重要的因素是用于比较时钟和时钟同步的时间链路的质量。一个实例 – 电信/计算机网络。大多数电信和计算机网络依赖于时钟。当电信/接收机设备的时钟不同步时，可能会引起以下非常负面的结果，例如：

- 因为由相关软件（协议）、数据备份等造成事件的正常顺序被扰乱而引起的操作失败；
- 数据丢失 – 错误的时间戳可能会引发数据库中错误的数据修改，一些应用可能会执行一个错误的行动或甚至崩溃；
- 安全漏洞 – 因为服务器访问日志是来自不同主机信息的一个汇编，最关键的是时间戳要正确。因为日志文件的不准确，不良计时可能会危及该服务器的安全，以及管理者因此不能追踪黑客的行为。

### 用于精确时间和频率播发的基于卫星的系统

从20世纪初起，无线电波就被用于时间信号的传送和播发。但是，从一开始就知道无线电信号会因为它们沿着从陆地发射机到陆地接收机的路径传输而被延迟，且所接收时间信号的准确度不会好于对路径时延的了解。从一个位于地基发射机所发出的信号具有很难估计的路径时延，因为该时延会因为变化的电离层状况而持续改变。某些这类问题对覆盖范围较小的视线信号会被降低。

与此相反，一个星载发射机与一个地基接收机之间的无障碍路径时延更加稳定，且能够比地基电台之间的时延被更加准确地予以确定。这是一个重要的优点，因为很多播发方法的准确度几乎总是受限于为补偿信号从源行进到目的地所花费时间而使用的任何方法之中的不确定性。

在发射机与接收机之间具有一条清晰的、无障碍路径的情况下，来自地球之上高空的一个时间信号广播通常比任何地基信号更加准确。此外，来自一颗卫星的信号广播能够在宽广的范围上被接收到，因此，星载系统能够比任何陆地系统更容易地在一个大的区域上支持时间和频率的播发。此外，对一个星载发射机和一个地基接收机之间的路径时延进行建模能够比对一个纯地基系统电台之间相应时延的建模更准确。

本手册旨在作为对卫星时间和频率传递和播发领域的介绍。第一章给出了对用于时间和频率信号播发的卫星系统的一个概览。利用全球导航卫星系统在播发时间领域中普遍影响的卓越表现，例如全球定位系统（GPS）、全球导航卫星系统（GLONASS）和通信卫星，提供了几章来描述其产生和与国际时间标度的关系。在对卫星系统描述之后是对国际时间标度、协调世界时（UTC）产生和维护的一个概述。该时间标度是从很多国家授时中心和实验室的贡献中产生出来的。因此，专门奉献了一章来描述支持该时间标度产生和播发的这些国家授时中心的组成和运作。在这些授时中心和各个用户之间的时间传递和播发是通过无线电传输来完成的。在最后几章描述使用中的主要时间和频率传递方法之前，讨论了相对论和传播效应对这些传输的影响。

## 参考文献

- ALLAN, D. W. [5-7 June 1995] The Impact of Precise Time in Our Lives, 50<sup>th</sup> Anniversary Annual Meeting, Institute of Navigation, Colorado Springs, Colorado, United States of America, (<http://www.ALLANstime.com/Publications/DWA/PDF/95jungps.pdf>) .
- DANA, P. and PENROD, B. [July-August, 1990] The Role of GPS in Precise Time and Frequency Dissemination, GPS World, ([http://www.pdana.com/PHDWWW\\_files/gpsrole.pdf](http://www.pdana.com/PHDWWW_files/gpsrole.pdf)) .
- ITU-R [1997] Handbook on Selection and Use of Precise Frequency and Time Systems. Geneva Switzerland, (<http://www.itu.int/publ/R-HDB-31/en>) .





## 第1章

### 卫星与时间和频率传递及播发

页码

1.1	引言 .....	2
1.2	用于频率和时间传递与播发的空间无线电通信业务和卫星系统.....	2
1.2.1	标准频率和时间信号业务 .....	2
1.2.2	全球导航卫星系统 .....	4
	参考文献.....	5

## 1.1 引言

在过最近几十年中，原子钟已经从实验室的新鲜事务转入大规模使用。在石英振荡器技术和卫星测时系统中的改进增进了原子钟中几十年的改进。导航、通信和电力系统都已经从这些改进中受益巨大。精确测时已经从一个新鲜事物转变为一个必需。因此，很多应用依赖于精确测时元素。

在ITU-R TF.686建议书《时间和频率术语的词汇表和定义》中可以查到本手册中所使用的的时间和频率术语的词汇表与定义。

## 1.2 用于频率和时间传递与播发的空间无线电通信业务和卫星系统

太空时代始自1957年10月俄罗斯人造卫星斯帕特尼克1号（*Sputnik 1*）的发射，接着是仅仅4个月之后命名为探险者1号（*Explorer 1*）的美国第一颗人造卫星的发射。最早的卫星被用于太阳和大气的研究，但是重点很快转向了通信。在1960年8月由美国国家航空航天局（NASA）发射了一颗无源中继卫星回声1号（*Echo 1*），作用为将无线电信号反射回地球的一面“镜子”[Whalen, 2002年]。在1960年采用回声1号进行的早期传播研究[Jakes Jr, 1961年]有时被认定为第一个卫星测时实验。第一个精确时间实验很可能是在1962年8月通过有源中继卫星*Telstar 1*号来进行的。这个实验让美国海军天文台（USNO）、英国的国家物理实验室（NPL）和皇家格林尼治天文台（RGO）能够采用被称为双向卫星时间传递的一项新技术进行横跨大西洋的时钟比较。

以这样或那样的方式，属于不同空间无线电通信业务（广播、固定、移动卫星等业务）的所有卫星系统都具有并使用时间和频率传递的能力[Lowe *et al.*, 2007年]。遥感、跟踪和指令系统要求时间传递，用于测距和时间标记的目的。但是，对很多通信卫星（特别是商业卫星）的频率和时间准确度要求通常限于保持所分配无线电频段和执行以上提到功能所要求的那样。同时，有些通信卫星系统为了通信目的而要求精确的时间，例如采用时分多址系统（TDMA）。

地球勘探和气象卫星系统为了对不同的环境参数（例如，海平面）进行测量而需要精确的测时设施，并且已经很久被用于精确时间播发之中[Lombardi和Hanson, 2005年；EUMETSAT Satellite Jason-2, 2008年]。

有些系统，特别是属于无线电导航卫星业务的那些[无线电规则, 2008年]，在精确时间和频率播发中起着非常重要的作用。时间和频率传递在这些系统发挥机能中起着关键的作用，因为它们的主要目标是要在全世界范围提供一个有效的定位、速度和时间业务。这些系统包含星载精确时间/频率源以及监视这些卫星运行和保持星载时间/频率源精确性的高效地基部分。

ITU无线电规则（RR）为精确时间和频率信号在全世界的播发指定了一个被称为标准频率和时间信号卫星业务的特别空间无线电通信业务。

### 1.2.1 标准频率和时间信号业务

认识到精确时间和频率标准对很多工业、科学机构和应急通信的重要性，国际电信联盟将标准频率和时间信号业务和相关的无线电通信电台的定义[无线电规则（RR），2008年]包含在其国际条约RR中。在RR的2008年版中提供的定义列出如下：

“1.53 标准频率和时间信号业务：为满足科学、技术和其他方面的需要而播发规定的高精度频率、时间信号（或二者同时播发）以供普遍接收的无线电通信业务。

**1.54** 卫星标准频率和时间信号业务：利用地球卫星上的空间电台开展的与标准频率和时间信号业务相同目的的无线电通信业务。

这种业务亦可以包括其作业所需的馈线链路。

**1.95** 标准频率和时间信号电台：用于标准频率和时间信号业务的电台。》

世界无线电通信大会（WRC）将射电频谱的某些部分分配给标准频率和时间信号业务。表1-1包含了来自描述分配给标准频率和时间信号卫星业务的频段的RR频率分配表的一个摘录。

表1-1  
分配给标准频率和时间信号卫星业务的频段  
(无线电规则，2008年版)

频段	划分	状态	注
400.05-400.15 MHz		主要	RR No. 5.261、5.262适用
4 202 ± 2 MHz	空间对地球		根据No.9.21之下获得的协议，由RR No. 5.440批准
6 427 ± 2 MHz	地球对空间		根据No.9.21之下获得的协议，由RR No. 5.440批准
13.4-13.75 GHz	地球对空间	辅助	
13.75-14 GHz	地球对空间	辅助	
20.2-21.2 GHz	空间对地球	辅助	
25.25-25.5 GHz	地球对空间	辅助	
30-31 GHz	空间对地球	辅助	
31-31.3 GHz	空间对地球	辅助	RR No. 5.149适用

RR的第26条（参见以下摘自RR2008年版的内容）要求ITU成员国支持对于提供标准频率和时间信号系统（包括星载系统）有效运行的行动和这些系统抗有害干扰的保护。

## 第26条

### 标准频率和时间信号业务

**26.1** § 1 1) 为了便于更有效地使用无线电频谱, 以及协助其他技术和科学活动, 提供和准备提供标准频率和时间信号业务的主管部门应该根据本条中的规定在世界范围内协调, 建立并运营这种业务, 把这项业务扩展到世界上使用不足的那些地区应该给予关注。

**26.2** 2) 为达此目的, 每个主管部门应在无线电通信局的协助下, 采取步骤协调任何新的标准频率或时间信号的传输, 或者在标准频段内的现有传输的任何变更。为此, 各主管部门应在它们之间相互交换所有有关资料并提交给无线电通信局。无线电通信局应就此事宜与对这一问题有直接和实质关系的其他国际组织进行商议。

**26.3** 3) 在实际可行的范围内, 在完成适当的协调之前, 各标准频段内不应做出新的频率分配或者通知无线电通信局。

**26.4** § 2 各主管部门应合作以减少划分给标准频率和时间信号业务的频段内的干扰。

**26.5** § 3 提供这项业务的主管部门应通过无线电通信局, 在核对和播发标准频率和时间的测试结果以及在涉及校准频率和时间信号的细节方面相互合作。

**26.6** § 4 在选择标准频率和时间信号的技术特性时, 各主管部门应以ITU-R相关建议书为指南。

值得注意的是, 没有专门用于标准频率和时间信号播发的卫星系统。如上所述, 精确时间和频率设备通常与同一卫星上的其他应用结合在一起。

有些国家在标准频率和时间信号卫星业务中尚无分配。因为它们使用属于其他空间无线电通信业务的能够将高准确度时间传递到地球上任何地点的卫星系统(例如GNSS)作为精确测时和频率的源。

#### 1.2.2 全球导航卫星系统

当前(2010年), 属于无线电导航卫星业务(RNSS)的全球导航卫星系统(GNSS)[无线电规则, 2008年]实际上是全球基础上精确频率和时间传递的主要工具。

现在有二个运营的GNSS和三个星基增强系统(SBAS):

- 美国全球定位系统(GPS), 提供全球覆盖;
- 俄罗斯全球导航卫星系统(GLONASS), 几乎提供全球覆盖。

提供增加本地导航覆盖的SBAS是:

- 广域增强系统(WAAS)为增加对美国的覆盖而采用 Inmarsat 地球静止卫星提供额外的GNSS信号。
- 欧洲地球静止卫星导航重叠服务(EGNOS)为增加欧洲的覆盖采用 Inmarsat 提供额外的GNSS信号。
- 多功能卫星增强系统(MSAS)采用专用的 MSAS 卫星在日本和周边亚洲国家提供额外的GNSS信号。

在随后的各章中提供了对GPS、GLONASS和SBAS系统的详细描述。

多个其他国家和国际系统正处于设计和开发阶段，例如北斗（COMPASS）（中国）、伽利略（Galileo）（欧洲航天局）、印度区域导航卫星系统（IRNSS）（印度）、及QZSS（日本）。

也可以在ITU-R M.1787建议书《无线电导航卫星业务（空对地和空对空）中系统和网络的描述和工作在1 164-1 215 MHz、1 215-1 300 MHz及1 559-1 610 MHz频段中的发射空间电台的技术特性》中查到对上述系统以及它们空间段的基本技术特性的简短描述。

## 参考文献

JAKES Jr, W.C. [1961] Participation of Bell Telephone Laboratories in Project Echo, Bell System Technical. Journal, 40, 975-1028.

LOMBARDI, M. A., HANSON D. W., [March-April 2005] The GOES Time Code Service, 1974-2004: A Retrospective. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Vol. 11, 2, (<http://nvl.nist.gov/pub/nistpubs/jres/110/2/j110-2lom.pdf>).

Low Earth Orbiting (LEO) satellite Jason-2 Space segment, the European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT), 2006, ([http://www.eumetsat.int/Home/Main/What\\_We\\_Do/Satellites/Jason/SpaceSegment/?l=en](http://www.eumetsat.int/Home/Main/What_We_Do/Satellites/Jason/SpaceSegment/?l=en)).

LOWE, J., HEIDECKER, J., SWIDAN, M., HISHAM, A., SAMUEL, A. S. [2007] Standard time and frequency dissemination via egyptian digital satellite. 39<sup>th</sup> Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting. Long Beach, California, USA, (<http://tf.nist.gov/timefreq/general/pdf/2274.pdf>).

WHALEN, D. J. [2002] The origins of Satellite Communications: 1945-1965. Smithsonian History of Aviation and Spaceflight Series, Smithsonian Books.

## ITU-R文件

无线电规则，2008年版，第1卷，第1条 – 术语和定义，国际电信联盟，2008年，（<http://www.itu.int/publ/R-REG-RR-2008/en>）。

ITU-R TF.686-2建议书 – 时间和频率术语的词汇表和定义，（<http://web.itu.int/rec/R-REC-TF.686-2-200202-I/en>）。

ITU-R M.1787建议书 – 无线电导航卫星业务（空间对地球和空间对空间）中系统和网络的描述和工作在1 164-1 215 MHz、1 215-1 300 MHz及1 559-1 610 MHz频段中的发射空间电台的技术特性，（<http://www.itu.int/rec/R-REC-M.1787-0-200908-I/en>）。



## 第2章

### 全球定位系统

	页码
2.1 运行的总体描述和原理 .....	8
2.2 GPS基础知识 .....	8
2.2.1 用于CDMA和测距的PRN码 .....	9
2.2.2 GPS频谱 .....	10
2.2.3 导航电文 .....	11
2.3 GPS段 .....	12
2.3.1 空间段 .....	12
2.3.2 控制段 .....	13
2.3.3 用户段 .....	13
2.4 测时和同步在运行中的作用 .....	14
2.4.1 测距和性能因素 .....	14
2.4.2 卫星时钟稳定性和预测 .....	15
2.5 GPS卫星时钟性能评估 .....	15
2.5.1 卫星路径时延 .....	17
2.5.2 相对论 .....	17
2.6 接收机时钟的影响 .....	17
2.6.1 导航接收机时钟 .....	18
2.6.2 测时接收机时钟 .....	18
2.7 测时的确定和保持 .....	19
2.7.1 控制段运行 .....	19
2.7.2 GPS时间引导 .....	20
参考文献 .....	20

时间和频率传递在全球定位系统（GPS）发挥功能中起着关键的作用，反过来又因为其在全球范围被接受而被极大地增强。本章列举了时钟、时间和频率在GPS运行中的作用和GPS在为播发它们提供一个机制中的能力和限制。

## 2.1 运行的总体描述和原理

GPS为在世界范围确定位置、速度和时间（PVT）提供基础设施以及为从这些基本能力中得出的许多其他应用提供一个平台。该系统包括三个所谓的段——空间段、控制段和用户段。

最熟悉的是空间段，标准上由在半同步（11小时58分）轨道上持续向地球发射扩频测距信号的24颗卫星构成的一个星群。所有卫星在由多个标识伪随机噪声编码调制的相同（大约1.5 GHz（L频段））频率上发射。

控制段监视卫星的健康、状态和性能，构成由卫星广播的一个数据电文，并采取行动来报告和纠正任何卫星异常。用户段包括全世界范围的军用和民用接收机。GPS卫星携带铷或铯标准（或二者），为产生由卫星发射的测距信号提供一个参考。

## 2.2 GPS基础知识

表2-1中汇总了许多GPS的关键特点。每颗GPS卫星发射由2个或更多伪随机噪声（PRN）编码和一路二进制数据流调制的2个（或更多）L频段载频信号。PRN编码对码分多址是必要的，它使所有卫星能够以最小的干扰使用相同的频率。该编码还使得可以进行高精度单向测距。为此，接收机产生它期望见到的卫星编码的一个本地复制并寻求该复制信号在时延和多普勒效应中的正确校准。被称为“NAV-MSG”的数据电文提供关于卫星时钟、卫星的精确位置、卫星群历书、健康和状态指示等的信息。有很多关于GPS的极好参考文献，它们涵盖了基本运行，远比我们在此所介绍的更加详细。特别是由Misra和Enge [Misra和Enge, 2001年]和Kaplan [Kaplan和Hegarty, 2006年]所写的教科书提供了对于所有GPS概念既详细又易于接受的描述。Parkinson, *et al.* [Parkinson, *et al.*, 1996年]是一个更为全面的论述，包含了对应用的广泛讨论以及运行的原理。此处我们仅仅提供了一个简要的概述，为讨论测时在这个重要系统中的作用建立起一个平台。

表2-1

GPS系统

信号频率	扩频编码	码速率
L1 1575.42 MHz	明捕获码 - C/A	1.023 MHz
	精确 - P码	10.23 MHz
	Y码（军用信号）	10.23 MHz
	NAV-MSG（卫星数据）	50 bits/s
L2 1227.60 MHz	精确 - P码	10.23 MHz
	Y码（军用信号）	10.23 MHz
	NAV-MSG（卫星数据）	50 bits/s



GPS设计于1970年代早期，其主要目标是为美国国防部用户及其同盟者提供一个有效的位置、速度和时间业务。定义原始系统结构的要求几乎完全源自DoD的任务。但是，自从那时起，GPS已经变成标志性“双重用途”系统。据估计，在2002年，仅仅在美国之内GPS就为大约30万DoD用户和4百万民用和商业用户提供了服务。民用用户数量的作用从来不曾被忽视，而且目前该系统是由一个联合项目办公室控制，该办公室里有来自DoD、NATO和负责民间应用的交通部的代表。

该系统双重用途的重要性已经在美国政府中得到认可，以至于已经成立了一个执行指导小组来协调和指导该系统在双重作用中的使用。定位导航和时间（PNT）执行委员会是由国防部和交通部全权代表联合担任主席，包括其他政府机构的代表。一个协调办公室支持这个执行委员会来监管受到影响的项目方向。

### 2.2.1 用于CDMA和测距的PRN码

伪随机噪声码被用在GPS中，以使测距和多址接入都能够在一个共同的频率上。二个最初的GPS码是精码（P）和粗捕获（C/A）码。GPS C/A码选自一个金码（Gold Code）系列，长度为1023比特，以一个1.023 MHz的速率在卫星中产生。

每颗GPS卫星发射一个唯一的C/A码，这样使得用户接收机能够轻而易举地识别它。C/A码的短持续时间（1 ms）有助于迅速捕获，但也使其容易受到干扰。每个C/A码比特的持续时间大约为900 ns或300米。一个用户接收机码跟踪环通常测量码的定位达到百分之一到千分之一比特的精度。

P码是一个长得多的码，以10.23 MHz产生。以此速率，整个码将要耗费37周来完成。对每颗GPS卫星分配一个一周的P码分段，它在周的变迁时刻（星期六-星期日午夜）开始发射。

在一个被称为“A/S”或防欺诈的处理下，通常不发射P码，取而代之的是一个具有相似特性的加密P码，被称为Y码。术语P（Y）通常被用来表示信号的这个成分。P（Y）信号远比C/A更抗干扰，且因为其更短的比特持续时间，它具有更高测量精度的潜力。

选择C/A和P（Y）码既是因为它们的交叉相关特性也是因为其自相关特性。这个系列中编码之间的低交叉相关性降低了同时发射的所有卫星的多址接入干扰。

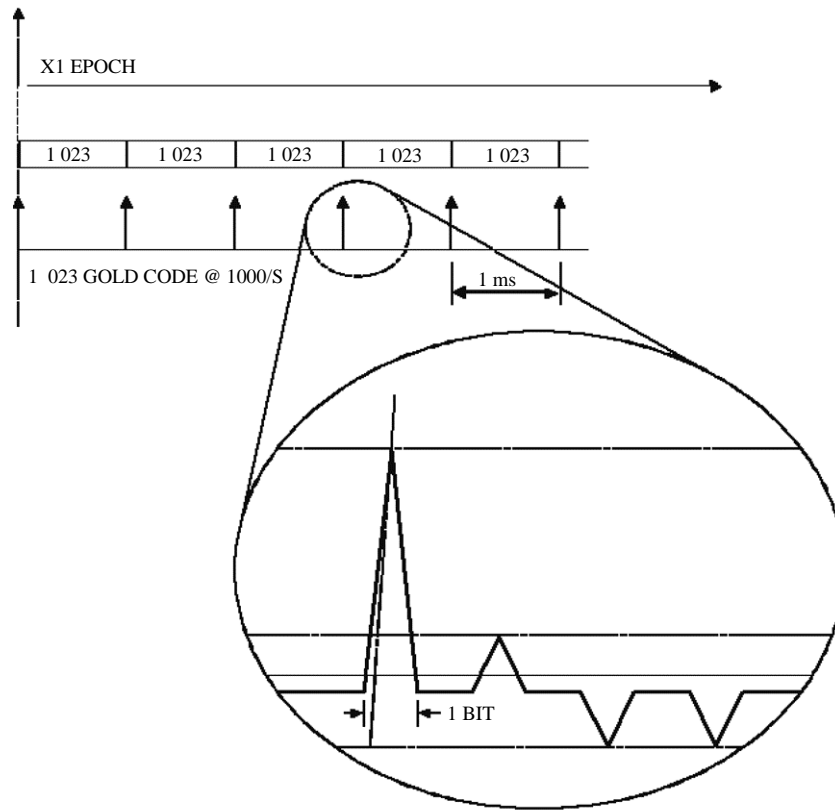
PRN码的自相关性类似于高斯白噪声。对于非零的时延，该码与其自己匹配不好。这很重要，因为这使一个接收机能够将其复制与到达的GPS信号明晰且精确地对齐。图2-1显示了GPS C/A码的相关特性。

当前正在为下一代GPS卫星定义和实施多个新的编码组。有新的民用编码被添加到L2频率，被称为L2C，以及一个完全新的频率1 176.45 MHz，被称为L5，还有被称为M码的一组新的军用码。

新码的设计利用了自从1970年代起发生在编码、纠错和数字信号处理中的改进。预期这些新码初步将与将要发射的被称为Block IIF卫星的下一批卫星一起开始上线，最终将由部署了被称为GPS III的下一代GPS卫星的整个星群来发射。

图2-1

GPS C/A码相关特性



Sat\_time\_freq-02-01

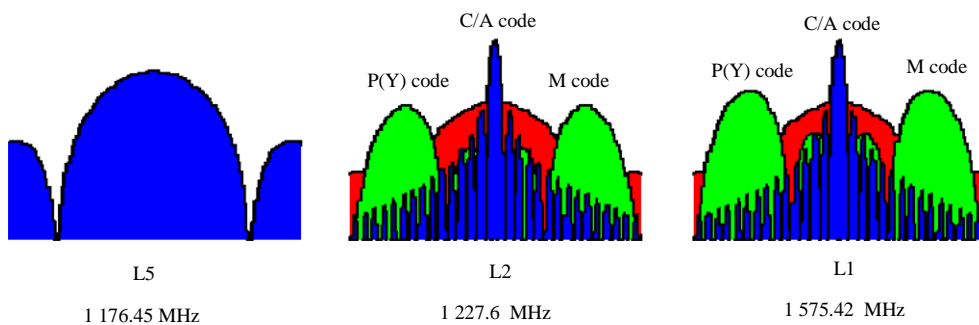
2.2.2 GPS频谱

图2-2显示了当前和现代化的信号频谱。在GPS卫星上的所有频率是源自一个10.23 MHz的参考原子频率标准，通常被称为原子钟。二个传统的载频信号是在1575.42 MHz的L1和在1227.6 MHz的L2。

到2002年为止，L2信号仅仅携带在10.23 MHz的P（Y）码，而L1以相位正交携带P（Y）和C/A。

图2-2

GPS信号频谱



Sat\_time\_freq-02-02

在这一时期，大部分低成本接收机仅仅跟踪L1 C/A码信号。DoD接收机在很大程度上对在L1和L2频率上的P(Y)都能够跟踪。即使信噪比有显著的降低，设计用于科学或其他高精度功能的高性能商用接收机也能采用各种技术获取基础RF信号来跟踪二个载频信号 [Misra and Enge, 2001年]。

现代化的GPS频谱将向L2添加二个窄带的有区别PRN民用信号来形成L2C信号和被称为CNAV的导航电文的一个升级版本。M码分裂频谱将被添加到L1和L2。新的L5C民用信号目的是作为生命安全信号，并计划随着第一次GPS IIF的发射（2010年）而可以使用[Kaplan和Hegarty, 2006年]。在L5上发射二个PRN测距码：同相码（标记为I5码）；和正交相位码（标记为Q5码）。二个码都是10,230比特长，以一个1 ms的重复率在10.23 MHz频率上发射。I5流采用一个1 kHz时钟的10比特Neuman-Hofman码进行调制，而Q5码也是采用1 kHz时钟的20比特Neuman-Hofman码进行调制。

除了一个附加频率带来的好处之外，信号结构和编码还要被设计用来：

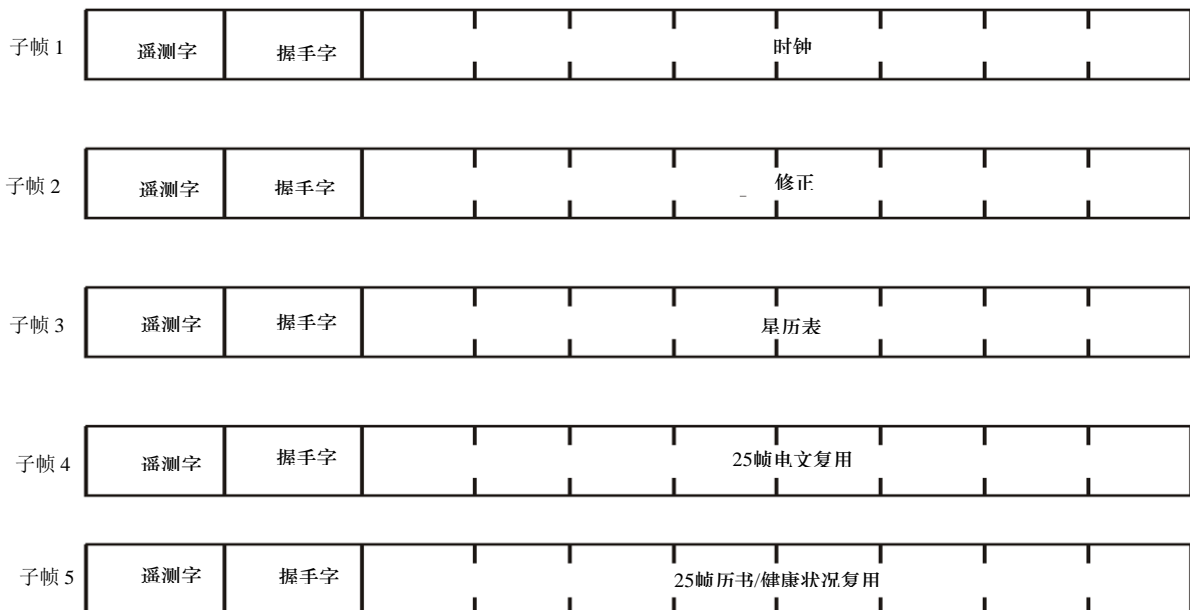
- 为增强性能改进信号结构；
- 提供高大约 3 dB 的功率；
- 支持由于更宽带宽而引起的一个 10 倍处理增益。

### 2.2.3 导航电文

导航电文（NAV-MSG）包括一个接收机为了根据观测到的伪距和/或多普勒效应构成一个位置、速度和时间解算值所需要的所有数据[IS-GPS-200 rev D, 2006年]。图2-3显示了NAV-MSG的单元。它由一个1500比特帧构成，包括5个子帧，每个300比特。以50比特的速率发射，每个子帧需要6秒来完成。但是，组合的子帧4和5是整个卫星群历书的1/25。这表示，要发射整个历书将需要12.5分钟来完成。

图2-3

导航电文



在每个子帧的开始处是握手字或HOW。HOW提供精确定位系统（PPS）要从C/A码转变到P（Y）码跟踪所需要的关键测时消息。HOW在1.5秒的单元中给出了下一个子帧开始周的绝对时间。因此，一个已经对HOW进行解码的接收机能够根据这个数值明确地设定其内部时间。

前面的二个子帧包含特定于发射卫星的信息。这些数据一起被称为星历表，包括轨道参数和时钟误差预测。子帧1包括通过一个二次多项式对卫星时钟相对于GPS时间偏移建模的3个时钟参数。af0项是在参考时间（toc）处以秒为单位的测时偏差值；af1项是在参考时刻以秒/秒为单位的频率误差；而af2项是以秒/秒<sup>2</sup>为单位的频率漂移。

包括在子帧4中的导航电文中的一个附加测时项是UTC-GPS修正值。能够从GPS和这些参数计算出UTC时间。这也被采用一个偏差和漂移项来建模。最终对UTC的一个跳秒调整（对发生周和何时应该将跳秒应用于输出的一个指示）将被包括在这个子帧中。

当L2C和L5可用时，它们都将发射被称为CNAV电文的一个NAV-MSG升级版。这些信号的每一个实际将是在载频上的一组调制。某些情况下，作为一个捕获辅助，一个被称为导频的无数据捕获辅助与一个数据信号一起广播。这个无数据信号被设计得比编码的数据更易于捕获，而且，根据成功的捕获，能够被用于获得数据信号。

这个技术改善了GPS信号的捕获，并且提升了在相关器的功率电平。CNAV电文将是在数据信号上并将包括与传统电文相同的信息，以一个12秒300比特电文包的伪分组格式而不是帧结构的格式。它将使用1/2比率卷积码的前向纠错。形成的每秒100字符的数据流然后被添加到同相信号载频上来产生数据信号。正交相位载频则将没有数据，并变成无数据的导频信号。

## 2.3 GPS段

GPS通常被描述为由三段构成 – 卫星、控制和用户。产生信号的责任在卫星和控制段之间分担。

### 2.3.1 空间段

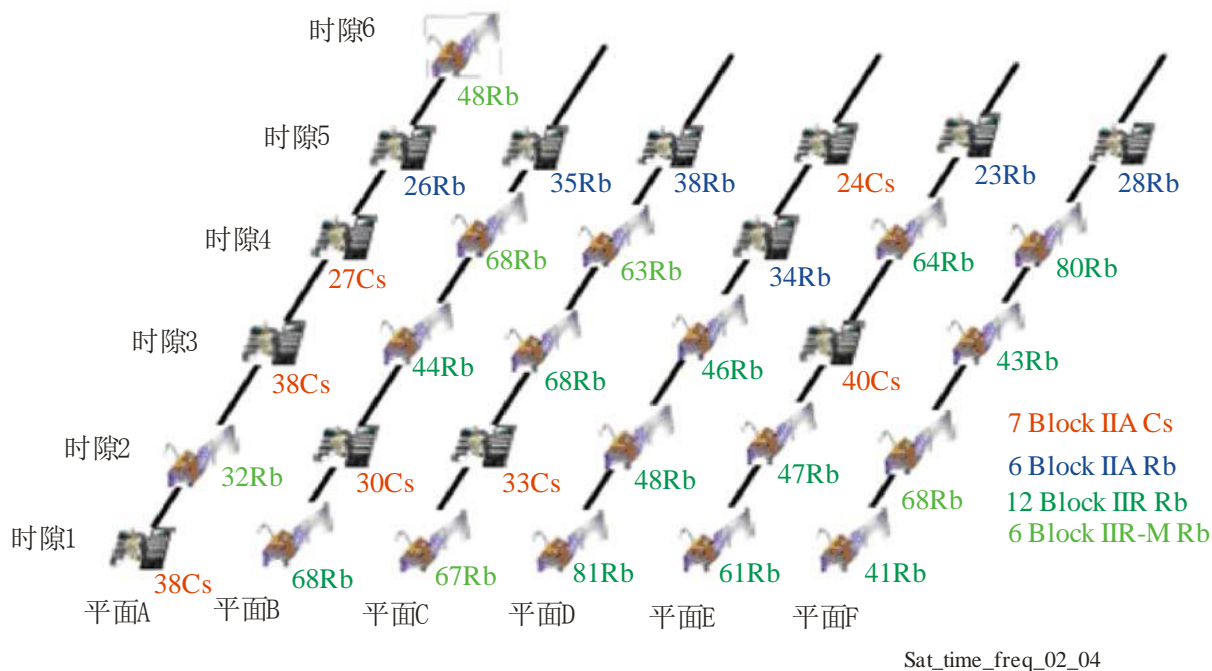
标准或运行的GPS星群包括在半同步轨道上的24颗卫星。这些卫星被部署在55°度倾角的6个轨道平面上，4颗卫星在一个平面上。当前的星群超过了24颗工作卫星的标准要求，并且显示在图2-4中。

对这些卫星进行三轴稳定使发射天线矩阵朝向地球，而太阳能板朝向太阳。已经开发出多个卫星“组（block）”，以Block I样机开始，直到最近的Block IIF卫星部署。下一代Block III卫星的设计当前正在进行中。

GPS信号通过一个12螺旋天线的矩阵发射，这个矩阵被设计来产生一个朝向地球的赋形波束，使在地球表面几乎具有恒定的接收信号功率。这样做使卫星间的干扰最小并为用户改善了性能。GPS导航负载包括3或4个原子钟和用来产生源自该时钟的扩频信号的电子设备。要求使用原子钟来实现改进的轨道预测和在地面控制段丧失能力的情况下扩展的自主卫星运行。因此，不像仅仅转发由一个地面站所产生信号的一颗典型通信卫星，GPS卫星在星上产生参考信号。图2-4显示了截止到2008年在星群中每颗卫星上的时钟类型。任何时候，仅仅使用一个时钟，而其他都保持为休眠状态，直到发生故障或时钟劣化时。星载时钟用作产生C/A和P（Y）码和L1与L2载频信号的频率参考。

图2-4

GPS卫星和时钟，截止到2008年12月



### 2.3.2 控制段

控制段包括在科罗拉多斯普林斯外施里佛空军基地的主控制站（MCS），和在夏威夷、阿森松、迭戈加西亚、和夸贾林的DoD专用监视站。国家地理空间情报局（NGA）也支持添加对GPS控制段提供GPS测量的监视地点，以提升星历表和时钟的准确度。这些监视站容纳具有PPS功能的GPS接收机，这些GPS接收机被连接到通过整个天空跟踪GPS卫星的高增益天线。监视站接收机以1.5秒的间隔持续记录在L1和L2上的伪距、多普勒效应及载频相位测量值。

MCS负责对监视站收集来的数据进行分析，以确定GPS卫星导航负载的健康度和性能。监视站测量还由MCS处理来确定GPS卫星轨道和时钟误差。在导航电文中的星历表和时钟参数是根据对下一个24小时轨道和时钟的预测进行计算的。通常每天进行一次或二次导航电文上载。

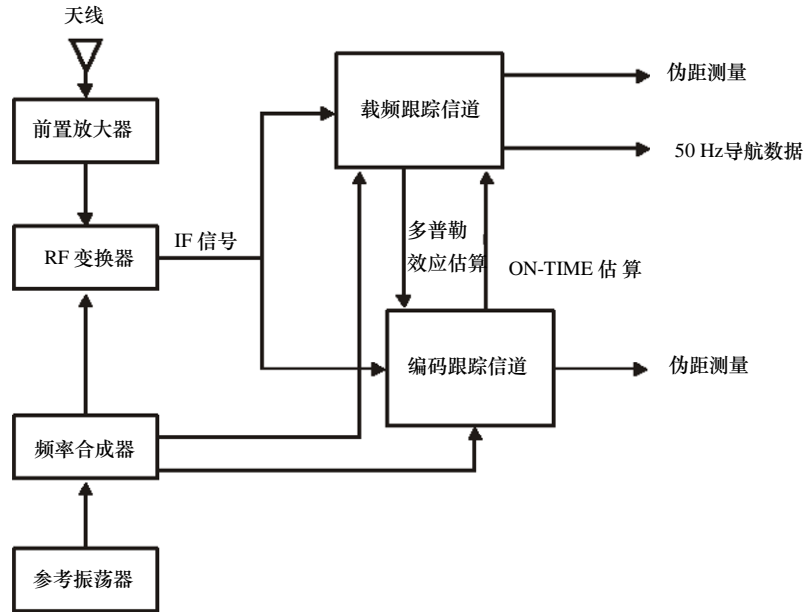
### 2.3.3 用户段

GPS的用户设备被设计用来被动获取和跟踪GPS信号。图2-5显示了一个GPS接收机的关键单元—天线、振荡器和频率合成器、下变频器和模数（A/D）转换器、信道或信号处理器、和导航处理器。

在一个典型导航接收机中，频率参考是一个石英晶体振荡器；而在一个时间传递接收机中，可以应用一个外部参考振荡器。天线一般是半球状的，带有使用被称为扼流圈天线的一些装置来缓解来自附近表面的信号反射[Misra和Enge，2001年]。下变频和取样产生对噪声占主导的GPS频谱的IF取样。通过将接收到的取样与GPS码的本地复制相关联，接收机就能够捕获每一颗可视卫星并对其进行距离测量。

图2-5

GPS接收机总体方框图



Sat\_time\_freq-02-05

## 2.4 测时和同步在运行中的作用

本节描述了精确测时在用于导航和其他应用的GPS正常运行中的重要作用。

### 2.4.1 测距和性能因素

单向时间延迟和多普勒效应的测量是对GPS的关键测量。伪距是对在一个接收机处信号感知到达时间与来自GPS卫星的一个信号发射时间之间时延的测量。

等式形式为：

$$PR = c(t_R - t_T) \tag{2-1}$$

伪距与接收机位置相关联如下：

$$PR = R + b_R - b_T + I + T + MP + \epsilon \tag{2-2}$$

因此，由于在GPS卫星中测时偏差 ( $b_T$ ) 引起的假定信号传输时间中的误差、由于在接收机中测时偏差 ( $b_R$ ) 引起的信号接收时间的误差、电离层时延 ( $I$ )、对流层时延 ( $T$ )、多径、及接收机误差 ( $\gamma$ )，都对伪距测量误差有所影响。在所有GPS接收机中都实施了修正传播时延的模型。接收机跟踪误差 ( $\epsilon$ ) 倾向于高频，且对时间的平均能够有助于减少它们的影响。在表2-2中给出了分配给卫星时钟预测的误差预算[Parkinson *et al.*, 1996年]。

因为不要求是原子振荡器，所以接收机时钟的误差贡献基本上是无限制的。因此，这个参数必须要在接收机导航解算中予以估算，或者在一个网络解算中通过双重差分来消除。

表2-2

GPS系统误差预算

误差来源	空间 (米)	控制 (米)	用户 (米)	系统 (米)
时钟与导航子系统的稳定性	2.7	2.7	—	2.7
卫星扰动预测	1.0	1.0	—	1.0
其他	0.5	0.5	—	0.5
星历表和时钟预测	—	2.5	—	2.5
电离层时延补偿	—	—	2.3	2.3
对流层时延	—	—	2.0	2.0
接收机噪声和分辨率	—	—	1.5	1.5
多径	—	—	1.2	1.2
其他	—	—	0.5	0.5
RSS	3.0	3.8	3.6	
系统误差 ( $1\sigma$ )				5.3

#### 2.4.2 卫星时钟稳定性和预测

GPS卫星时钟是所有发射信号产生的基础。如在§ 2.3.1中所描述，每颗卫星携带三个或四个冗余原子钟，在任何给定时间其中只有一个是工作的。该时钟的可预测性决定了对独立用户所能够得到的定位和绝对时间传递准确度的误差贡献，以及要求对导航电文进行更新的速率。

### 2.5 GPS卫星时钟性能评估

在海军研究实验室的海军空间技术中心（NCST/NRL）监视并按季度报告GPS卫星时钟的性能。总体项目支持的一个重要方面是对航天器原子钟在轨性能的评估，以支持开发新的和改进的空间原子钟、评估系统运行设想、及测量系统性能。对GPS系统性能准确评估的能力是通过NAVSTAR SV和MS观测伪距数据的一个全面的在线数据库才得以实现的。

该数据库包含了在所发射的每颗NAVSTAR SV寿命期间的持续数据。来自GPS运行控制段（OCS）和NGA监视站的数据，以及经过精确后处理的NGA星历表被用于从系统中每个运行的原子钟获取时钟信号。

这个工作起始于NAVSTAR Block I联合NCST/NRL和GPS联合项目办公室（JPO）跟踪采用临时控制段运行的导航技术卫星2号（Navigation Technology Satellite Two）和Block I演示卫星期间。这已经扩展到运营的Block II/IIA和IIR卫星及OCS的运行。

在2004年，NRL开始给出从载频相位观测和来自国际GNSS业务（IGS）的精确星历表推算出来的时钟估算值。IGS由在80多个国家中超过200个国家机构、大学和研究所的一个联盟构成。

每个参与者为各种各样的GPS数据捕获和分析结果带来贡献。这些贡献导致了可用的最佳模型、分析技术、以及数据产物，而它们又反过来使每个机构受益。IGS维持350多个采用多信道、双频率、编码和载频跟踪接收机的永久持续运行的GPS跟踪站。

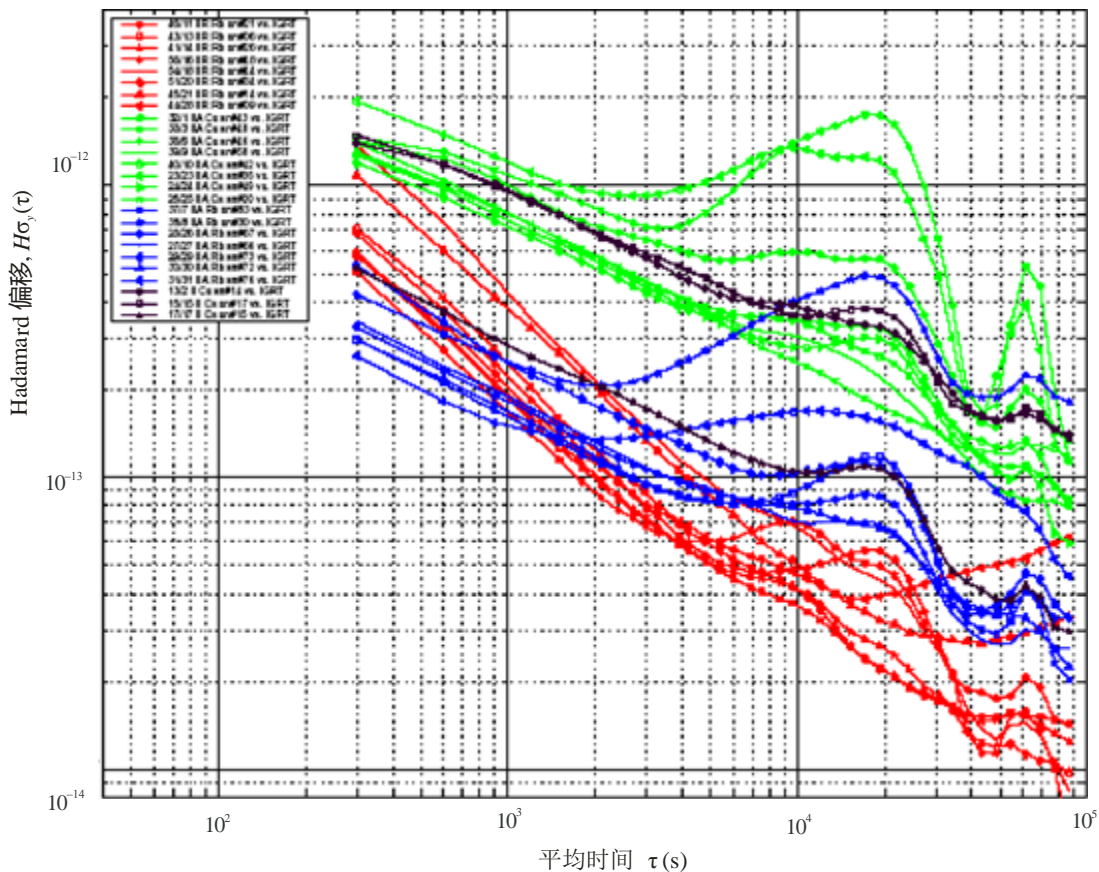
已经为数据存储和交换制定并采纳了公共的标准。IGS时钟产品包括用于快速和最终产品的GPS时钟和地面站时钟估算值。IGS播发时间标度（IGRT和IGST）是在NCST/NRL产生的，并为不依赖于单独一个地面时钟的GPS数据分析提供了一个稳定的参考。

每个运行着的SV和MS原子钟的频率稳定性是从在轨数据库计算出来的，并根据连续的数据系列进行评估的。这个分析独立于任何其他机构的分析，并与它们互相补充。经常非正式地协调与其他分析之间的比较，作为对独立性的一个测试度量。按季报报告标准性能，并且对显示出异常或不规则表现的观测进行详细的分析。对GPS数据库中在轨数据的在线存档能够被用来分析过去的正常和反常时钟性能。这个在线数据库使得能够以范围从5分钟到数年的平均时间对照一个公共标准从连续的数据段估算频率的稳定性。

图2-6显示了GPS星群中卫星时钟的频率稳定性。

图2-6

GPS卫星原子钟的稳定性



美国海军研究室,  
12月22日-2003, 13, 28



### 2.5.1 卫星路径时延

除了测时负载的可变性，GPS卫星内路径的时延或差异也会对最终用户时间传递解决方案产生测时误差。特别是，必须考虑L1和L2信号路径之间路径时延的差异、相位和编码时延中的差异、和天线相位中心的变化。

在导航电文中传递的af0和af1时钟修正值是对于具有双频P(Y)码能力的接收机而计算的。这是因为该解决方案是基于来自GPS控制段监视站的双频观测。该修正值因而包括了信号路径差异对P1和P2无电离层组合的影响。单频用户必须将一个修正值应用于广播时钟值，称为测时群时延(tgd)。在一个时刻，单独一个tgd值被用于所有卫星。但是，对每颗卫星进行分别的群时延测量，并且现在被包括在广播电文中。

一直到最近，不认为小于1个载频周期(0.6秒)的误差对时间传递是重要的。但是，随着基于载频相位的时间传递解决方案的出现[Larson和Levine, 1999年]，对GPS天线中相位中心变化的关注现在正在增加。因为是右旋圆极化天线，当航天器打算对于天底方向进行一个完整的旋转时，载频相位将增加一个完整的周期(19.04 cm或0.6 ns)。类似地，在地球不同地区接收GPS发射的用户将看到不同的信号相位值。对高精度应用现在可以得到对于这些偏移的一个修正值[Larson et al., 2000年]。

### 2.5.2 相对论

相对论在GPS测时中起着显著的作用，已经有很多论文和书的章节专门针对这个题目。对于此重要题目的更多细节包含在稍后的一章中。此处，我们仅仅提及关键的要素。

因为其在大地水准面以上20000公里的高度，搭载在一颗GPS卫星上的一个时钟受到二个相对论效应的影响，它们改变了它所产生的频率。时间膨胀和重力频移的组合引起GPS卫星时钟比大地水准面上同样的时钟运行快38.59 μs/天。

为了使卫星能够更加精确地产生如同在大地水准面上看到的所需信号频率，星载振荡器被偏置运行慢38.59 μs/天，这样，接收的信号频率被依照大地水准面上的坐标时进行了修正。此外，因为卫星轨道不是理想的圆，所以发生了二阶相对论频率偏移。对由此偏移所引起的误差由以下一个近似表达式给出：

$$\Delta t_r = \frac{2}{c^2} \sqrt{GM a} e \sin E = \frac{2 \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}}{c^2} \quad (2-3)$$

此处：

**R**和**v**： 卫星的位置和速度，在GPS接收机处理过程中采用来自广播导航电文的偏心率信息对 $\Delta t_r$ 进行修正。

因为GPS轨道偏心率所引起的测时误差的幅度是在数十纳秒量级，且对跟踪特定GPS卫星的所有接收机是相同的。

### 2.6 接收机时钟的影响

与在GPS卫星中相同，在GPS接收机内，所有测时是从一个公共振荡器推算出来的。但是，对大多数商用和军用接收机，这个参考是一个石英标准，而不是铷或铯标准。在接收机频率合成部分中的接收机振荡器频率误差和不稳定性显现在多普勒效应测量和累计多普勒效应或载频相位中。接收机时钟偏差误差或测时偏移和在接收机中从天线到A/D变换器的路径时延出现在伪距和载频相位测量

中，以及在观测值和位置解算值的时间标签中。如果对所有卫星的测量是同时进行的，相同的频率和偏差误差出现在所有测量中。

通常实施多个步骤来设立GPS接收机中的时间。这个时间基础被称为接收机时间或本地时间。当在热启动模式下加电时，接收机根据存储在非易失性存储器中的数值设定其时间。取决于特定的接收机，这可能准确到1秒或更差。在冷启动中，它将没有时间信息，开始时间最初被任意设置。

当解码出首个卫星星历表消息时，本地时间可以被设置在导航电文中所给出的周时间（TOW）的1-10 ms之内。这个初始时间设定的准确性决定了随后必须被修正的时钟解算值的剩余部分。在对应于下一个测量历元中断处的本地时间将被设置等于发射的TOW，加上估算出来信号在发射时刻从卫星行进到接收时刻接收位置所需的时间。精确到100公里以内的一个位置估算值足以将此很好地设定在1毫秒以内。（对在地球表面上的一个接收机，传播时间范围是从对于直接在头顶上的一个GPS卫星接收机的大约67毫秒到对于在地平线上的一个接收机的大约85毫秒。）

一旦本地时间已经被建立在1毫秒之内时，时钟偏差被作为应用处理的一部分来估算。在某些接收机中，此偏差作为所谓的书面时钟修正值来保留，即，不进行物理调整来减少这个偏差，但是该数值被监视和报告。在一些接收机中，要对测量测时进行调整来补偿这个偏差，以使测量实际是在GPS1秒历元上完成。在协调来自多个接收机的测量以达到高精度运动或静止相对定位的情况中，这对大地测量接收机是特别重要的。最后，一些接收机不调整进行测量的实际时间，而是修正报告的时间标记和对该偏差的测量。

## 2.6.1 导航接收机时钟

对大多数导航应用，时钟偏差的实际值不是非常显著。如果要进行与其他接收机测量的协调，则仅仅需要采用GPS时间历元对测量进行同步，且即使如此，它也仅仅对要求厘米到毫米精度的应用才是关键的。测量和导航解算值的正确时间标记对快速移动的平台很重要，例如高速飞行器和卫星。近地卫星测时的一个敏感点是1毫秒的时间标记误差产生7米量级的沿轨迹定位误差。对在其他高动态平台上类似的时间标记误差也有可能是米级的定位误差。

从接收机时钟偏差引起的伪距偏差和频率误差是作为导航定位和速度解算的一部分而被可靠地解决。通常在导航应用中不关心这些值。在相关的导航和勘测应用中，一个流行的技术是采用载频相位双差分[Misra和Enge, 2001年]。这一方式通过对来自二个接收机和二颗卫星的同时观测对进行差分来从解算值中消除时钟偏差参数。如果适当处理了测量相关性，双重差分点解算等效于时钟在其中被解算的相对位置解算。

## 2.6.2 测时接收机时钟

### 2.6.2.1 相对论

在一个为时间传递而特别设计的接收机中，内部振荡器通常被旁路或忽略掉，取而代之的是来自外部参考振荡器的一个输入和每秒一个脉冲（1PPS）的参考信号。需要相对论修正值来修正GPS卫星时钟的频率和测时偏移。类似的相对论效应发生在用于高动态平台的接收机时钟上。这些偏移对所有测量是共同的，因此它们不影响导航解算的准确性。对向一个快速移动平台的时间传递，应该对参考振荡器的相对论偏移进行补偿。

### 2.6.2.2 书面时钟修正

如上所述，大多数GPS接收机不通过修改它们的内部测时来修正估计的时钟误差。这些误差被估算出来并标注为“书面时钟”修正。在某些情况下，该修正应用于显示和报告的时间，以及所报告的测量。

### 2.6.2.3 修正的输出时钟 – 频率和1 PPS

被要求输出一个修正的频率和1 PPS信号的一个测时接收机必须在内部应用时钟修正来产生这些同步的输出。这可以通过一个内部振荡器或接收机频率合成部分的的闭环调整来完成，或者采用一个分开的开环电路来生成修正的信号。如果在闭环上完成，控制必须以不干扰信号跟踪功能的方式来实施。

## 2.7 测时的确定和保持

所有GPS测量的基础是所谓的GPS时间（GPST）。GPST是建立于GPS历元UTC时间1980年1月6日00:00的一个连续时间基准。GPST通过UTC（USNO）与国际时间标度世界协调时（UTC）相关联 [ICD-GPS-202B Navstar, 2001年]。但是，不像UTC时间标度，GPST不应用跳秒步骤，并因此以一个当前为14秒的偏移量持续从UTC漂移开。控制段负责依据来自USNO的输入维持GPST并监视每颗GPS卫星的测时性能。卫星传输被链接到GPST，并且，通过采用对GPS卫星的测量，一个接收机能够将其本地时间连接到GPST，并继而连接到UTC（USNO）。

### 2.7.1 控制段运行

自从1990年6月17日起，GPST时间已经由在主控站（MCS）、GPS监视站、及卫星的星载时钟的一个混合或全体所确定。实际的GPST时间物理上不由系统内的任何一个时钟维持。它是由作为MCS分析和预测功能一部分工作的一个卡尔曼滤波器间接计算出来的。根据其在估算间隔中的稳定性，对来自各个频率标准的测量进行加权。

GPST就是这样由一个原子钟集合的加权平均构成。每个频率标准的书面时钟修正值也是采用构成在广播文本中所传输参数基础的GPS卫星时钟修正值来计算的。

MCS采用来自监视站的测量值来估算GPS卫星的轨道和时钟、监视站的时钟误差、及其他参数。MCS估算器将要被估算的测量和状态分为多个“划分”，它们每一个处理GPS卫星和所有监视站的一个子集。划分是因受早期MCS计算机计算能力的限制而起，但一直被延续，以减轻计算的负担并有助于隔离各个卫星的问题[Hutsell, 1994年]。每个划分包括最多6颗卫星和5个GPS监视站的状态。一个分别的“划分核对”算法为了划分间的一致性而调整MS状态。

一个划分间的“总平均”为MCS提供了监视站和卫星时钟相对于GPST偏离的最佳估算。

美国海军天文台（USNO）负责为美国国防部维持一个物理时间参考。UTC（USNO）是为了DoD的UTC实时实现。USNO还维持在施里佛空军基地里GPS MCS的USNO备用主时钟（USNO/AMC）。

USNO采用位于华盛顿特区的特定测时接收机监视GPS卫星标准定位业务（SPS）和PPS传输。在一个13分钟轨迹上以6秒间隔收集来自各个卫星的测量。所有卫星的轨迹被用于形成对GPS-UTC（USNO）修正参数 $a_0$ 和 $a_1$ 估值的一个2天线性拟合。13分钟解算值的均方根是15-20 ns的量级。各个卫星观测值和线性估算值被提供给MCS，并被人工输入到MCS软件，以保持GPS系统是一个没有外部输入的封闭系统。

### 2.7.2 GPS时间引导

GPST被接口控制文件强制保持在 UTC (USNO) 的 $\pm 1 \mu\text{s}$ 之内, 除了跳秒偏移[ICD-GPS-202B Navstar, 2001年]。因此, GPST被引导与UTC (USNO) 校准来满足这个要求。引导是通过分析GPS-UTC (USNO) 偏差的每天估算值, 然后确定在随后一天是否需要引导以将GPS-UTC (USNO) 偏移保持在规范之内来完成的。

引导包括将一个正或负的固定偏离漂移设定到GPST里一天。在1994年3月18日之前使用一个 $\pm 2 \times 10^{-19} \text{ s/s}^2$ 的固定偏移值, 然后自从那时起一直使用一个 $\pm 1 \times 10^{-19} \text{ s/s}^2$ 的值。引导是通过修改广播卫星时钟修正值和GPS-UTC修正值来实现的, 并且对于用户是透明的[Hutsell, 1994年]。如果实施了不必要的引导, GPS用户将其视为是GPST中的不稳定性。

### 参考文献

- HUTSELL, S.T. [Sep 20-23, 1994] Recent MCS Improvements to GPS Timing. Proc. ION GPS-94, Salt Lake City, UT, p. 261-273.
- KAPLAN, E.D. and HEGARTY, C.J., Editors [2006] Understanding GPS: Principles and applications. 2ed., Artech House, Inc., 685 Canton Street, Norwood, MA 02062.
- LARSON, K.M., *et al.* [March 2000] Assessment of GPS Carrier-Phase Stability for Time-Transfer Applications. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 47, 2, p. 484-494.
- LARSON, K.M., and LEVINE, J. [July 1999] Carrier-Phase Time Transfer, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 46, 4, p. 1001-1012.
- MISRA, P. and ENGE, P. [2001] Global Positioning System – Signals, Measurements, and Performance, Ganga-Jamuna Press.
- Naval Observatory Time Transfer Interfaces ICD-GPS-202B [31 October, 2001] Navstar GPS Control Segment/U.S.
- Navstar Global Positioning System Interface Specification IS-200 rev D [2006] Navstar GPS Space Segment/ Navigation User Interfaces, IRN-200D-001, ARINC Engineering Services, LLC, El Segundo, CA 90245.
- PARKINSON, B.W., *et al.*, Editors [1996] Global Positioning System: Theory and Applications, AIAA Press.

## 第3章

## 应用于GPS的星基增强系统

	页码
3.1 引言 .....	22
3.2 SBAS描述 .....	22
3.3 WAAS描述（美国） .....	22
3.4 MSAS描述（日本） .....	24
3.4.1 概述 .....	24
3.4.2 双伪随机噪声功能 .....	25
3.4.3 上行链路功率控制 .....	26
3.5 EGNOS描述（欧洲） .....	26
3.5.1 EGNOS地面段概述 .....	26
3.5.2 与时间相关的EGNOS系统概述 .....	26
3.5.3 同步RIMS时钟和生成ENT .....	27
3.5.4 ENT向GPS时间的引导 .....	27
3.5.5 卫星时钟修正值 .....	28
3.5.6 通过地球静止轨道（GEO）卫星广播ENT .....	28
3.5.7 对ENT和UTC时间标度之间差值的估算 .....	28
3.5.8 SBAS和时间 .....	29
3.5.9 时间和GEO .....	31
3.5.10 SBAS和时间传递 .....	38
3.5.11 2个实验室之间的时间传递 .....	39
3.5.12 二颗SBAS之间的时间传递 .....	41
参考文献 .....	43
附录 A — SBAS电文内容的简要描述 .....	44

### 3.1 引言

历史上，导航系统一直依赖于时间。这已经被1761年哈里森在HMS *Deptford* 号上的经纬仪航行清楚地展示了，证明了仪表使导航者第一次能够准确和可靠地确定经度。由于导航和时间之间的这种关系，计时界一直总是对将导航系统用于时间的播发有着强烈的兴趣。即使在今天，GPS的核心是建立在一个高度演进的时钟技术之上。不像需要4颗GPS卫星来决定其位置的导航器，已知其位置的计时器仅仅需要一颗卫星来确定时间。对单独一颗卫星的观测就使计时器能够远程同步全世界的时钟。

### 3.2 SBAS描述

星基增强系统（SBAS）是导航系统演进中的最新进展之一。尽管在概念上它们类似于差分GPS系统，SBAS为国家民航管理部门和航空导航提供一个比其他差分GPS（DGPS）系统明显更高水平的性能。因为SBAS所采用的增强方法，它们不仅仅提供改进的准确性，而且还提供了增强的业务可用性、完好性、和持续性。它们通过持续监视来自地面参考站的GPS传输和通过从地球静止通信卫星（GEO）发射一个增强电文来实现这个目标。虽然采用与GPS L1相同的频率，但来自一个GEO的信号在格式和比特率上不同。

来自GEO电文的内容不仅向用户提供了改善从GPS信号所确定用户位置的准确性的信息，而且还向用户提供了关于该位置可靠性的信息。来自GEO的信号还能够被用作导航的另一个测距源。但要实现它，信号必须与GPS时间同步。

继而，来自GEO的信号还能被用于时间播发和时间传递。当前关于SBAS用于这些测时功能的研究显示，它们已经达到了GPS精确定位系统（PPS）的水平。我们可以合理的期待随着系统成熟而带来的精确性和准确性水平的改善。

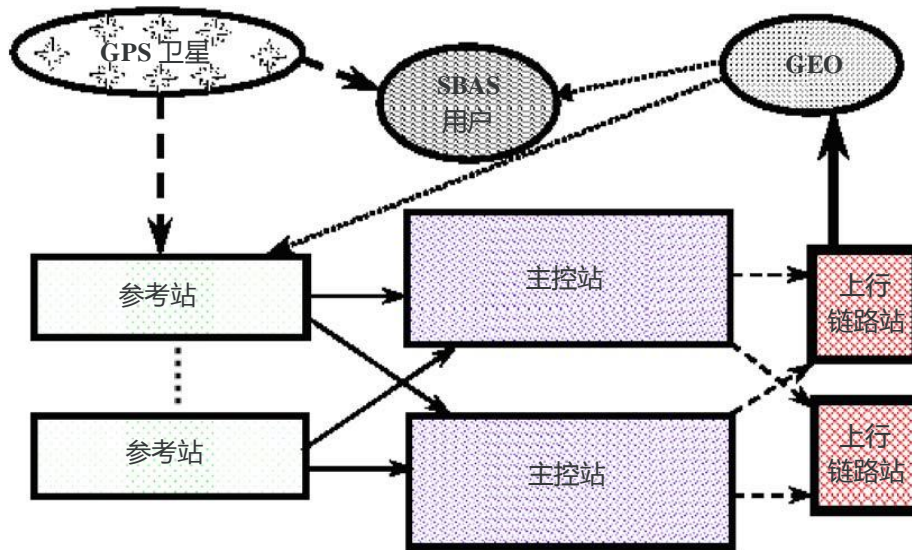
### 3.3 WAAS描述（美国）

图3-1概要地描述了广域增强系统（WAAS）过程。基本单元是WAAS参考站（WRS）。在参考站中的设备包括冗余铯射束频率标准或其他形式的原子钟、多个12信道、双频WAAS/GPS接收机、和特定的宽带和一个窄带相位跟踪GPS接收机。每个参考站连续跟踪其所能看到和捕获的所有GPS卫星和GEO。

每个WRS执行数据采集、合理性检验、数据处理、数据记录、和数据传输功能。每个WRS包括一个三重冗余的广域参考站设备（WRE）机柜，它们收集包括GPS卫星的观测值和GEO卫星的观测值的独立数据组，并将数据发送到系统中的每个WAAS主控站（WMS）。数据组的独立性是通过支持由WMS完成的验证功能所必需的独立硬件组采集可观测参数来得到保证的。数据是以一个与其期望变化水平一致的速率进行收集的；例如，缓慢变化的天气情况允许不像对来自GPS卫星的数据那么频繁地收集这个数据。在将数据发送到WMS之前，每个WRE验证其所收集到数据的合理性。未通过的数据被标记为未通过合理性测试，然后被转发到WMS。为了保证在每个WMS的数据的可用性，每个WRS通过陆地通信子系统（TCS）的二个独立骨干节点将数据发送到每个WMS。

图3-1

一个SBAS系统的简单、高层次概览



Sat\_time\_freq-03-01

每个WMS执行纠错处理、计算卫星轨道、确定完好性、验证、确认、及产生WAAS电文的功能。每秒一次，WMS收集从所有WRS接收到的数据，并对其处理以支持以上所列举的功能。对所有可用WRS数据进行这个处理，并最终每秒一次发送一个格式化的250比特WAAS电文。这些WAAS电文被发送到所有地球静止上行链路子系统（GUS）。

WMS处理的测时被安排得能够按照随后的GPS 1秒粗/捕获（C/A）码历元从GEO卫星广播形成的WAAS电文[Peck *et al.*, 1997年]。WAAS通过检验下行链路电文以保证它们是与发送到GEO卫星的那些相同，和通过将来自WAAS/GPS的导航定位解算值与调查得到的WRS位置进行比较来确认空间信号（SIS）。每个WMS包括一个运行和维护（O & M）控制台，从它可以通过一个人机接口执行对WAAS的控制。为了避免冲突，在任意一个时刻，在WAAS中仅仅一个WMS能够被指定为控制WMS（有效O & M控制台）。

每个地球静止通信系统（GCS）执行广播和测距的功能。每个WAAS GCS包括二个信号发生器子系统（SGS）、二个RF上行链路（RFU）子系统和一个地球静止轨道（GEO）卫星。一个SGS和一个RFU的组合是一个GEO上行链路站（GUS）。GCS广播功能随着GCS每秒一次从系统中每个WMS接收250比特格式化WAAS电文而开始。为了改善WAAS电文的可用性，每个GUS被连接到在TCS上的二个WAAS骨干节点。GUS选择一个WMS作为其消息源并采用一个1/2比率前向纠错卷积码对接收到的电文进行编码。形成的500比特电文被调制到一个GPS类型信号上，并被上传到GEO卫星。每颗GEO卫星由二个GUS提供服务：

- 一个作为主用上行链路运行；以及
- 另一个作为一个热备份运行。

服务于一个GEO的二个GUS运行上独立并且位于分开至少300英里的地理上不同的地球地面站（GES）。一个GES是包括了一个或多个GUS，并且为GUS提供庇护所、电源及运行和维护服务的一

个设施。GEO 卫星“弯管”转发器移动信号的频率并将其广播给WAAS用户。当需要时，发起主用和备份GUS之间的切换，以保持WAAS空间信号的可用性。

GCS测距功能是通过在GPS L1频率上向用户发射一个带有以下信息的信号来完成的：

1. 分配给每颗 GEO 卫星的一个精确测时的伪随机噪声（PRN）码
2. 包含在定期在广播功能中发送的 GEO 卫星导航电文中的一个精确星历表。

这个信号结构是以一个类似于GPS的方式来达到的，除了PRN码的精确测时是在地面而不是在GEO卫星上进行的。这个功能将使用户能够将GEO卫星应用为另外一个GPS卫星，因而增加了总的系统可用性。

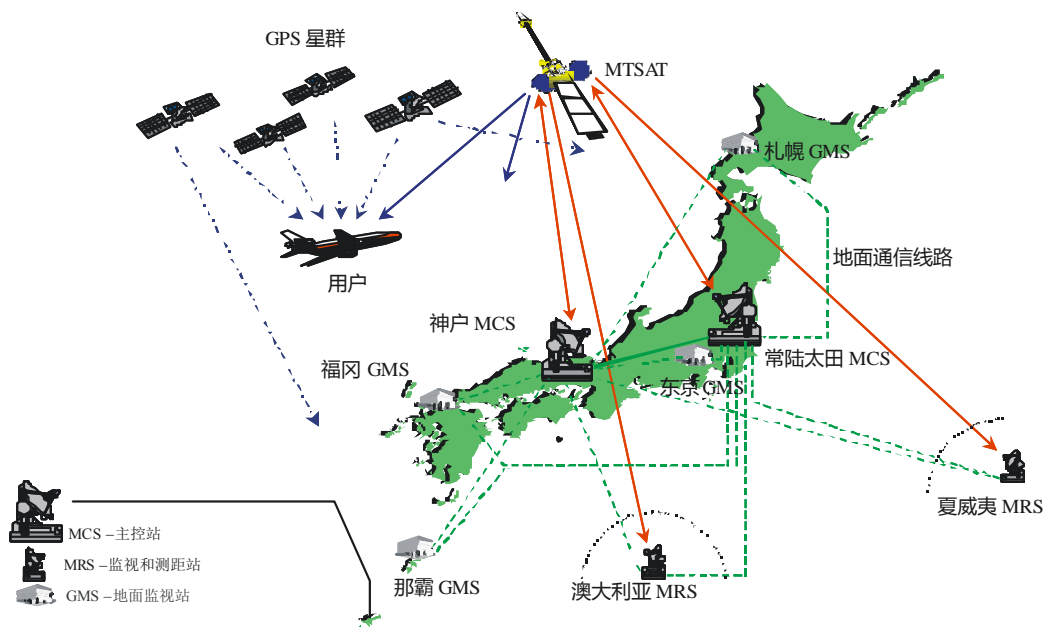
### 3.4 MSAS描述（日本）

#### 3.4.1 概述

MSAS-多功能传输卫星（MTSAT）星基增强系统-配置如图3-2所示。由安装在日本札幌、东京、福冈和那霸四个位置的地面监视站（GMS）接收GPS卫星数据。GPS卫星数据和MTSAT地球静止卫星信号也被安装在神户、常陵太田、夏威夷和澳大利亚其他四个位置的监视和测距站（MRS）接收。接收到的数据被送到安装在日本神户和常陵太田二个位置的主控制站（MCS）。

图3-2

MSAS配置





在MCS中，中央处理设施（CPF）子系统计算卫星的修正值和在MSAS中预先定义的离子网格点（IGP），并监视完好性。MSAS网络时间（MNT）是MSAS的内部网络时间，保持它使它相对于GPS时间的偏移在一个规定的限制之内。导航地球站（NES）子系统采用来自CPF的数据生成MSAS电文，并将它们调制到Ku频段。MSAS电文在由大功率放大器（HPA）放大之后被从共址的地面地球站（GES）上传到MTSAT卫星。此外，地面设施之间的通信由网络通信子系统（NCS）负责。

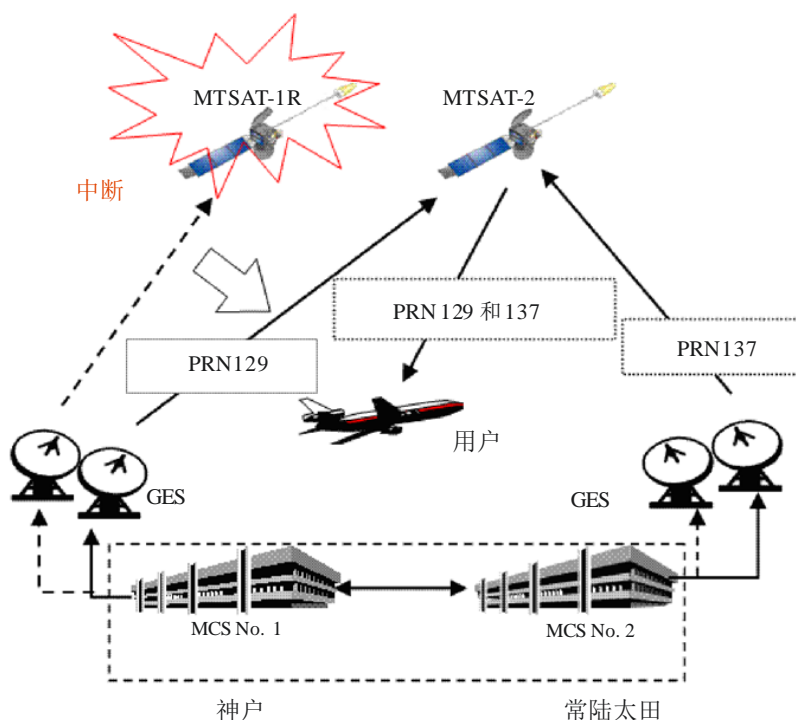
MSAS地面设施具有许多与WAAS共同的特性。另一方面，MSAS具有其自己的特性，即，对一颗地球静止卫星采用二种类型PRN工作的双PRN功能和补偿Ku频段雨衰的上行链路功率控制（UPC）。

### 3.4.2 双伪随机噪声功能

MSAS通常与二颗MTSAT地球静止卫星（MTSAT-1R、MTSAT-2）一起工作，如图3-3中所示。不同的伪随机噪声（PRN）码被分别上传到二颗MTSAT。即使当MCS之一因为在地面设施中的一个故障或由于大雨而不可用时，PRN之一被继续播发给一个用户，因为该用户能够接收来自MTSAT地球静止卫星的二个以上信道的信号，以防止连续性和可用性的劣化。如果MTSAT地球静止卫星之一失效，MSAS能够将自己切换到双PRN运行。

图3-3

双PRN运行



在双PRN运行情况下，不同的PRN被从二个MCS上传到一颗地球静止卫星。由于雨衰而引起的上行链路中断是影响MSAS中连续性劣化的一个小因素。在双PRN运行情况下，即使由于大雨引起的Ku频段衰减超过在由二个MCS中UPC进行的补偿，运行仍由从其他MCS上传的PRN继续，无需MCS之间的任何切换。

### 3.4.3 上行链路功率控制

在降雨期间，为了稳定MTSAT地球静止卫星和GES之间的链路，MSAS通过闭环控制来控制上行链路功率，以补偿Ku频段上行链路信号的雨衰。上行链路控制（UPC）使用由安装在HPA中的UPC接收机得到的MTSAT地球静止卫星的L1-C/N<sub>0</sub>数据。闭环控制是通过根据L1-C/N<sub>0</sub>的测量值和预先定义的C/N<sub>0</sub>目标值控制HPA中的衰减器来完成的。

此外，为了保证控制，也使用Ku频段中的C/N<sub>0</sub>。

## 3.5 EGNOS描述（欧洲）

EGNOS由四个段落组成：地面段、空间段、用户段和类似于对WAAS和MSAS所描述的支撑设施。

1. EGNOS 空间段包括 GEO 卫星上的转发器。
2. EGNOS 用户段包括按照 RTCA MOPS DO-229 开发的 GNSS 标准接收机。
3. EGNOS 支撑段包括支持系统开发、运行和认证所需的一些设施。

最后，EGNOS地面段如§ 3.5.1所描述。

### 3.5.1 EGNOS地面段概述

EGNOS地面段包括测距和完好性监视站（RIMS），它被连接到被称为任务控制中心（MCC）的一组冗余控制和处理设施。MCC确定每颗受监视卫星的完好性、星历表和时钟差分修正、电离层延时，并生成GEO卫星星历表。这个信息在一个电文中被送到导航陆地地球站（NLES），以便与GEO测距信号一起上传到GEO卫星。这些GEO卫星采用与GPS的相类似的一个调制和编码机制在GPS链路1（L1）频率上下发此数据。所有地面段组件通过EGNOS广域通信网（EWAN）相互连接。

### 3.5.2 与时间相关的EGNOS系统概述

以下几节将应要求提供对每个时间功能的一个描述和基于分析与实验的期望性能。

GPS和GLONASS都采用到达的时间差（TDOA）作为接收机到卫星距离测量信息的基础。因此，所涉及的接收机和卫星时钟准确度对所达到的测距精度有一个直接的影响。GPS和GLONASS卫星都在它们的广播导航电文中提供使系统用户能够修正卫星时钟误差的信息，即，各个卫星时钟对标准卫星系统时间标度的偏离。这些修正准确到数纳秒之内。

但是，在GPS的情况下，它们不考虑选择可用性（SA）抖动，所以除非它们被估算和消除，否则它们将降低用户定位的性能。此外，对高完好性应用，为了监视广播修正值，可取的是产生独立的卫星时钟误差估算。

为了计算对卫星时钟误差的高准确度估算并将其播发给系统用户，EGNOS系统执行位于中央处理设施中的三项基本时钟功能：

- 同步 RIMS 时钟和生成 EGNOS 网络时间 (ENT)。
- 将 ENT 相对于 GPS 时间进行引导。
- 确定卫星时钟对于 NET 的偏移。

估算 ENT 和 UTC 之间的差值。

### 3.5.3 同步 RIMS 时钟和生成 ENT

RIMS 时钟是采用复合时钟技术来同步的。在复合时钟技术中，ENT 被定义为所有 RIMS 时钟的默认组合平均值，而同步过程产生每个 RIMS 时钟相对于它的偏离和漂移的估算值。这些估算值之后能够被用于将所有 RIMS 的伪距测量对 ENT 进行参照。为了使得来自多个 RIMS 的同时观测到的伪距测量值能够在估算卫星时钟误差的功能中被组合起来，这个同步过程是必要的。

一个更为简单的替代同步技术是主用时钟技术，其中一个 RIMS 时钟被选定提供网络时间，而所有其他 RIMS 时钟同步到该时钟。复合时钟方法具有二个优于这种方法的显著优点。首先，主用时钟方式具有一个单一故障点，如果主用时钟丢失，ENT 就丢失。与之相反，只要在组合中有二个时钟，就能保持复合时钟 ENT。其次，由主用时钟方法提供的 ENT 的稳定性理所当然地受限于主用时钟自身的稳定性。采用复合时钟技术，ENT 的稳定性变为所有 RIMS 时钟默认组合平均值的稳定性。

假设一个有  $n$  个相同、独立时钟的组合，这对稳定性给出了一个  $\sqrt{n}$  倍的改善。复合时钟的最后这个特性具有增加系统检测和隔离故障时钟失效能力的重要附加效应。

复合时钟算法是采用一个卡尔曼滤波器来进行的。滤波器测量数据包含一组线性独立的带有最小先验方差的共视观测值。对一对 RIMS 的共视观测值是通过减去对于一个共同卫星同时观测到的伪距测量值来形成的。在减去之前，对伪距进行预处理以消除 RIMS 天线到卫星天线的几何距离并减去多余的误差，例如多径时延和热噪声。形成的共视观测值表示了 RIMS 时钟偏离加上剩余误差的直接测量值。

滤波器状态包含每个 RIMS 时钟相对于一个假设理想时间标度的偏移和漂移。这个构想的结果是该滤波器提供相对于所有 RIMS 时钟默认加权平均的偏移和漂移的估算值。这个默认组合方式实质上定义了 EGNOS 时间标度，ENT。用在该滤波器中的时钟相对权重取决于多个因素，但很大程度上决定于与每个时钟相关的过程噪声模型。这些模型决定了 RIMS 时钟的稳定性。

因为对于该滤波器仅仅时钟差测量值是可得，所以该滤波器模型具有引起在状态误差协方差矩阵中长期增长倾向的不可观测成分。必须采取特殊措施来消除这些倾向。否则，它们将最终导致该滤波器内的数值不稳定性。可以看到，一旦已经从协方差矩阵中消除了由于系统模型的不可观测成分所引起的长期增长倾向，形成的协方差描述了在相对于默认组合的平均而不是理想时间标度的滤波器状态估算值中的误差。

### 3.5.4 ENT 向 GPS 时间的引导

为了限制卫星时钟修正的动态范围，进而减少 WAD 时钟电文的大小并改进电文播发过程的效率，有必要将 ENT 对 GPS 时间标度进行引导。将 ENT 对 GPS 时间标度的引导是采用一个二阶低通数字滤波器来进行的。引导输入信号是对 ENT-GPS 时间标度偏移的一个即时估算。这是从所估计的卫星时钟相对于 ENT 的偏移和 GPS 广播卫星时钟修正值计算出来的，而这个修正值是相对于 GPS 时间标度的卫星时钟偏移的估算值。要选择滤波器的截止频率来提供对选择稳定性 (SA) 的最佳减少，同时

避免由于相对于GPS时间标度的ENT相对漂移所引起的显著滞后。ENT越稳定，截止频率就能够被设置得越低，而SA的减少就越大。

EGNOS系统基线将轻易地满足 $< 50$  ns的ENT-GPS时间标度引导要求。所有被检验的铯应用场合证明可以达到 $< 3$  ns的一个引导准确度。因为它们是基于采用SA和RIMS时钟理想化模型的合成数据集，所以必须谨慎对待这些结果。但是，结果与其他发现一致，例如在[Benedicto *et al.*, 1998年]中所引用的那些。

$< 3$  ns的引导精度将使从不同CPF对ENT实现能够被自主同步，而无需一个ENT-A对于ENT-B的同步功能。但是，如果需要这样一个功能，采用真实和合成数据的实验已经显示，采用优于 $3$  ns( $2\sigma$ )的一个准确度，可以轻而易举地达到不同ENT的同步。这是强制使CPF切换对EGNOS用户透明的系统要求。

### 3.5.5 卫星时钟修正值

卫星时钟修正值和修正率是采用来自预处理功能的所有可用伪距和多普勒测量值进行计算的。采用RIMS同步参数将测量与ENT进行参照，然后由卫星收集成组。对每颗卫星，要计算其时钟偏移的加权最小二乘估值和相对于ENT的变化速率。类似于用于ENT的引导功能，偏移值之后被低通滤波分成缓慢和快速分量，它们构成了卫星时钟修正电文。变化速率估值被用于根据预期系统延迟及时推动修正的进行。

### 3.5.6 通过地球静止轨道（GEO）卫星广播ENT

卫星快速和缓慢时钟修正值被通过GEO卫星在分开的电文中播发给EGNOS用户。EGNOS用户接收机对这些电文进行解码，并对每颗它所跟踪的每颗卫星重构相对于ENT的组合卫星时钟偏移，然后将它们与由EGNOS所提供的其他WAD修正值一起应用于其伪距。以这种方式，ENT时间标度替代了接收机导航解算中的GPS或GLONASS时间标度。因此，接收机不仅仅计算一个改进的位置估算值，因为WAD修正值，它还计算其内部接收机时钟相对于ENT偏移的一个估值。

一旦在地面可用，ENT必须要被准确地传递到GEO卫星上。实际上，GEO时间是在GEO负载的输出端确定，精确地在L1天线的相位中心。此功能是由所谓的长环来保证，它是一个伺服控制机制，基于从NLES到GEO卫星的上下行链路之间的近乎对称。

### 3.5.7 对ENT和UTC时间标度之间差值的估算

因为UTC是全世界很多时钟的理论平均，不可能在ENT和UTC之间建立一个直接的联系。取而代之，有必要利用参与到UTC精准化之中的一个物理时钟。

所以，ENT和UTC之间的时间差可以被分解成二项：

$$\text{ENT} - \text{UTC} = [\text{ENT} - \text{UTC} (k)] + [\text{UTC} (k) - \text{UTC}] \quad (3-1)$$

此处：

k 表示参与到UTC精准化中的任何欧洲实验室。

#### 3.5.7.1 UTC(k) - UTC

时间差（ $\text{UTC} - \text{UTC}(k)$ ）是由BIPM通过Circular T按月提供的，并且超出EGNOS范围之外。

时间差 (UTC - UTC(k)) 的性能如下:

- IUT 和 CCDS 建议书要将 (UTC - UTC(k)) 保持在 100 ns(1 $\sigma$ )之内。
- 估算的时间差 (UTC - UTC(k)) 的不确定性当前是在 10 ns(1 $\sigma$ )的水平, 由 *Circular T* 稍后提供。
- 估算的时间差 (UTC - UTC(k)) 预测的不确定性取决于预测周期, 并可能在 20 ns(1 $\sigma$ )范围之内。

### 3.5.7.2 ENT - UTC (k)

要将ENT与UTC (OP) 同步, 一个EGNOS RIMS将要与位于巴黎天文台中的SYRTE实验室共址, 以便物理上连接到它的原子钟上 (带有10 MHz和1pps级别的接口)。EGNOS RIMS同步模块将以小于3 ns(2  $\sigma$ )的不确定性直接估算ENT和RIMS (OP) 之间的时间差。此时间差将采用具有以上不确定性的电文类型12进行广播。对由一个SBAS地球静止卫星发射的SBAS电文内容的简要描述请参见附录A。

### 3.5.8 SBAS和时间

一个SBAS对计时的主要优点是它采用一个地球静止卫星作为对于GPS的一个补充测距卫星。对一个SBAS设定了规范, 使得来自GEO的信号将对于GPS时间准时到50 ns之内。因为GEO停留在空中的相同一点, 一个固定的、高方向性天线 (例如一个馈电喇叭形或一个碟形天线) 能够被一个计时实验室用来跟踪该卫星。这样一个天线提供增强的信噪比, 并还能帮助缓解多径效应。这样的天线还应有助于缓解干扰。此外, 还能够在夜晚电离层活动最小时连续跟踪GEO, 特别是在闪烁最小的中纬度地区。

有很多SBAS应能够对其有所贡献的不同种类计时实验。这些包括校准实验、多径缓解实验、不同计时实验室之间的比较和不同SBAS之间的比较。

校准, 或者说对通过系统时延的测量, 是计时的一个特殊关注点。估计通过一个测时系统的时延在准确评估二个时钟之间差值中是至关重要的。零基线实验[Brown, 1991年]在此过程中已经发挥了重要作用。因为其持续的可用性, 一个SBAS能够为在此领域中长的期测量提供一个平台。

#### 3.5.8.1 时间和参考站

观测时间的记录对SBAS是一个引人关注的领域。所有观测是在独立的SBAS参考站 (SRS) 中进行的。为了保证在每个SRS有一个统一的时间基准, 一个基于GPS时间的时钟被用作参考。

每个SRS通常保持多个被称为参考站设备 (RSE) 的独立线程。要求这些线程是为了足够的冗余, 以便在SRS中发生单个失效的情况下向SBAS主控站 (SMS) 提供数据。除了包含在SRE中的其他商用化现有组件 (COTS) 之外, 通常还有一个铯射束频率标准 (原子钟)。

频率标准需要满足一定的规范才能用于一个SBAS结构中。功能要求包括:

- 准确性;
- 可设置性;
- 稳定性;
- 单边带相位噪声;
- 预热时间。

准确度至少应为 $2 \times 10^{-12}$ ，在铯管寿命期间无老化，因此它能被调谐到一个指定的频率。为了准确地将GEO信号与GPS时间进行比较，频率标准向每个参考站接收机提供一个24小时稳定度至少为 $2 \times 10^{-13}$ 的10 MHz正弦波参考信号。SRS频率标准为了查询和参数调整而要求通过一些接口的通信。

来自铯射束频率标准的10 MHz输出有时被输入到一个提供一个用作观测历元的1 PPS输出的GPS接收机中。接收机时钟在启动时被设置为GPS时间。因此，SRS接收机近似同步到数毫秒级别。每个SRS接收机的输出数据流包含接收机1 PPS相对于GPS时间的偏移的一个参数。在这之后，1 PPS输出受输入铯钟速率的控制。实质上，来自SRS接收机的输出是一个自由运行时钟。这对一个独立时间标度的形成是必要的。

### 3.5.8.2 时间和主控站

SMS内置了生成由GEO传输的修正值和验证它们所需要的处理设备。它还应执行运行和维护(O & M)功能，并具有一个用于与GPS同步的GPS时钟。

SMS执行多个功能。直接或间接涉及时间的功能包括：

- a) 确定 GPS/GEO 卫星轨道；
- b) 监视空间信号 (SIS) 性能；
- c) 生成 SNT；
- d) 生成 SNT/UTC 偏移消息；及
- e) 生成 SBAS 电文。

来自每个SRS参考站设备的数据被送到SMS修正处理器，来自每个单个SRS的数据被进行比较。时钟被相互对照进行监视，以确定一个时钟是否“坏”了，即，在偏移上有没有显著的变化。这是在§ 3.5.8.3所描述的SBAS网络时间(SNT)形成的开始。

### 3.5.8.3 SBAS网络时间

为了让一个SBAS信号补充GPS导航信号，SBAS传输必须与它们同步，即，GPS时间。这是通过将SBAS网络时间(SNT)设置为SBAS的参考时间来完成的。SNT被引导到GPS时间。来自在所有SRS的所有参考站的测量被送到每个主控站，在那里，一个算法从接收自参考站的数据计算出一个独立的SNT时间标度。所有参与到一个主控站所接收的参考站测量中的“正常时钟”被用来形成SNT时间标度。然后，这个时间标度被采用相同的算法引导到GPS。上面所大略描述的SNT算法实施在每个主控站中。

SBAS电文包括由GEO传递的快速和缓慢修正值。应对每个GPS卫星飞行器(SV)计算快速修正值。这是通过采用从一个GEO广播的长期修正值电文来从推算的快速修正值中消除长期时钟来完成。请注意，长期和快速修正值的总和必须要被加到一起。

据估计，每天一次引导可能不足以保持SNT接近GPS时间。因此，硬件引导将通过SBAS导航电文中的修正消息得到补充。将会有由GEO传递的缓慢修正值电文(电文类型9)和一个快速修正值电文(电文类型2-5)。缓慢修正值将至少每2分钟更新一次，并将涉及修正值的主要部分。快速修正值将至少每分钟发布一次。

### 3.5.9 时间和GEO

将以WAAS作为一个实例来显示时间在GEO中起作用的方式。在GUS的铯时钟将从属于SNT。SMS将每天一次发布指令来引导GUS时钟，以减少对于GPS时间的任何偏移。GUS时钟控制来自GEO的WAAS导航电文的同步。

地球静止通信系统（GCS）包括信号发生子系统（SGS）、RFU和地球静止卫星。SGS向RFU提供一个C/A伪随机噪声（PRN）码加上一个WAAS电文信号作为给RFU的70 MHz中频（IF）。RFU将这个IF变换为RF上行链路频率（6 455.42 MHz），放大它，然后将此信号发送给INMARSAT-3 GEO卫星。

C频段上行链路被GEO接收并转换到L1和C频段下行链路，它被以右旋圆极化（RHCP）地球覆盖波束向用户和RFU广播。RFU接收来自INMARSAT-3 GEO卫星的下行链路L1和C频段信号。此信号被放大，且C频段被变换到L2。RFU将L1和L2信号提供给SGS。

GUS接收机接受来自RFU的在L1和L2频率的C/A PRN编码信号。GUS接收机对二路输入信号都测量编码和载频相位伪距数据。这个信息被送到处理器和信号发生器，它们具有产生时间、频率和相位反馈修正信号的算法和硬件。处理器还对WAAS电文进行FEC编码。

这些修正信号调整C/A PRN编码信号的时间、频率、和相位，除去上行链路距离、距离比例、及电离层影响。信号发生器还将FEC编码WAAS电文数据与这个上行链路修正C/A PRN码组合起来，它被作为一个IF信号提供给RFU。频率标准为RFU和SGS中的所有转换器、信号发生器、及接收机提供精确和稳定的频率参考。

5和10 MHz输出频率偏移应在一个 $\pm 1 \times 10^{-9}$ 的范围上是可设置的。可设置性要求仅仅适用于在SGS处的频率标准，因为这必须能够补偿GEO本地转换振荡器中的任何漂移。

RF上行链路子系统将来自SGS的包括完好性和修正数据的信号与一个类GPS测距信号一起发射给GEO卫星。RF上行链路接收来自GEO的C和L频段信号。在SGS方向上，RFU控制上行链路功率电平来防止上行链路干扰和传输损耗中的变化。RFU还提供上行链路信号到C频段的频率转换和C频段下行链路信号到L2频率的转换。

GEO卫星子系统是在空间中地球静止轨道上的一颗卫星，INMARSAT-3 AOR-E卫星，位于经度15.5°W。INMARSAT-3空间段将提供传输中心频率在1 575.42 MHz的2.2 MHz带宽导航信号的能力。

#### 3.5.9.1 SBAS和时间播发

一个SBAS通常负有时间播发的次要任务。一个SBAS的时间标准参考通常是由一些国家或国际机构维持的一个协调世界时（UTC）。时间播发将通过以电文类型12（MT12）格式向用户提供SBAS网络时间（SNT）和UTC之间时间偏移来进行。各个国家计时实验室将确定这个时间偏移。这些实验室将监视在它们视野中的SBAS地球静止卫星。它们将计算一个SBAS电文开始的历元时间与作为UTC（实验室）物理实现的实验室的1 PPS之间的时间差。该数据然后被通过某种接口送到SBAS主控站（SMS）。SMS收集SNT/UTC偏移并创建一个MT12，然后它被送到地球静止上行链路站（GUS），再由它将其发射给GEO卫星。MT12的目的是要向时间用户提供一个参照UTC的准确时间源。

SBAS有希望成为下一代的全球传递系统。一个SBAS的很多特性说明了这个推论。地球静止卫星总是处于视野之中。这提供了使多个观察能够通过将它们自己锁定到公共卫星信号来永久地“相位锁定”到一起的能力。从一颗地球静止卫星进行发射时允许使用一个高增益方向性天线，它能提

供更纯净的信号和更少受干扰和周跳的影响。地球静止卫星信号由提供合理稳定参考的基于铯GPS接收机的一个网络产生和控制。此外，来自地球静止卫星的SBAS电文还通过一个基于GPS卫星实时观测的模型提供GPS信号通过电离层时其延迟的实施估算值。

导航系统播发它们的参考时间标度，且有时还有它与其他时间标度的关系。例如，GPS播发被称为“GPS时间”的参考时间标度及其它与由美国海军天文台（UTC（USNO））维持的协调世界时的关系。采用GPS，一个用户能够将本地时钟设定到UTC（USNO），而且，通过持续地监视GPS，用户能够保持跟踪该时钟是如何对应于UTC（USNO）运行的。目前，GPS时间和UTC因为跳秒而相差15秒。

WAAS网络时间（WNT）、EGNOS网络时间（ENT）和MSAS网络时间（MNT）是每个SBAS的GPS时间估算值。用户应能够确定其本地时间参考相对于WNT或ENT的偏移。在它们最终的运行配置中，每个SBAS将向用户提供其SNT与UTC之间差值的估算值。WAAS和EGNOS将传递显示WNT或ENT与UTC之间差值的修正值。用户能够利用这个信息来将一个时钟设置到UTC。但是，这个信息在开发的早期阶段可能不总是可用。

### 3.5.9.2 用于播发测时数据的CGGTTS格式

通过一个被称为CGGTTS的特别工作组，测时界已经开发了一个格式来帮助在关心高精度度时间传递用户之间的GPS测时数据交换。这些用户主要是世界上主要的计时实验室。虽然不打算涉及该格式的具体细节，但只需说有二列包含与计时处理相关的数据就够了。它们显示在表3-1中。第一行是列的标题，第二行显示了在该列中包含了什么数据。“Lab MC”将表示完成并报告这些测量的实验室的主用时钟。SVN指一个特定卫星的时钟，其SVN号也以电文格式给出。GPS时间将指GPS系统时间。

表3-1

与计时相关的数据

REFSV	REFSYS
Lab MC – SVN (对于GP卫星)	Lab MC – GPS时间

因为这个电文格式和来自WAAS卫星的数据不同于来自GPS卫星的格式，CGGTTS测时电文的标准格式不得被修改。这就是NovAtel所建议的改进电文，它现在正被CGGTTS仔细审查。建议的改进包括了对已经提到的表3-2中所包含二列的增强。测时电文的一个新的第三列被冠以GAT，此处，G表示地球静止卫星，A表示WAAS（对于EGNOS，这将是B），而T表示时间。提出这个建议的格式是为了保持与以前所采纳协定的连续性，并且还考虑了WAAS导航电文和对所观测（测量）伪距应用修正值的方法的独特性。表3-2显示了当应用于一个SBAS卫星时应该对所建议改进CGGTTS格式的数据给予解释。

在建议的CGGTTS格式中，标记了REFSV的列包含了本地时钟相对于该信号发射的地球静止卫星时间的偏移。类似于对于一颗GPS卫星。对照表3-1，在表3-2第二行中的第一列被标记为Lab MC-Geo。但是，“Geo”仍然不是SBAS网络时间（SNT）。应用包含在电文类型9中的缓慢时钟修正值使一个时钟更加接近SNT。第二列现在被称为Lab MC-SBAS。“SBAS”仍然不是SNT，因此它被称



为SBAS时间，有些类似于GPS时间。在应用了包含在电文类型2到5中的快速修正值之后，最终推算出本地时钟相对于SNT的偏移。

表3-2  
所建议改进CGGTTS格式的数据

REFSV	REFSYS	GAT
Lab MC – Geo	Lab MC – SBAS	Lab MC – SNT
测量的PSR + 电离层 + 对流层 + 轨道	缓慢时钟修正值	快速时钟和轨道修正值
来自MT9的地球静止轨道	来自MT9的时钟	MT2（快速修正值）

已经在USNO采用一个NovAtelier窄带相关器系统监视WAAS传输。每天采用一个按照所建议的改进CGGTTS格式产生输出数据的程序对数据进行处理。

处理的结果生成USNO主控时钟对于WNT的偏移。这个数据最终被用于准备由WAAS发射的一个MT12。MT12将由SBAS地球静止卫星发射，以使用户能够得到SNT相对于UTC（实验室）的差值。应该指出，为用于实施测试的WAAS窄带相关器提供时间的USNO主控时钟是UTC（USNO）的一个实时估算值。

对这个分析，选择了一个40天时间段的数据（修正儒略日（MJD）52167到MJD 52207）。它不是一个连续的数据组。为了有助于将数据通过一个电话调制解调器从USNO传递到另外一个计算机，在使用的闲时传送数据的多个子集。

因为用在这个实验中的接收机从绝对意义上尚未被校准，即，将采用WAAS接收机得到的通过系统所有组件测量的时延（为USNO MC – GPS时间得到的数值）与采用USNO校准接收机得到的数值进行比较。形成对一天期间差值的平均值。这个平均值被用作NovAtelier接收机与用于将GPS数据报告给GPS主控站的USNO接收机之间系统差值的一个估算值。

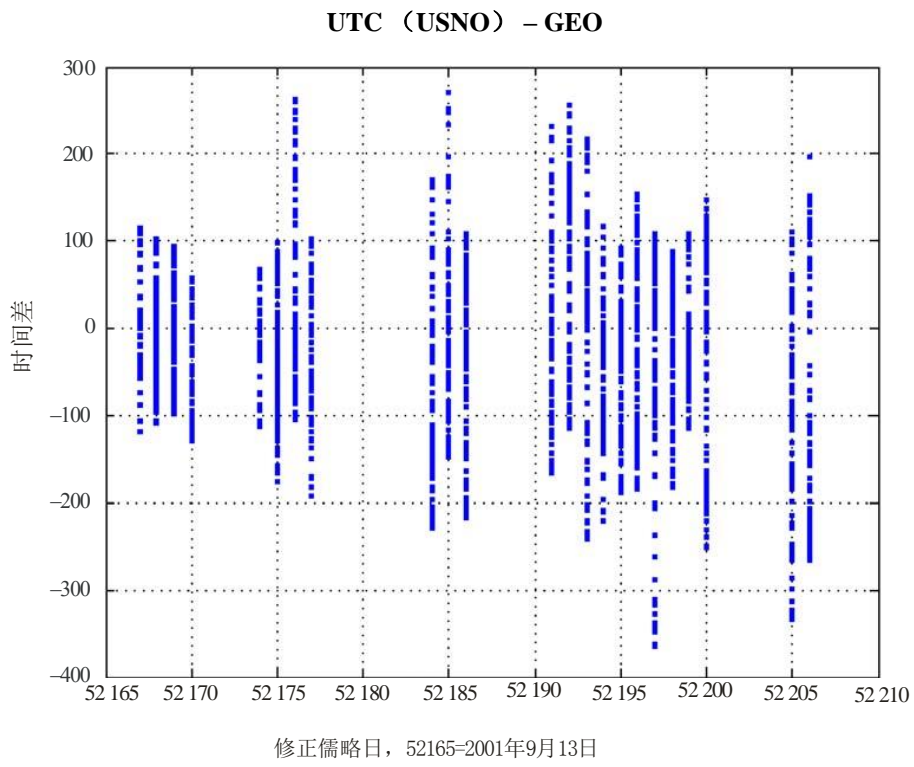
图3-4显示了包含在标记为REFSV列中的数据，它是按照改进CGGTTS格式产生的。在将修正值应用于由电离层、对流层引起的延迟，以及将包含在MT9中的对地球静止卫星轨道的修正值应用于测量的伪距之后，它显示出USNO MC和来自WAAS地球静止卫星的时间之间的差值。

接下来，包含在MT9中的时钟修正值被应用于该数据，结果展示在图3-5中。可以看到偏离值的显著减少。但是，仍有一个在MJD52198前后开始的相当大的偏移。这对应于大约发生在2001年10月13日的一个相当大的电离层扰动。

应用包含在MT2-5中的快速修正值显示了更进一步的改善，如图3-6中所显示。

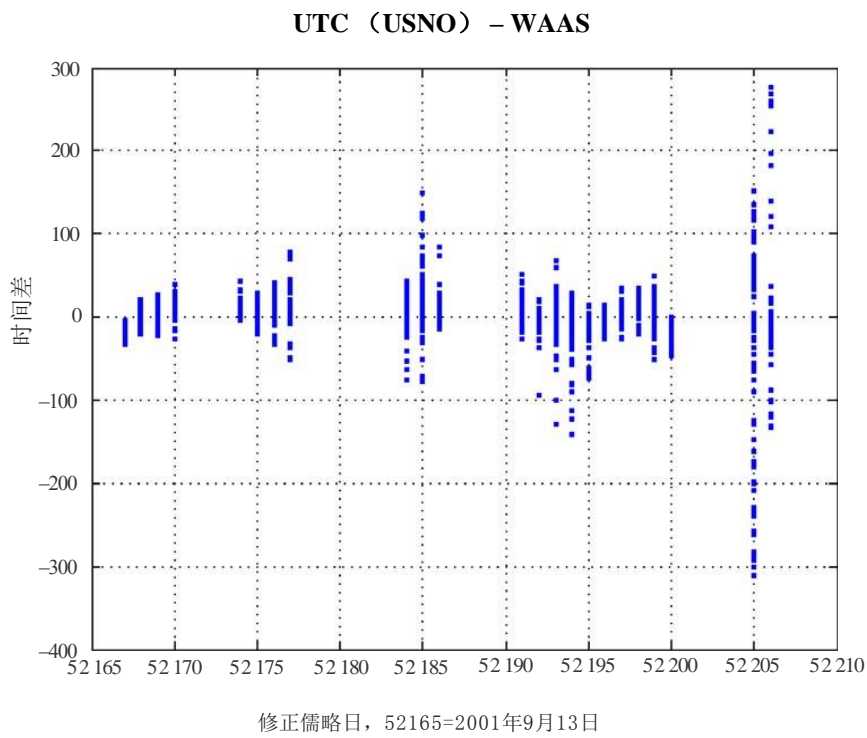
虽然UTC（USNO）–WNT 的数值被减少到WAAS规范之内的水平，但当与采用GPS得到的类似数值相比较时，它们对时间播发来说仍然很大。图3-7显示了从包含在图3-6中的各个点进行的日平均值。在数值中有一个大约40 ns的分散。这个大的分散很可能是由于在WAAS部署早期阶段期间所实施的运行步骤中的变化所引起的。

图3-4



Sat\_time\_freq-03-04

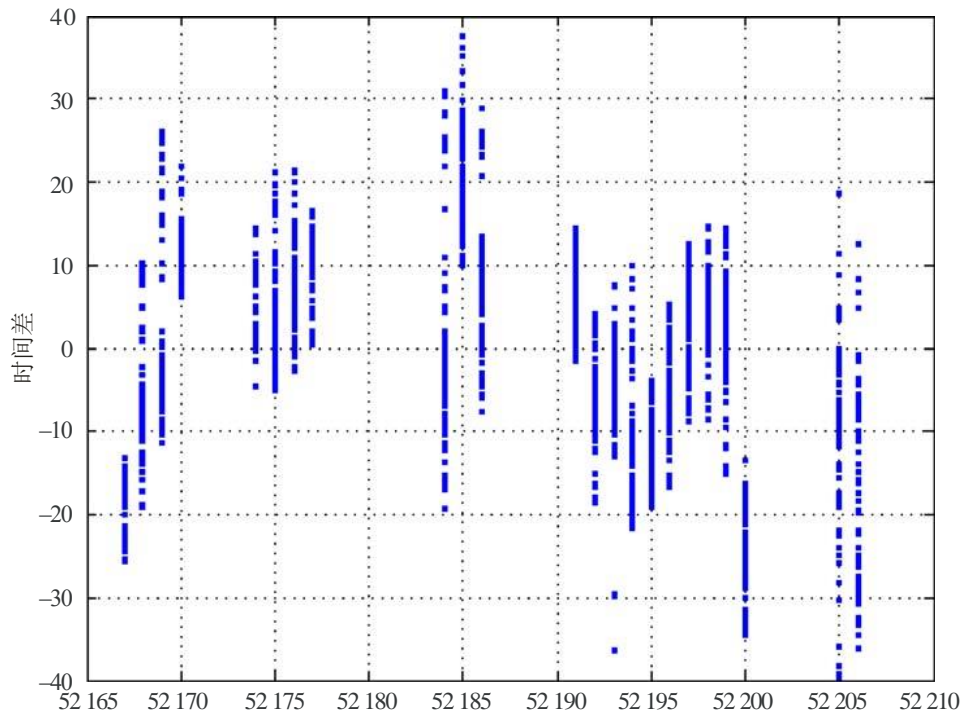
图3-5



Sat\_time\_freq-03-05

图3-6

UTC (USNO) - WNT

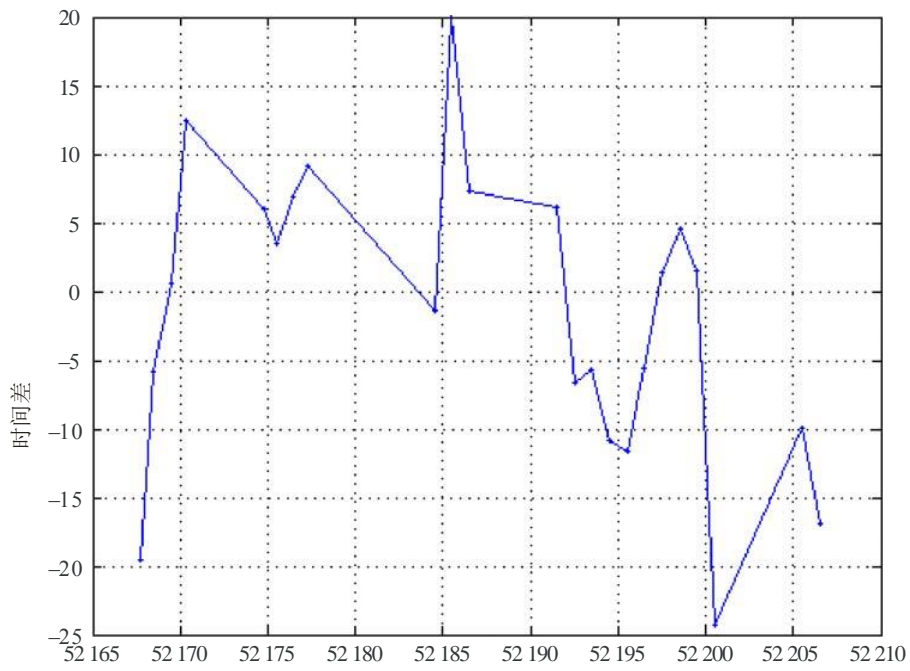


修正儒略日, 52165=2001年9月13日

Sat\_time\_freq-03-06

图3-7

UTC (USNO) - WNT的日平均

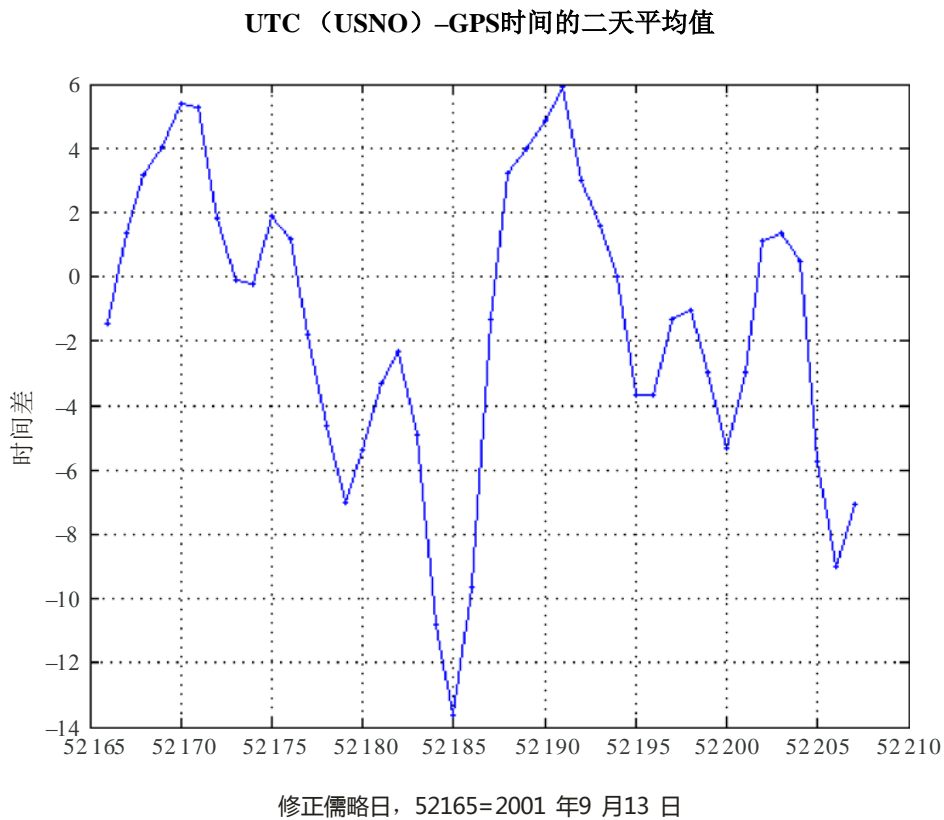


修正儒略日, 52165=2001年9月13日

Sat\_time\_freq-03-07

图3-8显示了UTC (USNO) – GPS系统时间的二天平均值。在此案例中的分散大约是20 ns。

图3-8



Sat\_time\_freq-03-08

### 3.5.9.3 SBAS和频率播发

采用GPS卫星的时间传递被广泛用于测时实验室之间的国际比较和用于国际原子时 (TAI) 的计算已经有很多年了。依靠在2个电台共同视野中的一颗卫星和被每个电台捕获的GPS观测值, 有可能通过一个简单的差分来确定供给GPS接收机的时钟之间的绝对时间偏移。这要求知道在每个电台中的内部时延 (天线、电缆、接收机等)。如果将这些延时视为常数, 就能在这二个电台之间进行一个频率传递, 这就能够获取二个时钟之间时间偏移的变化, 并因此获取这些时钟的稳定性。

大地测量GPS接收机现在能够处理多个信道 (因此多个卫星能够被同时观测) 和二个频率 (因此可以消除电离层时延)。因此, 为了得到更为精确的结果, 采用所有的编码测量, 对传统技术进行一个扩展是有可能的。此外, 这些接收机能够记录编码和载频相位的观测值。众所周知后者为在介于数小时和数天之间的积分时间中准确传递频率提供了光明的前景。

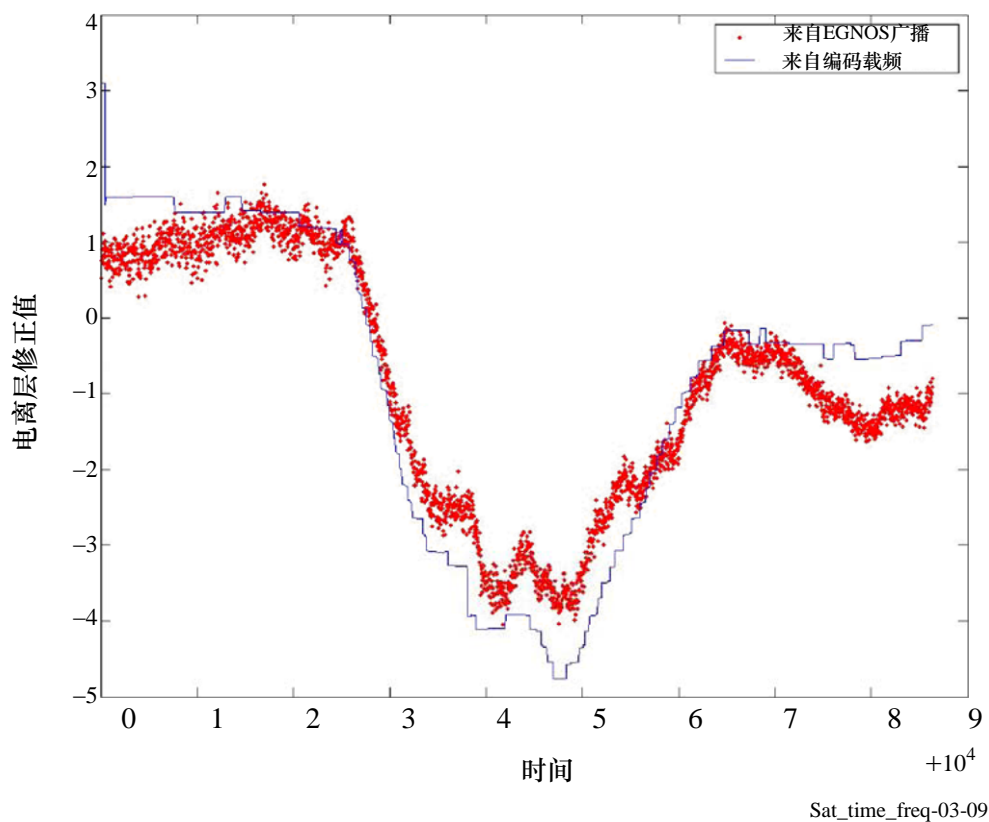
一些GPS接收机还能跟踪GEO信号, 即, 来自地球静止卫星L频段导航负载的类似GPS电文。这些额外信号对时间/频率的传递提供了一个重要的优点。根据定义, GEO卫星总是在视野之中, 所以它应提供将相位持续锁定到其信号的机会。这个永久的可观测性还应能够简化该信号的处理。此外, GEO信号不受有意劣化的影响, 例如选择可用性。

但是，使用GEO卫星意味着特殊的问题。首先，它们在单一的频率上发射，这阻止了使用众所周知的无电离组合。电离层效应能够通过采用SBAS广播的信息或通过计算码/相位差值来修正。事实上，电离层同样地使编码和相位失真，但是具有不同的符号，因此电离层修正可以轻易地计算为编码/相位差的一半。

图3-9显示了在一个BIPM/CNES基线（大约600公里）上得到的结果，采用抛物线天线，都指向INMARSAT AOR-E（EGNOS）：

首先，我们能将在一个电台从编码载频差计算出来的电离层修正值与EGNOS所广播的那个相比较。

图3-9  
根据编码/相位差和广播信息的电离层修正值

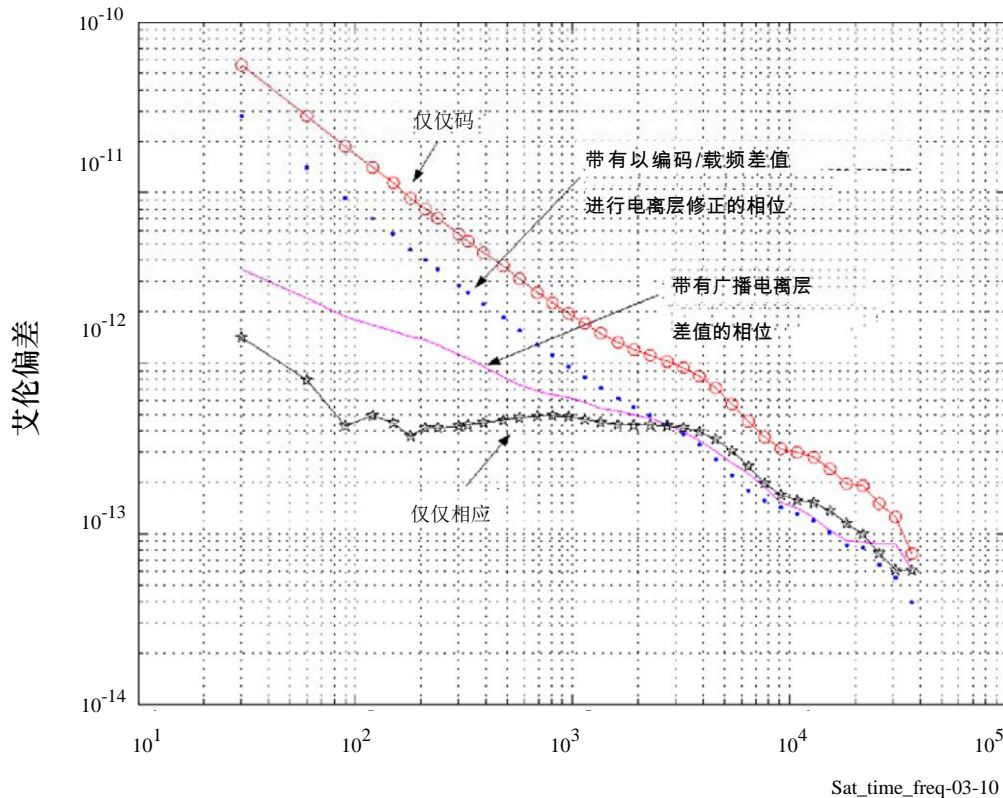


从编码载频差值计算出的电离层修正值明显噪声更多，但是连续的，不像呈现数字阶梯的EGNOS广播。

图3-10比较了带有电离层修正值（二种方法）和没有修正值的时钟解算值的稳定性。

图3-10

不同时钟解算值的艾伦偏差



采用未修正相位的时钟解算值在短期内明显是最佳的，但是缺少电离层修正值影响了中期稳定性。因为编码噪声，采用带有以编码/载频差值进行电离层修正的相位的时钟解算值在短期内是充满噪声的。在大约一个小时的积分时间之后，未修正相位和具有二个修正的相位非常接近。

所以，一个重要的问题是信噪比。使用一个大方向性天线将会改善它，这应对连续相位锁定（减少跳周数量）和对以编码/相位差值进行电离层修正是一个很大的优点。

### 3.5.10 SBAS和时间传递

用户可能希望在某个指定的时间标度让一个位于远处的时钟运行，或简单地希望知道一个本地时钟和一个远端时钟之间的差值。这可以通过一个被称为共视的技术来完成。在共视技术中，二个电台同时观测同一颗卫星。在二个电台的每个用户必须在同一时刻采用相同的卫星记录其本地时钟或本地时间参考之间的差值。这曾经通常采用一个GPS时间传递接收机来完成。但是，随着这个能力被组合到当今先进的接收机中，这有可能采用一个更加先进的接收机来完成。

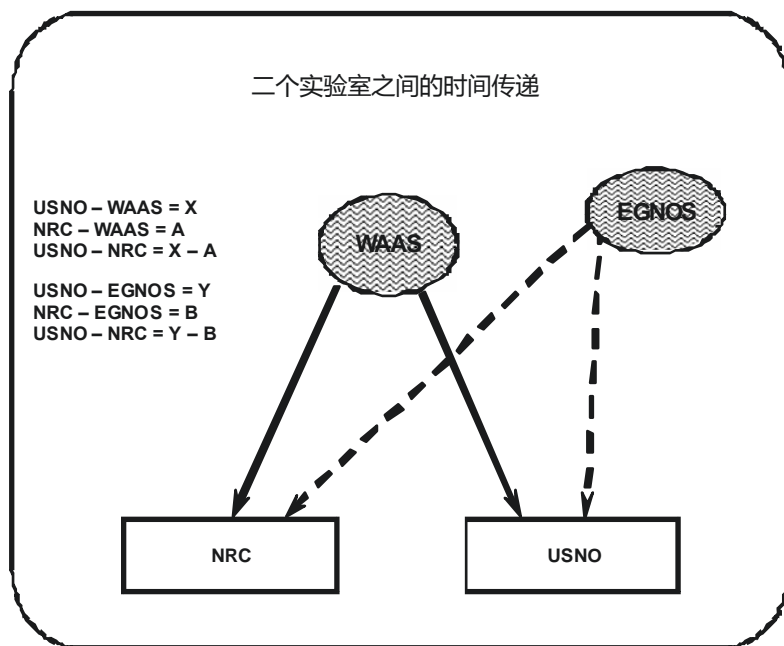
将SBAS用于时间传递涉及二个用户。为了得到最佳结果，他们应在相同的时刻观测相同的卫星，并在计算他们的本地时钟相对于SNT的偏移时采用同样的数据减少技术。这具有显著减少任何共同误差源影响的优点。

### 3.5.11 2个实验室之间的时间传递

当前，二颗SBAS在全球很大范围上是可观察到的。对于时间传递，这提供了一些好的附加特性。图3-11是一个示意图，显示了二个实验室如何能够将二颗SBAS用于比较它们的时钟。每个实验室能够观察到这两颗SBAS。来自一颗SBAS的结果然后能够用作对另一个的检验。

图3-11

显示二个计时实验室之间为了得到二个实验室之间的时间差采用二颗SBAS进行时间传递的示意图



Sat\_time\_freq-03-11

在这个实例中，观测是在华盛顿特区的USNO和在加拿大渥太华的NRC进行的，采用了WAAS GEO和ESTB GEO作为时间传递卫星。图3-12显示了采用WAAS GEO时USNO和NRC主用时钟之间的差值，而图3-13显示了采用ESTB GEO时的差值。因为在此实验中使用的接收机不曾校准，所以已经消除了一个任意的零点。

因此，这个实例只能被用来显示采用这种技术当前可以得到的精度。对每个数据组的一个线性回归分别给出了1.3 ns和2.1 ns的标准误差。

图3-12

采用WAAS GEO时USNO和NRC之间的差值标准误差是1.3 ns

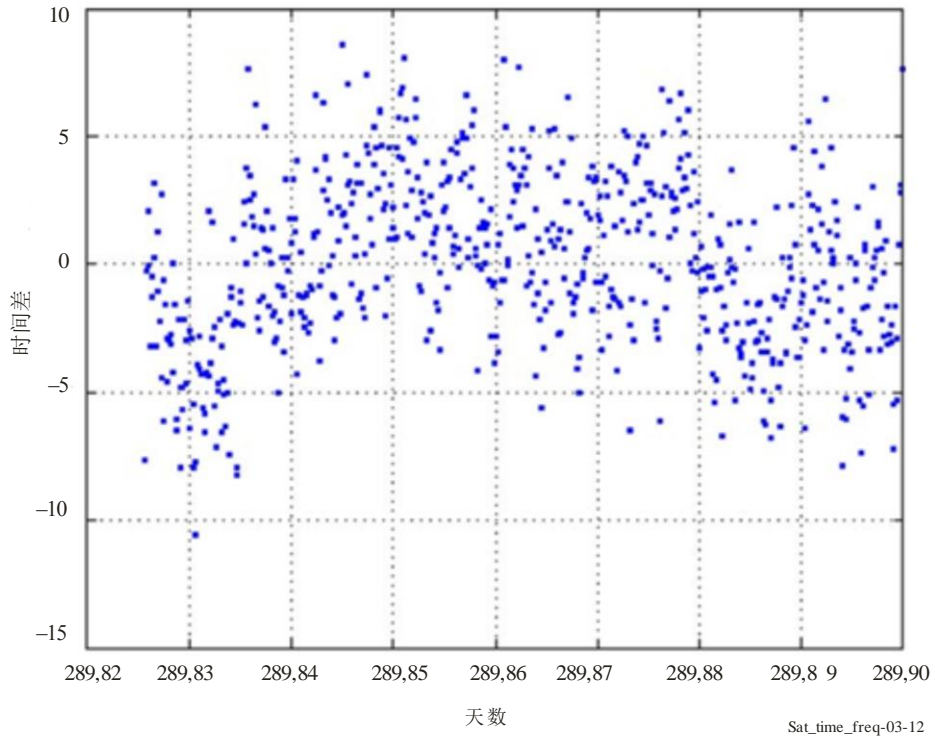
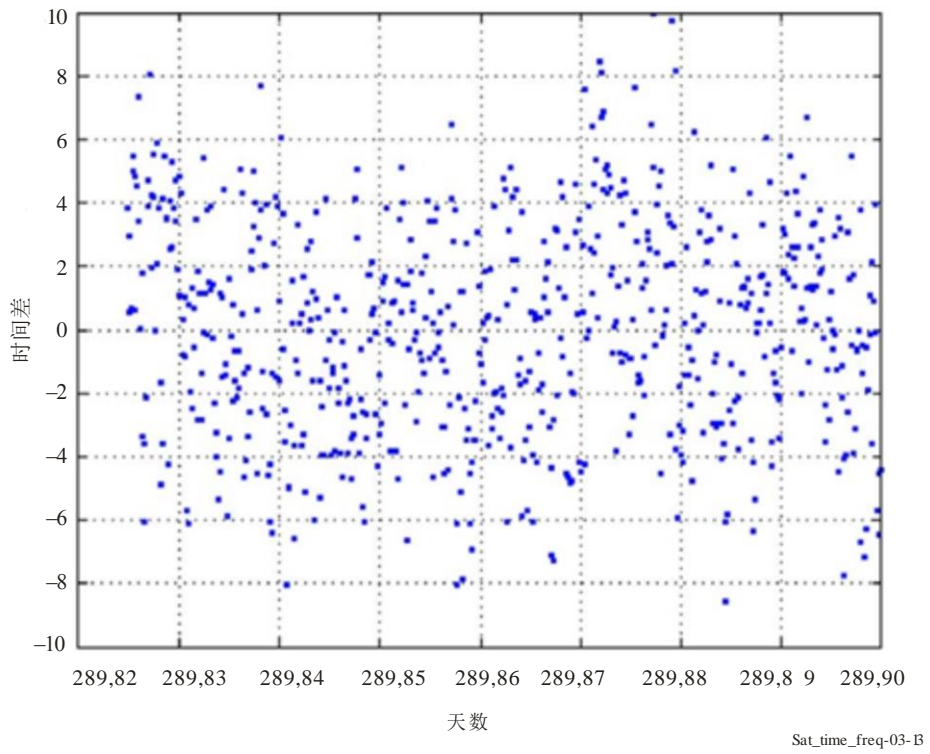


图3-13

采用EGNOS GEO时USNO和NRC之间的差值标准误差是2.1 ns





### 3.5.12 二颗SBAS之间的时间传递

图3-14是一个示意图，它显示了二个实验室如何能够比较二颗SBAS之间的时间差。每个实验室提供对另外一个的检验。

图3-14

显示二个计时实验室之间为了得到二颗SBAS之间的时间差而采用这两颗SBAS进行时间传递的示意图

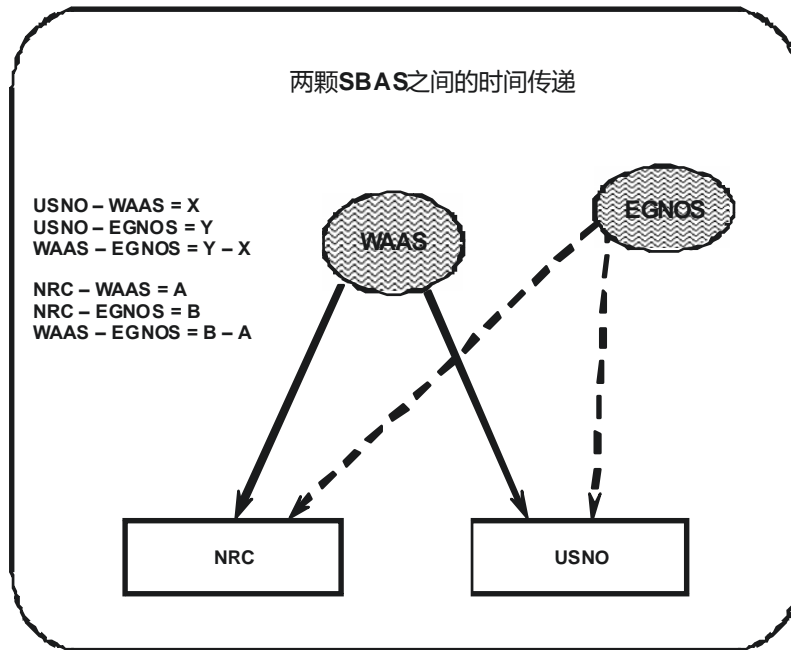


图3-15显示了WNT和ENT之间的差值，它是在一个线性回归对整个观测进行了拟合之后在USNO得到的。同样，因为没有进行过接收机校准，此图显示了采用这个技术当前可以得到的精度。这个数据线性回归的标准误差为1.2 ns。

图3-16显示了在NRC得到的WNT和ENT之间的时间差。对这个数据线性回归的标准误差几乎等于在USNO所得到的。它是1.0 ns。

图3-15  
采用USNO数据时WAAS和EGNOS之间的差值  
标准误差为1.2 ns

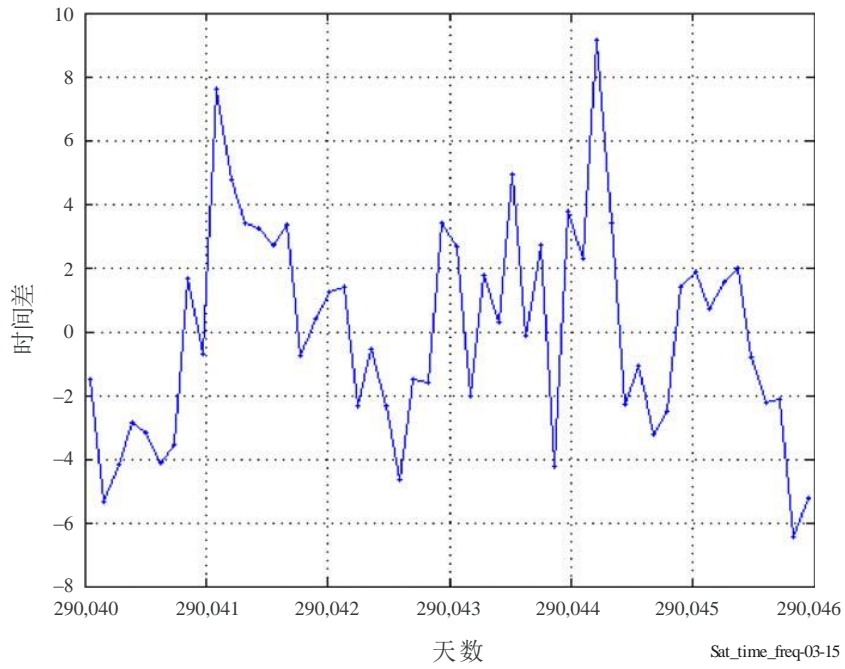
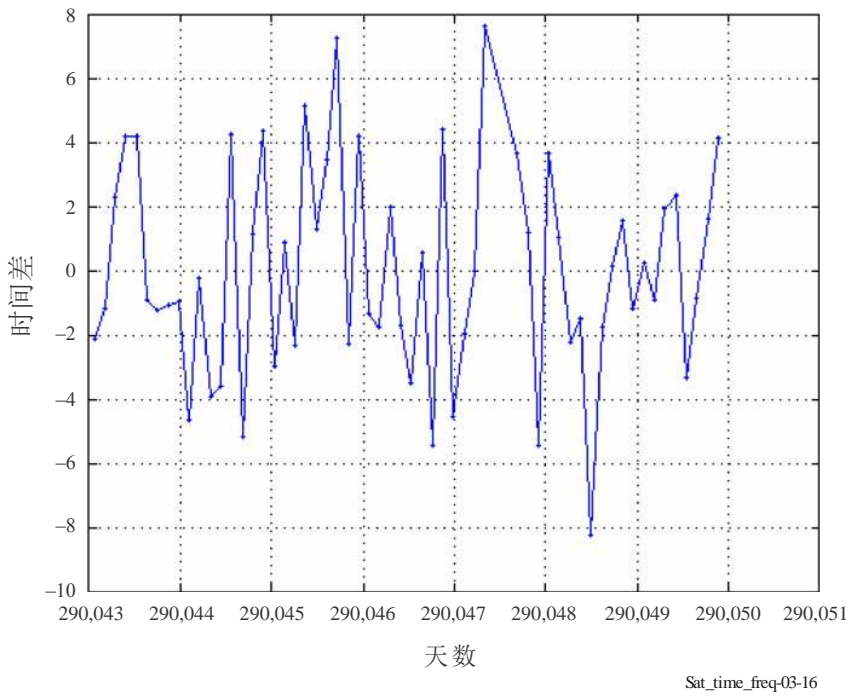


图3-16  
采用NRC数据时WAAS和EGNOS之间的差值  
标准误差为1.0 ns



### 3.5.12.1 SBAS和计时界

一个SBAS能够/将在全球为各种事件的记录提供时间。它还将为计时界提供一个非常稳定的测时信号。它将不受SA的影响。这个源在空中保持同样的接近点。因此，一个高增益天线能够被用来为静止用户提供一个非常好的信号。SNT相对于UTC的偏移是在SBAS导航电文内传送的。该信号将是持续可用的。

这样一个信号为计时界提供了一些独不寻常的能力。它应该使得能够开发更多采用其信号的高用测时系统。较便宜的晶体现在能够被用于在对GPS时间进行积分来消除选择可用性效应时依靠原子标准作为其惯性轮的系统中。因为没有选择可用性，将有可能在提供时间的一个系统中几乎即时检测到任何病态行为。采用GPS，必须要等待观察瞬变是因为选择可用性还是因为异常的时钟行为所引起。如果在二颗SBAS传输卫星的信号覆盖区之内，就会有一个立即的冗余校验。这对很多被定时的系统能够被用作一个极为强健的校验。

### 参考文献

- BENEDICTO, J. *et al.*, [1998] EGNOS: the European Satellite Based Augmentation to GPS and GLONASS. Proc. GNSS98.
- BROWN, K.R. [1991] The theory of the GPS composite clock. Proc. ION GPS-91, p. 223-241 and GOUNI, Ph. *et al.* [1997] Time and Frequency aspects in EURIDIS, EFTF 1997.
- BRUNET M. *et al.* [1998] The role of time and frequency in EGNOS. PTTI 1998.
- FLAMENT, D. *et al.* [1998] EGNOS: the European Based Augmentation to GPS and GLONASS-mission and system architecture. Proc. GNSS98.
- PECK, S. *et al.* [1997] WAAS network time performance and validation, Proc. ION GPS97, p. 1123-1131.
- PIEPLU, J-M. *et al.* [1998] EGNOS algorithms performances status and experiment activities. Proc. GNSS98.

## 附录 A

## SBAS电文内容的简要描述

类型	内容
0	不要将此GEO用于任何事务（用于 WAAS测试）
1	PRN掩膜分配，设定为210比特的51比特
2至5	快速修正值
6	完好性信息
7	快速修正值劣化因子
8	留待将来消息
9	GEO 导航电文（X、Y、Z、时间等）
10	劣化参数
11	留待将来消息
12	SBAS网络时间/UTC偏移参数
13至16	留待将来消息
17	GEO卫星历书
18	电离层网格点掩膜
19至23	留待将来消息
24	混合快速修正值/长期卫星误差修正值
25	长期卫星误差修正值
26	电离层延时修正值
27	SBAS业务消息
28	时钟-星历表协方差矩阵
29至61	留待将来消息
62	内部测试消息
63	无效电文

## 第4章

### GPS系统时间

	页码
4.1 引言 .....	46
4.2 跟踪时钟测量和星历表计算 .....	46
4.3 GPS时间 .....	47
4.3.1 复合时钟部署 .....	47
4.3.2 减少协方差 .....	48
4.3.3 划分协调 .....	48
4.4 来自GPS的UTC (USNO) .....	48
参考文献 .....	49

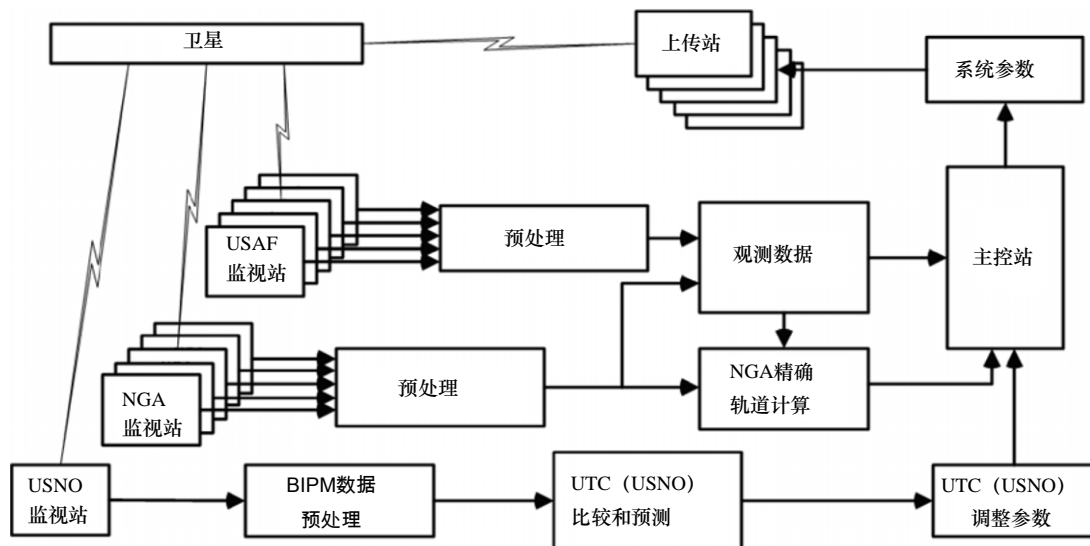
## 4.1 引言

GPS是一个实时预测信息操作。5个美国空军监视站维持对MCS的连续实时链路，这样，当前跟踪和状态信息就能够与来自国家情报和地球物理局（NGA）建立用来提供GPS卫星群补充覆盖的附加监视站的消息结合起来。增加的观察数据则提供对新系统变量的预测。这些系统性能的预测值随后被上传到卫星的星载存储器中，用于在卫星导航电文中传送。在主要的系统性误差（偏移）被消除后，此过程中残留的误差被认为随机性的。

GPS控制段的数据流显示在图4-1中。每颗GPS Block II/IIA运营卫星携带二个铯（Cs）原子钟和二一个铷（Rb）原子钟。每颗Block IIR卫星携带三个铷钟。基本时钟频率是10.23 MHz。卫星时钟和监视站时钟对一个被称为GPS时间的连续系统时间的统计形成有所贡献，GPS时间被规定在UTC的1  $\mu$ s之内，除了未插入跳秒。在考虑了电离层和对流层传输时延、相对论、硬件影响的各种修正之后，GPS能够提供通常具有 $\leq 25$  ns精度的时间参考。但是，实际中精度能够达到10 ns甚至更好。

图4-1

控制段数据流



Sat\_time\_freq-04-01

## 4.2 跟踪时钟测量和星历表计算

当前（2009年），在GPS中，基本测量包括卫星与监视站时钟之间的伪距和伪载频相位。有5个运行控制段（OCS）监视站，包括在科罗拉多州科罗拉多斯普林斯的主控站，它由美国空军管理。已经通过建立与由NGA管理的8个监视站的新直接链路对该OCS进行了增强。每15分钟在一个包含了监视站坐标、轨道计算、和时钟特性的相关常数和模型的卡尔曼滤波器中对由监视站测量的来自所有卫星的伪距进行处理。该卡尔曼滤波器预测组合系统时间（GPS时间）、各个卫星和监视站时钟相对于GPS时间的偏移、以及每颗卫星对于WGS84大地测量坐标系的轨道根数。

测量误差分布在卡尔曼状态之间。卫星和监视站时钟是按照一个时钟模型来估算的，且以模型协方差矩阵的形式来表示误差。

为了确定相对于地心惯性（ECI）参考坐标系的初始轨道方向，GPS轨道计算过程要求了解UT1和UTC之间差值的信息。运动方程是在ECI参考坐标系中进行积分。这些坐标被通过表示地球极移、可变旋转、章动、及岁差的四个旋转矩阵转换到地心地固（ECEF）参考坐标系中。来自跟踪站的数据是以GPS时间来进行时间标记的。在MCS的一个卡尔曼滤波器采用MS数据来生成当前卫星位置和时钟数据的估算值，并对未来14天预测这些值。然后将这些数据格式化并上载到卫星与测距信号一起作为NAV-MSG传送给用户。卫星上载通常每24小时进行一次，但可能会因为系统动态和数据指示而更加频繁。NAV-MSG包含卫星星历表、时钟数据、系统状态和用户需要的其他数据[IS-GPS-2002 rev D, 2006年]。预测准确卫星位置和各个卫星相对于一个公共时间基准的时钟偏移是由控制段提供的使GPS概念能尽其所能的关键功能。

### 4.3 GPS时间

GPS时间的开始历元是1980年1月5-6日的午夜。因此，GPS时间落后于TAI一个19秒的恒定值，并且在2009年6月GPS时间超前UTC15秒。每次在UTC中插入一个跳秒时，UTC时间差就改变。

在GPS被开发时，系统组件同步的原始概念是已经被普遍用于通信系统中的主控时钟方式。系统中的所有时钟要参照在监视站（MS）之一的单独一个时钟。对一个卫星导航系统的主要要求是一个统一的时间系统，它不包含跳秒和中断，这样就使系统单元同步一致。形成的导航业务则将提供准确的定位且不中断。在GPS使用的初始主控时钟方式中，系统中的所有时钟参照在科罗拉多斯普林斯主控站（MCS）中的单独一个时钟。为保证在时钟失效时能有一个主用时钟，系统软件能在任何时间将监视站中的任何时钟指定为主用参考时钟。实行这个能力导致在这样一个切换发生时总体导航性能的显著改变。时钟作为主用参考被假设是完美的，但它们之间的差异将导致使导航性能混乱的总体系统改变。因此，开发了一个复合时钟方式，并加入到系统卡尔曼滤波器中。

这个复合时钟方式类似于产生不依赖任何单一设备的“书面时钟”的传统时钟组合 [Stein和Filler, 1988年]。时钟组合是用于长期计时的一个众所周知的技术，但是在复合时钟情况下，一个卡尔曼估算器技术被用来计算一个公共参考时间代表，它是在产生短期（短于 $10^5$ 秒）内同步系统时间的系统之内时钟差的平均值。在短期内的一致同步正是导航业务所需要的。公共内部时间基准被称为GPS时间，并作为GPS段中所有时钟同步的基础，特别是用户设备。

设计用来为GPS计算系统参数的卡尔曼滤波器估算器最初被设计作为划分滤波器。此设计主要是因为计算要求，也是为了估算的可靠性。滤波器的每个划分估算卫星时钟和监视电台时钟的一个子集。当在滤波器中部署了复合时钟时，添加了一个附加状态，使得各个时钟将不同于测量的隐性平均。与自己的平均当然产生一个零残差。产生的实际时钟状态结果估算值是稳定的，且表现得如所期望的那样，但是，解算值的协方差无限制地线性增加，这是系统基本不可观察性的结果。同样，如果一个偏差被引入到时钟状态中，结果保持相同。因此，添加了一个伪测量，它将限制协方差的增长而不影响所计算的估值。但是，不同的滤波器划分并不都在相同的估算共同时间到达。所以有必要协调来自各个划分的估算值，以保证GPS时间在卫星星群之间一致。

#### 4.3.1 复合时钟部署

当附加状态被添加到卡尔曼滤波器来代替主用MS时钟时，GPS系统变得不可观测。这是因为在所有时钟状态中的一个恒定偏差偏移将不影响伪距，并因此对滤波器将是不可观测的。这个不可观

测状态成分的存在引起时钟相位协方差随时间线性增长，即使该系统因适当规定的滤波器增益而充分稳定。对此特性的进一步讨论请参见Brown [Brown, 1991年]。因为一个增长的协方差矩阵最终将引起数字问题，引进了一个减少协方差矩阵而不劣化滤波器性能的方法。选定的这个方法是减去伪测量更新值[Satin and Leondes, 1990年]。

### 4.3.2 减少协方差

这个伪测量更新采取标准卡尔曼形式：

$$P' = P - [PH^T(HPH^T + R)^{-1}]HP \quad (4-1)$$

此处：

- P' : 因更新形成的协方差矩阵（即，减少的协方差矩阵）
- R: 伪测量噪声方差
- H: 将测量与状态参数相关联的测量矩阵。

此等式中的矩阵P是一个特定划分中卫星与监视站的n个星历表和时钟状态的n×n全协方差矩阵。每个滤波器更新周期，所有滤波器划分都经历独立的协方差减少。n×1列向量H<sup>T</sup>是通过将一个m×1列向量 $\hat{H}^T$ 的每个元素插入到一个n×1零向量中的适当位置来构成的。

$\hat{H}^T$  由下式给出：

$$\hat{H}^T = \frac{B^{-1}u}{u^{-1}Bu} \quad (4-2)$$

此处：

- B: P的m×m子矩阵，对应于仅仅m×1列全零向量的时钟相位状态
- u: m×1列全1向量。

在一个划分中的每个时钟则将在每个星历表状态具有零加权的列向量H中具有一个组合加权（顺序如P的排列）。在H中的元素之和被归一化为1。然后， $\hat{H}^T$ 的表达式为每个时钟分配一个归一化的相位和频率加权组，它反比于估值误差方差的幅度，B的对角线。但是，因为H<sup>T</sup>的特殊形式，更新修正值表达式将导致一些非零星历表状态。因此，这个修正值技术对星历表估值不完全透明。但是，在实际中，显示出极小的差别。

### 4.3.3 划分协调

要求划分协调是为了保证用于每个滤波器划分的复合时钟时间一致。划分中解算时间的离散将产生一个直接的伪距误差。在每个划分中的参考时间将有一个不同的偏差项，它能够从监视站时钟值是在每个划分中的事实估算出来。对划分所引起的数字问题的更好解决方案是采用单独一个划分滤波器，这样使得估值都被以相同的方式处理。GPS系统已经引入了一个单一的划分滤波器。确定GPS时间的复合时钟技术仍将被采用。

## 4.4 来自GPS的UTC (USNO)

GPS卫星原子钟是自由运行的，采用由数据修正提供给GPS时间的同步。GPS时间不在其中没有一个将GPS时间保持为参考的物理时钟的一个系统内实现。GPS时间是在GPS接收机的输出中实现并



因此受USNO监视。他们将这些数据与他们的UTC、UTC（USNO）实现进行比较，并且从这些数据预测为了在卫星的NAV—MSG中传输而被回馈给GPS主控站的参数[McKenzie *et al.*, 1989年]。在USNO实现的UTC相对于GPS时间的实时预测偏移可以从广播NAV-MSG第18页第4子帧得到。

### 参考文献

- BROWN, K. [September 1991] The theory of the GPS composite clock. *Proc. Of ION GPS-91*, p. 223–241.
- McKENZIE, C.H., *et al.* [28-30 November 1989] GPS-UTC Time Synchronization. *Proc. of the 21<sup>st</sup> Annual PTTI Applications and Planning Meeting*.
- Navstar Global Positioning System Interface Specification IS-200 rev D [2006] Navstar GPS Space Segment/ Navigation User Interfaces, IRN-200D-001, ARINC Engineering Services, LLC, El Segundo, CA 90245.
- SATIN, A.L. and LEONDES, C.T. [January 1990] Ensembling Clocks of the Global Positioning System (GPS). *IEEE Trans Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 26, **1**.
- STEIN, S. and FILLER, R. [June 1988] Kalman filter analysis for real time applications of clocks and oscillators. *Proc. of the 42nd Annual Symposium on Frequency Control*, p. 447-452.



## 第5章

## GLONASS导航卫星系统

页码

5.1	引言 .....	52
5.2	总体描述和运行原理 .....	52
5.3	GLONASS的结构和发展 .....	52
5.3.1	空间段 .....	53
5.3.2	控制段 .....	57
5.3.3	用户段 .....	58
5.4	GLONASS时间 .....	58
5.5	GLONASS系统的轨道计算与时间同步 (OD & TS) .....	60
5.6	GLONASS信号和无线电频谱 .....	61
5.6.1	频率要求 .....	61
5.6.2	信号功率和频谱 .....	62
5.7	GLONASS和GPS组合使用特性 .....	64
5.8	结论 .....	65
	参考文献 .....	65

## 5.1 引言

全球导航卫星系统（GLONASS）是一个政府全球导航卫星系统（GNSS），其设计目的是要以高精度定位和测时信息向在地球上和在近地外层空间任何一点的无限数量的航空、航海、陆地和星载用户提供一个连续的全天候支持。

GLONASS系统是一个双重目的空间设施，应用于解决科学、工业、经济、社会、国防、安全和其他相关的问题。俄罗斯联邦航天局（Roscosmos）和俄罗斯国防部是GLONASS系统的同等共同用户[Glotov *et al.*, 2006年]。

注1 – 俄罗斯首字母缩写GLONASS表示GLObal' naya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema，或全球导航卫星系统。

## 5.2 总体描述和运行原理

完全部署的GLONASS系统由24颗卫星构成，定轨在3个轨道平面上。轨道平面以 $120^\circ$ （经度）分隔排列。在每个轨道平面上，8颗卫星以 $45^\circ$ （相位）在每个平面中均匀部署。此外，平面自己相互之间相位偏移 $15^\circ$ 。

卫星轨道的标准周期是11小时15分44秒，对应于19100公里的圆形轨道高度。这个周期保证了每17个轨道后卫星轨迹在地球表面上的重现。选择这个周期是为了减少共振重力场效应对卫星运动的影响，并因此在卫星整个寿命期间排除对轨道的控制操作。标准轨道倾角是 $64.8^\circ$ 。卫星的间隔使得能够对地球表面和近地空间提供连续和全球的覆盖，[GLONASS, 2008年]和（ITU-R M.1787建议书）。

GLONASS系统根据被动三角测量原理运行。系统用户设备测量到所有可见卫星的伪距和径向伪速度，并接收关于卫星星历表和时钟参数的信息。在这些数据的基础上，计算出用户位置的三个坐标和三个速度矢量成分，并进行对用户时钟和频率的修正（ITU-R M.1787建议书）。

每颗卫星在一个（GLONASS）、二个（GLONASS-M）或三个（GLONASS-K）频段上发射导航信号：L1（1.6 GHz）、L2（1.2 GHz）和L3（1.1 GHz）[Dvorking *et al.*, 2009年]和（ITU-R M.1787建议书）。

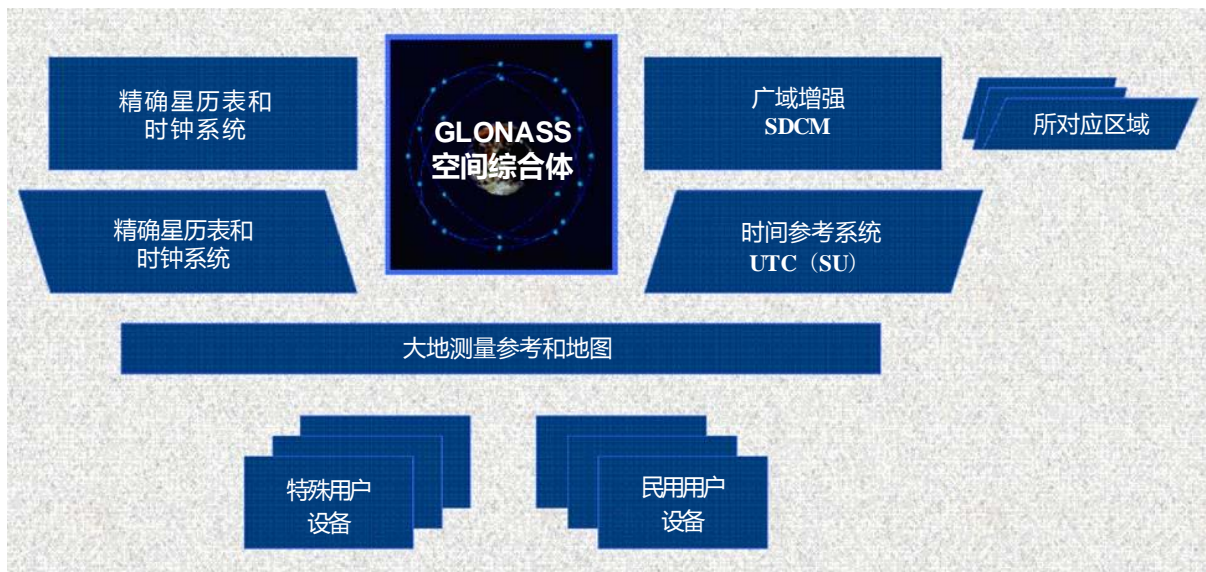
一颗GLONASS型卫星的独特特性是可以利用一个能够进行卫星激光测距的星载光反射器系统。它们被用于精确的轨道计算和大地测量研究[Dvorking *et al.*, 2009年]。

## 5.3 GLONASS的结构和发展

为了提供所需的功能，图5-1中所示的子系统/单元已经被包括在GLONASS系统中[Polischuk *et al.*, 2002年]。

图5-1

## GLONASS的结构



Sat\_time\_freq-05-01

GLONASS系统由以下段落构成：

- GLONASS 卫星轨道星群（空间段）。
- 地面控制系统。
- 用户设备（用户段）。

轨道星群的部署与维护是由二个火箭航天系统来提供的：一个基于“质子”运载火箭，而另一个基于“联合号”运载火箭，从BAYKONOUR或PLESETSK发射基地发射。

### 5.3.1 空间段

按常规变化，GLONASS轨道星群（空间段）包括24个运行的空间装置，在相对于赤道倾角为 $64.8^\circ$ 的实际圆形19100公里轨道上，轨道周期近似为11小时15分。它们均匀分布在3个轨道平面上（沿着升交点经度以 $120^\circ$ 间隔部署），每个平面包含8颗卫星（采用 $45^\circ$ 相等纬度间隔）。在相邻轨道平面上的导航卫星有一个 $15^\circ$ 的纬度间隔。轨道星群的这个几何结构保证了导航区对地球表面的全球和连续覆盖，这样就使用户能够在任何时刻和地球的任何一点观测到不少于4颗卫星（最好的布局是在一颗卫星位于天顶而其他3颗卫星靠近地平线的时候）[Dvorking *et al.*, 2009年]。

第一颗GLONASS卫星是在1982年部署到轨道中的。在1993年，该系统具有了12颗卫星并宣布具有运行能力。

GLONASS系统分三个阶段实施[Polischuk *et al.*, 2002年]:

- 阶段 1 (1983 – 1985 年): 实验测试。系统设想改进。4-6 颗卫星的入轨星群。
- 阶段 2 (1986 – 1993 年): 12 颗卫星的入轨星群。飞行测试完成。系统投入初步运行。
- 阶段 3 (1993 – 1995 年): 部署标准的 24 颗卫星的入轨星群。系统投入运行。

在 1995 年 3 月, 俄罗斯联邦政府决议由国际组织 ICAO 和 IMO 为民用提供导航卫星系统 GLONASS。

在 1995 年, 全部系统部署完成。但是, 由于资金短缺, 在 1995 年到 1998 年期间没有进行 GLONASS 系统的补充。而且, 自 1998 年起, 系统的补充被限制在每年一次发射 3 颗卫星。

2010 年 8 月 4 日入轨星群的状态是 21 颗运行卫星 (当前的状态显示在俄罗斯航天局 GLONASS 信息分析中心, (<http://www.glonass-ianc.rsa.ru/pls/htmldb/f?p=202:1:9296521002007641687>))。

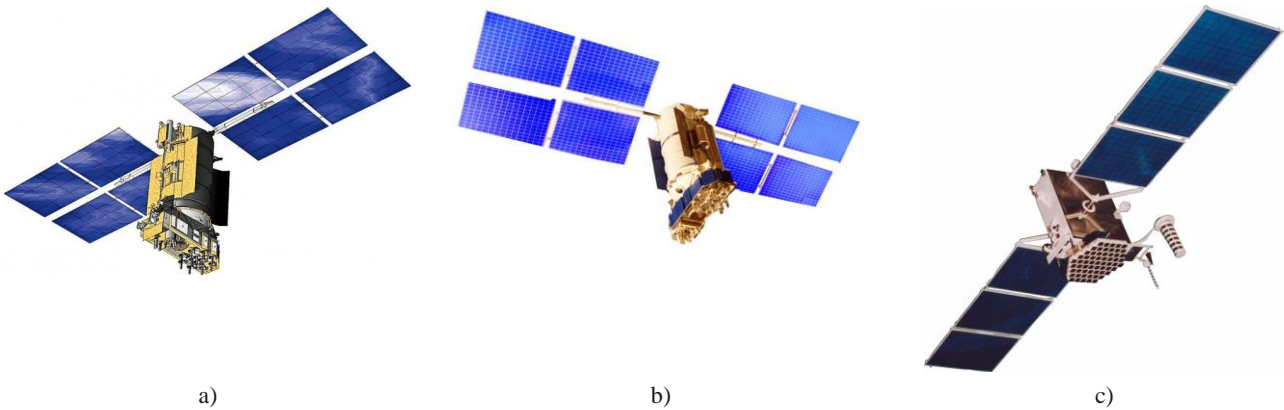
自从 1970 年后期, GLONASS 卫星开发商 JSC “信息卫星系统” Reshetnev 公司已经设计了 3 代 GLONASS 卫星: GLONASS、GLONASS-M 和 GLONASS-K。

这些卫星的全部视图显示在图 5-2 中。

图 5-2

三代 GLONASS 卫星:

a) GLONASS, b) GLONASS-M, c) GLONASS-K



GLONASS卫星的技术特性显示在表5.1中。

表5-1

GLONASS系统卫星的性能对比

	GLONASS	GLONASS-M	GLONASS-K
首次发射	1982年	2003年	计划在2010年
寿命(年)	3	7	10-12
重量(kg)	1 415	1 415	750
导航负载的重量(kg)	180	250	260
每次发射的卫星数量:			
- 质子火箭	3	3	6
- 联盟火箭	-	1	2
电源(W)	1 000	1 450	1 270
导航负载的功耗(W)	600	580	750
垂直实时导航准确度(95%)(m)	60	30	5-8 (40-60 cm, 采用全球差分系统)
民用信号数量	1	3	3
特殊信号数量	2	2	3
星载时钟稳定度	$5 \times 10^{-13}$	$1 \times 10^{-13}$	$1 \times 10^{-13}$
导航信号互同步均方根误差(ns)	15	8	3-4
辅助功能			完好性信号 差分修正值 研究和救援

GLONASS-K卫星的设计是基于一个物理上分为一个平台模块和负载模块的不封闭机箱。

GLONASS-M型卫星取代了GLONASS卫星。这种卫星改进了性能和能力。

M型卫星性能水平的主要目标如下:

- 借助改进的导航信号使用一个新的频段:
  - 频段被向左移(代替频率字符  $K = 0 - 12$ , 将使用其他的频率字符  $K = -7...+6$ )。
  - 以前保留的字节被用于附加信息, 包括 GPS 和 GLONASS 时间标度的分歧、导航帧真实性(有效性)标签、导航数据年龄。
  - 安装减少带外发射的滤波器。
  - 在 L1 和 L2 二个频率上都发送包含数字数据和用于伪距测量的测距码的双信号。
- 在定轨在相同轨道平面和不同轨道平面上的卫星之间都引入一条用于测距和数据交换的卫星间无线链路。
- 改善导航信号稳定度达到  $1 \times 10^{-13}$ 。借助于 Cs 时钟的精确温度稳定性。

- 减少光压不确定性。借助于太阳能电池阵列指向准确性的改善。
- 卫星寿命增加到 7 年。

一颗GLONASS-M卫星既能够在一次串联发射（3颗卫星同时从BAYKONOUR发射基地由带有微风M助推器的质子M运载火箭发射），也能够进行一次单独发射（从PLESETSK发射基地由带有弗雷加特助推器的联盟2运载火箭发射）中发射。

GLONASS-M卫星结构的主要部分是一个密闭的容器，在其中保持0 – 40°C范围的舒适温度条件。在频率标准放置区域的温度稳定度为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

在标准模式下，一颗卫星的纵轴以 $0.5^{\circ}$ 的准确度持续指向地球，而一颗卫星的横轴以 $0.5^{\circ}$ 的准确度与太阳-卫星-地球平面一致，太阳能电池阵列以 $\pm 2^{\circ}$ 的准确度指向太阳。卫星指向由动量轮提供，电磁单元定期对动量轮去饱和。

推进子系统包括联氨（阿米酚）推进器并在卫星初始模式和轨道控制中提供产生控制扭矩。

非常重要的一点是仅仅在卫星定位到其指定轨道时隙才进行轨道控制操纵。在早期定轨阶段期间的高准确性轨道参数控制和对在轨星群采用非谐振轨道可以实现在整个卫星任务寿命期间排除轨道操纵。

电源子系统基于镍氢（Ni-H）电池和硅太阳能电池阵列。一颗GLONASS卫星的首次发射是在2003年12月。这颗卫星由NPO PM制造。

GLONASS系统的进一步开发是由俄罗斯联邦政府在2001年8月20日批准的联邦专项（面向任务）GLONASS项目确定的。这个现代化项目受到以下激励：

- （对民用用户）改善系统准确度、可用性和完好性性能，以增加系统在世界导航服务市场竞争性的必要性；
- （对客户）以增加卫星寿命和每次发射的卫星数量来减少轨道星群维护费用，以及以实施自动化来减少地面控制段费用；
- （对国际合作）GLONASS/GPS 兼容性和互操作性。

该项目覆盖了从2002年到2011年时间段。主要的项目任务是：

- 创建并发展导航卫星系统的空间段和地面基础设施。
- 在针对不同用户需求提供导航解决方案层面对星群进行补充和维护。
- 发展在 SATNAV 中的国际合作。
- 开发和制造俄罗斯用户设备。

根据联邦专项（面向任务）项目和采用GLONASS-M卫星进行系统维护，设想了新一代GLONASS-K型卫星的开发。

与GLONASS-M卫星相比，一颗GLONASS-K卫星具有以下突出的特性，包括：

- a) 在 L 频段引入第三频率来改善用户导航解决方案的可靠性和准确性；
- b) 卫星寿命增加到 10 年；
- c) 卫星重量减少一半；
- d) 在一颗卫星上容纳了搜索和救援负载。



到2010年，NPO PM已经完成了阶段B并开始了阶段C。一颗GLONASS-K卫星可以按照以下串联发射机制之一来发射：

- 6 颗卫星同时从 BAYKONOUR 发射基地由一个带有微风 M 助推器的质子 M 运载火箭发射。
- 2 颗卫星同时从 PLESETSK 发射基地由一个带有弗雷加特助推器的联盟 2 运载火箭发射。

GLONASS-K卫星设计是基于物理上分为一个平台模块和负载模块的一个未密封设备机箱。在标准模式下，一颗卫星的纵轴以 $\pm 5^\circ$ 的准确度指向地球，太阳能电池阵列以 $1^\circ$ 的准确度指向太阳。

频率标准被局部热稳定在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 范围之内。对其他的设备，温度保持在 $-10$ 到 $+50^\circ\text{C}$ 的范围内。

### 5.3.2 控制段

控制段包括：

- 系统控制中心（SCC）；
- 遥感、跟踪和控制站 UT & C；
- 单向监视站；
- 卫星激光测距站。

GLONASS地面控制设施显示在图5-3中[Kosenko, 2009年]。

图5-3

GLONASS控制段



Sat\_time\_freq-05-03

- |           |                |         |          |
|-----------|----------------|---------|----------|
| SSC       | - 系统控制中心       | MS      | - 监视和测量站 |
| TT和C      | - 遥测、跟踪、指令站    | CC      | - 中央时钟   |
| ULS       | - 上传站          | SLR     | - 激光跟踪站  |
| ○ (Green) | - 新站 (2010年之后) | ○ (Red) | - 运行站    |

监视站测量卫星的轨道参数和相对于主用系统时钟的时钟偏移。这些数据被发送到系统控制中心。该中心计算星历表和时钟修正参数，然后按天通过监视站将信息上传到卫星。

### 5.3.3 用户段

用户段包括大量不同类型的用户终端。用户终端包括一个天线、一个接收机、一个处理器和一个输入/输出装置。这个设备可以与其他导航装置结合以增加导航的准确性和可靠性。这样一个组合能对高动态平台特别有用。

用户设备对4（3）颗GLONASS卫星进行伪距和伪距速率的被动测量以及接收和处理包含在卫星导航信号中的导航电文。导航电文描述卫星在空间和时间中的位置。4（3）颗GLONASS卫星的测量与导航电文的结合处理使用户能够确定3（2）个位置坐标，3（2）个速度矢量成分，并将用户时间标度与协调世界时（UTC）的国家参考相参照。保证导航计算进程安排、对SV工作星群的选择和对由它们所发射无线电信号检测的数据被作为导航文本的一部分进行发射。

这些设备功能上结合到GLONASS中，正像移动电话和用户终端被结合到通信系统中那样。用于GPS的用户导航设备（CND）的大规模生产始于1980年代后期；目前，在超过100个企业中进行它们的系列生产，包括双系统GPS/GLONASS接收机，生产500个标准类型的接收机。请注意，非政府用户CND的开发和生产是私人企业的目的，特别是因为在此行业中产品和服务的世界年销售额目前超过了100亿美元。但是，政府支持为生产有竞争力CND型号所必需的原件基础的开发[GLONASS, 2008年]。

## 5.4 GLONASS时间

在每颗卫星上，有被结合到用来形成、存储和产生星载时间标度和在1600 MHz和1250 MHz频率范围中高稳定性导航信号的星载同步装置系统之中的铯时间和频率标准。在2010年，计划开始发射具有改进特性的新一代卫星GLONASS-K（图5-1c）。它们的保证寿命期将是10年。它们还将包括在L3（1 198–1 212 MHz）频率范围中的第三民用信号。时间和频率标准是星载同步装置，它们很大程度上决定了导航卫星的保证寿命期[GLONASS, 2008; Dvorking *et al.*, 2009年]。

类似于GPS，GLONASS时间基于一个原子时间标度。此时间标度是由俄罗斯维护的UTC（UTC（SU））。不像GPS，GLONASS时间标度不是连续的，且必须为了周期性跳秒而进行调整。按国际地球旋转和参考系统服务（IERS）所规定，跳秒被应用于所有UTC时间参考。跳秒被用于保持UTC接近平太阳时。因为地球绕其自己轴的自转，所以平太阳时不是均匀的，且由于潮汐摩擦和诸如地球液态核运动这样的其他因素的影响，其速率逐渐改变。

GLONASS时间由控制段采用导航电文中广播的偏移剩余部分来维持在UTC（SU）的1 ms之内，且通常优于1  $\mu$ s。同样，莫斯科将GLONASS时间相对于UTC（SU）增加3小时的偏离。按照OEMV系列固件参考指南，GLOCLOCK日志包含GPS和GLONASS之间时间偏离的信息。

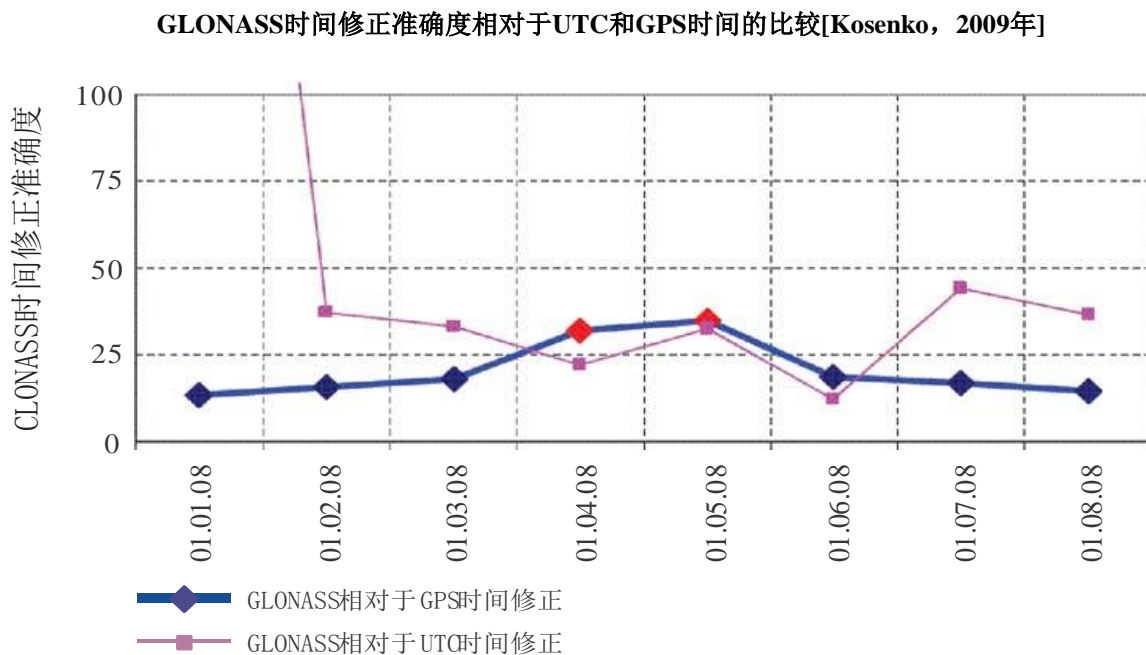
GLONASS卫星装备了日稳定度不劣于 $5 \times 10^{-13}$ 的时钟（时间/频率标准），而对GLONASS-M卫星是不劣于 $1 \times 10^{-13}$ 。对于GLONASS，卫星时间标度互同步的准确性不劣于20 ns（1  $\sigma$ ），而对GLONASS-M卫星则不劣于8 ns（1  $\sigma$ ）。

GLONASS时间是基于GLONASS中央同步器（CS）时间而产生的。中央同步器氢时钟的日稳定度不劣于 $2 \times 10^{-15}$ 。

GLONASS卫星的时间标度被定期与CS时间标度相比较。控制段每天二次计算每个星载时间标度相对于GLONASS时间和UTC（SU）的修正值并上传到卫星。一个采用GLONASS UTC（SU）时间标度系统的误差应不超过1  $\mu$ s。

按照国际计量局（BIPM）通告（跳秒修正）执行，GLONASS时间标度被定期与UTC修正同时修正到整数秒 – 参见图5-3。通常，这些修正（1秒）由所有UTC用户每年（或1.5年）进行一次，一季度在从12月31日到1月1日（或二季度从3月31日到4月1日，或三季度从6月30日到7月1日，或四季度从9月30日到10月1日）的UTC午夜00点00分00秒。

图5-4



Sat\_time\_freq-05-04

这些计划的修正被通过相关的公告、通知等事先（至少三个月之前）通知给GLONASS用户。GLONASS卫星在其导航电文中没有任何涉及UTC跳秒的数据。但是，GLONASS-M卫星的导航电文具有给予用户的关于即将到来UTC跳秒修正、其数值和符号的事先通知项（参见[GLONASS, 2008年]的§ 4.5）。

由于跳秒修正的原因，在GLONASS时间和UTC（SU）之间没有整数秒的差值。但是，因为GLONASS控制段的特殊特性，在这些时间标度之间有恒定的三小时时间差值：

$$t_{\text{GLONASS}} = t_{\text{UTC (SU)}} + 03 \text{ h } 00 \text{ min} \tag{5-1}$$

此处：

$t_{\text{GLONASS}}$ ： GLONASS时间；

$t_{\text{UTC (SU)}}$ ： 协调世界时（UTC（SU））的国家时间标度。

为了在UTC（SU）中测量的时刻重新计算卫星的星历表，应使用以下等式：

$$t_{\text{UTC (SU)}} + 03 \text{ h } 00 \text{ min} = t + \tau_c + \tau_n(t_b) - \gamma_n(t_b) (t - t_b) \tag{5-2}$$

此处：

$t$ : 按照星载时间标度的导航信号传输时间

$\tau_c$ 、 $\tau_n$ 、 $\gamma_n$ 、 $t_b$ : 星历表和年历参数（在§§ 4.4和 4.5中涉及）。

GLONASS-M卫星还发送用于计算世界时UT1和协调世界时（UTC）之间差值的特殊系数B1和B2以及GPS相对于GLONASS时间的GPS修正值，它不应超过30 ns ( $\sigma$ ) [GLONASS, 2008年]。

## 5.5 GLONASS系统的轨道计算与时间同步（OD & TS）

在GLONASS系统标准模式下，对时间修正值和轨道参数的计算是分别进行的。采用单向和双向测量每天二次对每颗卫星计算时间修正值。对采用单向和双向测量计算的距离进行比较使得能够简单定义星载时钟的时间修正值。对于星历表计算，仅仅采用双向测量。

频率时间支撑系统包括无线电非查询和查询测量站（NMS和QMS）及系统中央同步器（莫斯科州肖尔科沃）。采用NMS对到导航卫星伪距的测量和采用QMS的距离测量产生出星载时间标度相对于系统时间标度的偏移值。事实上，由多个日稳定度不劣于 $5 \times 10^{-14}$ 的高稳定度氢频率标准组成的中央同步器作用为一个系统时钟，所有卫星时钟都同步于它，且使用者与它比较其时钟。

反过来，GLONASS系统时间标度与作为协调世界时（UTC）实施之一的国家时间和频率标准标度（莫斯科州门捷列耶沃）UTC（SU）同步。根据具有甚长基线的无线电干涉法数据计算出GLONASS系统时间标度相对于世界时（UT1）的修正值，并在一个导航电文中传递给用户[Dvorking *et al.*, 2009年]。

现在（2010年），由于单向测量设施的建立和地球引力场活动的结束，已经开始了对仅基于单向测量的同时时间修正和星历表计算的技术验证。

GLONASS系统所发送的星历表描述了卫星在地心参考坐标系PZ-90中的位置。为了组合使用GLONASS和GPS系统，可以将卫星坐标转换到WGS-84系统且存在一个用于此目的的对对应矩阵。沿着每个轴的坐标变换误差小于1.5米（ $1\sigma$ ）。

GLONASS-K卫星的某些OD & TS任务现在由卫星的星载软件来解决，显著改善了卫星的自主性。在卫星上进行的主要OD & TS任务如下：

- 生成并向导航发射机提供导航超级帧；
- 初步处理卫星间的距离测量；
- 采用卫星间的距离测量改善卫星参考星历表；
- 计算相对于一个群时间标度的时间修正值；
- 传输星历表和时间数据。

对于采用卫星间测量改善参考星历表，已经检验了三种方法：

- 垂直观测法，当采用以与卫星运动垂直的视线进行的相互测量仅仅对沿轨分量进行改善时。
- 基于“用户”主角的方法，当假设确切知道其他卫星的参考星历表来改善每个卫星参考星历表时。
- 平面轨道参数改善法，以沿轨和径向分量改善为主。在卫星上对每颗卫星和视野中所有其他卫星的星历表进行改善。

第三种方法似乎是最优的。采用卫星间测量进行的参考星历表星上改善和时间修正星上改善是分开进行的。在导航帧中传递的星历表误差（RMS）如下：

- 对于 GLONASS 卫星：沿轨 - 20 米，沿副法线 - 10 米，沿半径 - 5 米；
- 对于 GLONASS-M 卫星：沿轨 - 7 米，沿副法线 - 7 米，沿半径 - 1.5 米。

从1999年起，根据俄罗斯政府法令，GLONASS系统变为一个双重用途系统，这就是说，可以预见其使用是既为军用用户也为民用用户。此外，GLONASS系统对国际合作是开放的，以建立一个国际导航系统，且其使用由ICAO和IMO设想。GPS和GLONASS系统的组合使用将为用户提供具有高准确度和可用性的可靠导航，并有助于世界导航业务市场的发展。

## 5.6 GLONASS信号和无线电频谱

GPS系统应用编码信道多址信号，其中所有导航卫星在一个且相同的载频上发射信号，与之相比，GLONASS系统应用频分多址，因此每颗卫星在其自己的载频上发射导航信号。二种方法都有它们自己的优缺点。特别是，使用编码信道多址极大地简化了用户装置的量产，并能够使卫星数量无限制的增加。因此，以GLONASS的平衡发展和导航服务数量和质量的扩展为目的，计划要在GLONASS-K卫星中引入采用频分和相分的新导航信号。

### 5.6.1 频率要求

GLONASS系统的频率要求基于电离层透明度、无线电链路预算、用户天线的简单性、多径抑制、设备成本和RR规定。载频在L1频段中按0.5625 MHz的整数倍变化，而在L2频段中按0.4375 MHz的整数倍变化，以及在L3频段中按0.423 MHz整数倍变化。

从2006年起，GLONASS系统中的新卫星采用不同频段中的14到20个载波频率。在L1频段中采用从1598.0625 MHz（最低）到1605.3750 MHz（最高）的载波频率，在L2频段中采用从1242.9375 MHz（最低）到1248.6250 MHz（最高）的载波频率，而在L3频段中采用从1201.7430 MHz（最低）到1209.7800 MHz（最高）的载波频率。GLONASS系统中所使用无线电导航信号载波的标称值在表5-1（ITU-R M.1787建议书）中给出。

表5-1

GLONASS系统中无线电导航信号载波频率的标称值

K（载频序号）	$F_K^{L1}$ (MHz)	$F_K^{L2}$ (MHz)	$F_K^{L3}$ (MHz)
12	-	-	1 209.7800
11	-	-	1 209.3570
10	-	-	1 208.9340
09	-	-	1 208.5110
08	-	-	1 208.0880
07	-	-	1 207.6650
06	1 605.3750	1 248.6250	1 207.2420

K (载频序号)	$F_K^{L1}$ (MHz)	$F_K^{L2}$ (MHz)	$F_K^{L3}$ (MHz)
05	1 604.8125	1 248.1875	1 206.8190
04	1 604.2500	1 247.7500	1 206.3960
03	1 603.6875	1 247.3125	1 205.9730
02	1 603.1250	1 246.8750	1 205.5500
01	1 602.5625	1 246.4375	1 205.1270
00	1 602.0000	1 246.0000	1 204.7040
-01	1 601.4375	1 245.5625	1 204.2810
-02	1 600.8750	1 245.1250	1 203.8580
-03	1 600.3125	1 244.6875	1 203.4350
-04	1 599.7500	1 244.2500	1 203.0120
-05	1 599.1875	1 243.8125	1 202.5890
-06	1 598.6250	1 243.3750	1 202.1660
-07	1 598.0625	1 242.9375	1 201.7430

在每个载波频率上发送相位上偏移90°（正交）的二个相移键控（相位差180°）导航信号。它们是一个标准精度（SA）信号和一个高精度（HA）信号。

每颗卫星（GLONASS和GLONASS-M）在L1（1.6 GHz）和L2（1.2 GHz）二个频率范围中发射导航信号，并采用不同的载频。相同的载频由在相同平面中相对的卫星使用。L1和L2频段中的标称载频由以下表达式确定：

$$f_{K1} = f_{01} + K\Delta f_1 \quad (5-3)$$

$$f_{K2} = f_{02} + K\Delta f_2 \quad (5-4)$$

此处：

K: 载频序号

$$f_{01} = 1\,602\text{ MHz}$$

$$\Delta f_1 = 562.5\text{ kHz}$$

$$f_{02} = 1\,246\text{ MHz}$$

$$\Delta f_2 = 437.5\text{ kHz.}$$

在2005年之前，K所采用的值是从0到13的整数，2005年之后 - 从-7...+6。

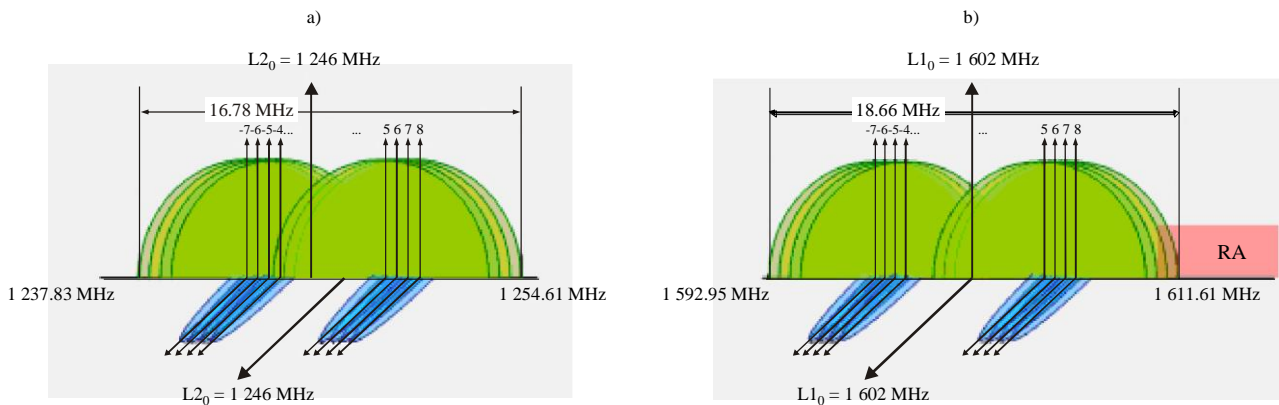
对于GLONASS-K卫星，引入了第三频段L3。

### 5.6.2 信号功率和频谱

在L1、L2频段中的GLONASS信号频谱显示在图5-4中，在L3频段中的GLONASS-K卫星信号频谱显示在图5-5中[Revnivkh, 2005年]。

图5-5

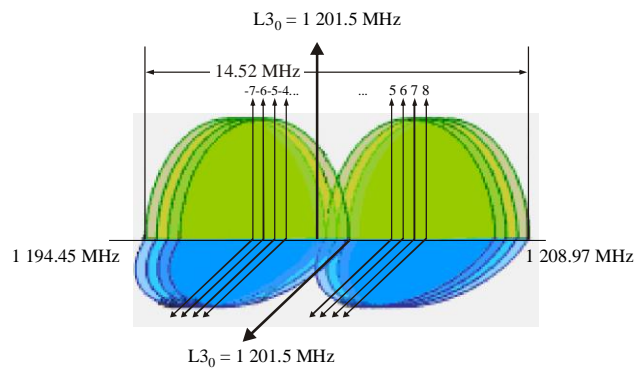
GLONASS频谱：b) L1频段，a) L2频段



Sat\_time\_freq-05-05

图5-6

GLONASS频谱：信号L3（GLONASS-K）



Sat\_time\_freq-05-06

发射信号是椭圆右极化的，椭圆系数对于L1、L2、L3频段不劣于0.7。对于L1、L2和L3频段中的SA和HA信号，在一个接收机输入处（假设0 dBi增益天线）信号的最小保证功率被规定为-161 dBW（-131 dBm）（ITU-R M.1787建议书）。

在GLONASS系统中采用三个发射类别：8M19G7X、1M02G7X、10M2G7X。这些信号的特性提供在表5-2中。

表5-2

GLONASS信号的特性

频率范围	发射类别 <sup>(1)</sup>	Tx带宽 (MHz)	最大峰值发射 功率 (dBW)	最大频谱功率 密度 (dB (W/Hz))	天线增益 (dB)
L1	10M2G7X	10.2	15	-52	11
	1M02G7X	1.02	15	-42	
L2	10M2G7X	10.2	14	-53	10
	1M02G7X	1.02	14	-43	
L3 <sup>(2)</sup>	8M19G7X	8.2	15	-52.1	12
	8M19G7X	8.2	15	-52.1	

(1) 无线电规则，2008年版。第2卷，附录1。

(2) 二个GLONASS L3信号相互相对偏移90°（正交）。

导航信号功率频谱包络由函数  $(\sin x/x)^2$  描述，此处：

$$x = \pi(f - f_c) / f_t \quad (5-5)$$

此处：

- $f$ : 所涉及的频率
- $f_c$ : 信号的载波频率
- $f_t$ : 信号码片速率。

频谱的主瓣形成信号的工作频谱。它占用等于 $2f_t$ 的带宽。波瓣具有等于 $f_t$ 的带宽。

## 5.7 GLONASS和GPS组合使用特性

很明显，GPS和GLONASS的组合将最终产生一个48颗卫星的系统。有了这样一个系统，卫星遮蔽将变得较少成为限制因素，使得能够增加测量冗余。

尽管系统之间的差异，先进的数字信号处理方法使得有可能采用相同的接收机结构来处理GPS和GLONASS的信号。GPS和GLONASS频率范围接近，因此允许在用户设备中使用一个组合天线和共用输入放大器。最佳的接收机设计和适当的信号处理应使得能够以仅仅比一个GPS或GLONASS接收机略高的成本来制造一个组合接收机。GPS和GLONASS在星历表信息和年历表示上的差异对用户设备的操作不构成障碍。导航处理器软件提供适当的修正并能够处理双方的数据流。

作为整个系统最灵活的部分，用户设备持续改进。大多数现有的接收机是多通道的，并且能够同时跟踪多个可视卫星的伪距和伪速度。它们因此提供导航观测的最大准确性和完好性。在数字信号处理领域中的技术进展为非常高的集成度提供了手段，使得已经能够在靠近前端输入处对卫星信号进行离散变换和数字处理。

GLONASS和GPS的组合应用提供了超过任何这些系统独立使用的显著优点：



增强的可用性：对于在有阻碍环境中的运行，例如山区地带或城市“峡谷”，可用卫星数量的加倍经常意味着对GPS或GLONASS单独接收机无解的情况有一个可行的解决方案。

改进的准确性：卫星数量的增加通常将导致更好的用户对卫星的几何关系（PDOP）。

更快的冷启动：当接收机没有假设定位或时间信息时，如果视野中的卫星数量增加，捕获一颗卫星的概率也增加，进而减少了捕获时间。

强健的系统完好性：检测和隔离一个故障卫星的能力因为视野中卫星数量的增加而得到极大的增强。同样，对二个独立系统的依赖为应对一个系统范围内的故障增加了完好性水平。

在市场上，有可用于在陆地、海上和空中拓扑和地理调查中同时采用GLONASS和GPS系统导航卫星信号的设备。当工作在一个差分模式时，这个设备保证对地面站固定的测量精度 $1-3 \text{ cm} + 10^{-6} L$ （ $L = 1000 \text{ km}$ ），此处， $L$ 是大地测量电台、汽车、飞机、飞船之间的距离[ITU-R手册，2002年]。

认识到了上述GPS-GLONASS优点，美国和俄罗斯联邦的代表团于2004年12月9-10日在华盛顿会面并成立了工作组，来处理发展和采用GPS和GLONASS的事宜。保持每个基于卫星的导航和测时信号之间无线电频率的兼容性是继续合作努力的主要关注点。双方重申他们对继续这些对话的承诺，并再次确认美国和俄罗斯联邦愿意继续在一个持续、全球范围的基础上提供适用于商业、科学和生命安全的GPS和GLONASS民用信号，免除直接用户费用。从那时起，GPS-GLONASS工作组定期开会。

## 5.8 结论

基于以上信息，可以指出以下几点：

- GLONASS 是一个全球定位卫星系统，目前（2010年）提供几乎全球范围覆盖（将在几年中完全覆盖）。
- GLONASS 系统是一个双重（民用和军用）应用系统
- GLONASS 由民用机构 ROSCOSMOS（俄罗斯联邦航天局）协调。
- GLONASS 与 GPS 的结合使用将改善导航和精确时间播发业务的质量。
- GLONASS 对国际合作开放。

## 参考文献

- DVORKING, V. V., NOSENKO, YU. I. URLICHICH, YU. M., FINKEL' STEIN, A. M. [2009] The Russian Global Navigation, Satellite Program. Vestnik Rossiiskoi Akademii Nauk. Vol. 79, 1, (<http://www.springerlink.com/content/180m3184w46747u5/fulltext.pdf>) .
- GLOTOV, V.D., REVNIVYKH, S. G., MITRIKAS, V.V. [October 2006] GLONASS status update. MCC activity in GLONASS program. 15<sup>th</sup> International Workshop on Laser Ranging, Canberra, Australia, (<http://cddis.gsfc.nasa.gov/lw15/docs/papers/GLONASS%20Status%20Update%20and%20MCC%20Activity%20in%20GLONASS%20Program.pdf>) .

- KOSENKO V. [3-9 May, 2009] Satellite 系统 GLONASS Status and Plans. Proceedings of European Navigation Conference - Global Navigation Satellite 系统s (ENC-GNSS), Naples, Italy, ([http://www.enc-gnss09.it/proceedingsPDF/04\\_Kosenko.pdf](http://www.enc-gnss09.it/proceedingsPDF/04_Kosenko.pdf)) .
- POLISCHUK G., M., KOZLOV, V. I., ILITCHOV, V. V., KOZLOV, A. G., BARTENEV V. A., KOSENKO, V. E., ANPHIMOV, N. A., REVNIVYKH, S. G., PISAREV, S. B., TYULYAKOV, A. E. [2002] Global navigation satellite 系统 GLONASS: development and usage in the 21st century. 34<sup>th</sup> Annual Precise 时间和时间 Interval (PTTI) Meeting, Reston, Virginia, USA, (<http://tycho.usno.navy.mil/ptti/ptti2002/paper13.pdf>) .
- REILLY, J. P. [2004] A review of the evolution of the Russian GLONASS 系统, ([http://www.topconpositioning.com/uploads/tx\\_topconfilearchive/POB\\_Magazine\\_takes\\_an\\_in-depth\\_look\\_at\\_GLONASS\\_Click\\_here\\_for\\_article.pdf](http://www.topconpositioning.com/uploads/tx_topconfilearchive/POB_Magazine_takes_an_in-depth_look_at_GLONASS_Click_here_for_article.pdf)).
- REVNIVYKH, S. G. [14-15 March, 2005] GLONASS: Status and Perspectives. Civil GPS Service Interface Committee International Information Subcommittee, Prague, Check Republic, (<http://radio.feld.cvut.cz/satnav/CGSIC/>) .
- RISDE [2008] Global Navigation Satellite 系统 GLONASS Interface Control Document Navigational radio signals in bands L1, L2, Ed. 5.1, Russian Institute of Space Device Engineering (RISDE), (<http://rniikp.ru/en/pages/about/publ/ikd51en.pdf>) .

### ITU-R文件

- ITU-R 频谱监测手册, 2002年版, (<http://www.itu.int/publ/R-HDB-23/en>) 。
- 无线电规则, 2008年版, 第2卷, 附录1 – 发射类别和必要带宽, (<http://www.itu.int/publ/R-REG-RR-2008/en>) 。
- ITU-R M.1787建议书 – 无线电导航卫星业务 (空间对地球和空间对空间) 中系统和网络的描述和工作在1 164-1 215 MHz、1 215-1 300 MHz及1 559-1 610 MHz频段中的传输空间站的技术特性, (<http://www.itu.int/rec/R-REC-M.1787-0-200908-I/en>) 。

## 第6章

### 通信卫星系统

页码

6.1	引言 .....	68
6.2	通信负载 .....	68
6.2.1	模拟弯管结构 .....	68
6.2.2	再生结构 .....	70
6.2.3	数字实施 .....	70
6.2.4	跟踪、遥测和指令系统 .....	70
6.3	卫星运行的测时和同步 .....	70
6.4	弯管负载中链路噪声和卫星缺陷的影响 .....	70
6.4.1	白噪声贡献 .....	70
6.5	卫星相位噪声和系统误差 .....	72
6.6	结论 .....	72
	参考文献 .....	72

## 6.1 引言

通信卫星的主要功能是为了通信目的传送RF信号。因此，通过通信卫星的时间和频率传递通常是借助通信功能来实现的。有些卫星系统，特别是采用时分复用寻址系统（TDMA）的那些，为了它们的通信功能而要求精确的时间 [ITU-R Handbook, 2002年; Ha, 1990年]。在大多数TDMA情况下，卫星仅仅转发来自地球的精确测时信号，而且卫星负载自身并不为其运行而要求精确时间。为了测距和时间标记目的，在卫星公共汽车遥测、跟踪和指令系统中要求时间传递能力。但是，卫星系统的这个部分通常对租用用户是不可用的。商用卫星的频率准确性和稳定性要求通常限于维持频段分配和执行测距功能的要求。政府通信卫星计划拥有更加准确的星载频率源，因为它们还被用于导航或需要精确时间的其他目的。

一个通信卫星的二个部分能被用于时间传递，即通信负载和公交车跟踪、遥测、和指令（TT&C）系统。以下几节将描述这些系统每一个的运行原理，重点在时间传递方面。

通信卫星的结构、主要技术和运行特性在[ITU-R手册, 2002年]中描述。

## 6.2 通信负载

通信卫星被用于各种通信业务。上行链路和下行链路频段被用于通过卫星负载进行通信。这些频段经常被进一步分解为子频段，经常被称为信道。一个通信负载的目的是接收来自上行链路或信道的信号，将这些信号转换到新的频率并进一步对其进行处理，然后在下行链路频段或信道再次发射处理过的信号。

一颗卫星的频段或信道或者被单址接入（SA）模式下的单个用户使用，例如一个广播应用，或者被各种多址（MA）模式下的多个用户使用。各种MA模式是空分多址（SDMA）、时分多址（TDMA）、码分多址（CDMA）、频分多址（FDMA）和随机多址（RMA）。

这些MA模式经常被组合应用以扩展频段或信道的容量。

通信负载包括二个通用结构类型，弯管或再生型，和二种实施，模拟或数字。这些结构和实施在随后几节中讨论。

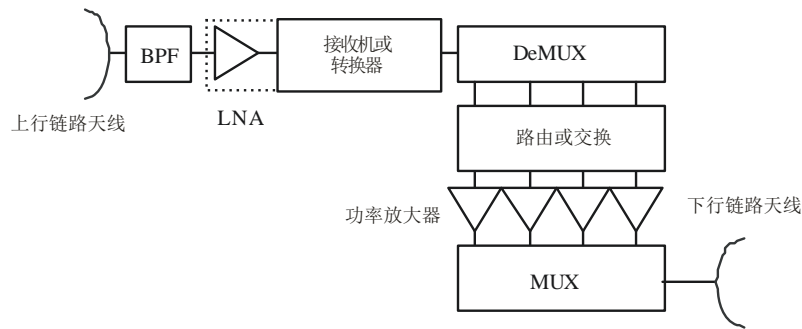
### 6.2.1 模拟弯管结构

在用的最普遍负载结构是模拟弯管结构。在这种结构中，多个弯管转发器简单地将一个上行链路频段中的一个或多个信号转换到一个下行频段，并在此下行链路频段重新广播这个汇聚信号。这种结构类型对时间传递是最有用的，因为信号路径是相对直截了当的。采用这一结构的商业卫星倾向于采用分别的自由运行本地振荡器（LO）来转换频段。采用这一结构的政府卫星经常使用一致以卫星上单独一个主用振荡器（MO）为源的LO。在某些情况下，卫星MO相位锁定到位于卫星控制站的一个地面参考上。用来执行这个频率变换的LO的相位误差特性对时间传递应用是一个重要限制。

图6-1显示了一个典型弯管结构的方框图[ITU-R手册, 2002年; Ha, 1990年]。在示意图中，一个上行链路天线后面接着一个宽带滤波器（BPF）和低噪声放大器（LNA），以确定上行链路天线增益与噪声温度之比（G/T），它是上行链路卫星的主要品质因数。接收信号然后被一个接收机或转换器（它有时包括LNA）放大并转换到下行链路频段。

图6-1

典型弯管中继器结构

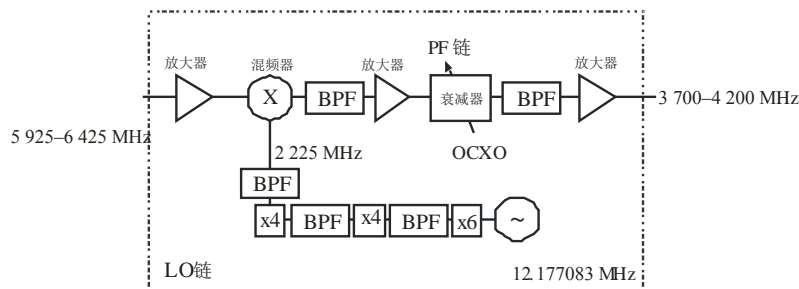


Sat\_time\_freq-06-01

如前所述，商用转换器或接收机倾向于将分别的自由运行晶体控制振荡器用于进行转换频率的LO，而政府转换器倾向于采用与单一MO相位相一致的合成LO。图6-2显示了一个典型的商用接收机[Ha, 1990年]。请注意LO倍频器链，它以一个自由运行的恒温箱控制晶体振荡器为源。

图6-2

典型商用C频段接收机



Sat\_time\_freq-06-07

在图5-1中，一个解复用器（DEMUX）跟在转换器之后，它将完整的上行链路频段分解成分别的频段或信道。在一些负载中，解复用是在采用合成LO的转换器中完成的，以使各个信道频率转换是可选的。之后，各个信道被输送到输出功率放大器，有时使用一个开关来选择输送路径。随后，来自各个功率放大器的信号在一个输出复用器（MUX）中组合起来，用于通过下行链路天线进行重新广播。

在大多数弯管负载中，不因为它们的运行而要求精确时间，且频率准确性和稳定性限于满足频段分配的要求。当TDMA交换是通过地面或地球站进行时，这也同样适用[ITU-R手册, 2002年]。只有卫星交换的TDMA（SS-TDMA）是例外，其中，DEMUX和MUX之间的交换被用来帮助TDMA的运行。在这种情况下，对于交换的测时要求可以在亚微秒级[Ha, 1990年]。

在用于卫星到卫星测距及通信信号的负载中，对频率的准确性和稳定性有一个更高的要求。这些负载经常采用锁定到一个主用振荡器的合成LO。

### 6.2.2 再生结构

再生负载结构对上行链路信号进行解调制来产生基带数据，并将这个数据重新调制到下行链路载频上。因为在上行链路和下行链路之间没有直接路径，通过这些负载的时间传递必须考虑通过卫星数字处理系统的数据延迟。

### 6.2.3 数字实施

一些新的卫星系统采用数字处理，即使它们是弯管类型。通过这些系统的时间传递也必须考虑数字延迟。很难概括这些负载的时间传递特性，而且这些负载的详细属性经常是专有的。读者请咨询特定的负载制造商。

### 6.2.4 跟踪、遥测和指令系统

一颗卫星中的遥测、跟踪、和指令 (TT & C) 系统是公交车管理系统的一部分，运行的细节通常是专有的。该系统采用时间编码，但这个能力通常限于诊断时间标记目的所要求的准确度，除非是采用卫星交换的TDMA，或者有其他要求，例如导航。跟踪系统被设计用于确定卫星的位置和方位。它包括确定方位的角度跟踪系统以及确定位置的测距系统。测距系统能被用于时间传递目的。测距系统采用相干侧音或伪随机码调制，以类似于在GPS系统中使用的方式（单向测距）测量从地面站到卫星的单向或往返时延。测距数据被以足以进行轨道计算的准确性加上时间标记，并因而准确得足以用于精确时间传递目。

## 6.3 卫星运行的测时和同步

在商用通信卫星中的测时和同步通常是一个简单的问题。通常是人工引导主用振荡器来保持它们在一个频率容限之内或允许在任务的生命期自由运行。用在商用卫星中的独立转发器LO不是频率受控的，但被设计得在卫星寿命期内满足频段分配目的所要求的准确度。如果有必要，测时系统通常通过地面指令进行人工更新。政府卫星因为导航和其他要求可以采用更加复杂的测时系统。政府主用振荡器有时锁定于地面参考，而有时是自由运行的，采用频率更新来引导。

## 6.4 弯管负载中链路噪声和卫星缺陷的影响

通过一个弯管负载的链路噪声和缺陷影响执行卫星时间传递的能力。对噪声和缺陷的贡献者是白噪声、和相位噪声、及系统性相位变化。

### 6.4.1 白噪声贡献

白噪声对卫星时间传递误差贡献的一个通用表达式可以从基本的卫星链路噪声等式和时间误差等式推导如下。如果一个角频率 $\omega$ （度/秒）信号被用于时间传递，时间传递的时钟读取误差 $x$ （秒）能够通过以下众所周知的等式与信号的相位误差 $\phi$ （度）相关联：

$$x = \phi / \omega \quad (6-1)$$

这个时间传递信号既可以是载频信号自己，也可以是存在于载波上的各种调制分量。对白噪声， $\phi$ 的标准方差（对单独一个相位测量）由下式给出：

$$\sigma_{\phi}^2 = P_{noise} / P_{signal} \quad (6-2)$$

此处:

$P_{signal}$ : 接收信号功率

$P_{noise}$ : 接收噪声功率。

所以, 从等式 (6-1) 和 (6-2),  $x$  的标准方差 (对单独一个测量) 变为:

$$\sigma_{x-std}^2 = P_{noise} / (P_{signal} \omega^2) \quad (6-3)$$

采用妥善建立的链路和白噪声等式[ITU-R手册, 2002年], 可以推导出以下以基本链路参数表示的接收信号与白噪声之比的表达式 (对卫星上行链路和或下行链路):

$$P_{noise} / P_{signal} = kB(2r\omega_{car} / (c\omega))^2 / P_{eirp}(G/T) \quad (6-4)$$

此处:

$P_{eirp}$ : 发射有效电离层辐射功率

$G/T$ : 接收增益与温度之比

$B$ : 链路的限制 (最小) 带宽

$\omega_{car}$ : 链路的载波角频率

$k$ : 玻尔兹曼常数,  $r$  是范围,  $c$  是光速。

所以对每种链路:

$$\sigma_{x-std}^2 = kB(2r\omega_{car} / (c\omega))^2 / P_{eirp}(G/T) \quad (6-5)$$

因为来自上行链路和下行链路的白噪声贡献是统计独立的, 上行链路和下行链路的组合方差由下式给出:

$$\sigma_{x-std-tot}^2 = 4kB(\omega_{car} / (c\omega))^2 [r_{uplink}^2 / P_{eirp-ground}(G/T)_{satellite} + r_{downlink}^2 / (P_{eirp-satellite}(G/T)_{ground})] \quad (6-6)$$

此处:

$B$ : 完整链路的限制带宽。

等式 (6-6) 表示了单个相位测量的时钟读取误差。可以通过差分二个时钟读数测量并除以 $\tau$ 来得出在平均时间 $\tau$ 上的一个微小频率估值。所以, 对这个平均时间 $\tau$ 的微小频率估值标准方差或艾伦方差 (对白噪声相同) 由下式给出:

$$\sigma_y^2 = 8kB(\omega_{car} / (c\omega))^2 [r_{uplink}^2 / P_{eirp-ground}(G/T)_{satellite} + r_{downlink}^2 / (P_{eirp-satellite}(G/T)_{ground})] \quad (6-7)$$

时间 $\tau$ 上时钟读数误差二阶差分的方差:

$$\sigma_X^2 = \tau^2 \sigma_y^2 \quad (6-8)$$

并因此由下式给出:

$$\sigma_x^2 = 8kB(\omega_{car} / (c\omega))^2 [r_{uplink}^2 / P_{eirp-ground}(G/T)_{satellite} + r_{downlink}^2 / (P_{eirp-satellite}(G/T)_{ground})] \quad (6-9)$$

因为没有通过双向系统消除白噪声，等式（6-7）和（6-9）同时适用于单向和双向（对每个传递）卫星时间传递。因此，以上等式表现出对一个卫星链路是所能做到的最好的一个。还应注意，采用载频的时间传递具有低于采用调制的时间抖动，因为调制频率总是低于 $\omega_{car}$ 。

## 6.5 卫星相位噪声和系统误差

相位噪声是频率转换器中的LO添加到通信信号上的。LO的相位噪声和频率漂移直接影响转发器信号载频和调制相位的不稳定性。在采用晶体振荡器的商用转发器中的近同相噪声和漂移通常较高。系统中滤波器和有源器件的群时延和相位时延及时延变化影响调制和载频相位，尽管这些不稳定性是有限制的。这些不稳定的主要来源是整个信道链路上随着温度、公交车电压、及功率电平的变化。对特定数值，必须联系卫星业务提供商。

在通过相同转发器的双向时间传递中，LO漂移和时延变化被高度抵消。对采用二个不同频率的同时双向时间传递，主要问题是由于频率色散造成跨信道频带的时延变化。对顺序双向时间传递，主要问题是在传递之间的时间上LO中相位的变化。

## 6.6 结论

为了将卫星通信系统适当地用于时间传递，重要的是要理解正在使用系统的结构、运行和限制。已经通过开发方法来利用各个系统长处、降低系统弱项影响而成功地实现了通过各种卫星通信系统的时间传递。

## 参考文献

HA, T. T. [1990] Digital Satellite Communications. McGraw-Hill, 1990.

ITU-R [2002]卫星通信手册，第三版，国际电信联盟，Wiley & Sons, Inc.

MORGAN, W. L. and GORDON, G. D. [1989] Communications Satellite Handbook. Wiley & Sons, Inc.



## 第7章

### 时间标度

页码

7.1	引言 .....	74
7.2	世界时 .....	74
7.3	星历时 .....	74
7.4	原子时 .....	75
7.5	相对论时间标度 .....	75
7.5.1	地球时 .....	76
7.5.2	地心坐标时 .....	76
7.5.3	质心坐标时 .....	76
7.5.4	质心力学时 .....	78
7.6	国际时间标度 .....	79
7.6.1	国际原子时 .....	79
7.6.2	协调世界时 .....	82
	参考文献 .....	86

## 7.1 引言

已经采用了三种主要的测量时间方法。它们是：

1. 基于地球自转的时间；
2. 基于地球、和月球及行星天体运动的时间；
3. 基于原子量子力学的时间。

随着测量方法精度和复杂性的演进，这些方法的每一种都有了各种改善。

在ITU-R TF.686-2建议书《时间和频率术语的词汇表和定义》中提供了时间标度的定义和相关术语。

## 7.2 世界时

根据地球旋转测量的时间被称为平太阳时。当从格林尼治子午线的午夜计算时，它被称为世界时（UT）。平太阳日名义上被定义为假想平太阳相继通过一条指定子午线之间的间隔。平太阳秒被定义为一个平太阳日的1/86400。

对地球相对于天空参考系旋转角度的真实测量是被称为UT1的UT形式。实际当中，UT1不是根据太阳的位置，而是按照一个以格林尼治平恒星时（GMST）来规定UT1的传统关系根据天体球上春分点的周日运动来确定的。在过去，UT1是从恒星穿越测量出来的。今天，它是通过选定的紧凑无线电点源的甚长基线干涉仪（VLBI）测量、卫星激光测距（SLR）、和GPS卫星跟踪来测量的。

以GMST表示的UT1定义表达式是[Aoki *et al.*, 1982年]：

$$\text{GMST} = 24110.^{\circ}548\ 41 + 8640184.^{\circ}812\ 866\ T + 0.^{\circ}093\ 104\ T^2 - 0.^{\circ}000\ 0062\ T^3 \quad (7-1)$$

此处：

$T$ ：按照36525天儒略世纪测量的自从UT时间2000年1月1日12点起流逝的世界时。

国际天文学联合会（IAU）所采纳的基于采用VLBI观测的银河系外物体位置的传统天体参考系统[General Assembly, 1997年]已经改变了UT1的基础并去除了对春分点的需求。

由于地球旋转中的不规则，UT1不是均匀的。有三个变化来源：由于潮汐摩擦所引起的一天长度的稳定增加、一个周期性的季节变化、和随机波动。UT2是对季节变化进行修正了的UT1，并且按秒由下式定义[Seidelmann, 1992年]：

$$\text{UT2} = \text{UT1} + 0.^{\circ}022 \sin 2\pi t - 0.^{\circ}012 \cos 2\pi t - 0.^{\circ}006 \sin 4\pi t + 0.^{\circ}007 \cos 4\pi t \quad (7-2)$$

此处：

$t$ ：贝塞尔年的部分。

但是，UT2在实际中不再使用。

## 7.3 星历时

星历时（ET）是由地球环绕太阳运动的牛顿万有引力理论所定义的一个均匀时间标度，如纽康的太阳表所表示。按照纽康，历元1900年的太阳几何平均经度由下式给出[NewComb, 1895年]：

$$L = 279^{\circ}41'48.^{\circ}04 + 129\ 602\ 768.^{\circ}13\ T + 1.^{\circ}089\ T^2 \quad (7-3)$$

此处：

$T$ ：从1900年按世纪测量的星历时。

这个表达式的线性系数定义了星历秒。因此，1900年的回归年包含  $[360 \times 60 \times 60 / 129\,602\,768.13] \times 36\,525 \times 86\,400 = 31\,556\,925.9747$  秒。

在1956年，国际计量委员会（CIPM）定义ET的秒为在ET时间1900 1月0日12时回归年的  $1/31\,556\,925.9747$ 。

这个定义于1960年被国际计量大会（CGPM）批准。

参照1900年并不意味着它是86 400秒的一个平太阳日的历元。相反，它是31 556 925.9747秒的一个回归年的历元。

尽管ET是按照太阳位置定义的，但它是通过对月亮的间接观测来实现的。ET可以被定位为使由牛顿运动动力学定律所构想的天体位置与观测相一致的独立变量。因此它仅仅基于牛顿力学，它假设一个世界协调时，且没有对相对论进行规定。

ET在1960年代替UT1用于天文星历。

## 7.4 原子时

第一个铯射束原子标准于1955年在英国国家物理实验室投入运行。原子时间标度由美国海军天文台和国家标准局于1956年在美国建立，很快有很多其他天文台和实验室跟进。在1960年星历秒被采纳之后仅仅7年，CGPM采用原子秒作为国际单位制（SI）中时间的基本单位。该秒被定义为“对应于铯-133原子地面状态二个超精细能级之间跃迁的9 192 631 770个辐射周期的持续时间”。此数值是通过将基于对月亮观察的ET与原子时间标度进行比较来确定的。

原子时已经成为所有现代时间标度的基础并自1955年起被持续维持在各个实验室中，尽管直到1971年才被正式采纳作为一个国际时间标度。自从国际时间局（BIH）于1920年在巴黎天文台（OP）建立起，国际时间标度完全基于天文观测。时间单位是秒，它同样基于天文观测。1950年代铯原子标准的出现和运行以及像LORAN这样使能够对这些标准进行准确国际比较的广播系统导致初步形成了一个原子时（AT）。

形成国际原子时（TAI）是分别由国际天文学联合会（IAU）于1967年、国际无线电科学联盟（URSI）于1969年和ITU的国际无线电咨询委员会（CCIR）于1970年建议的。第14届国际计量大会（CGPM）于1971年批准建立TAI作为坐标时间标度，其单位间隔是在旋转的大地水准面上实现的国际单位制（SI）秒。

在§ 7.6.1中提供了更多关于国际原子时（TAI）实施的详细信息。

## 7.5 相对论时间标度

星历时（ET）是由牛顿的运动力学定律所定义的一个时间标度。但是，它与相对于地表、地心或太阳系中心定义的力学时间标度没有区别。因此，对历史上从ET得出的相对论时间标度需要更加精确的定义。这些另外的时间标度是用于天文学和天体力学中的相对论星历表的自变量。在第9章中提供了关于卫星时间和频率传递和播发中相对论影响的讨论。

在1976年，IAU批准了相对论星历表的时间标度，这样它们仅仅从周期意义上不同于TAI[Muller *et al.* 1977年]。这些时间标度在1979年被命名为地球力学时（TDT）和质心力学时（TDB）。TDT于

1991年被简单地重新命名为地球时 (TT)。此外, IAU批准了所有都以SI秒作为单位的新时间标度。地心坐标时 (TCG) 和质心坐标时 (TCB) 是用于坐标系统的时间标度, 它们分别以地球的中心和太阳系的质心作为它们的原点[Bergeron, 1992年]。这些时间标度由IAU于2000年所批准的决议进一步澄清。

### 7.5.1 地球时

地球时 (TT) 是由大地水准面上本征时钟读数表示的时间坐标。实际当中, TT是根据国际原子时 (TAI) 来实现的, 其单位是国际单位制 (SI) 的秒。TT能被视为等效于TDT, 它的起点在TAI时间1977年1月1日0时, 且与星历时 (ET) 保持连续。TDT在1984年代替ET作为基本地心星历的表格自变量。

因为TT是一个理论上均匀的时间标度, 而TAI是一个统计推算出来的原子时间标度, TT和TAI从严格意义上不是相等的。但是, 在一个大约 $\pm 10 \mu\text{s}$ 的容限范围之内, 它们的差值是恒定的。TT的一个实际实现是:

$$\text{TT} = \text{TAI} + 32.184 \text{ s} \quad (7-4)$$

常数偏差是在1958年1月1日TAI定义历元时ET和UT1之间差值的一个估算值。TT可以被视为是TAI的理想形式。

### 7.5.2 地心坐标时

地心坐标时 (TCG) 是相对于地心的星历坐标时间标度, 其单位是SI秒。在地心TCG的坐标时间 $\Delta t$  通过下式与水准面上本征时间 $\Delta\tau$  (TT) 相关联:

$$\Delta t = (1 + W_0 / c^2) \Delta\tau.$$

所以, TCG与TT相差比例因子:

$$\text{TCG} - \text{TT} = L_G \Delta T \quad (7-5)$$

此处:

$$L_G = W_0 / c^2 = 6.969\,290\,134 \times 10^{-10} \text{ (大约 } 60.2 \mu\text{s/d)}$$

$$\Delta T: \text{ 自从TAI时间1977年1月1日0时流逝的时间 (JD 244 3144.5)}$$

在2000年, IAU重新定义了TT, 这样使得它与TCG相差恒定比例 $d\text{TT} / d\text{TCG} = 1 - L_G$ 。  $L_G$  的数值是2000年 ( $W_0 / c^2$ ) 的最佳估算值, 但是它现在被认为是一个将来不再修改的规定常数[Rickmand, 2001年]。

### 7.5.3 质心坐标时

质心坐标时 (TCB) 是相对于太阳系中心的星历坐标时间标度, 其单位是SI秒。对应于由大地水准面上一个时钟所保持的本征时间 $\Delta\tau$ 的一个质心坐标系统中的坐标时间  $\Delta t_B$ 是:

$$\Delta t_B = \int_{\tau_0}^{\tau} \left( 1 + \frac{1}{c^2} U(\mathbf{r}) + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v^2 \right) d\tau \quad (7-6)$$

此处:

$\mathbf{r}$  和  $\mathbf{v}$ : 时钟的质心位置和速度

$U(\mathbf{r})$  : 在大地水准面上估算的太阳系中（包括地球）所有天体的引力势能。

坐标时间  $t_B$  以TCB 确定，而本征时间  $\tau$  以TT确定。

积分值取决于在质心坐标系中该时钟的位置和速度。因此，可以期望将时钟相关部分与时钟无关部分相分开。

在这个近似中，可以将  $\mathbf{r}$  和  $\mathbf{v}$  表示为：

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_E + \mathbf{R} \quad \text{和} \quad \mathbf{v} = \mathbf{v}_E + \dot{\mathbf{R}}$$

此处：

$\mathbf{r}_E$  和  $\mathbf{v}_E$  : 地球质心的质心位置和速度

$\mathbf{R}$  和  $\dot{\mathbf{R}} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R}$  : 时钟的地心位置和速度。

总的势能为：

$$U(\mathbf{r}) = U_E(\mathbf{r}) + U_{ext}(\mathbf{r})$$

此处：

$U_E$  : 地球的牛顿势能

$U_{ext}$  : 除地球之外的所有太阳系天体的外部牛顿势能。

同样， $U_{ext}(\mathbf{r}) \approx U_{ext}(\mathbf{r}_E) + \nabla U_{ext} \cdot \mathbf{R}$  和  $\mathbf{v}_E \cdot \dot{\mathbf{R}} = (d/dt_B)(\mathbf{v}_E \cdot \mathbf{R}) - \mathbf{a}_E \cdot \mathbf{R}$

此处：

$\mathbf{a}_E = \nabla U_{ext}$  是地球的加速度。

所以[Thomas, 1975年; Moyer 1971年和1981年]：

$$\Delta t_B \approx \Delta \tau + \frac{1}{c^2} \int_{t_{B_0}}^{t_B} \left( U_{ext}(\mathbf{r}_E) + \frac{1}{2} v_E^2 \right) dt_B + \frac{1}{c^2} W_0 \Delta \tau + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_E \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_E) \quad (7-7)$$

此处：

- 第一项是在大地水准面上的一个时钟所测量的本征时间。
- 第二项是由于在地心处相对于质心的红移和时间膨胀组合效应所引起的，且与时钟无关。
- 第三项是在地心处的时钟与在大地水准面处时钟的时间差。
- 第四项取决于时钟的位置。

在平坦时空的限制中，当从质心系观测时，它对应于移动地心系中狭义相对论时钟同步修正值。对于在大地水准面上的一个时钟，它以一个2.1  $\mu\text{s}$ 的幅度按周日变化。去除二个加速度项对于一个自由落体参考系是等效性原理的表现形式。

此积分值可以通过行星星历和月球星历的数值积分来计算，或者可以以一个解析公式来表示。它表示为一个长期项  $L_C \Delta T$  和剩余的周期项  $P$  之和。

所以，TCB和TT之间的关系是（ITU-R TF.686-2建议书）：

$$\begin{aligned} \text{TCB} - \text{TT} &= \frac{1}{c^2} \int_{t_{B_0}}^{t_B} \left( U_{ext}(\mathbf{r}_E) + \frac{1}{2} v_E^2 \right) dt_B + L_G \Delta T + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_E \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_E) \\ &= L_C \Delta T + P + L_G \Delta T + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_E \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_E) \end{aligned} \quad (7-8)$$

TCB和TCG之间的关系是:

$$\text{TCB} - \text{TCG} = (\text{TCB} - \text{TT}) - (\text{TCG} - \text{TT})$$

所以:

$$\text{TCB} - \text{TCG} = \frac{1}{c^2} \int_{t_{B_0}}^{t_B} \left( U_{ext}(\mathbf{r}_E) + \frac{1}{2} v_E^2 \right) dt_B + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_E \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_E) = L_C \Delta T + P + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_E \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_E) \quad (7-9)$$

此处:

$$L_C = 1.480\,826\,867\,41 \times 10^{-8} \text{ (大约1.28 ms/d) [Irwin 和 Fukushima, 1999年].}$$

为了达到一个100 ns的准确度, 必须要包括超过100个周期项[Fairhead *et al.*, 1998年]。在一阶近似中:

$$\frac{1}{c^2} \int_{t_{B_0}}^{t_B} \left( U_{ext}(\mathbf{r}_E) + \frac{1}{2} v_E^2 \right) dt_B \approx \frac{3}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM_S}{a_E} \Delta T + \frac{2}{c^2} \sqrt{GM_S a_E} e \sin E \quad (7-10)$$

此处:

$GM_S$ : 太阳的万有引力常数

$a_E$  和  $e$ : 地球的轨道半长轴和偏心率。

第一项是对  $L_C \Delta T$  的近似。第二项是主周期项  $P$ , 其幅度是1.7 ms。

#### 7.5.4 质心力学时

质心力学时 (TDB) 也是一个质心坐标时。但是, 按照1976年IAU决议, TDB和TT (后来被称为TDT) 之间的差必须仅仅包括周期项。因此坐标时的速率被修改比例为:

$$\Delta t'_B = (1 - L_B) \Delta t_B$$

此处:

$\Delta t'_B$ : 用TDB确定

$\Delta t_B$ : 用TCB确定。

TCB和TDT之间的差是:

$$\text{TCB} - \text{TDB} = L_B \Delta T \quad (7-11)$$

TDB和TT之间的关系是  $\text{TDB} - \text{TT} = (\text{TCB} - \text{TT}) - (\text{TCB} - \text{TDB})$ 。所以:

$$\begin{aligned} \text{TDB} - \text{TT} &= \frac{1}{c^2} \int_{t_{B_0}}^{t_B} \left( U_{ext}(\mathbf{r}_E) + \frac{1}{2} v_E^2 \right) dt_B + L_G \Delta T + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_E \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_E) - L_B \Delta T \\ &= L_C \Delta T + P + L_G \Delta T + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_E \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_E) - L_B \Delta T \end{aligned} \quad (7-12)$$

如果  $L_B \approx L_C + L_G$ ，则它不包含长期项。相对论星历的另一个时间标度被称为  $T_{eph}$ ，由JPL使用 [Standish, 1998年] 且接近TDB。如果该积分值是按照  $T_{eph}$  作为一个自变量来表达的恒星星历来计算，它应除以因子  $1 - L_B$ 。

TDB与TCB的比值是：

$$\left\langle \frac{d\text{TDB}}{d\text{TCB}} \right\rangle = \left\langle \frac{d\text{TDB}}{d\text{TT}} \right\rangle \frac{d\text{TT}}{d\text{TCG}} \left\langle \frac{d\text{TCG}}{d\text{TCB}} \right\rangle \quad (7-13)$$

此处：

- <> 表示在地心处取的长期平均；
- $L_B$  的值是采用以下关系得到的；
- $1 - L_B = (1 - L_G) (1 - L_C)$
- 因为  $\langle d\text{TDB}/d\text{TCB} \rangle = 1 - L_B$
- $d\text{TT}/d\text{TCG} = 1 - L_G$
- $\langle d\text{TCG}/d\text{TCB} \rangle = 1 - L_C$
- $\langle d\text{TDB}/d\text{TT} \rangle = 1$ 。

所以： $L_B = 1.550\ 519\ 767\ 72 \times 10^{-8}$ （大约1.34 ms/d）。

因子  $1 - L_B$  将按照TDB表达的星历中时间和距离的星历单位与相应的SI单位相关联。

## 7.6 国际时间标度

国际通信和计算机网络，特别是全球电子导航系统的发展要求高精度、同步的国际时间标度。其结果是相关的国际机构制定并批准了以下主要国际时间标度：

- 国际原子时（TAI）；
- 协调世界时（UTC）。

### 7.6.1 国际原子时

国际原子时（TAI）的历元是1958年1月1日。TAI被定义为BIPM根据保持在接近60个实验室中的大约400个原子钟读数所建立的原子时间标度。它被进一步规定为[BIPM, 1981年]在地心参考系中定义的一个坐标时间标度，以在旋转大地水准面上实现的SI秒作为度量单位。TAI是由BIH维持的一个原子时的延续，它自1955年起持续存在。

TAI的建立是分别由国际天文学联合会（IAU）于1967年、国际无线电科学联盟（URSI）于1969年和ITU的国际无线电咨询委员会（CCIR）于1970年建议的。第14届国际计量大会（CGPM）在1971年批准了TAI的建立。

TAI是从参与实验室提供给BIPM的时钟比较数据和一个被称为ALGOS的特殊算法建立起来的实际时间标度。TAI已经被进一步定义为地心参考系中的一个坐标时间标度，采用SI秒作为在旋转大地水准面上实现的度量单位。TAI作为一个坐标时间标度是由秒定义咨询委员会（CCDS）在1980年确定的。CCDS在1997年被重新命名为时间和频率咨询委员会（CCTF）。CCDS还为根据相对论建立TAI和为其在非地球参考系中的应用提供了必要的修正信息。TAI的准确度是长期维持SI秒和提供可靠尺度的一个主要考虑。长期稳定性的优化是以短期可获取性为代价来实现的。TAI的计算采用一个延长时期上的数据。时钟数据被在以4和9结尾的修正儒略日提供给BIPM。

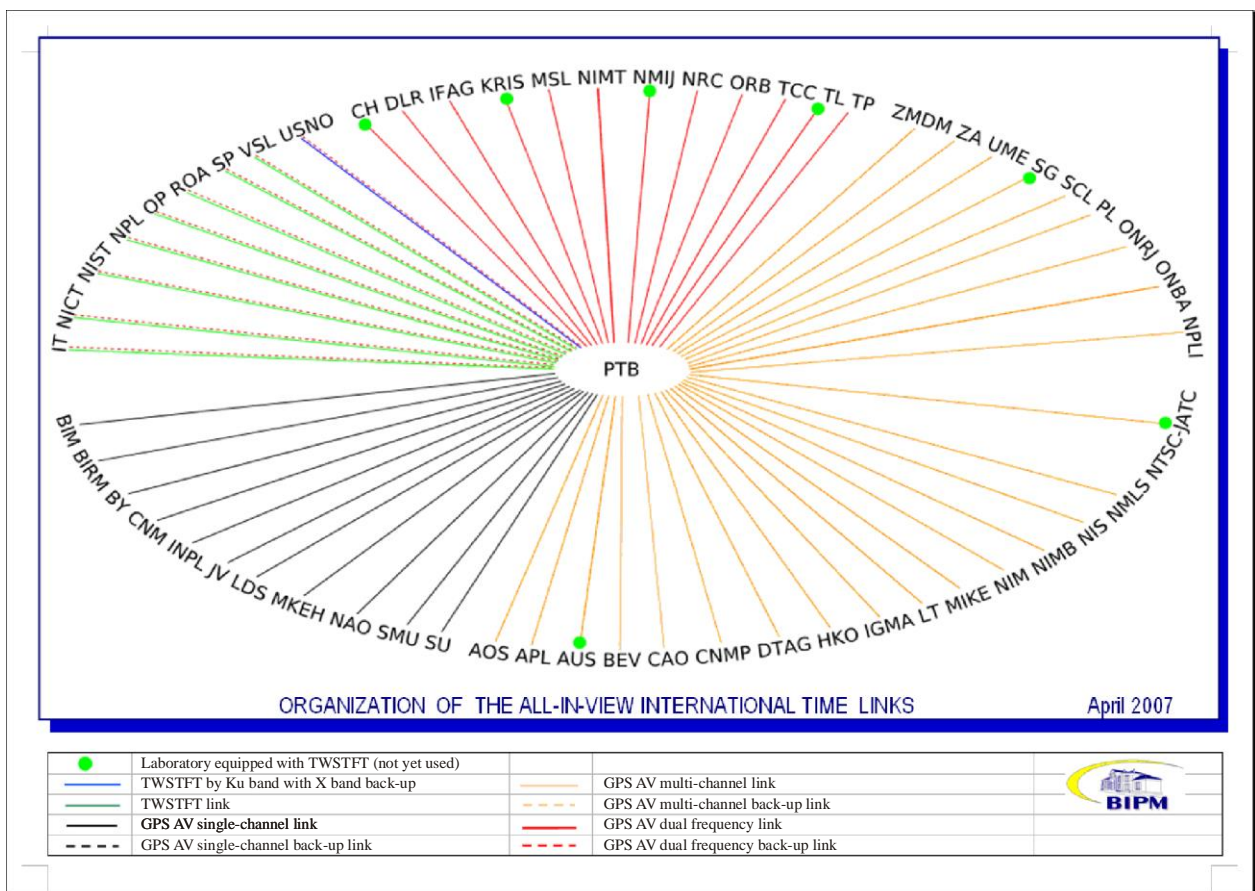
二种时间传递技术正用于时钟比较：

- a) 通过 GPS 卫星跟踪对本地 UTC 与 GPS 时间进行比较，或
- b) 通过 TWSTFT 对二个本地 UTC 进行比较 (§ 7.6.2)。

时钟比较的链路是由BIPM按照图7-1中所给出的机制组织起来的。覆盖30天的数据块被用在时间标度的计算中。选定了一个30天的时间段来在铯钟的本底闪烁和随机漫步频率调制之间的过渡处置入时间标度的有效积分时间。稳定性因此将不会因为一个更长的积分时间而有所改善。30天的时间段足够消除时间链路和时钟的白频率调制所贡献的噪声。

图7-1

参与中心之间的国际时间链路





确定TAI分三个步骤完成:

步骤 1: 采用一个后处理进行计算, 它是采用时钟比较数据和ALGOS对被称为echelle atomique libre (法语) (EAL) 或自由原子尺度的中间尺度的迭代程序。

步骤 2: 采用来自主频率标准的数据和一个最佳滤波器对 EAL 尺度单位持续时间进行评估。

步骤 3: 从 EAL 产生 TAI, 如果有必要, 对 EAL 尺度间隔应用一个修正值来给出一个尽可能接近 SI 秒的数值。对尺度单位进行修正被称为“频率引导”, 并且如果被认为必要, 每个月通过应用一个可变修正值来进行, 月到月的最大步长为  $7 \times 10^{-16}$  或更低。

在下面简要描述了如何建立TAI。更多细节请参考[Azoubib, *et al.*, 1977年]。

1. TAI的结构: EAL  $f(t)$  的时间  $t$  是以一组  $N$  个时钟  $H_i$  的读数  $h_i(t)$  来定义的, 公式为:

$$\text{EAL}(t) = \frac{\sum_{i=1}^N p_i [h_i(t) + h'_i(t)]}{\sum_{i=1}^N p_i} \quad (7-14)$$

此处:

$p_i$ : 指定给时钟  $H_i$  的统计权重:

$h'_i(t)$ : 时间修正值, 为在各个时钟的权重或时钟总数改变时保证尺度的时间和频率连续性而设定。

这个表达式不能被直接使用, 因为提供基础数据的测量值不是各个时钟的读数, 而是时钟对之间比较的结果。在时间  $t$ , 时钟  $H_i$  和  $H_j$  读数之间的缓慢变化差值  $\zeta_{ij}(t)$  被写为:

$$\zeta_{ij}(t) = h_i(t) - h_j(t) \quad (7-15)$$

EAL的输出则是一组  $N$  个由下式所定义的差值  $x_i(t)$ :

$$x_i(t) = \text{EAL}(t) - h_i(t) \quad (7-16)$$

此处:

$x_i$ : 各个时钟读数与EAL所确定时间之间的差值。

然后, 这个差值能够被表示为:

$$x_i(t) - x_j(t) = -\zeta_{ij}(t) \quad (7-17)$$

方程式 (7-14) 则能够被变换为:

$$\sum_{i=1}^N p_i x_i(t) = \sum_{i=1}^N p_i h'_i(t) \quad (7-18)$$

实际上, 一个  $N-1$  条时间链路的非冗余系统被用来解算最后的这二个表达式。

2. 加权步骤: 指定给每个时钟的权重是以有利于生成尺度的长期稳定性和使相对于基本频率标准的年波动和频率偏移最小的方式进行计算的。ALGOS的一个重要特性是, 尽管时钟权重的评估是基于覆盖一整年的数据, 但它考虑了EAL被计算的那30天的数据。因此有可能根据EAL被建立的时

间间隔中时钟的实际性能来评价它们。在必要时，也有可能将各别时钟的权重调整到零来顾及观察到的它们的异常表现。这已经被证明在很多情况下是有用的。

权重通常基于在一个月取样上所计算的相对于EAL的平均速率方差  $\sigma^2(6, \tau)$  [Thomas and Azoubib, 1996年]。选择这个方差，而不是通常的对方差，是因为它更多地减少了显示出频率漂移的时钟的权重。只要当前30天期间没有显示出异常表现，权重直接从下式得到：

$$p_i = \frac{1000}{\sigma_i^2(6, \tau)} \quad (7-19)$$

( $\sigma_i$  以ns/天表示)。在异常表现的情况下，指定一个零权重。一个2.5/N (N 是在计算的月份中参与时钟的数量) 的最大权重是固定的。选择最大权重以保证为了照顾最好的时钟而使尺度被极大地偏置，不让它们任何一个变得占优势[Thomas and Azoubib, 1996年]。

3. 速率预测：时间修正项  $h'_i(t)$  由二个分量组成：

$$h'_i(t) = a_i(t_0) + B_{ip}(t)(t - t_0) \quad (7-20)$$

此处：

$a_i(t_0)$  : 仅仅时钟Hi和EAL在时刻 $t_0$ 的时间差， $t_0$ 是30天时间段的开始时间  
 $B_{ip}(t)$  :  $t_0$ 到 $t$ 时间段中预测的Hi和EAL之间速率差值，此处时钟Hi的速率由下式定义：

$$\text{rate} = \frac{a_i(t_0 - t) - a_i(t_0)}{(t - t_0)} \quad (7-21)$$

对  $B_{ip}(t)$  的预测是通过根据以前数据的一阶线性预测得到的。这得到事实的证明，即，在30天时间段中，主导的时钟噪声是随机漫步类型的，因此对下一个时间段最可能的估值就是前一个时间段的值。

一旦已经建立了EAL最佳估值，到TAI的转换是通过确定EAL的速率是否充分地不同于最佳基本标准的速率并因此保证一个«引导»修正来完成的。从2005年到2008年，几乎每个月都应用每一个最大值为  $0.6 \times 10^{-15}$  的频率改变。

最后，这些计算的输出发表在月刊 *Circular T* 中，它被分发给参与的实验室。在图7-2中显示了来自一个期刊的摘录。每5天发布贡献实验室k的[UTC-UTC(k)]值，一起还有各自的不确定性，其值对计算的那一个月份保持恒定。

## 7.6.2 协调世界时

基于原子定义SI秒的世界时测量值被称为UTC。在1961年把对国际原子时间标度的协调委托给了BIH。在1988年，这个责任被从BIH转交给了BIPM。

开始，速率偏移和周期步进调整被应用到广播时间信号，以保持UTC距离UT2在0.1秒内。在1972年引入了UTC的当前格式，其中速率偏移被终止，且整数“跳秒”步进代替了那时使用的100 ms或200 ms步进，因为它们太频繁和太小[Nelson, 2001年]。UTC速率上等于TAI，但差一个整数的秒，这样使得它总是在UT1的0.9秒之内。

图7-2

BIPM Circular T的摘录

CIRCULAR T 208  
2005 MAY 12, 17h UTC

ISSN 1143-1393

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES  
ORGANISATION INTERGOUVERNEMENTALE DE LA CONVENTION DU METRE  
PAVILLON DE BRETEUIL F-92312 SEVRES CEDEX TEL. +33 1 45 07 70 70 FAX. +33 1 45 34 20 21 tai@bipm.org

1 - Coordinated Universal Time UTC and its local realizations UTC(k). Computed values of [UTC-UTC(k)].  
From 1999 January 1, 0h UTC, TAI-UTC = 32 s.

Date 2005	0h UTC	MAR 30	APR 4	APR 9	APR 14	APR 19	APR 24	APR 29	Uncertainty/ns		
MJD		53459	53464	53469	53474	53479	53484	53489	uA	uB	u
Laboratory k		[UTC-UTC(k)]/ns							(1)		
AOS (Borowiec)		8.2	12.1	17.1	22.7	19.0	16.0	16.8	1.6	5.2	5.4
APL (Laurel)		-18.6	-23.3	-13.6	-2.0	4.6	39.3	26.5	1.6	5.3	5.5
AUS (Sydney)		-541.1	-547.9	-556.5	-561.7	-574.0	-590.8	-608.2	3.2	6.4	7.2
BEV (Wien)		97.8	88.7	80.6	70.6	63.0	58.2	46.3	1.6	5.2	5.4
BIRM (Beijing)		-145.0	-170.1	-192.3	-217.0	-238.1	-260.8	-288.4	2.8	20.4	20.6
CAO (Cagliari)		-2890.4	-2883.7	-2871.8	-2865.4	-2845.1	-2819.2	-2794.1	1.6	7.2	7.4
CH (Bern)		-21.7	-24.4	-24.6	-21.4	-14.6	-9.4	-0.7	0.8	5.2	5.3
CNM (Queretaro)		36.7	44.2	47.2	52.2	52.6	59.5	78.3	5.0	20.3	20.9
CNMP (Panama)		-2514.2	-2543.1	-2584.6	-2629.9	-2655.4	-2690.8	-2721.4	4.0	7.2	8.2
CSIR (Pretoria)		-3393.0	-3468.5	-3548.2	-3628.6	-3718.2	-3800.9	-3891.4	3.0	20.1	20.3
DLR (Oberpfaffenhofen)		-40.4	-46.1	-44.7	-46.1	-62.1	-62.9	-71.4	0.8	5.2	5.3
DTAG (Darmstadt)		254.6	274.3	283.9	273.2	267.7	271.2	273.3	3.0	10.1	10.5
HKO (Hong Kong)		93.7	71.6	68.9	55.1	45.9	45.2	51.0	3.2	6.4	7.2
IEN (Torino)		-116.2	-116.2	-109.3	-104.5	-99.3	-98.1	-100.5	0.7	1.9	2.0
IFAG (Wetzell)		-348.7	-340.9	-340.6	-340.4	-332.8	-324.9	-314.8	0.8	5.2	5.3
IGMA (Buenos Aires)		351.7	353.5	346.2	354.1	361.3	366.9	367.4	5.0	19.9	20.5
INPL (Jerusalem)		-264.7	-311.1	-347.5	-387.4	-432.2	-478.0	-523.6	4.0	10.1	10.9
JATC (Lintong)		-10237.5	-10227.2	-10209.8	-10197.3	-10180.0	-10167.2	-10155.8	2.7	21.0	21.2
JV (Kjeller)		-6316.2	-6310.2	-6252.7	-6243.4	-6219.6	-6173.5	-6177.2	5.0	20.1	20.7
KRIS (Daejeon)		-3.8	-4.2	0.9	2.5	3.4	5.7	6.0	2.8	6.4	7.0

Sat\_time\_freq-07-02

因此，时间信号现在在同一个发射中提供SI秒的单位间隔和对UT1的一个近似。可以借助双步进或脉冲来将0.1秒整数倍的一个附加修正值DUT1置入一个广播时间信号，这样，当添加到UTC时，提供对UT1的一个更好近似。如在CGPM、ITU、和IAU等各个条约组织和科学联盟的决议及大多数国家法典中所确定的，UTC已经被认可为民用时间的基础。

现在按照铯跃迁周期定义的SI秒被选定在实验不确定性限值之内与星历秒一致。但是，对古代月食和现代望远镜观测记录的研究显示，天的长度一直缓慢地增加。在过去1000年中，它一直以大约每个世纪每天1.4毫秒的速度增加。因此，根据纽康的太阳表，事实上，星历秒等于18世纪和19世纪的平均平太阳秒。

根据长期趋势，平太阳秒大约在1820年等于SI秒[Stephenson, 1997年]。这个日期也是由纽康所分析的覆盖了从1750年到1892年时间段数据的近似平历元。自从1820年起，天的长度已经增加了大约2.5毫秒。因此，平太阳日当前大约是86 400.0025秒，它超过了正好86 400秒的民用日。经过一年，0.0025秒的差累积到大约完整的1秒，通过插入一个跳秒来对其进行补偿。但是，由于地球旋转中的随机波动，不能事先预测一个跳秒，且其发生的频率也是可变的。

ITU的CCIR (CCIR与IFRB合并，并命名为ITU-R) 制定了UTC，它在1972年建议建立UTC作为UT和TAI之间的折中时间标度。这个时间标度用于协调由各个测时中心和国家保持的本地时间，并提供与UT1相当接近的一致。由于电子导航系统的发展而需要协调，例如罗兰，它能在全球距离上

提供相当准确的计时测量。UTC的特殊定义是在ITU-R TF.460建议书 – 《标准频率和时间信号发射》中。自从采纳了UTC，随着电子导航和通信系统在全世界提供高准确度测时测量中成长起来，并反过来需要高准确度的协调时间（ITU-R TF.535-2 和ITU-R TF.767-2），UTC的使用已经在无线电和通信界内极大地增长。

UTC已经在多个科学联盟和协议组织的决议中被认可为国际时间参考，例如IAU、ITU、URSI、CGPM和像ISO这样的标准组织。CCIR在1978年批准了一个新版本的CCIR 486建议书（现在是ITU-R TF.486-2建议书 – 《使用UTC频率作为标准时间频率信号发射的参考频率》），且WARC-79决定UTC应被用来指定所有国际通信活动中的时间[最后文件，1980年]。

RR（2008版）定义UTC如下：

“**1.14** 协调世界时（UTC）：由ITU-R TF.460-6建议书规定的以秒（SI）为单位的时间标度。  
（WRC-03）

对于《无线电规则》中的大部分实际应用而言，协调世界时（UTC）相当于本初子午线（经度 $0^{\circ}$ ）上的平均太阳时（过去用格林尼治平时（GMT）表示）。”

今天通常认为卫星时间和频率应用的参考是UTC。

### 7.6.2.1 协调世界时的实现

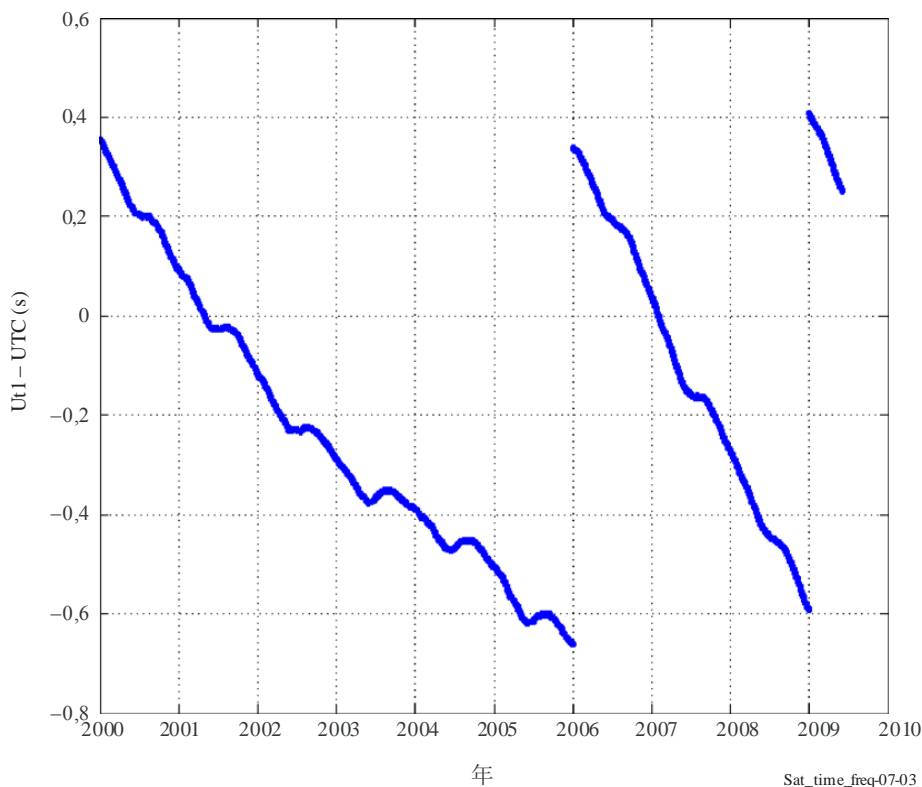
UTC是通过添加或减少1秒阶跃（被称为跳秒）进行调整的一个TAI版本。为了保持UTC与UT1的紧密关系，如图7-3中所显示，与UTC一起广播或传播一个被称为DUT1的调整值。DUT1是0.1秒整数倍形式的UT1 – UTC差的预测值。UT1的用户则能够以 $< 0.1$ 秒的准确度对UT1调整一个广播的UTC值。UT1是在地球不规则旋转之后对极移进行修正的一个世界时版本。在过去，UT1是由对季节变化进行修正过的恒星穿越时间确定。今天，UT1的确定依靠空间卫星技术，并提供对地球旋转速度的测量和建立地球朝向与一天UT1时间的关系。在刊物《跳秒：其历史与可能的未来》[Nelson *et al.*, 2001年]中讨论了这些时间标度的更多历史和发展。

因此，UTC是速率与TAI一致，但相差整数秒的一个原子时间标度。例如，2008年6月，UTC落后TAI 33秒。插入1个跳秒的决定是由地球旋转速度的变化所决定，以使它最多积累一个0.9秒的误差。国际地球旋转和参考系服务（IERS）监视地球的旋转和确定何时门限将要被超过，并向自从1988年TAI的责任从BIH转交过来后一直负责保持UTC的BIPM提出建议。在图7-3中描述了最近10年UTC相对于UT1的偏移。请注意分别在2005年和2008年插入的跳秒。

1972年以前尝试的UTC初始形式是要通过同时调整频率偏移和小数秒阶跃将原子时信号的广播与地球旋转相匹配来保持接近UT1。与地球旋转的紧密吻合被认为对于帮助天体导航是必要的，但是系统难于在广播站间进行协调和提供一个统一的准确参考时间。现在采纳了没有频率偏差的整数跳秒阶跃UTC系统，这样使得将由单独一个时间标度提供UT1历元的近似和SI秒的间隔。

图7-3

2000年到2009年期间的UT1 - UTC偏差

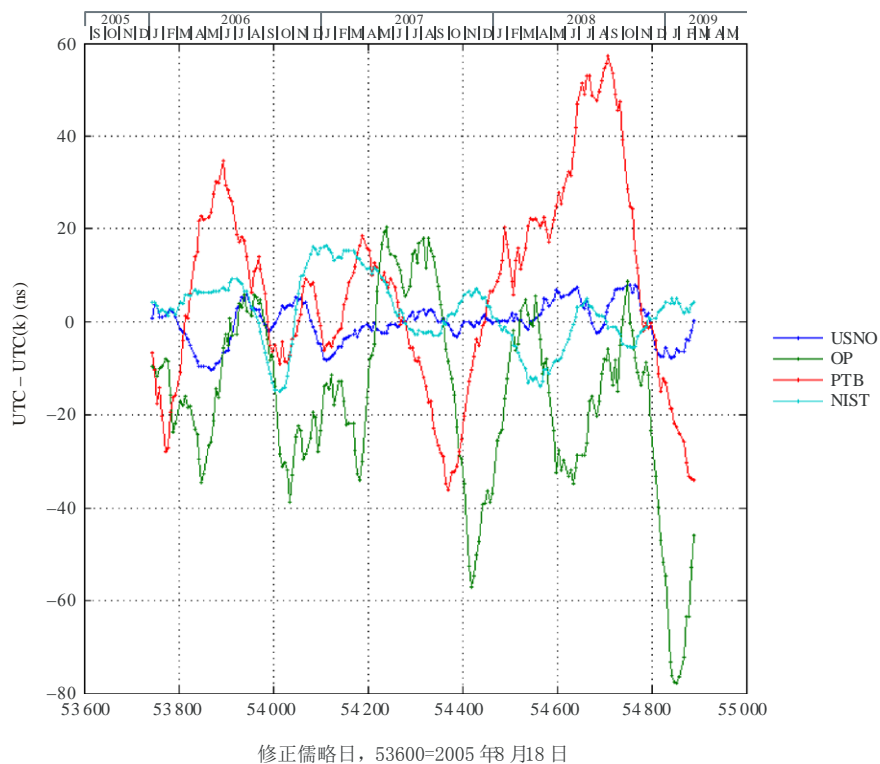


因为广播业务的需求要求根据同一个产生保持信号时间的时钟和振荡器来产生和传输信号，所以要求一个“实时”或即刻时间标度。为了提供这些“实时”信号，只要向BIPM报告时钟信号的测量并且在确定国际时间标度时予以考虑，一个授时中心可以产生一个UTC的本地表达。表示UTC(k)被用于在为BIPM形成TAI和UTC做贡献的一个实验室k中对UTC的本地近似。例如，UTC(USNO)是提交的对当前由美国海军天文台保持的UTC的实时预测。

其他授时中心的类似实时实现，例如巴黎天文台(OP)、联邦物理技术研究院(PTB)和美国国家标准与技术研究院(NIST)，对BIPM所使用的加权时钟测量数据有所贡献[Quinn, 1991年]。所用的UTC后面没有跟随限制括号标志着是参照由BIPM所确定的最终国际值。ITU-R TF.536-2建议书 - 《时间尺度标记法》中描述了这些程序和定义。UTC的最终计算值没有一个物理输出，但是在2到4周延迟后，可以得到相对于参与实验室所保持的表示值的偏移形式。TAI和UTC的值由名为Circular T的BIPM月刊来播发。在图7-4中显示了上述研究机构的UTC(k)值与在BIPM的Circular T中所报告UTC之间的差值。

图7-4

## 在BIPM Circular T中报告的 UTC - UTC (k) 差值 (日值)



Sat\_time\_freq-07-04

## 参考文献

- AOKI, S., GUINOT, B., KAPLAN, G. H., KINISHITA, H., MCCARTHY, D. D. and SEIDELMANN, P. K. [1982] The New Definition of Universal Time. *Astron. Astrophys.* 105, p. 359-361.
- AZOUBIB, J. [2001] A revised way of fixing an upper limit to clock weights in TAI computation. *Report to the 15th meeting of the CCTF*, available on request to the BIPM.
- AZOUBIB, J., GRANVEAUD, M., GUINOT, B. [1977] Estimation of the scale unit duration of time scales. *Metrologia*, Vol. 13, p. 87-93.
- BERGERON, J. (editor) [1992], *Trans. Int. Astron. Union, Vol. XXIB, Proc. 21st General Assembly, Buenos Aires, 1991*, Reidel, Dordrecht, p. 41-52.
- BIPM *Com. Cons. Déf. Seconde* **9**, 15 (1980), *Metrologia* **17**, 70, 1981.
- FAIRHEAD, L., BRETAGNON, P. and LESTRADE, J.-F. [1998] The Time Transformation TB – TT: An Analytical Formula and Related Problem of Convention, in *The Earth's Rotation and Reference Frames for Geodesy and Geophysics*, edited by A. K. Babcock and G. A. Wilkins, Kluwer, Dordrecht, p. 419-426.
- FUKUSHIMA, T. [1995] Time Ephemeris. *Astron. Astrophys.* **294**, p. 895-906.
- IRWIN, A. W. AND FUKUSHIMA, T. [1999] A Numerical Time Ephemeris of the Earth. *Astron. Astrophys.* **348**, p. 642-652.

- MOYER, T. D. [1971/1981] Transformation from Proper Time on Earth to Coordinate Time in Solar System Barycentric Space-Time Frame of Reference. *Celestial Mech.* **23**, p. 33-68.
- MULLER, E. A. and JAPPEL, A. (editors) [1977], Trans. Int. Astron. Union, Vol. XVIB, Proc. 16th General Assembly, Grenoble, 1976, Reidel, Dordrecht, p. 60.
- NELSON, R. A., MCCARTHY, D. D., MALYS, S., LEVINE, J., GUINOT, B., FLIEGEL, H. F., BEARD, R. L. and BARTHOLOMEW, T. R. [2001] The Leap Second: Its History and Possible Future. *Metrologia* **38**, p. 509-529.
- NEWCOMB, S. [1895] Astronomical Papers Prepared for the Use of the American Ephemeris and Nautical Almanac. Vol. VI, Part I: *Tables of the Sun*, U. S. Govt. Printing Office, Washington, D.C, p. 9.
- QUINN, T. J. [July 1991] The BIPM and the Accurate Measurement of Time. *Proc. IEEE*, 79(7), p. 894-905.
- RICKMAND, H. (editor) [2001], Trans. Int. Astron. Union, Vol. XXIVB, Proc. 24th General Assembly, Manchester, 2000, Astron. Soc. Pacific, San Francisco, p. 37-49.
- SEIDELMANN P. K. (editor) [1992] Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac. University Science Books, Mill Valley, CA.
- STANDISH, E. M. [1998] Time Scales in the JPL and CfA Ephemerides. *Astron. Astrophys.* **336**, p. 381-384.
- STEPHENSON, F. R. [1997] Historical Eclipses and Earth's Rotation. Cambridge, New York, p. 28.
- The XXIII<sup>rd</sup> International Astronomical Union General Assembly [1997] Resolution B2 On the International Celestial Reference System (ICRS). Kyoto, Japan.
- THOMAS, C. and AZOUBIB, J. [1996] TAI computation: study of an alternative choice for implementing an upper limit of clock weights. *Metrologia*, **33**, p. 227-240.
- THOMAS, J. B. [1975] Reformulation of the Relativistic Conversion between Coordinate Time and Atomic Time. *Ap. J.* **80**, p. 405-411.

## ITU-R文件

- ITU-R [1979] 世界无线电行政大会最终文件 (WARC-79), 日内瓦。
- 无线电规则, 2008年版, 第1卷, 国际电信联盟, 2008年,  
(<http://www.itu.int/publ/R-REG-RR-2008/en>)。
- ITU-R TF.458-3建议书 – 国际原子时间标度的比较  
(<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.458-3-199802-I/en>)。
- ITU-R TF.460-6建议书 – 标准频率和时间信号的发射,  
(<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.460-6-200202-I/en>)。
- ITU-R TF.486-2建议书 – UTC频率用作标准频率和时间信号发生中的参考,  
(<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.486-2-199802-I/en>)。
- ITU-R TF.535-2建议书 – 术语UTC的使用, (<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.535-2-199802-I/en>)。
- ITU-R TF.536-2建议书 – 时间标度标记法, (<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.536-2-200305-I/en>)。
- ITU-R TF.686-2建议书 – 时间和频率术语的词汇表和定义,  
(<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.686-2-200202-I/en>)。
- ITU-R TF.767-2建议书 – 全球导航卫星系统在高准确度时间传递中的使用,  
(<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.767-2-200103-I/en>)。





## 第8章

### 国家授时中心

页码

8.1	引言 .....	90
8.2	测时实验室布置 .....	90
8.3	本地测量系统 .....	92
8.4	国际可追溯性 .....	92
8.5	时间播发业务 .....	92
	参考文献 .....	93

## 8.1 引言

如前所描述，UTC是在BIPM通过对分布于全世界的大约60个测时实验室中的大约350个原子频率标准的数据进行后处理计算来建立的。在很多情况下，这些实验室运行于国家计量研究院（NMIs）中，除了实现本地的UTC时间标度外，通常还被认为国家时间参考，并且即使不是全部，也会在以下多个领域中进行活动：

- 建立基本频率标准和时钟，
- 参加国际同步实验，
- 播发时间和频率标准信号，
- 开发准确时间和频率传递技术，
- 研究时钟特性和时间标度算法，
- 校准时间和频率设备。

在自从1999年以来已经签署了CIPM（CIPM MRA）互相认可协定来遵守其关于建立国家标准等效程度要求的所有NMI中，至少能够找到这些活动其中的二个，即，通过参加关键比较（KC）和互相认可所发布的校准和测量证书参与到同步链路和播发活动中[CIPM/BIPM/OIML, 1999年]。

作为一个首要研究，每个为在BIPM形成UTC贡献时钟数据的国家计量实验室保持一个被称为UTC(k)的UTC本地实时表示，它保持与UTC的紧密一致，可以是基于单独一个主用时钟或一个时钟组合的读数。其次，为了能够参加到UTC的形成和由CCTF认定的关键比较[CCTF报告, 2001年；CCTF报告, 2006年]中，每个测时实验室需要至少运行一个同步系统，主要是GPS，来定期向BIPM提供（UTC(k) - GPS时间）数据，它将被用在国际频率和时间参考（TAI和UTC）的实现中；Circular T按月在用于国家标准等效性的关键比较数据库中提供将由BIPM发布的[UTC- UTC(k)]值。与此任务相关的一个重要的方面是对所用同步链路不确定性的准确性评估，为此而定期循环校准过的GPS、GLONASS或TWSTFT设备。对有贡献实验室中GPS设备的校准活动将由BIPM定期安排。

除了这些核心活动所需的设备之外，一个时间和频率参考实验室应具有专用设备，用于产生和监视将要通过不同方式向本地或向远处用户播发的标准时间和频率参考信号，例如专用LF、HF和TV发射、电话线路和计算机网络。这些特性与根据它们的规范（时间、频率和漂移、频率稳定性）适合于校准时间和频率设备的仪表一起就完成了在CIPM MRA中所预见的可跟追溯性链。

在已经建立了一个授权校准实验室系统的国家中，NMI实验室还向授权机构提供其专门知识，并能参与到国家和国际实验室间比较的组织中，这在评估二级校准实验室的测量能力中是很有用，它们是CIPM MRA所设想的可追溯性链的最末级。

## 8.2 测时实验室布置

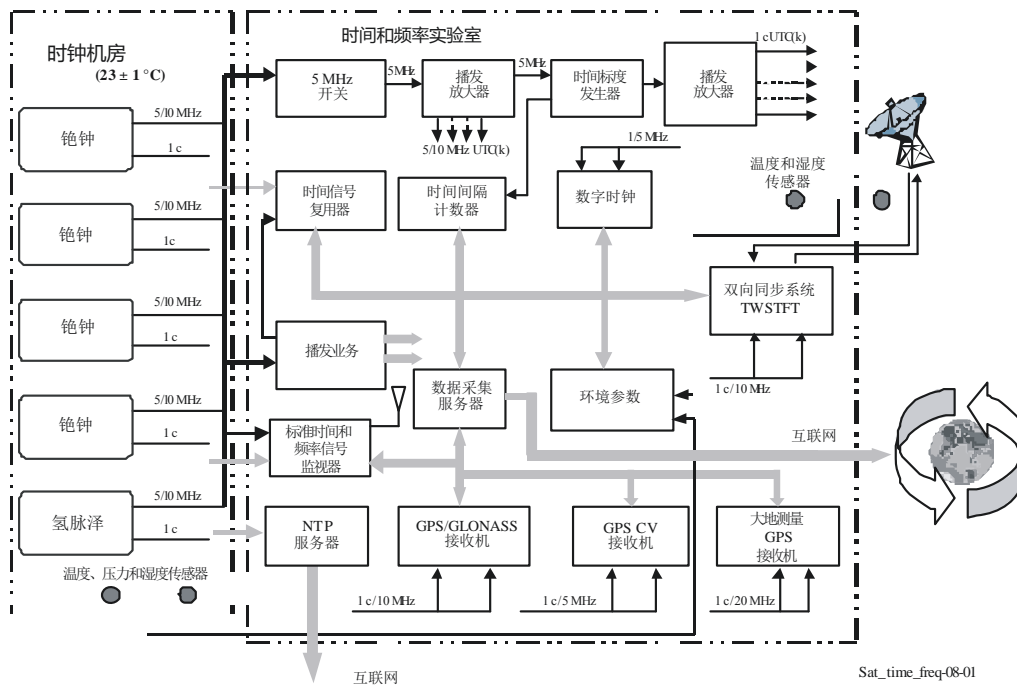
除了用于标准频率源研究、铯标准和校准设施的设备之外，图8-1还描述了实施所介绍核心活动的一个典型实例。除了同步系统接收天线之外，所有设备都安装在温度和湿度受控的机房中，而且有一个冗余的持续供电系统（未画出）；这个设施对计量活动的可靠性是非常重要的。

在图的左侧，可以看到一间用于时钟组合的分离房间，通常被控制在一个 $(23\pm 1)^\circ\text{C}$ 的温度；如果需要得到铯钟对环境变化的最好性能就推荐这个方案，但将时钟保持在具有严格 $(\pm 0.1^\circ\text{C})$ 温度和湿度控制的一个小恒温室中能够得到更好的结果。这个解决方案特别适合于为了在时间标度

生成情况中获得最大程度频率稳定性而采用氢脉泽的情况，或当氢脉泽被用作一个基本铯标准的本地振荡器时。

图8-1

一个授时中心的典型布置



按照所建议的结构，建议至少4个原子时钟用于本地UTC的可靠实现；这个配置还能够产生一个改善时间标度长期表现和可靠性的书面时间标度。任何情况下最受追捧的方式是根据其准确性和稳定性能从组合中选定单独一个时钟，并将它用作实时产生UTC(k)的主用时钟。为了改善时间标度产生的可靠性，可以在铯钟和时间标度发生器（TSG）之间插入一个自动开关（例如，5 MHz开关），在其输入端接收所有可用的标准频率并检验它们的幅度和相位变化来检测系统中的任何异常，并因此避免时间标度的不连续性。

可以通过观测在铯钟串行接口可以得到数值的一些物理参数来得到关于可能到来异常的信息；因此建议对实验室服务器中的某些数据要有一个永久的监视。

为了符合时间和频率咨询委员会（CCTF）的建议（它建议UTC本地实现中的最大偏移为100 ns（CCDS报告，1993年来自UTC）），应在主用时钟和TSG之间插入一个微相位步进器，根据BIPM在Circular T中发布的修正值或根据对于一个实验室基本标准的准确性评估来相对于UTC调整其频率。一些类型的铯标准已经包括了微步进器的功能，因此在时间标度生成的路径上不需要附加的设备。

由参考时钟提供的标准信号是通过高质量同轴电缆或光纤线路的方式在时间和频率实验室中分发的。

为了在实验室内进行可追溯测量，还需要用于UTC(k)标准频率和1秒信号的分发放大器。

### 8.3 本地测量系统

时间和频率实验室容纳专用于产生时间标度和时钟比较的设备、播发业务、卫星接收机、数据采集系统和辅助监视设备。

在实验室中，一个本地测量系统的建立与运行具有双重目的，即，为时间标度的计算和内部时间提供时钟数据，以及在UTC(k)和保持在实验室中的所有时钟与频率标准之间进行频率比较。为了进行因为国际可追溯性而要求的对GPS卫星或其他同步系统的日常测量，专用测量系统通常是必需的。

本地测量系统包括一个高分辨率的时间间隔计数器(TIC)，它以1秒的重复频率对时钟差值进行适当时间的测量，且每小时重复此循环。测量速率的最佳解算值极大地依赖于实验室所进行的活动。因为测量准确度与时基相关，向TIC提供了UTC(k)外部参考频率。其他因素对时钟比较的不确定性有影响，例如触发瞬间、量化误差和开始与停止信道的差分延迟。因此，必须要定期执行一个仔细的校准，以评估测量系统的稳定性。TIC所执行的所有测量应参考UTC(k)，同时，通过一个时间信号复用器发送来自不同时钟的“停止”信号。一个数字时钟为每个测量提供必要的时间标记。测量循环由一个里面存储了所有来自TIC、来自同步系统和来自环境监视结果的计算机控制。与BIPM和其他NMI的外部连接也可以通过一个保证安全接入互联网的专用网络服务器来管理。

### 8.4 国际可追溯性

在测时实验室中日常用来建立UTC(k)对于国际时间和频率参考UTC和TAI可追溯性的时间比较链路是建立在按照BIPM要求运行的GPS接收机和采用卫星通信的双向卫星时间频率传递(TWSTFT)之上。相同的测量链路使得保持在每个实验室中的原子钟能够为这些参考的计算做出贡献。在大多数实验室中，时间传递设备已经被升级，而且其他同步技术正在取代类似基本GPS的技术，例如，采用多信道接收机(它们很多带有双频接收)接收GPS和GLONASS卫星、采用大地测量类型接收机的TWSTFT或GPS载频相位测量的性能增强。后二个技术对频率和时间比较中更为严格的要求以及对跨大陆基线特别有用。所有这些仪表需要接收外部UTC(k)时间和频率参考，并且在选择其天线系统安装地点和实现与时间和频率实验室的信号连接中需要特别的谨慎。

对于GPS和GLONASS设备的情况，测量数据通常被存储在接收机中，并随后被自动转送到数据采集系统，同时，对于TWSTFT的情况，可能需要一个辅助测量系统。

为了评估任何同步链路的准确性，一个测时实验室的参考接收机应参加由BIPM或者地区计量组织通过循环一个校准的GPS接收机来组织的定期校准活动，以监视实验室中所使用接收机延迟时间的稳定性。对于TWSTFT的情况，使用一个便携VSAT电台或一个卫星模拟器也能适合这个目的。在UTC结构中所用链路的不确定性的完整特性以及关于它们校准的信息发布在BIPM的Circular T中；在前一节的图7-2中显示了提供此信息表格的一个摘录。目前，能够达到的不确定性水平在数纳秒的范围内。

### 8.5 时间播发业务

为了满足科学和工业用户的需求并使国家社会能够得到法定的时间信息，一个国家授时中心可以依靠在VLF、LF、HF和TV频段、卫星、电话网络和互联网上的专用广播实施多个时间和时间播发业务。

可以在ITU-R手册 - 《精确频率和时间系统的选择与使用》中找到关于所使用技术和从用户可得到的不确定性水平的详尽信息，同时，在ITU-R TF系列建议书(<http://www.itu.int/rec/R-REC->

TF/en) 中报告了时间信号和频率标准发射的更新表。在BIPM关于时间活动的年度报告中也提供了对时间信号和时间播发业务的描述。

在图8-1的方框图中, 已经用二个方块表示了这种活动, 即“播发业务”和“NTP服务器”; 要为了用户记录对这些业务UTC (k) 的可追溯性, 必须由实验室部署一些监视系统, 或者应定期使公众可以以书面或电子形式得到时间或频率偏移和所播发时间和频率信号的不确定性。

也可以由授时中心通过发布在可以被认为是一个传递标准的GPS上进行测量的结果来提供一个国家标准的可追溯性, 以使二级实验室能够将它们的本地标准 (主要是GPS规范的振荡器) 与国际时间参考相对照。

### 参考文献

- BIPM Annual Report on 时间 Activities, Bureau International des Poids et Mesures, Available upon request from the BIPM.
- BIPM Annual Report on Time Activities, Bureau International des Poids et Mesures, Available upon request from the BIPM.
- CCDS – Report on the 14<sup>th</sup> Meeting, 1993.
- CCTF – Report of the 15<sup>th</sup> Meeting, June 2001, (<http://www.bipm.org/cc/AllowedDocuments.jsp>).
- CCTF – Report of the 17<sup>th</sup> Meeting, 2006, (<http://www.bipm.org/utis/common/pdf/CCTF17.pdf>).
- CIPM/BIPM/OIML – Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes. Paris, October 1999.



## 第9章

## 在卫星时间和频率传递与播发中的相对论效应

页码

9.1	时空间隔 .....	96
9.2	相对论原理 .....	96
9.2.1	度量张量 .....	97
9.2.2	地球的引力势能 .....	99
9.2.3	时间膨胀 .....	101
9.2.4	重力红移 .....	102
9.2.5	采用时钟传送的时间传递 .....	103
9.2.6	地心惯性坐标系 .....	103
9.2.7	地心地固坐标系 .....	105
9.3	在一颗卫星上的时钟 .....	107
9.4	借助一个电磁信号的时间传递 .....	111
9.4.1	地心惯性坐标系 .....	112
9.4.2	地心地固坐标系 .....	114
9.4.3	卫星间链路 .....	116
9.4.4	相对论多普勒效应 .....	117
9.5	结论 .....	119
	参考文献 .....	119

## 9.1 时空间隔

根据广义相对论理论，空间、时间和引力的理论建立在以下一个黎曼时空间隔恒等式形式的表述上：

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = g_{00} c^2 dt^2 + 2 g_{0j} c dt dx^j + g_{ij} dx^i dx^j \quad (9-1)$$

此处：

希腊指数设定范围0、1、2、3

拉丁指数设定范围1、2、3。

一个重复指数（一个在上标位置，另一个在下标位置）意味着对该指数求和。基本数学对象是度量张量 $g_{\mu\nu}$ ，它的分量是坐标的函数 $x^\alpha = (ct, x^i)$ 且对于指数 $\mu, \nu$ 是对称的（即， $g_{\mu\nu} = g_{\nu\mu}$ ）。互反度量张量 $g^{\mu\nu}$ 由关系 $g^{\mu\alpha} g_{\alpha\nu} = \delta^\mu_\nu$ 定义，此处 $\delta^\mu_\nu$ 是克罗内克 $\delta$ （如果 $\mu = \nu$ ， $\delta^\mu_\nu = 1$ ，其他情况为0）。在此处采纳的符号约定， $-g_{00} > 0$ 。

在对长度和时间的测量中，时间是唯一的基本量；长度是一个推算出来的概念。因此，时钟和光信号是仅仅用到的基本测量工具。有二种不同的方法在二个远距离时钟之间传递时间：

1. 传递一个中间便携时钟；
2. 一个电磁信号。

对于相对论时间的传递，有必要区分坐标时间和本征时间。一个事件的坐标时间 $t$ 在时空坐标系中任何地方都相同。本征时间 $\tau$ 是一个时钟在其自己所处参考系中的读数。本征时间取决于时钟的运动状态和其在引力势中的位置。对一个被传递的时钟，时空间隔是：

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \equiv -c^2 d\tau^2 \quad (9-2)$$

对一个电磁信号，时空间隔满足以下条件：

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = 0 \quad (9-3)$$

## 9.2 相对论原理

按照爱因斯坦在1905年构想的狭义相对论，物理定律在每个惯性参考系中都应具有相同的形式。这个假设被称为相对论原理。因此，除了力学定律外，麦克斯韦的电磁场方程式应在所有惯性系中成立。麦克斯韦方程式的一个基本预测是存在着在真空中以光速传播的电磁场，由下式唯一地给出：

$$c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$$

此处：

$\mu_0$  和  $\epsilon_0$ ：分别是表示自由空间磁导率和介电常数的电常数。

因此，光速 $c$ 在每个惯性系中必定相同。

1908年，明科夫斯基认为，这个属性能够用一个四维时空间隔不变性来表示，其形式如下：



$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 = -c^2 dt'^2 + dx'^2 + dy'^2 + dz'^2 \quad (9-4)$$

这样，对于一个光信号，等式 $ds^2 = 0$ 表示在惯性系 $S(ct, x, y, z)$ 或惯性系 $S'(ct', x', y', z')$ 中的一个扩展球面波阵面。坐标微分的系数由明科斯基度量给出， $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} \equiv \text{diag}(-1, 1, 1, 1)$ 。

保持这个表达式不变性的坐标变换是洛伦兹变换。如果 $S'$ 以速度 $V$ 沿着 $S$ 的 $x$ 轴移动，则洛伦兹变换是：

$$x = \gamma(x' + Vt'); \quad y = y'; \quad z = z' \quad (9-5)$$

$$t = \gamma(t' + Vx'/c^2)$$

此处：

$$\gamma \equiv (1 - V^2/c^2)^{-1/2}$$

如果二个事件的坐标时相等，则它们是同时发生的。因此在坐标时变换中的第二项表示同时性的相对论：在 $S$ 中同时发生的事件在 $S'$ 不是必定同时发生的。

爱因斯坦在1916年所陈述的广义相对论的一个基本宗旨是“物理学定律必须具有适用于处于任何运动中的参考系这样的属性”。因此，在广义相对论中，任意二个参考系之间的坐标变换是任意的，且时空间隔假设是一个二次微分的形式，其度量分量是坐标的函数。根据其在任意坐标变换下的不变性 $x^\alpha \rightarrow x'^\alpha (x'^0, x'^1, x'^2, x'^3)$ ，时空间隔是：

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = g'_{\alpha\beta} dx'^\alpha dx'^\beta \quad (9-6)$$

坐标微分的变换是：

$$dx^\mu = \frac{\partial x^\mu}{\partial x'^\alpha} dx'^\alpha \quad (9-7)$$

因此，通过将这个表达式代入 $ds^2$ ，得出该度量的变换为：

$$g'_{\alpha\beta} = \frac{\partial x^\mu}{\partial x'^\alpha} \frac{\partial x^\nu}{\partial x'^\beta} g_{\mu\nu} \quad (9-8)$$

这个坐标微分和度量是被称为“张量”的某些量的实例。在任何坐标系中一个张量的特性由其对于一个新坐标系的转换定律来决定。转换是线性和均匀的，因此，如果一个张量等式在一个坐标系中有效，它在任何其他坐标系中也有效。因此，在广义相对论中，是通过根据张量表示等式来实现物理定律的坐标系不变性的。

### 9.2.1 度量张量

时空的几何性质由黎曼张量 $R^\alpha_{\beta\gamma\delta}$ 确定，它完全由度量张量及其一阶和二阶导数构成。如果，且仅仅如果黎曼张量为零时，存在着将一个给定张量 $g_{\mu\nu}$ 变为狭义相对论明科斯基张量 $\eta_{\mu\nu}$ 形式的坐标转换。在这种情况下，时空是平坦的。存在物质时，时空是弯曲的，且不能通过任何坐标转换将该度量减少到在所有时空上的明科斯基度量。但是，总有可能找到一个坐标系，以一个自由落体参考系为代表，该度量的一阶导数在一个选定的点消失，且该度量由在该点附近的明科斯基度量给出。这个性质包含在等效性原理中，它提出一个自由落体参考系在没有重力情况下局部等效于一个惯性参考系。或者说，它提出一个非惯性参考系与在引力场中处于静止的一个参考系在局部上是没有差别

的。等效性原理是基于所有物体都以相同加速度下落的实验观察，而无论其组成或内部结构，并根据惯性和引力质量的等效性以牛顿的引力理论来表示。

对一个给定的物质分布，度量张量由爱因斯坦场方程式确定：

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (9-9)$$

此处：

$R_{\mu\nu} = R^{\alpha}{}_{\mu\alpha\nu}$ ：里奇张量，通过在一阶和三阶指数上对黎曼张量收缩（求和）得到

$R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}$ ：标量曲率P

$T_{\mu\nu}$ ：能量动量张量，而G是牛顿引力常数。在自由空间，场方程式简化为 $R_{\mu\nu} = 0$ 。

但是，这个方程式并不意味着更强的条件 $R^{\alpha}{}_{\beta\gamma\delta} = 0$ ，它意味着时空是平坦的。

在一阶近似中，到 $1/c^2$ 阶，爱因斯坦场方程式简化为泊松方程式， $\nabla^2 U = -4\pi G \rho$ ，此处U是牛顿引力势能， $\rho$ 是物质密度。

在自由空间，场方程式变为拉普拉斯方程式， $\nabla^2 U = 0$ 。

对在这个近似中的时钟传输的分析，在一个地心惯性（ECI）参考系中的度量是：

$$-g_{00} = 1 - 2U/c^2, \quad g_{0j} = 0, \quad g_{ij} = \delta_{ij} \quad (9-10)$$

此处：

$\delta_{ij}$ ：克罗内克 $\delta$ 。

通过一个坐标变换，在一个旋转、地心地固（ECEF）参考系中的度量变为：

$$-g_{00} = 1 - 2U/c^2 - (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2/c^2 = 1 - 2W/c^2, \quad g_{0j} = (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})_j/c, \quad g_{ij} = \delta_{ij} \quad (9-11)$$

此处：

$\boldsymbol{\omega}$ ：地球的旋转角速度

$W \equiv U + \frac{1}{2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2$ ：地球位势能。

对于光信号分析，必须包含 $g_{ij}$ 中与 $g_{00}$ 中的项相同阶的项。所以，对于在一个惯性参考系中的光信号：

$$-g_{00} = 1 - 2U/c^2, \quad g_{0j} = 0, \quad g_{ij} = (1 + 2U/c^2) \delta_{ij} \quad (9-12)$$

而在一个旋转参考系中：

$$-g_{00} = 1 - 2U/c^2 - (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2/c^2 = 1 - 2W/c^2, \quad g_{0j} = (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})_j/c, \quad g_{ij} = (1 + 2U/c^2) \delta_{ij} \quad (9-13)$$

对度量张量的这些近似对于涉及时钟和光信号的实际问题是足够的。

注1 – 按照一个IAU建议书，牛顿引力势能的符号为正。

### 9.2.2 地球的引力势能

在径向距离 $r$ 、地心纬度 $\phi$ 、和经度 $\lambda$ 处的地球引力势能 $U$ 是对拉普拉斯方程式 $\nabla^2 U = 0$ 的一个解，它可以被表达为如下的球面调和函数形式的一个级数展开：

$$U(r, \phi, \lambda) = \frac{GM}{r} \left\{ 1 + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left( \frac{R}{r} \right)^2 P_{nm}(\sin \phi) (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) \right\}$$

$$= \frac{GM}{r} \left\{ 1 - \sum_{n=2}^{\infty} J_n \left( \frac{R}{r} \right)^n P_n(\sin \phi) - \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=1}^n \left( \frac{R}{r} \right)^n P_{nm}(\sin \phi) (J_{mn} \cos m\lambda + K_{mn} \sin m\lambda) \right\} \quad (9-14)$$

此处：

$G$ : 引力常数

$M$ : 地球的质量

$R$ : 地球的赤道半径

$P_n(\sin \phi)$ :  $n$ 次勒让德多项式

$P_{nm}(\sin \phi)$ :  $n$ 次 $m$ 阶连带勒让德函数。

第一项是一个球形地球的势能。在单重求和中的项被称为带谐函数，并与地球扁率相关。在双重求和中的项被称为田谐函数，并与地球赤道的椭圆形状相关。当仅仅考虑第一个带谐函数就足够时，引力势能可以由下面表达式近似：

$$U(r, \phi) = \frac{GM}{r} \left[ 1 + \frac{1}{2} J_2 \left( \frac{R}{r} \right)^2 (1 - 3 \sin^2 \phi) \right] \quad (9-15)$$

此处：

$J_2$ : 最低次扁率系数

$$P_2(x) = \frac{1}{2} (3x^2 - 1)$$

对陆地测量，必须考虑地球的引力势能和地球的旋转。引力势能 $U$ 与旋转势能 $\frac{1}{2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 = \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \cos^2 \phi$ 之和是地球位势能：

$$W = U + \frac{1}{2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 = U + \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \cos^2 \phi \quad (9-16)$$

它是 $\nabla^2 W = -4\pi G \rho + 2\omega^2$ 的一个解，此处， $\boldsymbol{\omega}$ 是地球旋转的角速度。仅仅保留一阶扁率修正，地球位势能可以表达为：

$$W(r, \phi) \approx \frac{GM}{r} \left[ 1 + \frac{1}{2} J_2 \left( \frac{R}{r} \right)^2 (1 - 3 \sin^2 \phi) \right] + \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \cos^2 \phi \quad (9-17)$$

恒定地球位势能的表面被称为大地水准面，它以平均海平面来接近地近似。因为在大地水准面上的地球位势能 $W_0$ 是恒定的，它可以在赤道取值并由下式给出：

$$W_0 \equiv U_0 + \frac{1}{2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R})^2 \approx \frac{GM}{R} \left( 1 + \frac{1}{2} J_2 \right) + \frac{1}{2} \omega^2 R^2 \quad (9-18)$$

此处:

$U_0$ : 在位置 $\mathbf{R}$ 处大地水准面上的牛顿引力势能。

在地球的WGS-84模型中 (NIMA技术报告, 1997年), 地球的万有引力常数是:

$$GM = 3.986\,004\,418 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$$

地球的赤道半径是 $R = 6\,378\,137.0$  米, 和

地球的旋转角速度是 $\omega = 7.292\,1150 \times 10^{-5}$  度/秒。

同样, 确切的光速是 $299\,792\,458$  米/秒。

注1 - 此数值定义了在国际单位制 (SI) 中的米。自由空间的介电常数是 $\epsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2)$ , 此处, 根据安培的定义, 自由空间的磁导率是 $\mu_0 \equiv 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ 。因此, 因为二者现在都被定义为常数, 不再对 $c$  和 $\epsilon_0$ 进行实验测量。

地球的二次扁率系数近似为 $J_2 = 0.001\,0826$ 。

所以: 近似有  $W_0 = 6.2637 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{s}^2$  和  $W_0/c^2 = 6.9693 \times 10^{-10}$ 。

本地重力加速度 $\mathbf{g}$ 是地球位势能的斜率。因此,

$$\mathbf{g} = \nabla W = \nabla U - \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \quad (9-19)$$

在高度 $h$ 上地球位势能差近似为 $\Delta W \approx \mathbf{g} \cdot \Delta \mathbf{r} = -g h$ 。

在一个扁圆、旋转地球上重力加速度的幅度由索密里安引力公式以闭合形式给出[Heiskanen和Moritz, 1967年]:

$$g = g_0 \frac{1 + k \sin^2 \phi'}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi'}} \quad (9-20)$$

此处:

$\phi'$ : 大地测量纬度

$e^2 = 2f - f^2$ : 一阶偏心率的平方

$f$ : 扁率

$g_0$ : 赤道处的 $g$ 值。

大地测量纬度 $\phi'$ 和地心纬度 $\phi$ 通过以下精确方程相关:

$$\tan \phi = (1 - f)^2 \tan \phi' = (1 - e^2) \tan \phi'。$$

在地球的WGS-84模型中:

-  $k = 0.001\,931\,852\,652\,41$

-  $f = 1/298.257\,223\,563$

-  $e^2 = 0.006\,694\,379\,990\,14$ , 和

-  $g_0 = 9.780\,325\,3359 \text{ m/s}^2$ 。

注1 - 根据约定, 当时钟在大地水准面之上时,  $\Delta W$  是负值。

### 9.2.3 时间膨胀

在狭义相对论中，以相对于一个惯性参考系的速度 $v$ 移动的时钟的时空间隔由下式给出：

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + \delta_{ij} dx^i dx^j = -c^2 (1 - v^2/c^2) dt^2 = -c^2 d\tau^2 \quad (9-21)$$

此处：

$v^2 = \delta_{ij} (dx^i/dt) (dx^j/dt)$ 。对速度为 $v_1$ 和 $v_2$ 的二个时钟

$$d\tau_1 = \sqrt{1 - v_1^2/c^2} dt \quad (9-22)$$

和

$$d\tau_2 = \sqrt{1 - v_2^2/c^2} dt \quad (9-23)$$

因为本征时间间隔 $d\tau_1$ 和 $d\tau_2$ 对应于相同的坐标时间间隔 $dt$ ：

$$\frac{d\tau_2}{d\tau_1} = \sqrt{\frac{1 - v_2^2/c^2}{1 - v_1^2/c^2}} \approx 1 - \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} (v_2^2 - v_1^2) \quad (9-24)$$

因此，具有相对于一个惯性参考系的更高速度的一个时钟比具有相对于该惯性系的较低速度的一个时钟走得更慢。

如果 $v_1 = 0$ ，则 $d\tau_2 = \sqrt{1 - v_2^2/c^2} d\tau_1$ ，而反过来 $d\tau_1 = d\tau_2 / \sqrt{1 - v_2^2/c^2}$ 。

因此，由静止时钟记录的本征时间间隔 $d\tau_1$ 长于由移动时钟记录的本征时间间隔 $d\tau_2$ 。这个性质被称为时间膨胀。

时间膨胀效应已经通过测量基本粒子寿命被广泛地验证。例如，根据它们衰败之前的路径长度进行判断，由宇宙射线在上层大气层中产生的高速 $\mu$ 介子显示出生存长于在实验室中所测量的静止 $\mu$ 介子的本征寿命[Frish and Smith, 1963年]。

在时钟传递中也观测到时间膨胀。考虑由被携带着以速度 $v'$ 环绕旋转地球赤道的一个时钟所记录的本征时间 $\tau_2$ 和保持在赤道上一个位置的一个参考时钟的本征时间 $\tau_1$ 之间的差值。相对于一个惯性参考系，参考时钟的速度是：

$$v_1 = \omega R, \text{ 而}$$

被传输时钟的速度是：

$$v_2 = \omega R + v'$$

此处：

$\omega$ : 地球的旋转角速度

$R$ : 地球的赤道半径。

本征时间中的差值（传输时钟 - 参考时钟）近似为：

$$\tau_2 - \tau_1 \approx -\frac{1}{2} \frac{1}{c^2} (v_2^2 - v_1^2) \tau_1 = -\frac{1}{c^2} \left( \frac{1}{2} v'^2 + \omega R v' \right) \tau_1 = -\frac{2\pi R}{c^2} \left( \frac{1}{2} |v'| \pm \omega R \right) \quad (9-25)$$

对于向东行驶，相对速度 $v'$ 为正，因此二项相加，而对向西行驶，相对速度为负，因此二项趋于抵消。在地球旋转系中，右侧的第二项表示了萨格纳克效应。在1971年，物理学家Joseph Hafele和

Richard Keating [Pound和Rebka, 1960年]第一次采用宏观原子时钟证实了时间膨胀。他们携带一组4个铯钟乘坐商业喷气式飞机环绕世界,一次向东,一次向西,定量验证了向东和向西飞行时钟之差的不对称性。

### 9.2.4 重力红移

在广义相对论中,一个时钟的时空间隔由下式给出:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = g_{00} c^2 dt^2 + 2 g_{0j} c dt dx^j + g_{ij} dx^i dx^j = -c^2 d\tau^2 \quad (9-26)$$

在一个静止时钟的特殊情况下,  $dx^i = 0$ , 因此  $d\tau = \sqrt{-g_{00}} dt$ 。

对静止在  $x_A$  和  $x_B$  点处重力势中的二个时钟  $A$  和  $B$ , 本征时间间隔是:

$$d\tau_A = \sqrt{-g_{00}(x_A)} dt \quad (9-27)$$

和

$$d\tau_B = \sqrt{-g_{00}(x_B)} dt \quad (9-28)$$

因为本征时间间隔  $d\tau_A$  和  $d\tau_B$  对应于相同的坐标时间间隔  $dt$ :

$$\frac{d\tau_B}{d\tau_A} = \frac{\sqrt{-g_{00}(x_B)}}{\sqrt{-g_{00}(x_A)}} \quad (9-29)$$

如果二个时钟在旋转地球的重力势中以高度  $h = r_B - r_A$  分开, 则:

$$-g_{00} = 1 - 2U/c^2 - (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2/c^2 = 1 - 2W/c^2 \quad \text{和} \quad (9-30)$$

$$\frac{d\tau_B}{d\tau_A} \approx \frac{1 - W_B/c^2}{1 - W_A/c^2} \approx 1 - \frac{1}{c^2} (W_B - W_A) = 1 - \frac{\Delta W}{c^2} \approx 1 + \frac{gh}{c^2} \quad (9-31)$$

此处:

$W$ : 地球位势能,  $g$  是本地重力加速度,

$$\Delta W \approx -gh。$$

则本征时间时钟读数中的差值是:

$$\tau_B - \tau_A = -\frac{1}{c^2} \Delta W \tau_A \approx \frac{1}{c^2} gh \tau_A \quad (9-32)$$

因此, 由于在重力势中的差, 由在较高高度的时钟  $B$  所记录的本征时间 (即, 在一个较弱的重力势中) 将比由在一个较低高度 (即, 在一个较强重力势中) 的时钟  $A$  所记录的本征时间更长。如果时钟  $A$  向上发射一个周期信号, 由时钟  $B$  接收, 相对频率差是:

$$\frac{f_B - f_A}{f_A} = \frac{f_B}{f_A} - 1 = \frac{d\tau_A}{d\tau_B} - 1 = -\frac{gh}{c^2} \quad (9-33)$$

由时钟  $B$  所测量的接收频率  $f_B$  因此小于由时钟  $A$  测量的发射频率  $f_A$ 。即, 在一个更长的本征时间间隔上观察到相同数量的信号脉冲<sup>1</sup>。这个效应被称为重力红移。(实际中, 术语“红移”是通用的并应用于二种符号的频率变化。)

在Robert Pound和Glen Rebka于1960年在哈佛大学所进行的一个实验中第一次直接测量到重力红移[Pound和Rebka, 1960年]。他们精确地测量了在一个已知垂直距离上上升或下降的伽马射线光子频率中的极微小改变。在实验中, 一个 $\text{Fe}^{57}$ 辐射源被非常缓慢地移动, 以产生一个精确补偿重力红移的多普勒效应, 使得一个稳态 $\text{Fe}^{57}$ 吸收器能够在一个狭窄的频率范围上进行共振吸收。采用新发现的穆斯堡尔效应才使得有可能实现这个精确性, 它是在同位素被嵌入一个适当晶体时发生无反冲发射和吸收的一个现象。

在1975年, 由Carroll Alley [Alley, 1983年]领导的一个研究小组在马里兰大学进行了一系列飞机原子钟实验, 它们被特别设计用来测试在三个不同高度的重力红移, 并发现与理论完全吻合。地球重力势的效应还作为1971年Hafele-Keating环绕世界原子钟实验的一部分被进行了测量。

至今最精确的红移测试是由史密松天文台的Robert Vessot在1976年采用被一个斯考特D火箭向上运送到10000公里高度的氢脉泽来进行的[Vessot和Levine, *et al*, 1980年]。通过火箭通信负载转发的一个双向信号与一个单向信号相混合来提取相对论频率变化。重力效应在上行和下行链路上完全抵消, 所以转发的信号经历了二次多普勒频移, 但是单向信号则受到重力和多普勒二个效应的影响。这个测试与理论一致到0.01%之内。

注1 - 从量子力学的观点出发, 一个光子的动能是 $E = hf$ , 此处,  $h$ 是普朗克常数。随着该光子上升, 它损失动能, 并观察到频率降低。

### 9.2.5 采用时钟传送的时间传递

对一个被传送的时钟, 时空间隔是:

$$ds^2 = g_{00} c^2 dt^2 + 2g_{0j} c dt dx^j + g_{ij} dx^i dx^j = -c^2 d\tau^2 \quad (9-34)$$

坐标时间由无穷远处一个静止标准时钟的本征时间定义, 因为:

$$\text{如果 } dx^i = 0 \text{ 和 } -g_{00} = 1 \text{ 则 } dt = d\tau.$$

这是 $d\tau$ 的一个二次代数方程式。

所以, 在一个时钟传送期间对应于所测量本征时间的流逝坐标时间是:

$$\Delta t = \pm \int_{path} \frac{1}{\sqrt{-g_{00}}} \sqrt{1 + \frac{1}{c^2} \left( g_{ij} + \frac{g_{0i} g_{0j}}{-g_{00}} \right) \frac{dx^i}{d\tau} \frac{dx^j}{d\tau}} d\tau + \frac{1}{c} \int_{path} \frac{g_{0j}}{-g_{00}} \frac{dx^j}{d\tau} d\tau \quad (9-35)$$

所以, 当借助一个中间便携时钟从A到B点传递时间时, 流逝的坐标时间在一阶近似中:

$$\Delta t = \int_A^B \left[ 1 - \frac{1}{2}(-g_{00} - 1) + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} g_{ij} \frac{dx^i}{dt} \frac{dx^j}{dt} \right] dt + \frac{1}{c} \int_A^B g_{0j} \frac{dx^j}{dt} dt \quad (9-36)$$

第二项是所传送时钟的萨格纳克效应。在一个惯性参考系中,  $g_{0j} = 0$ , 所以这一项并不发生。

### 9.2.6 地心惯性坐标系

一直到 $1/c^2$ 阶项, 在一个ECI坐标系中度量张量的分量是:

$$-g_{00} = 1 - 2U/c^2, \quad g_{0j} = 0, \quad \text{和 } g_{ij} = \delta_{ij}.$$

到这一阶, 时空间隔是:

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2U}{c^2}\right) c^2 dt^2 + \delta_{ij} dx^i dx^j = -c^2 \left(1 - \frac{2U}{c^2} - \frac{1}{c^2} v^2\right) dt^2 = -c^2 d\tau^2 \quad (9-37)$$

此处:

$U$ : 在时钟位置处的重力势能

$v$ : 相对于该惯性参考系的时钟速度。

所以, 在时钟运动期间流逝的坐标时间是:

$$\Delta t = \int_A^B \left(1 + \frac{1}{c^2} U + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v^2\right) d\tau \quad (9-38)$$

在这个积分下的修正值是由于地球势能所引起的重力红移和由于时钟速度所引起的时间膨胀。此描述所表示的坐标时间  $t$  就是地心坐标时 (TCG), 它是如同相对于一个 ECI 坐标系实现的地心坐标时, 其单位是 SI 秒。

对于在旋转大地水准面上位置  $\mathbf{R}$  处处于重力势能  $U_0$  并具有相对于 ECI 参考系的速度  $\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R}$  的一个静止时钟, 流逝的坐标时间是:

$$\Delta t = \int_A^B \left\{1 + \frac{1}{c^2} U_0 + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R})^2\right\} d\tau = (1 + W_0/c^2) \Delta\tau \quad (9-39)$$

此处:

$W_0$ : 是在大地水准面表面上的地球位势能。

因为  $W_0$  是一个常数, 而坐标时间  $t$  是一个全球坐标, 在大地水准面上任意位置的时钟保持相同的本征时间  $\Delta\tau$ 。通过如下式重新调整坐标时间比例, 能够使坐标时间等于在大地水准面上一个时钟的本征时间:

$$\Delta t' \equiv (1 - W_0/c^2) \Delta t = \Delta\tau \quad (9-40)$$

所以, 如通过在大地水准面上一个参考时钟的本征时间进行测量, 对应于在势能  $U$  且具有相对于 ECI 参考系的速度  $v$  的一个时钟本征时间的流逝坐标时间是:

$$\Delta t' = \int_A^B \left\{1 + \frac{1}{c^2} (U - W_0) + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v^2\right\} d\tau \quad (9-41)$$

注意,  $W_0$  包括地球旋转效应, 但  $U$  不包括。这个方程式既能被用于靠近地球表面的时钟, 也能用于在高达地球静止轨道 (35 786 公里) 高度上卫星的时钟。由这个描述所表示的坐标时间  $t'$  是 TT, 被定义为如同在旋转大地水准面上时钟所实现的坐标时间标度, 其单位是 SI 秒。

所以,  $t' \equiv \text{TT}$  与  $t \equiv \text{TCG}$  唯一不同于一个恒定速率, 由此  $d\text{TT} / d\text{TCG} = 1 - L_G$ ;

此处:

$$L_G \equiv W_0 / c^2 = 6.969\,290\,134 \times 10^{-10} \quad (\text{大约 } 60.2 \mu\text{s/d})。$$

TT 是 TAL 的一个理想形式。



### 9.2.7 地心地固坐标系

一直到 $1/c^2$ 阶项，度量张量在旋转地心地固（ECEF）坐标系中的分量是：

$$-g_{00} = 1 - 2U/c^2 - (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2/c^2 = 1 - 2W/c^2, \quad g_{0j} = (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})_j/c \quad \text{和} \quad g_{ij} = \delta_{ij}。$$

到这一阶，时空间隔是：

$$ds^2 = -\left[1 - 2\frac{1}{c^2}U - \frac{1}{c^2}(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2\right]c^2 dt^2 + 2(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})_j dx^j c dt + \delta_{ij} dx^i dx^j = -c^2 dt^2 \quad (9-42)$$

所以，流逝的坐标时间是：

$$\Delta t = \int_A^B \left\{ 1 + U/c^2 + \frac{1}{2}(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2/c^2 + (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \cdot \mathbf{v}'/c + \frac{1}{2}v'^2/c^2 \right\} dt \quad (9-43)$$

此处：

$\mathbf{v}'$ ：相对于旋转地球的时钟速度。这个结果也可以通过将 $\mathbf{v} = \mathbf{v}' + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}$ 代入到相同的近似中从在一个惯性坐标系下的 $\Delta t$ 方程式产生。

为了使这个坐标时间对应于由在大地水准面上一个静止的时钟所记录的本征时间，对它乘以比例因子 $1 - W_0/c^2$ ，产生：

$$\Delta t' = \left(1 - \frac{1}{c^2}W_0\right)\Delta t = \int_A^B \left\{ 1 + \frac{1}{c^2}\left[U + \frac{1}{2}(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 - W_0\right] + \frac{1}{2}v'^2 \right\} dt + \int_A^B (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \cdot \mathbf{v}' dt \quad (9-44)$$

在第一个积分括号中的项可以表示为：

$$U + \frac{1}{2}(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 - W_0 = W - W_0 = \Delta W = -gh \quad (9-45)$$

此处：

- $W$ ：在高度 $h$ 处的地球位势能
- $W_0$ ：在大地水准面上的地球位势能
- $g$ ：本地重力加速度。

所以，流逝的坐标时间变为：

$$\Delta t' = \int_A^B \left(1 - \frac{1}{c^2}gh + \frac{1}{2}\frac{1}{c^2}v'^2\right) dt + \frac{1}{c^2} \int_A^B (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \cdot \mathbf{v}' dt \quad (9-46)$$

第二项积分是对所传送时钟的萨格纳克效应。萨格纳克效应是旋转参考系内在的一个运动属性。此项可以表达为：

$$\Delta t_{\text{Sagnac}} = \frac{1}{c^2} \int_A^B (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \cdot \mathbf{v}' dt = \frac{1}{c^2} \int_A^B \boldsymbol{\omega} \cdot (\mathbf{r} \times d\mathbf{r}) = 2\frac{1}{c^2} \int_A^B \boldsymbol{\omega} \cdot d\mathbf{A} = \frac{2\omega A}{c^2} \quad (9-47)$$

此处：

- $A$ ：投射到赤道平面上的由相对于地球中心的位置矢量所扫过的面积（对朝东方向为正，对朝西方向为负）。

萨格纳克效应也可以被表示为:

$$\Delta t_{Sagnac} = \frac{1}{c^2} \int_A^B (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \cdot \mathbf{v}' d\tau = \frac{1}{c^2} \int_A^B (\omega R \cos \phi)(v' \cos \theta) d\tau \frac{\omega}{c^2} \int_A^B R^2 \cos^2 \phi d\lambda \quad (9-48)$$

此处:

$R$ : 地球的半径,  $\phi$  是纬度

$\lambda$ : 经度

$v' \cos \theta$ : 矢量的东向分量。相对于东方向测量的方向 $\theta$ 是相对于北测量的方位角 $Az$ 的余角, 因此 $\cos \theta = \sin Az$ 。

对一个向东行进时钟的流逝坐标时间的萨格纳克修正为正, 而对一个向西行进的时钟为负; 对向北或南行进的时钟为零。

所以, 当借助一个便携时钟从 $A$ 点向 $B$ 点传递时间时, 流逝的坐标时间是:

$$\Delta t' = \int_A^B \left( 1 - \frac{1}{c^2} g h + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v'^2 \right) d\tau + \frac{\omega}{c^2} \int_A^B R^2 \cos^2 \phi d\lambda \quad (9-49)$$

根据这个公式, 有三个相对论效应要被考虑。在第一个积分下的修正值是重力红移和时间膨胀项。由第二个积分所给出的修正值是萨格纳克效应。总之, 坐标时间必须在指定的路径上进行数值积分。

对完全环绕赤道向东传送并返回到出发点的一个时钟, 萨格纳克修正值为207.4 ns。

对界定地球表面一个小区域 $S$ 的一个闭合路径:

$A \approx S \sin \bar{\phi}$ , 此处 $\bar{\phi}$ 是在 $S$ 中心处求出的平均纬度。

如果一个时钟被通过相同路径在二点之间来回传送, 萨格纳克修正将会抵消, 且净萨格纳克效应为零。

如果路径是一个巨大的圆, 则 $\cos \phi \cos \theta = \cos i$ , 它是一个常数, 此处 $i$ 是巨大圆平面相对于赤道的倾角。

投影区是 $A = \frac{1}{2} R^2 \gamma \cos i$ , 此处 $\gamma$ 是从路径开始点和结束点处的点1到点2的巨大圆弧。

所以, 萨格纳克修正值为:

$$\Delta t_{Sagnac} = \frac{2\omega A}{c^2} = \frac{\omega R^2}{c^2} \gamma \cos i \quad (9-50)$$

通过球面三角学,  $\gamma$ 由下式给出:

$$\cos \gamma = \sin \phi_1 \sin \phi_2 + \cos \phi_1 \cos \phi_2 \cos(\lambda_2 - \lambda_1) \quad (9-51)$$

此处:

$\phi$  和  $\lambda$ : 每个点的纬度和经度。

巨大圆平面的倾角由下式给出:

$$\tan i = \begin{cases} \tan \phi_1 \csc \beta, & \beta \neq 0, \phi_1 \neq 0 \\ \tan \phi_2 \csc(\lambda_2 - \lambda_1), & \beta = \phi_1 = 0 \end{cases} \quad (9-52)$$

如此，点1被作为点2的西。角  $\beta$  是巨大圆与赤道之间交叉点与点1之间的经度差，由下式给出：

$$\cot \beta = \frac{\tan \phi_2}{\tan \phi_1} \csc(\lambda_2 - \lambda_1) - \cot(\lambda_2 - \lambda_1) \quad (9-53)$$

在巨大圆上任意点，纬度可以用经度表示为：

$$\tan \phi = \tan i \sin(\lambda_2 - \lambda_1 + \beta) \quad (9-54)$$

采用这个表达式和恒等式  $\cos^2 \phi = 1 / (1 + \tan^2 \phi)$ ，并且还注意  $\tan(\lambda_2 - \lambda_1 + \beta) = \cos i \tan(\gamma + \psi)$  及  $\tan \beta = \cos i \tan \psi$ ，此处  $\psi$  是从与赤道的相交点到点1的巨大圆弧，可以另外显示：

$$\Delta t_{Sagnac} = \frac{\omega}{c^2} \int_A^B R^2 \cos^2 \phi \, d\lambda = \frac{\omega R^2}{c^2} \gamma \cos i \quad (9-55)$$

如上。

作为一个实例，考虑在国家物理实验室和美国海军天文台之间借助一个传送原子时钟的时间传递测量。假设该时钟是装载在一架飞机上，通过从伦敦到华盛顿特区的一个巨大圆路由，平均高度10000米，平均速度220米/秒，飞行时间大约7.5小时。由飞行时钟所记录的本征时间间隔是  $\Delta\tau$ ，而由在大地水准面上的一个参考时钟所记录的本征时间间隔是  $\Delta\tau' = \Delta t'$ 。则由于重力红移所引起的本征时间差  $\Delta\tau - \Delta\tau'$ （飞行时钟 - 参考时钟）是 +29 ns，而由于时间膨胀所引起的是 -7 ns。对向西的飞行，萨格纳克效应是 +18 ns。飞行的时钟将因此相对于参考时钟得到一个40 ns的总和。

另一方面，对一个从华盛顿特区到伦敦的向东飞行，萨格纳克效应是 -18 ns，飞行时钟将仅仅净得4 ns。在往返飞行中，如果飞行路径相同，则萨格纳克修正抵消，并且导致净变化是 +44 ns（= 2 × 29 ns - 2 × 7 ns），完全由重力红移和时间膨胀造成。

### 9.3 在一颗卫星上的时钟

对于在卫星上的一个时钟，相对于一个ECI参考系的流失坐标时间是：

$$\Delta t = \int_A^B \left( 1 + \frac{1}{c^2} U + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v^2 \right) d\tau \quad (9-56)$$

如果卫星沿着一个未受扰动的开普勒轨道，重力势能是：

$$U = \frac{GM}{r} \quad (9-57)$$

且卫星的速度由能量  $E$  守恒给出（每单位质量）：

$$E = \frac{1}{2} v^2 - U = \frac{1}{2} v^2 - \frac{GM}{r} = -\frac{GM}{2a} \quad (9-58)$$

此处：

$a$ ：轨道半长轴。

所以，流逝的坐标时间是：

$$\Delta t = \int_{orbit} \left( 1 - \frac{1}{c^2} \frac{GM}{2a} + \frac{1}{c^2} \frac{2GM}{r} \right) dt = \left( 1 - \frac{1}{c^2} \frac{GM}{2a} \right) \Delta \tau + \frac{2GM}{c^2} \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{1}{r} dt \quad (9-59)$$

对一个开普勒轨道，径向距离是：

$$r = a (1 - e \cos E)$$

此处：

$e$ : 轨道偏心率

$E$ : 偏近点角。

同样，根据开普勒方程式：

$$M \equiv n (\tau - \tau_0) = E - e \sin E$$

此处：

$M$ : 平均近点角

$n \equiv 2\pi/T = \sqrt{GM/a^3}$ : 平均运动

$T$ : 轨道周期

$\tau_0$ : 轨道近地点时间。

所以，积分是：

$$\int_{\tau_0}^{\tau} \frac{1}{r} dt = \frac{1}{na} E = \frac{1}{a} \Delta \tau + \sqrt{\frac{a}{GM}} e \sin E \quad (9-60)$$

此处：

$$\Delta \tau = \tau - \tau_0.$$

所以：

$$\Delta t = \left( 1 + \frac{3}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM}{a} \right) \Delta \tau + \frac{2}{c^2} \sqrt{GM a} e \sin E \quad (9-61)$$

应用比例变换很方便：

$$\Delta t' = \left( 1 - \frac{1}{c^2} W_0 \right) \Delta t = \int_A^B \left\{ 1 + \frac{1}{c^2} (U - W_0) + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v^2 \right\} dt \quad (9-62)$$

结果，坐标时间将对于在大地水准面上的时钟所记录的本征时间。因此，在大地水准面上的一个时钟变成了一个坐标时钟。所以，流逝的坐标时间是：

$$\Delta t' = \left( 1 + \frac{3}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM}{a} - \frac{1}{c^2} W_0 \right) \Delta \tau + \frac{2}{c^2} \sqrt{GM a} e \sin E \quad (9-63)$$

第一项表示卫星时钟和在大地水准面上一个时钟之间的恒定速率偏移。对卫星本征时间间隔的修正值是：

$$k \equiv 1 + \frac{3}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM}{a} - \frac{1}{c^2} W_0 = \frac{3}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM}{a} - \frac{1}{c^2} \frac{GM}{R} \left( 1 + \frac{1}{2} J_2 \right) - \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} \omega^2 R^2 \quad (9-64)$$

对大约为9545公里的一个半长轴， $k$ 的数值是零。

在此距离上，重力红移和时间膨胀效应抵消。对一个较低轨道，时间膨胀较大，且 $k$ 为正，而对一个较高轨道，重力红移较大，且 $k$ 为负。

第二项是由于轨道偏心率引起的一个小的相对论周期性修正，并且可以没有近似地被表示为：

$$\Delta t_r = \frac{2}{c^2} \sqrt{GM a} e \sin E = \frac{2 \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}}{c^2} \quad (9-65)$$

此处：

$\mathbf{r}$  和  $\mathbf{v}$ ： 卫星的位置和速度。

因为 $\mathbf{r} \cdot \mathbf{v}$ 是一个标量，既可以在ECI坐标系中，也可以在ECEF坐标系中对其进行计算。所以，坐标时间间隔可以用以下形式表示：

$$\Delta t' = (1 + k) \Delta \tau + \Delta t_r.$$

卫星时钟的本征时间是：

$$\Delta \tau = (1 - k) \Delta t' + \Delta \tau_r$$

此处：

对本征时间的修正值是负的坐标时间修正值， $\Delta \tau_r \equiv -\Delta t_r$ 。

通过按照 $\Delta t' = (1 + k) \Delta \tau$ 调整卫星时钟速率，能够使卫星时钟具有与大地水准面上的一个时钟相同的平均速率。所以，本征时间变为：

$$\Delta \tau' = \Delta t' + \Delta \tau_r.$$

因此，除了一个小的周期性修正值之外，卫星时钟也变为一个坐标时钟。

对具有26562公里轨道半长轴的一颗GPS卫星，长期速率偏移是：

$$k = -4.464\,733 \times 10^{-10} = -38.575\,293 \mu\text{s}/\text{天}.$$

因此，一个GPS卫星时钟运行比在大地水准面上的一个标准时钟快大约38  $\mu\text{s}/\text{天}$ ，包括由于重力势能差引起的快45  $\mu\text{s}/\text{天}$ 和由于速度差引起的慢7  $\mu\text{s}/\text{天}$ 。

这个影响与数小时上10 ns的标称时钟精确度相比是相当大的。为了补偿速率差值，在发射之前对一个GPS卫星时钟给予一个微小的偏差 $\Delta f/f = -4.464\,733 \times 10^{-10}$ ，等效于在10.23 MHz时钟速率中 $\Delta f = -0.004\,5674$  Hz的变化。

导致的频率等于10 229 999.995 4326 Hz，这样，如同对大地水准面上的一个观测者所表现出来的，频率保持未变。如果最大轨道偏心率是0.02，周期性项 $\Delta \tau_r$ 对11.957小时的轨道周期有一个46 ns的幅度。这个相对论修正值被应用在用户接收机中。

在1977年，首次在从GPS原型卫星NTS-2接收到的信号中测量到这个速率差值，与广义相对论的一致性在0.7% 以内[Buisson, *et al.*, 1977年]。在轨道调整操作期间已经观测到相对论频率阶跃[Epstein, *et al.*, 2001年]。对于一个高椭圆轨道，周期项的幅度可能很大。例如，在一个具有0.722偏心率的12小时闪电型(Molniya)轨道，幅度是1.7  $\mu\text{s}$ 。

这些相对论修正值对纳秒级别精度的时间测量是足够的。对亚纳秒时间测量，下一个重要的因素是由于在上面给出的势能 $U(r, \phi)$ 中地球扁率 $J_2$ 的扰动所引起对重力红移的贡献。受扰动的半长轴 $a$ 和径向距离 $r$ 是[Kozai, 1959年]:

$$a = \bar{a} \left[ 1 + \frac{3}{2} J_2 \left( \frac{R}{\bar{a}} \right)^2 \sin^2 i \cos(2u) \right] \quad (9-66)$$

和

$$r = \bar{a} \left[ 1 - e \cos E + \frac{1}{4} J_2 \left( \frac{R}{\bar{a}} \right)^2 \sin^2 i \cos(2u) \right] \quad (9-67)$$

此处:

- $\bar{a}$ : 平均半长轴
- $e$ : 偏心率 (假设很小)
- $E$ : 偏近点角
- $i$ : 倾角
- $u$ : 升交角距。

因此受扰动的半长轴 $a$ 是 $u$ 的一个周期性函数。总能量 $E$  (可以被认为定义 $a$ ) 是:

$$E = \frac{1}{2} v^2 - U(r, \phi) = \left( \frac{GM}{r} - \frac{GM}{2a} \right) - U(r, \phi) = -\frac{GM}{2\bar{a}} \left[ 1 + J_2 \left( \frac{R}{\bar{a}} \right)^2 \left( 1 - \frac{3}{2} \sin^2 i \right) \right] \quad (9-68)$$

且如所要求的是一个常数。

因此, 将 $\frac{1}{2} v^2$ 和 $U(r, \phi)$ 代入流逝坐标时间 $\Delta t'$ 的表达式, 注意,  $\sin \phi = \sin i \sin u$ 和 $u \approx n \Delta \tau$ , 此处 $\Delta \tau$ 是卫星时钟所测量的来自升交点的本征时间, 可以发现 (NIMA技术报告, 1997年):

$$\Delta t_{\text{oblateness}} = \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM}{\bar{a}} J_2 \left( \frac{R}{\bar{a}} \right)^2 \left[ \left( 1 - \frac{3}{2} \sin^2 i \right) \Delta \tau + \frac{\sin^2 i}{n} \sin(2n \Delta \tau) \right] \quad (9-69)$$

对具有 $55^\circ$ 倾角的一个GPS轨道, 周期性项具有24 ps的幅度。

根据等效性原理, 月亮和太阳的引力势能不直接影响在环绕地球轨道卫星上的一个时钟, 因为地球在那些势能中构成一个自由落体参考系。

因此, 它们转而表现为潮汐的影响。由于外部第三天体而引起的潮汐势能由下式近似给出:

$$U_{\text{tidal}} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 U_{\text{ext}}}{\partial x^i \partial x^j} x^i x^j \approx \frac{GM_{\text{ext}}}{r_E^3} (r_S - r_E)^2 \quad (9-70)$$

此处:

- $r_S$  和  $r_E$ : 从第三天体分别到卫星和地球的距离。

$$r_S - r_E \approx r \cos i \sin(n \Delta \tau)$$

此处:

$r$ : 轨道半径

$i$ : 相对于第三天体的轨道倾角, 它是可变的。

所以, 对坐标时间间隔的修正值是:

$$\Delta t_{tidal} \approx \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM_{ext}}{r_E} \left( \frac{r}{r_E} \right)^2 \cos^2 i \left[ \Delta\tau - \frac{1}{2n} \sin(2n \Delta\tau) \right] \quad (9-71)$$

潮汐对一个GPS时钟的影响很小。除了倾角因素以外, 对于月亮, 长期漂移速度是每个回转15 ps, 而周期性项的幅度是1 ps。对于太阳, 数值分别是每个回转7 ps和0.5 ps。尽管太阳的质量是月亮的3千万倍, 但它大约是400倍远。因为潮汐势能与距离的立方成反比变化, 所以太阳的潮汐效应大约是月亮的一半。

#### 9.4 借助一个电磁信号的时间传递

在狭义相对论中, 在一个惯性参考系中光传播的方程式是:

$$ds^2 = \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 = 0 \quad (9-72)$$

此处:

$\eta_{\mu\nu}$ : 明科斯基度量。

点A和点B二点之间的传播时间简单地是:

$$\Delta t_{AB} = \Delta t_{BA} = \frac{1}{c} \int_A^B \sqrt{\delta_{ij} dx^i dx^j} = \frac{1}{c} \int_A^B \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2} \quad (9-73)$$

爱因斯坦规则是狭义相对论中的一个约定, 用来通过一个电磁信号同步在惯性参考系中的一个时钟, 例如一个光脉冲或一个雷达脉冲。假设一个信号是在点A发射, 并在点B接收, 在那里, 它被反射回在点A的一个接收机。如果时钟在A和B处测量的传输、反射、和接收的坐标时间分别是 $t_1$ 、 $t_2$ 和 $t_3$ , 根据定义, 如果 $t_2 - t_1 = t_3 - t_2$ , 则时钟被同步。因为 $\Delta t_{AB} = t_2 - t_1$ 和 $\Delta t_{BA} = t_3 - t_2$ , 则:

$$t_2 \equiv \frac{1}{2} \left[ (t_1 + \Delta t_{AB}) + (t_3 - \Delta t_{BA}) \right] = \frac{1}{2} (t_1 + t_3) \quad (9-74)$$

因此, 用 $t_1$ 和 $t_3$ 之间的时间中点标记反射的坐标时间 $t_2$ 。时钟A被指定本征时间 $\tau_1 = t_1$ 和 $\tau_3 = t_3$ , 而时钟B被指定本征时间 $\tau_2 = t_2$ 。通过这个方法, 可以建立由一个空间分布标准时钟网络读数给出的一个坐标时间标度。如果时钟A与时钟B同步, 且时钟B与时钟C同步, 则时钟A也同步于时钟C。

在广义相对论中, 光传播方程式:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = g_{ij} dx^i dx^j + 2g_{0j} dx^j c dt + g_{00} c^2 dt^2 = 0 \quad (9-75)$$

这是在坐标时间中增量 $dt$ 的一个二次方程。所以, 传播的流逝坐标时间是:

$$\Delta t = \pm \frac{1}{c} \int_{path} \frac{1}{-g_{00}} \sqrt{(-g_{00} g_{ij} + g_{0i} g_{0j}) dx^i dx^j} + \frac{1}{c} \int_{path} \frac{g_{0j}}{-g_{00}} dx^j \quad (9-76)$$

二个根对应于在向前和向后方向上的光传播。所以, 将 $\Delta t_{AB}$ 和 $\Delta t_{BA}$ 定义为在每个方向上的传播时间(分别具有从A到B和从B到A的积分限), 得到:

$$\Delta t_{AB} = \frac{1}{c} \int_A^B \frac{1}{\sqrt{-g_{00}}} \sqrt{\left( g_{ij} + \frac{g_{0i} g_{0j}}{-g_{00}} \right)} dx^i dx^j + \frac{1}{c} \int_A^B \frac{g_{0j}}{-g_{00}} dx^j \quad (9-77)$$

$$\Delta t_{BA} = -\frac{1}{c} \int_B^A \frac{1}{\sqrt{-g_{00}}} \sqrt{\left( g_{ij} + \frac{g_{0i} g_{0j}}{-g_{00}} \right)} dx^i dx^j + \frac{1}{c} \int_B^A \frac{g_{0j}}{-g_{00}} dx^j \quad (9-78)$$

第一项是通过空间间隔  $d\rho^2 \equiv \gamma_{ij} dx^i dx^j$  的路径的传播时间，此处  $\gamma_{ij} \equiv g_{ij} + g_{0i} g_{0j} / (-g_{00})$  是三维度量。第二项是萨格纳克效应。

假设一个脉冲在时刻  $t_1$  从在点A的一个参考时钟送出，在时刻  $t_2$  被从位于点B的一个远距离时钟反射，并在时刻  $t_3$  被在点A的参考时钟接收。在点B的反射坐标时间是：

$$t_2 = \frac{1}{2} \left[ (t_1 + \Delta t_{AB}) + (t_3 - \Delta t_{BA}) \right] = \frac{1}{2} (t_1 + t_3) + \frac{1}{c} \int_A^B \frac{g_{0j}}{-g_{00}} dx^j \quad (9-79)$$

通常，反射的坐标时间将取决于度量分量  $g_{0j}$  和  $-g_{00}$  和取决于从A到B的光路径。因此，当  $g_{0j}$  不等于零时，不可能在爱因斯坦的意义上唯一地同步时钟。这将是在一个旋转参考系中的情况，其中有由第二项给出的萨格纳克效应。

#### 9.4.1 地心惯性坐标系

可以忽略在一次近似中的重力势能。因此，在一个ECI坐标系中，度量变为  $-g_{00} \approx 1$ ， $g_{0j} = 0$ ，和  $g_{ij} \approx \delta_{ij}$ 。

沿着该路径对方程式  $ds^2 = 0$  积分，可以得到信号的传播时间：

$$\Delta t = \frac{1}{c} \int_{path} \sqrt{\delta_{ij} dx^i dx^j} = \frac{\rho}{c} \quad (9-80)$$

此处：

$\rho$ ：在ECI参考系中传播路径的长度。

这就是在欧氏空间间隔  $d\rho^2 \approx \delta_{ij} dx^i dx^j$  路径上的非相对论传播时间。

如果在坐标时间  $t_T$  从卫星发射一个信号，在坐标时间  $t_R$  到达一个移动着的接收机，在ECI参考系中路径长度上流逝的坐标时间是：

$$\Delta t = \frac{\rho}{c} = \frac{1}{c} |\mathbf{r}_R(t_R) - \mathbf{r}_T(t_T)| = \frac{1}{c} |\Delta \mathbf{r} + \mathbf{v}_R (t_R - t_T)| \approx \frac{1}{c} |\Delta \mathbf{r}| + \frac{1}{c^2} \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}_R \quad (9-81)$$

此处：

$\Delta \mathbf{r} \equiv \mathbf{r}_R(t_R) - \mathbf{r}_T(t_T)$ ：在发射的坐标时刻  $t_T$  接收机和卫星之间的位置差和接收机在ECI参考系中的速度  $\mathbf{v}_R$ 。

由此，对由于接收机速度所引起对坐标时间的修正值是：

$$\Delta t_v \approx \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}_R / c^2 \quad (9-82)$$



如果接收机相对于旋转大地水准面具有位置 $\mathbf{R}$ 和速度 $\mathbf{v}'_R$ ,  $\Delta\mathbf{r} = \mathbf{R}(t_T) - \mathbf{r}_T(t_T)$  和  $\mathbf{v}_R = \mathbf{v}'_R + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R}$ 。

则接收机速度修正值变为二项的和:

$$\Delta t_v = \Delta\mathbf{r} \cdot \mathbf{v}'_R / c^2 + \boldsymbol{\omega} \cdot [\mathbf{r}_T(t_T) \times \mathbf{R}(t_T)] / c^2 = |\Delta\mathbf{r}| v'_R \cos\theta / c^2 + 2\omega A / c^2 \quad (9-83)$$

此处:

$|\Delta\mathbf{r}|$ : 范围

$\theta$ : 接收机速度与卫星和接收机连线之间的角度,  $A$ 是三角形的面积, 三角形的顶点是发射坐标时刻 $t_T$ 卫星、接收机和地心在赤道平面上的投影。

在地球的旋转参考系中, 第一项是一个范围速率或积分多普勒频移、修正值, 而第二项是萨格纳克修正值。

传播时间  $\Delta t$  是由在无限远处一个静止标准时钟所测量的时间。为了确定相对于地球表面上一个时钟的传播时间, 必须包括地球位势能的影响。所以, 通过比例变换  $\Delta t' = (1 - W_0 / c^2) \Delta t$ , 传播时间变为  $\Delta t' = (1 - W_0 / c^2) \rho / c$ 。

对一颗GPS卫星, 最大的信号传播时间是86 ms, 而修正值是 -60 ps。

为了考虑重力势能 $U$ 对光信号的影响, 必须要包括度量在空间和时间部分的势能。度量张量的分量是:

$$-g_{00} = 1 - 2U / c^2, \quad g_{0j} = 0, \quad \text{和} \quad g_{ij} = (1 + 2U / c^2) \delta_{ij}。$$

所以, 根据方程式 $ds^2 = 0$ , 按在无限远处一个时钟所测量, 传播的流逝坐标时间是:

$$\Delta t = \frac{1}{c} \int_{path} \sqrt{\frac{g_{ij}}{-g_{00}}} dx^i dx^j \approx \frac{1}{c} \int_{path} (1 + 2U / c^2) \sqrt{\delta_{ij} dx^i dx^j} = \frac{\rho}{c} + \frac{2}{c^3} \int_{path} U d\rho \quad (9-84)$$

此处:

重力势能:  $U = GM / r$ 。

第一项是欧氏传播时间, 而第二项是重力时间延迟 $\Delta t_{delay}$ 。对在径向上的一个直线路径, 可以得到:

$$\Delta t_{delay} = \frac{2}{c^3} \int_R^r \frac{GM}{r} dr = \frac{2GM}{c^3} \ln \frac{r}{R} \quad (9-85)$$

但是, 通常, 距离 $\rho$ 、仰角 $\theta$ 、和径向距离 $r$ 通过定律 $\cosines r^2 = R^2 + \rho^2 + 2R\rho \sin\theta$ 相关联。

距离可以用仰角表达为:

$$\rho = \sqrt{r^2 - (R \cos\theta)^2} - R \sin\theta$$

所以, 重力时间延迟是:

$$\Delta t_{delay} = \frac{2}{c^3} \int_0^\rho \frac{GM}{\sqrt{R^2 + \rho^2 + 2R\rho \sin\theta}} d\rho = \frac{2GM}{c^3} \ln \left[ \frac{r + \sqrt{r^2 - (R \cos\theta)^2}}{R(1 + \sin\theta)} \right] \quad (9-86)$$

可以推导出以对称方式包括了距离 $r$ 、 $R$ 、和 $\rho$ 的另外一个公式。因为 $\sqrt{r^2 - (R \cos \theta)^2} = \rho + R \sin \theta$  和  $R \sin \theta = (r^2 - R^2 - \rho^2) / 2\rho$ ，对数自变量是：

$$\frac{2r\rho + \rho^2 + r^2 - R^2}{2R\rho + r^2 - R^2 - \rho^2} = \frac{(r+\rho)^2 - R^2}{r^2 - (\rho - R)^2} = \frac{(r+\rho+R)(r+\rho-R)}{(r+\rho-R)(r-\rho+R)} = \frac{R+r+\rho}{R+r-\rho} \quad (9-87)$$

所以，对于在无限远处一个时钟的重力时间时延可以表达为：

$$\Delta t_{delay} = \frac{2GM}{c^3} \ln \left( \frac{R+r+\rho}{R+r-\rho} \right) \quad (9-88)$$

当 $\rho = r - R$ 时，这个方程式简化为一个直线路径的时间延迟。

所以，相对于在大地水准面上一个时钟的总相对论修正是：

$$\Delta t'_{delay} = -\frac{W_0 \rho}{c^3} + \frac{2GM}{c^3} \ln \left( \frac{R+r+\rho}{R+r-\rho} \right) \quad (9-89)$$

第一项是由于标度改变所引起的地球位势能的贡献，而第二项是重力时间延迟。这些项在地球附近趋于抵消。

预测的重力时间延迟被Irwin Shapiro[Shapiro, 1980年]在1967年和1971年采用雷达测量到行星水星和火星距离的方法进行了验证。在上合时刻往返传输时间延迟分别大约是240  $\mu\text{s}$ 和180  $\mu\text{s}$ 。对在上合时刻到火星上海盗号着陆器更精确的测距具有大约250  $\mu\text{s}$ 的重力延迟。

对于轨道半径为26562公里和40°仰角的一颗GPS卫星，相对于无限远处一个时钟的相对论路径时延是48 ps，相对于大地水准面上的一个时钟则是-3 ps。对轨道半径为12 270公里的LAGEOS卫星，相对于无限远处一个时钟的最大时延是38 ps，而相对于大地水准面上的一个时钟则是14 ps。对从赤道发送到在轨道半径为42 164公里的地球静止卫星的一个信号，相对于无限远处一个时钟的修正是56 ps，而相对于大地水准面上的一个时钟则是-27 ps。

### 9.4.2 地心地固坐标系

在旋转ECEF坐标系中，一个电磁信号的传播坐标时间是：

$$\Delta t = \frac{\rho'}{c} + \frac{1}{c} \int_{path} \frac{g_{0j}}{-g_{00}} dx^j \quad (9-90)$$

此处：

$\rho'$ ：在ECEF参考系中传播路径的长度。

如果接收机具有速度 $\mathbf{v}'_R$ ，则 $\rho' = |\mathbf{R}(t_R) - \mathbf{r}_T(t_T)| \approx |\Delta \mathbf{r}| + \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}'_R / c$ ，并且有一个距离速度修正值 $\Delta t_{v'} = \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}'_R / c^2$ ，此处 $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{R}(t_T) - \mathbf{r}_T(t_T)$ 。

$\Delta t$ 方程式中的积分项是萨格纳克影响。

度量分量是：

$$-g_{00} \approx 1, \quad g_{0j} = (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})_j / c, \quad \text{和} \quad g_{ij} \approx \delta_{ij}$$

所以，萨格纳克影响是：

$$\Delta t_{Sagnac} \approx \frac{1}{c^2} \int_A^B (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \cdot d\mathbf{r} = \frac{1}{c^2} \int_A^B \boldsymbol{\omega} \cdot (\mathbf{r} \times d\mathbf{r}) = 2 \frac{1}{c^2} \int_A^B \boldsymbol{\omega} \cdot d\mathbf{A} = \frac{2\boldsymbol{\omega}A}{c^2} \quad (9-91)$$

此处:

A: 由旋转中心和光路径终点所形成面积的垂直投影。

从旋转系看到的路径近似是一条直线。对在  $(x_A, y_A)$  和  $(x_B, y_B)$  的端点, 萨格纳克影响可以表示为:

$$\Delta t_{Sagnac} = \frac{2\boldsymbol{\omega}A}{c^2} = \boldsymbol{\omega} \cdot (\mathbf{r}_A \times \mathbf{r}_B) = \frac{\boldsymbol{\omega}}{c^2} (x_A y_B - y_A x_B) \quad (9-92)$$

在地球上一个静止接收机的情况中, 在ECEF参考系中的一个观察者认为该接收机是静止的, 并应用一个萨格纳克修正值, 但在ECI参考系中的一个观察者看到该接收机由于地球的旋转而已经移动了, 并应用了一个速度修正值。总的传播时间是:

$$\Delta t = |\Delta \mathbf{r}| / c + \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}'_R / c^2 + 2 \boldsymbol{\omega} A / c^2 = |\mathbf{r}_R(t_R) - \mathbf{r}_T(t_T)| / c$$

注1 – 术语“萨格纳克效应”仅仅是在旋转参考系中观察者词汇的一部分。由惯性观察者所应用的相应修正值被称为“速度修正值。”

如在GPS文件[Navstar GPS, 2000年]中所规定, 对一个GPS信号的总传播时间修正值被应用于用户接收机中。最大的萨格纳克影响是133 ns, 它出现于接收机位于赤道上而卫星是在地平线上。从一个惯性观察者的观点出发, 这个修正值是由于在86 ms传播期间接收机以相对于ECI参考系465米/秒的速度运动所引起的。这个修正值的自我一致性已经通过分布在全世界的授时中心对之间同时共视GPS测量[Allen *et al.*, 1985]的闭合而得到证实。

对借助电磁信号经过一颗地球静止卫星的时间传递也必须考虑萨格纳克效应。这个性质已经例行地通过与时钟传送同步进行比较[Saburi, 1976年]而得到了确认。假设, 地球是一个半径为 $R$ 的球体, 而卫星轨道是在赤道平面上半径 $r$ 的精确圆形。在纬度 $\phi_E$ 和东经 $\lambda_E$ 处的一个地球站的坐标是:

$$x_E = R \cos \phi_E \cos \lambda_E \text{ and } y_E = R \cos \phi_E \sin \lambda_E$$

此处:

$R = 6371$  公里是地球的平均半径。

卫星的坐标是:

$$x_S = r \cos \lambda_S \text{ and } y_S = r \sin \lambda_S$$

此处:

$r = 42164$  公里是地球静止轨道。

对朝东方向上从地球站A到卫星的一条上行链路信号路径:

$$\Delta t_1 = \frac{\boldsymbol{\omega}}{c^2} (x_{EA} y_S - y_{EA} x_S) = \frac{\boldsymbol{\omega}}{c^2} R r \cos \phi_{EA} \sin(\lambda_S - \lambda_{EA}) \quad (9-93)$$

类似地, 对朝东方向上从卫星到地球站B的一条下行链路信号路径:

$$\Delta t_2 = \frac{\boldsymbol{\omega}}{c^2} (x_S y_{EB} - y_S x_{EB}) = \frac{\boldsymbol{\omega}}{c^2} R r \cos \phi_{EB} \sin(\lambda_{EB} - \lambda_S) \quad (9-94)$$

总的萨格纳克修正值是这二项的和,  $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$ 。对朝西方向上的一条信号路径, 修正值具有相同的幅度, 但是符号相反。

例如, 考虑测量从在科罗拉多博尔德的国家标准和技术研究所(纬度 $40.0^\circ$ , 经度 $105.3^\circ \text{W}$ )到 在华盛顿特区的美国海军天文台(纬度 $38.9^\circ$ , 经度 $77.1^\circ \text{W}$ )通过在 $97.0^\circ \text{W}$ 的一颗地球静止卫星进行的一个双向卫星时间传递(TWSTT)。萨格纳克修正值对上行链路是 $24.1 \text{ ns}$ , 对下行链路是 $57.7 \text{ ns}$ , 并且总修正值是 $81.8 \text{ ns}$ 。对在相反方向的信号路径, 修正值是 $-81.8 \text{ ns}$ 。

但是, 实际中, 地球不是一个理想的球体。此外, 卫星轨道受到扰动, 使它既不是理想的圆形, 也不是精确地在赤道平面上。对于一个 $300 \text{ m}$ 的地球站位置误差、一个 $1^\circ$ 的卫星经度误差、或一个 $0.2^\circ$ 的卫星纬度误差, 在萨格纳克修正值中的误差大约是 $0.1 \text{ ns}$ 。为了更精确的计算, 必须要通过考虑地球的轮廓和卫星轨道根数来计算地球站和卫星的坐标。

### 9.4.3 卫星间链路

用在交叉链路测距、卫星和地面站之间的时间传递、和卫星星群之间的互操作性中的电磁信号分析包括三个步骤:

1. 从在发射机处时钟的本征时间读数到在所采纳坐标系中发射坐标时间的相对论转换;
2. 计算信号传播的坐标时间, 包括相对论和非相对论影响;
3. 从在所采纳坐标系中的接收坐标时间到在接收机处时钟的本征时间读数的一个相对论转换。

此外, 所有本征时间必须针对“硬件”影响加以修正, 例如处理噪声和时钟环境。

考虑借助于一条卫星间链路在二颗卫星上的原子钟A和B之间进行相对论时间传递。假设每个时钟的本征时间 $\tau$ 已经根据规定 $\Delta\tau' = (1 + k) \Delta\tau$ 被加以调整, 这样, 结果本征时间 $\tau'$ 平均等于在大地水准面上原子时钟所实现的坐标时间 $t'$ 。如果每个时钟在一个ECI参考系中具有位置 $\mathbf{r}$ 和速度 $\mathbf{v}$ , 则 $\Delta\tau' = \Delta t' + \Delta t_r$ , 此处相对论修正值是:

$$\Delta t_r = -2 \frac{1}{c^2} \sqrt{GM a} e \sin E = -\frac{2 \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}}{c^2} \quad (9-95)$$

所以, 在发射坐标时刻时钟A的本征时间是:

$$\tau'_T = t'_T - 2 \mathbf{r}_T \cdot \mathbf{v}_T / c^2$$

而在接收坐标时刻时钟B的本征时间是:

$$\tau'_R = t'_R - 2 \mathbf{r}_R \cdot \mathbf{v}_R / c^2 + \Delta\tau_R$$

此处:

$\Delta\tau_R$ : 时钟B相对于时钟A的同步偏移。

按在无限远处的一个时钟所测量的信号传播坐标时间是:

$$t_R - t_T = \frac{\rho}{c} + \Delta t_{\text{delay}} \quad (9-96)$$

此处:

$\rho$ : 从发射时刻第一颗卫星到接收时刻第二颗卫星的路径距离;

$\Delta t_{\text{delay}}$ : 重力时间延迟。

路径距离是:

$$\rho = |\mathbf{r}_R(t_R) - \mathbf{r}_T(t_T)| = |\Delta\mathbf{r} + \mathbf{v}_R(t_R - t_T)| \approx |\Delta\mathbf{r}| + \frac{1}{c} \Delta\mathbf{r} \cdot \mathbf{v}_R \quad (9-97)$$

此处:

$\Delta\mathbf{r} = \mathbf{r}_R - \mathbf{r}_T$ : 在发射的坐标时间二颗卫星分开的距离。

重力时间延迟是:

$$\Delta t_{delay} = \frac{2GM}{c^3} \ln \left( \frac{r_T + r_R + \rho}{r_T + r_R - \rho} \right) \quad (9-98)$$

按大地水准面上时钟所测量的信号传播的坐标时间是:

$$t'_R - t'_T = (1 - W_0/c^2)(t_R - t_T)$$

所以, 理想本征时间中的差值是:

$$\tau'_R - \tau'_T = \Delta\tau_R + \frac{|\Delta\mathbf{r}|}{c} + \frac{\Delta\mathbf{r} \cdot \mathbf{v}_R}{c^2} - \frac{2\mathbf{r}_R \cdot \mathbf{v}_R}{c^2} + \frac{2\mathbf{r}_T \cdot \mathbf{v}_T}{c^2} - \frac{W_0|\Delta\mathbf{r}|}{c^3} + \frac{2GM}{c^3} \ln \left( \frac{r_T + r_R + \rho}{r_T + r_R - \rho} \right) \quad (9-99)$$

实际时钟读数是受噪声和环境偏差影响的“硬件”本征时间。还可能有由于残留大气所引起的一个非相对论路径延迟。

#### 9.4.4 相对论多普勒效应

考虑具有位置 $\mathbf{r}_T$ 和速度 $\mathbf{v}_T$ 的一个发射机在坐标时刻 $t_T$ 发射一个电磁信号, 和具有位置 $\mathbf{r}_R$ 和速度 $\mathbf{v}_R$ 的一个地球站在相对于一个ECI参考系的坐标时刻 $t_R$ 接收信号。发射信号本征频率 $f_T$ 与接收信号本征频率的比值反比于本征周期的比值。

所以:

$$\frac{f_R}{f_T} = \frac{d\tau_T}{d\tau_R} \quad (9-100)$$

这个表达式能够以坐标时间增量的形式被写为:

$$\frac{f_R}{f_T} = \frac{(dt_R/d\tau_R) dt_T}{(dt_T/d\tau_T) dt_R} \quad (9-101)$$

从发射机到接收机的距离是:

$$\rho \equiv \mathbf{r}_R(t_R) - \mathbf{r}_T(t_T)$$

接收与发射之间坐标时间的差值是:

$$t_R - t_T = \rho/c = |\mathbf{r}_R(t_R) - \mathbf{r}_T(t_T)|/c$$

二侧对 $t_R$ 求导, 得到:

$$1 - \frac{dt_T}{dt_R} = \frac{1}{c} \left( \frac{\partial \rho}{\partial t_R} + \frac{\partial \rho}{\partial t_T} \frac{dt_T}{dt_R} \right) = \frac{1}{c} \left( \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_R - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_T \frac{dt_T}{dt_R} \right) \quad (9-102)$$

此处, 从发射机到接收机传播方向上的单位法线是:

$$\mathbf{n} \equiv \frac{1}{\rho} \boldsymbol{\rho} = \frac{\mathbf{r}_R - \mathbf{r}_T}{|\mathbf{r}_R - \mathbf{r}_T|} \quad (9-103)$$

所以:

$$\frac{dt_T}{dt_R} = \frac{1 - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_R / c}{1 - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_T / c} \quad (9-104)$$

对在一个具有重力势能 $U$ 的ECI参考系中所分析的测量, 度量张量分量是:

$-g_{00} = 1 - 2U/c^2$ ,  $g_{0j} = 0$ , 而  $g_{ij} = \delta_{ij}$  和时空间隔是:

$$ds^2 = -c^2 (1 - 2U/c^2 - v^2/c^2) dt^2 = -c^2 d\tau^2.$$

所以:

$$\frac{dt_R}{d\tau_R} = \frac{1}{\sqrt{1 - 2U_R/c^2 - v_R^2/c^2}} \quad (9-105)$$

和

$$\frac{dt_T}{d\tau_T} = \frac{1}{\sqrt{1 - 2U_T/c^2 - v_T^2/c^2}} \quad (9-106)$$

所以

$$\frac{f_R}{f_T} = \frac{\sqrt{1 - 2U_T/c^2 - v_T^2/c^2}}{\sqrt{1 - 2U_R/c^2 - v_R^2/c^2}} \frac{(1 - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_R / c)}{(1 - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_T / c)} \quad (9-107)$$

这是相对论多普勒效应的方程式。第一个乘数是相对论修正值, 第二个乘数是典型多普勒效应。将各项展开到 $v^2/c^2$ 阶, 得到:

$$\frac{\Delta f}{f_T} = \frac{1}{c} \left( 1 + \frac{1}{c} \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_T \right) [\mathbf{n} \cdot (\mathbf{v}_T - \mathbf{v}_R)] + \frac{1}{c^2} (U_R - U_T) + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} (v_R^2 - v_T^2) \quad (9-108)$$

此处:

$$\Delta f \equiv f_R - f_T$$

应注意这个方程式的二个性质。首先, 有一个 $v^2/c^2$ 阶项, 它原本是非相对论的。第二, 没有 $\mathbf{v}_T \cdot \mathbf{v}_R / c^2$ 型的混合项。

特别关心的一个情况是发射机在一颗卫星上, 而发射机是在旋转的地球上。卫星相对于ECI参考系的速度由活力方程给出, 而径向坐标是:

$$r = a (1 - e^2) / (1 + e \cos \nu)$$

此处:

$a$  和  $e$  是轨道半长轴和偏心率, 且

$\nu$  是真近点角。

同样, 在纬度 $\phi_R$ 处的接收机速度是:

$$v_R = \omega R \cos \phi_R。$$

在卫星发射机处的重力势能是： $U_T = GM/r$ ，而在地球站接收机处的重力势能是： $U_R = GM/R$ 。

因此，忽略 $e^2$ 阶项：

$$\frac{\Delta f}{f_T} = \frac{1}{c} \left( 1 + \frac{1}{c} \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_T \right) \left[ \mathbf{n} \cdot (\mathbf{v}_T - \mathbf{v}_R) \right] + \frac{GM}{c^2} \left( \frac{1}{R} - \frac{3}{2a} \right) - \frac{2GM}{c^2 a} e \cos v + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} \omega^2 R^2 \cos^2 \phi_R \quad (9-109)$$

第一项是典型多普勒频移。第二项是组合时间膨胀和重力红移效应的长期部分。第三项是一个残留相对论周期性效应。R. E. Jenkins在1969年报告了这个效应的第一个证据 [Jenkins, 1969年]。第四项是由于地球站的速度所引起。对轨道偏心率为0.02的一颗GPS卫星，周期性效应的幅度是 $6.7 \times 10^{-12}$ 。这表示，1.57542 GHz的GPS L1载频将经历因为相对论而引起的一个幅度为0.011 Hz和周期等于11.967小时卫星轨道周期的调制。

## 9.5 结论

广义相对论理论为现代空间、时间、和引力概念提供了基础。在过去40年中，范围广泛的精确实验已经确认了其多种多样的预测。因此相对论已经成为工程、物理、和天文学中精确测时系统的一个重要实际考虑。

三个主要效应是时间膨胀、重力红移、和萨格纳克效应。全球定位系统是这些效应在其中非常重要的一个工程系统的实例。时间膨胀和红移的组合效应产生一个每天38  $\mu\text{s}$ 的长期速率偏移和一个幅度高达46 ns的残留周期性变化，而萨格纳克效应通常是在100 ns的量级。GPS对0.1纳秒级别相对论时间测量起到了一个实验室的作用。相对论对GPS时间和位置测量的成功应用已经被该系统的操作精准性和众多设计用来在广泛条件范围中测试这些各个效应的众多实验所验证。对空间时钟所进行的纳秒量级精确性的时间测量，将需要考虑额外的效应，包括由于地球扁率所引起的红移贡献、太阳和月亮的潮汐势能、和对光本身传播速度的重力效应。

远非仅仅是理论科学的兴趣，陆地和星载原子钟所进行的持续精确时间测量和播发要求广义相对论所施加的修正。

## 参考文献

- ALLEY, C.O. [1983] Proper Time Experiments in Gravitational Fields With Atomic Clocks, Aircraft, and Laser Light Pulses. *Quantum Optics, Experimental Gravitation, and Measurement Theory*, edited by P. Meystre and M. O. Scully, Plenum, New York, p. 363-427.
- ALLEN, D. W., WEISS, M. A. and ASHBY, N. [1985] Around-the-World Relativistic Sagnac Experiment. *Science* **228**, p. 69-70.
- ASHBY, N. [2001] Relativistic Effects on SV Clocks Due to Orbit Changes, and Due to Earth's Oblateness. Proc. 33rd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, U. S. Naval Observatory, Washington, D.C, p. 509-524.
- BUISSON, J. A., EASTON, R. L. and MCCASKILL, T. B. [1977] Initial Results of the Navstar GPS NTS-2 Satellite. Proc. 9th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, U. S. Naval Observatory, Washington, D.C, p. 177-200.
- DEPARTMENT of DEFENSE WGS 84 [1997] NIMA Tech. Rep. TR8350.2, 3<sup>rd</sup> edition. National Imagery and Mapping Agency, Bethesda, MD.

- EPSTEIN, M., STOLL, E. and FINE, J. [2001] Observable Relativistic Frequency Steps Induced by GPS Orbit Changes. Proc. 33rd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, U. S. Naval Observatory, Washington, D.C, p. 493-508.
- FRISCH, D. H. and SMITH, J. H. [1963] Measurement of the Relativistic Time Dilation Using  $\mu$ -Mesons. *Am. J. Phys.* **31**, p. 342-355.
- HAFELE, J. C. and KEATING, R. E. [1972] Around-the-World Atomic Clocks: Predicted Relativistic Time Gains; Observed Relativistic Time Gains. *Science* **177**, p. 166-170.
- HEISKANEN, W. A. and MORITZ, H. [1967] Physical Geodesy. Freeman, San Francisco, p. 70.
- JENKINS, R. E. [1969] A Satellite Observation of the Relativistic Doppler Shift. *Astron. J.* **74**, p. 960-963.
- KOZAI, Y. [1959] The Motion of a Close Earth Satellite. *Astron. J.* **64**, p. 367-377.
- NAVSTAR GPS Space Segment/Navigation User Interfaces, ICD-GPS-200C-004 [2000] Arinc Research Corporation, El Segundo, CA.
- POUND, R. V. and REBKA, Jr. G. A. [1960] Apparent Weight of Photons. *Phys. Rev. Lett.* **4**, 337-341.
- SABURI, Y. [1976] Observed Time Discontinuity of Clock Synchronization in Rotating Frame of the Earth. *J. Radio Research Laboratories* **23**, p. 255-265.
- SHAPIRO, I. I. [1980] Experimental Tests of General Relativity, in *General Relativity and Gravitation*, edited by A. Held, Plenum, New York, , Vol. II, p. 469-489.
- VESSOT, R. F. C. and LEVINE, M. W. *et al.* [1980] Tests of Relativistic Gravitation With a Space-Borne Hydrogen Maser. *Phys. Rev. Lett.* **45**, p. 2081-2084.



第10章  
地球定向和大地测量系统

	页码
10.1 引言 .....	122
10.2 地球定向 .....	122
10.2.1 岁差/章动 .....	123
10.2.2 极移 .....	124
10.3 世界时 (UT) .....	124
10.4 大地测量系统 .....	125
10.5 参考面 .....	125
10.5.1 大地水准面 .....	125
10.5.2 椭球 .....	126
10.5.3 坐标的类型 .....	126
参考文献 .....	129

## 10.1 引言

参考系的构成：

1. 一个指定的原点；
2. 基本轴的方向；
3. 一组用来实现该系统的协议模型和程序。

而一个参考框架是通过给予定义单元坐标的一个列表对该系统的实现。地球定向指用来将一个大地测量参考系与一个天球系统相关联的程序和模型。

严谨的细节在国际地球旋转和参考系统服务（IERS）公约中叙述，电子版可以在以下网址得到：<http://www.iers.org/iers/products/conv/>。

天球参考系由天文学家规定，且大多数现代系统通常被认为它们的原点在太阳系的质心，而它们的极轴以某种方式与地球的轴相关。第三轴则位于垂直于极轴的赤道平面之内并指向在该平面中的一个基准点。对天文物体位置和可能移动的一个列表则构成了相关的天球参考框架。国际天文联合会已经指定了一个标准天球参考系统和框架，被分别称为国际天球参考系（ICRS）和国际天球参考架（ICRF）。ICRF由远距离无线电源的指定位置构成。

类似地，地球参考系其自己的原点通常在地球的质量中心，它们的极轴与对于地球外壳固定的一个轴的方向相关。在赤道平面中经度的原点提供了第三个方向。如同天球参考框架的情况，地球框架由地点坐标和可能移动的一个列表构成。由IERS维持的国际地球参考系（ITRS）和国际地球参考框架（ITRF）被接受为国际标准。

## 10.2 地球定向

地球定向由5个角度确定。通常三个将是足够的，但采用5个角度是为了描述所涉及的物理过程和使转换更易于应用。

二个角度被用来对在一个协议天球系中地球轴变化方向建模。这个轴被称为天球中间极（CIP）且其运动是由于地球的岁差和章动所引起。这些现象受太阳系天体对非球形地球的引力吸引所驱动，主要是太阳和月亮。岁差指运动的非周期性部分，而章动指周期性的部分。二个运动都取决于太阳系天体的位置和地球的内部结构，但能够以相当的准确性对它们进行数学建模。

另外二个角度被用来描述CIP在地球外壳上的运动。这个现象被称为“极移”，并且受在地球及其大气内地球物理和气象变化的驱动。主要成分是一个线性漂移和二周期为365天和435天的周期性运动。极移难于建模，因为驱动极移的力难以预测。作为结果，必须对这些角度进行天文观测并例行地向用户报告。

CIP是按照协议定义的一个极，它将地球参考系（TRS）的极在天球参考系（CRS）中的移动分解成CIP的天球移动（岁差/章动），包括CRS中周期大于2天（介于每恒星日-0.5周（cpsd）（在T+F界 - 和ITU中，负频率值的使用是不同寻常的且应该予以解释）和+0.5 cpsd之间的频率）的所有项，和CIP的地球移动（极移），包括TRS中逆周日带外的所有项（低于-1.5 cpsd或大于-0.5 cpsd的频率）。

5个角度的最后一个描述了地球的旋转角度并被表示为时间差[UT1 - UTC]，此处，UT1是由远距离无线电源观测所确定的一个天文时间，而UTC是统一时间标度—协调世界时。地球旋转速度中的主要变化包括由潮汐减速和冰川消失所引起的一个恒定减速、由于地球质量内部分布改变所引起

年代际变化、极大受季节天气驱动的变化和潮汐驱动的周期性变化。如同极移，难于对UT1 – UTC建模和预测，并且必须例行进行天文观测和向用户报告。

由国际天文学联合会第XXIV届全体大会于2000年8月批准的B1.8决议建议在地心天球参考系（GCRS）和ITRS中都采用“非旋转原点” [Guinot, 1979年]，且这些原点被指定为天球星历表原点（CEO）和地球星历表原点（TEO）。地球旋转角被定义为沿着CEO和TEO之间CIP赤道所测量的角度。这个决议进一步建议UT1应该是线性正比于地球旋转角，并且ITRS和GCRS之间的转换应该由CIP在GCRS中的位置、CIP在ITRS中的位置、和地球旋转角来确定。

数学上，在历元 $t$ 处从TRS转换到CRS的程序被写为：

$$[CRS(t)] = Q(t)R(t)W(t)[TRS(t)] \quad (10-1)$$

此处， $Q(t)$ 、 $R(t)$ 和 $W(t)$ 分别是描述天球系中天极运动（岁差/章动）、地球围绕极轴的旋转、和极移的转换矩阵。用在这个和所有随后表达式中的参数 $t$ 由下式定义：

$$t = [TT - 2000 \text{ January } 1, 12\text{h TT} - \text{in days}] / 36525 \quad (10-2)$$

请注意，2000年1月1.5日 TT = 儒略日期2451545.0 TT。

在以下对要在转换中使用的旋转矩阵进行的讨论中，我们采用符号 $R_1$ 、 $R_2$ 、和 $R_3$ 分别来表示对于参考系的x、y、和z轴的旋转。即：

$$R_1(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (10-3)$$

$$R_2(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (10-4)$$

$$R_3(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10-5)$$

### 10.2.1 岁差/章动

太阳系天体施加在非球形地球上的引力引起其方向在天球参考系中移动。在26000年中，该轴移动在空间描绘了一个圆锥体。这个移动被称为岁差。章动引起岁差之外的一个小得多的周期性轴摆动。章动移动的主周期是18.6年。IAU已经建议，从2003年1月1日开始，应采用岁差-章动模型IAU 2000A或给需要一个准确到1毫秒（mas）级别模型的那些人的较短形式IAU 2000B来描述这个移动。

参考方程式（10-1），岁差/章动矩阵 $Q(t)$ 可以被写为：

$$Q(t) = \begin{bmatrix} 1 - aX^2 & -aXY & X \\ -aXY & 1 - aY^2 & Y \\ -X & -Y & 1 - a(X^2 + Y^2) \end{bmatrix} \bullet R_3(s) \quad (10-6)$$

其中

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{8}(X^2 + Y^2)$$

此处:

$X$  和  $Y$ : CIP在CRS中的“坐标”, 并由协议IAU 2000A或IAU 2000B模型提供, 它们基于地球物理和天文理论。

这个公式对由于日月和行星移动而造成极的移动进行建模。它不包括已经在文献中被称为“行星岁差”的移动, 它是由行星引力所引起的黄道(地球轨道移动的路径)移动。在2000年IAU批准这个程序来描述地球的岁差和章动之前, 黄道被用作一个基本参考平面, 且其移动由基于天文学理论的一个协议表达式来描述。组合的地球地极和黄道的岁差/章动被称为总岁差。

数量 $s$ 指定了天球星历表原点在地球中间极赤道上的位置。它由下式给出:

$$s = -XY/2 + \sum_{i=0}^{i=3} c_i t^i + \sum_k C_k \sin \alpha_k + 1.71t \sin \Omega + 3.57t \cos 2\Omega \\ + 743.53t^2 \sin \Omega + 56.91t^2 \sin(2F - 2D + 2\Omega) + 9.84t^2 \sin(2F + 2\Omega) - 8.85t^2 \sin 2\Omega \quad (10-7)$$

可以在IERS公约[McCarthy and Petit, 2003年]中找到实施以上所述算法的表格和软件。

### 10.2.2 极移

CIP也在TRF内移动, 但是这个移动不能被建模。所以, 必须观测并在坐标系之间的转换中适当考虑这个移动。这个移动以极坐标 $x$ 和 $y$ 表示, 单位是角度单位。 $x$ 指向沿着经度 $0^\circ$ , 而 $y$ 指向沿着西经 $90^\circ$ 。经度系统被TRF中所采纳地点的位置间接定义。

极移主要由一个近似线性漂移加上二个周期性项组成。第一个是地极的自由移动, 按照其发现者C.钱德勒而被称为钱德勒摆动。其周期是435天, 并且对应于非刚性地球的自由移动, 而它最初是由L.欧拉在1758年为一个刚性地球所预测的。极移的第二个主要成分是由地球大气质量的季节性再分布驱动的一个年度性移动。

这些移动的幅度很小, 但是对参考框架之间的精确转换非常重要。线性漂移是在西经 $75^\circ$ 方向每年数厘米。周期性移动将以数十米的幅度移动CIP。

数学上, 再次参考方程式(10-1), 这个旋转由下式给出:

$$W(t) = R_3(-s')R_1(y)R_2(x) \quad (10-8)$$

必须要观测并报告极坐标信息。可以从国际地球旋转和参考系服务(IERS)得到这些数据。他们提供包含最新数据和对将来预测的一系列文件。参见<http://www.iers.org/iers/products>。

对21世纪, 可以通过下式将 $s'$ 近似为时间的一个函数:

$$s' = -47 \mu\text{as } t \quad (10-9)$$

### 10.3 世界时(UT)

太阳时是基于地球相对于太阳的旋转。平太阳时是设计用来消除由于黄道倾角和地球在其围绕太阳轨道中速度的变化所引起的太阳时中的不规则性。它是和太阳沿着黄道的平均速度相同的速度匀速沿着天球赤道移动的一个假想点的时角。实际中, 它是天文上直接观测到并在之后通过除以1.00273790935变换到平太阳时间间隔的恒星时间间隔。

对经度 $0^\circ$ 子午线确定的平太阳时被称为UT1。为了确定这个时间和协调世界时（UTC）之间的差值要进行天文观测。对时间进行的原始观测被称为UT0，并且为了得到UT1必须对地球的极移进行修正。极移效应的量可以达到百分之几秒。IERS接收这些数据并维持一个UT1时间标度。

这些观测显示出地球旋转速度有变化，可以划分为三种类型：长期、不规则、和周期性变化。旋转速度的长期变化指主要由于潮汐摩擦力所引起的一天长度的明显线性增加。这个效应引起地球旋转速度减缓，导致一天变长大约0.0005至0.0035秒/世纪。在速度中的不规则变化表现为随机加速度的结果，但可以与地球表面或地球内的物理过程相关联。它们包括特征周期为5-10年的年代波动及在较短时间范围上发生的变化。

周期性变化与影响地球的周期性重复物理过程相关。由月亮和太阳在固态地球上引起的潮汐产生0.0005秒量级的一天长度的周期性变化，周期为1年、1/2年、27.55天和13.66天。

再次参考方程式（10-1），此旋转由下式给出：

$$R(t) = R_3(-\theta) \quad (10-10)$$

$\theta$  是日期 $t$ 时在CIP赤道上CEO和TEO之间的地球旋转角度。它得自于与UT1的约定关系 [Capitaine *et al.*, 2000年]：

$$\theta(T_u) = 2\pi(0.7790572732640 + 1.00273781191135448T_u) \quad (10-11)$$

此处：

$T_u = (\text{UT1儒略日期} - 2451545.0)$ ，和 $\text{UT1} = \text{UTC} + (\text{UT1} - \text{UTC})$ ，或等效

$$\theta(T_u) = 2\pi(\text{UT1 Julian Days elapsed since } 2451545.0 + 0.7790572732640 + 1.00273781191135448T_u)$$

自从 $2451545.0 + 0.7790572732640 + 1.00273781191135448T_u$ 起流逝的UT1儒略日。

注1—进一步细节请参见第7章-时间标度。

## 10.4 大地测量系统

如以上所解释，地球参考系的原点在地球的质量中心，其极轴与相对于地球外壳固定的一个轴的方向相关联。在赤道平面中的经度原点提供了第三个方向。地球参考框架由地点坐标和可能移动的一个列表构成。这些坐标能够被表示为一个地点的一组笛卡尔（ $x, y, z$ ）坐标。它们经常以在某些参考表面之上位置的纬度、经度和高度来描述。这个表面可以是一个参考椭圆或一个地球位势能表面。

## 10.5 参考面

### 10.5.1 大地水准面

地球可以被视为是由一系列表面构成的，每个表面具有相同的引力势能。这个势能不仅仅包括重力势能，还包括由于离心力所引起的势能。这些表面被称为地球等势面，而接近平均海平面的表面被称为大地水准面。它是一个自然参考面，是因为一条铅垂线垂直于这个表面，且沿着一条铅垂

线测量高度很容易。大地水准面是通常被称为平均海平面的表面。它是通过描述其沿着垂直于参考椭球的直线在该椭球以上的高度来定义的，这个高度被称为大地水准面起伏。

沿着铅垂线测量的表面地形在大地水准面之上的高度被称为平均海平面高度或正高。

### 10.5.2 椭球

出于参考的目的，采用一个参考椭球来描述一个地球的近似形状。它由一个半长轴（赤道半径）和扁率（赤道半径和极半径的关系）来详细说明。扁率被定义为：

$$f = \frac{a-b}{a} \quad (10-12)$$

此处：

a 和 b： 分别是赤道半径和极半径。

表面地形沿着垂直于该椭球的直线在该椭球之上的高度被称为椭球高度。例如，对WGS 84椭球， $a = 6378137.0 \text{ m}$  和  $f = 1.0/298.2572235630$ 。

### 10.5.3 坐标的类型

#### 10.5.3.1 地心坐标

地心坐标参照于地球的中心。这些能够以一个矢量的形式给出，即，一个地点的  $(x, y, z)$  笛卡尔坐标或地心纬度 $\phi'$ 和经度 $\lambda$ 。这二者之间的关系由下式给出：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \cos \phi' \cos \lambda \\ \cos \phi' \sin \lambda \\ \sin \phi' \end{bmatrix} \quad (10-13)$$

一个位置的地心纬度指一个参考椭球赤道与从该椭球中心到该位置的一条直线之间的角度。地心经度是该椭球参考子午线和该位置子午线之间的角度。

#### 10.5.3.2 大地测量坐标

大地测量坐标是参照于一个参考椭球而确定的。这些通常以大地测量纬度 $\phi$ 和大地测量经度 $\lambda$ 的形式给出。大地测量纬度是该椭球赤道和通过该地点的椭球法线之间的角度。地心纬度和大地测量纬度之间的差别显示在图10-1中。大地测量经度是该椭球参考子午线与该地点子午线之间的角度。如果在每种情况下参考椭球具有相同的轴和参考子午线，则它与地心经度相同。地心笛卡尔坐标可以通过下式与大地测量坐标关联：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} (N_\phi + h) \cos \phi \cos \lambda \\ (N_\phi + h) \cos \phi \sin \lambda \\ \left[ (1 - e^2) N_\phi + h \right] \sin \phi' \end{bmatrix} \quad (10-14)$$

此处:

$h$ : 椭球高度

$e$ : 由下式给出的椭球的偏心率:

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} = \sqrt{2f - f^2}$$

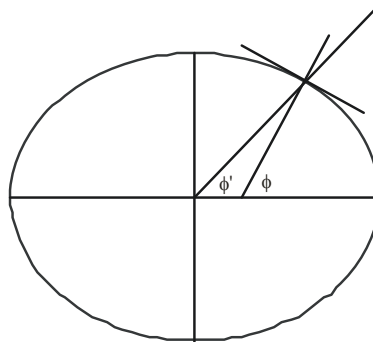
$N_\phi$ : 由下式给出的子午线中圆弧的椭球半径:

$$N_\phi = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}} \quad (10-15)$$

高度由椭球高度 $h$ 确定,它是沿着通过该地点的垂直于该椭球的直线所测量的该地点在参考椭球之上的距离。

图10-1

地心纬度 $\phi'$ 与大地测量纬度 $\phi$ 之间的差异

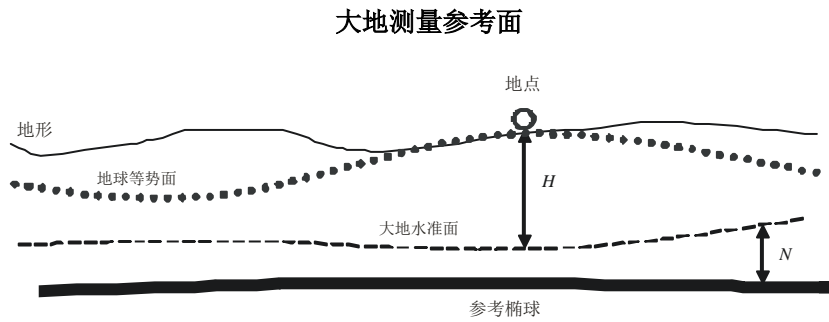


Sat\_time\_freq-10-01

### 10.5.3.3 天文坐标

天文坐标是通过参照本地垂线或铅垂线方向来测量的。本地垂线垂直于在该地点处的重力等势面。这些表面被称为地球等势面,而具有在海平面处地球势能的地球等势面被称为大地水准面。天文纬度则是该垂线方向和地球赤道平面之间的夹角。天文经度是包含该垂线的平面与参考子午线平面之间的夹角。该垂线的偏斜是椭圆法线与该垂线之间的夹角,并通过详细说明在南北方向和在东西方向上的角度分量来描述。该地点在大地水准面上的高度被称为平均海拔高度或正高 $H$ 。它是沿着该垂线方向测量的。大地水准面在一个参考椭球之上的高度被称为大地水准面波动 $N$ ,并沿着该椭球的法线测量。

图10-2



Sat\_time\_freq-10-02

### 10.5.3.4 大地测量基准

一个大地测量基准被用来提供地球的一个总体大地测量模型，并传统地通过一个参考椭球和确定一个起始点来定义。现代空间大地测量学现在已经使得有可能提供一个直接与地球中心相关的参考系统而无需使用一个参考椭球。这些观测经常被用来提供包含一组参数并定义地点坐标的一个基准，它可以被用来通过相对于该指定地点的差分测量扩展该系统。基准之间的转换可以由以下表达式来表示：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_2 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_1 - \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} D & -R_3 & R_2 \\ R_3 & D & -R_1 \\ -R_2 & R_1 & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_1 \quad (10-16)$$

此处：

平移参数 ( $T_1, T_2, T_3$ )、旋转参数 ( $R_1, R_2, R_3$ ) 和比例参数是通过比较地点在二个不同基准中的坐标来从经验上确定。

### 10.5.3.5 国际地球参考框架

国际地球旋转和参考服务 (IERS) 提供国际地球参考系作为国际标准。该参考系的原点是包括海洋和大气的地球质量的地理中心，并且它被定义为没有相对于地球表面上水平移动的球面残留旋转。按照国际建议，长度的单位是米 (SI)，为地心本地框架提供了与TCG时间坐标一致的一个标度。

由IERS ITRS产品中心制定的ITRS实现被称为国际地球参考框架 (ITRF)。它从空间大地观测推演出来。当前，ITRF解算值几乎每年由ITRS-PC在IERS技术通告中发布。跟随在名称“ITRF”后面的数字 (yy) 指明其数据被用在该框架构成中的最后一年。因此，ITRF97指明了采用直到1998年可以得到的所有IERS数据在1999年构成的电台位置和速度的框架。

ITRF工作组关于ITRF基准的报告[Ray *et al.*, 1999年]包含了与ITRF基准定义历史相关的有用信息。它还详述了在一些基准定义参数上的技术特定影响，特别是原点和标度。



## 参考文献

- CAPITAINE, N., GUINOT, B. and MCCARTHY, D. D. [2000] *Astronomy & Astrophysics*. p. 355-398.
- GUINOT, B. [1979] *Time and the Earth's Rotation*, IAU Symp. 82, ed. D. D. McCarthy & J. D. H. Pilkington, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, 7.
- MCCARTHY, D. D. and PETIT, G. (editors) [2003] *IERS Conventions (2003)*, *IERS Technical Note 32*, International Earth Rotation Service.
- RAY, J., BLEWITT, G., BOUCHER, C., EANES, R., FEISSEL, M., HEFLIN, M., HERRING, T., KOUBA, J., MA, C., MONTAG, H., WILLIS, P., ALTAMIMI, Z., EUBANKS, T. M., D. GAMBIS, PETIT, G., RIES, J., SCHERNECK, H. G., SILLARD, P. and P. [1999] Report of the Working Group on ITRF Datum.



## 第11章

### 传播和环境因素

页码

11.1	引言 .....	132
11.2	地球对流层和电离层距离时延的对比 .....	132
11.3	地球对流层距离时延建模 .....	133
11.3.1	电离层和对流层距离时延的可变性 .....	134
11.4	电离层的时延、其世界范围特性、每天可变性和太阳活动周可变性.....	134
11.4.1	对电离层时延的修正方法、月平均模型、更新模型、SBAS/WAAS/IGS电离层实时数据的使用、双频修正 .....	136
11.4.2	电离层对于时延的高阶影响 .....	138
11.4.3	闪烁效应 .....	138
11.5	结论 .....	139
	参考文献.....	139

## 11.1 引言

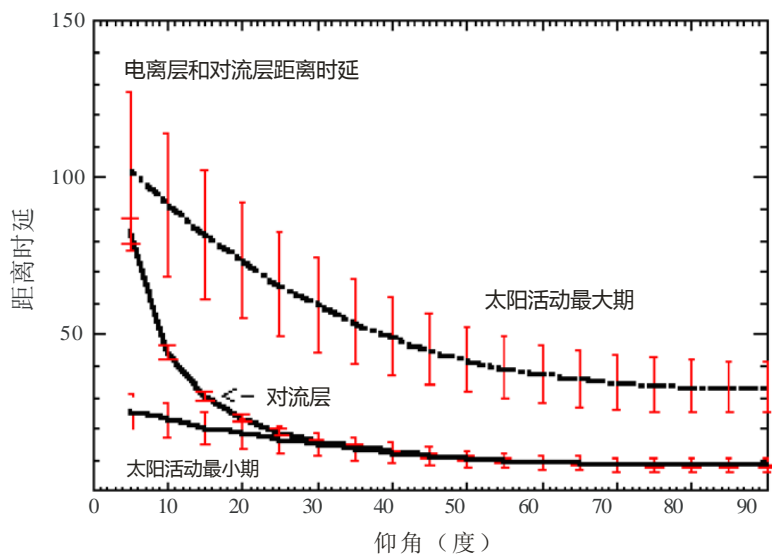
通过卫星进行精确时间传递的最大潜在误差来源是地球中性大气和电离层的传播时延。在本节中将概述这些距离时延，并将介绍和讨论对它们进行补偿的各种技术。对流层和电离层的距离时延在多个重要方面不同。地球对流层的距离时延不是色散性的；即，它不是频率的函数，至少对用于人造卫星测距的标准无线电频率范围不是。另一方面，电离层的距离时延是色散性的；它与频率成反比变化。因此，通过在二个适当分开的频率测量相对距离时延，能够直接计算出沿卫星到用户路径的绝对距离时延。不能直接测量地球对流层的距离时延，但是，多个模型或间接测量技术能够被用来以高准确性推断对流层时间延迟对通过卫星进行时间传递的贡献。

## 11.2 地球对流层和电离层距离时延的对比

图11-1显示了不同太阳活动条件下在GPS L1频率处地球对流层和中纬度电离层的典型距离时延-仰角特性曲线。在图11-1中有多个重要的事情需要注意。首先，在太阳活动最小期情况的期间，在高仰角的电离层距离时延类似于中纬度电离层。其次，从天顶到5°仰角，距离时延随仰角的变化对于电离层是以大约3的因子变化，但是对于对流层是以大于10的因子变化。当然，这是由于对流层比电离层更接近地球表面所引起，而且，在低仰角观测比通过在更大高度的电离层进行观测更倾斜。

图11-1

对流层和中纬度电离层距离时延-仰角特性曲线的对比



Sat\_time\_freq-11-01

最后，请注意在图11-1中的大约 $1\sigma$ 的误差条。在所有太阳活动情况期间，对平均电离层距离时延的误差大约是 $\pm 25\%$ ，而对流层的 $1\sigma$ 误差条少于大约 $\pm 5\%$ 。此外，由于地球对流层所引起的距离时延要稳定得多，在整个地球上变化少于20%。这是因为接近90%的对流层距离时延是由于所谓的地球对流层“干燥成分”所引起的，正比于绝对压力和绝对温度，对于生活在地球上的我们是很幸运的，它通常变化不超过标称值的百分之几。因为大部分对流层是由“干燥成分”所形成，其距离时延比地球电离层更易于建模。

### 11.3 地球对流层距离时延建模

有很多地球对流层的模型，它们中有些已经被Spilker评论过[1996]。大多数对流层模型的基础就是将天顶距离时延与较低仰角时延相关联的一个仰角函数。尽管每个仰角函数多少有些不同，但是它们大多数仅仅要求确定天顶距离时延，然后乘以作为仰角函数的一个数来得到在所观测卫星在该仰角的等效要求时延。有确定垂直距离延时的气候学方法，和通过近实时测量确定实际垂直时延的方法，这个近实时测量采用来自处于不同仰角的多颗GPS卫星的精确双频数据，并将距离时延拟合为在该时刻的最佳拟合仰角函数。通过采用这个曲线拟合技术，能够得到接近1-2 cm的距离时延修正值的准确性。

对流层所引起的垂直距离时延由下式近似给出：

$$\Delta r = 10^{-6} c \int N(h) dl \quad (11-1)$$

此处：

$c$ ： 光速，单位 m/s；

$N(h) dl$ ： 对流层的总折射率，以折射率单位给出。

很多天顶距离时延形式其中之一如下，在其中，干燥或流体静力学项和所谓的“潮湿”项被分开，且可以考虑本地温度、压力和水蒸气：

$$\Delta r_{total} = \Delta r_{Dry} + \Delta r_{Wet} \quad (11-2)$$

$$\Delta r_{dry} = \frac{0.62 \times P_{millibars}}{T_{Kelvin}} \quad (m) \quad (11-3)$$

此处：

$P$ ： 总压力，单位mbar。

$$\Delta r_{wet} = \frac{8.3 \times 10^2 \times P_{WV}}{T^2} \quad (m) \quad (11-4)$$

此处：

$P_{WV}$ ： 水蒸气分压力。

采用典型数值，压力为1 013 mbar、温度为15° C或288° K、和分水压为8.5 mbar，对应于50%相对湿度，则总垂直对流层距离时延是：

$$\Delta r_{total} = 2.18 + 0.08 = 2.26 \quad (m) \quad (11-5)$$

对这个典型情况，由于大气中的水蒸气所引起的“潮湿”分量仅仅是0.08/2.26 = 3.5 %总垂直对流层距离时延。

对各个纬度仅仅要求一个平均对流层距离时延的用户能够采用一个单一的全世界恒定值，近似由下式给出：

$$\Delta r = \frac{2.47}{\sin E + 0.0121} \quad (m) \quad (11-6)$$

此处：

$E$ ： 仰角。

一个简化的映射函数是：

$$m(E) = \frac{1.0121}{\sin E + 0.0121} \quad (11-7)$$

已经由Collins和Langley[Collins and Langley, 1999年]提出了一个气候对流层距离时延模型，它已经针对来自北美很多电台实际无线电探空仪数据进行过广泛测试。他们以相对于标准或高斯残量偏移的形式描述了它们的结果。他们的模型被称为UNB3，大约从 $-5\sigma$ 到 $+4\sigma$ 点遵循高斯分布，这对于一个没有实时输入的气候学模型是值得赞的特性。对该模型的限制因素已经在 [Collins and Langley, 1996年]中描述。

### 11.3.1 电离层和对流层距离时延的可变性

如上所示，地球对流层距离时延的可变性主要是受大气层中水蒸气含量的影响。但是，由于水蒸气造成的天顶距离时延的绝对幅度仅仅是数厘米的量级，且即使对于低仰角，它可能也不是总距离误差中的一个主要因素。地球电离层距离时延的绝对可变性要大得多，但是如下所述，采用一个双频GPS接收机几乎能够将其完全消除掉。

对电离层和对流层距离时延修正需要最高精确修正值的那些人应采用一个双频修正值来消除一阶电离层距离时延，然后应该考虑采用对于残留距误差-仰角的“拟合”函数来独立确定对流层距离时延。如果只有一个单频GPS接收机可用，则即使在采用各种电离层修正方法之一之后，残留电离层距离时延将仍可能大于对流层的残留距离时延，即使它采用一个距离时延的气候学模型，例如UNB3模型。

## 11.4 电离层的时延、其世界范围特性、每天可变性和太阳活动周可变性

电离层的距离时延是色散的；即，它以如下方式与频率相反变化：

$$\Delta t = \frac{40.3}{cf^2} \int_0^{Sat.} Ndl - (s) \quad (11-8)$$

此处：

$\int_0^{Sat.} Ndl$  沿着从地面测量点到卫星的无线电波路径的自由电子积分数量，普遍被称为沿着此路径的斜向电离层总电子含量 (TEC)

:

$c$ ： 光速，单位为 m/s

$f$ ： 系统工作频率 (Hz)。

因为电离层距离时延是频率的一个函数，对其在时间传递上影响的最佳修正方法是简单地在隔开足够远的个频率上对其进行测量，并由此直接测量电离层时延。其他方法都是不太直接的，且必定是准确性较低的。

地球TEC的典型数值从 $10^{16}$ 到 $10^{19}$   $\text{el}/\text{m}^2$ 变化。从 $10^{16}$ 到 $10^{19}$   $\text{el}/\text{m}^2$  TEC值对应的单向电离层时延-频率特性显示在图11-2中。图11-2中采用一根垂线显示1.57542 GHz的GPS L1频率。TEC中幅度近似3个量级的较大变化是由很多因素所引起，其中有一天的时间、季节、电台位置、和太阳紫外线离子通量。

图11-2

从 $10^{16}$ 到 $10^{19}$   $\text{el}/\text{m}^2$ 不同TEC值情况下单向电离层距离时延的频率函数。  
GPS L1 频率由在1.575 GHz处的一根垂线表示

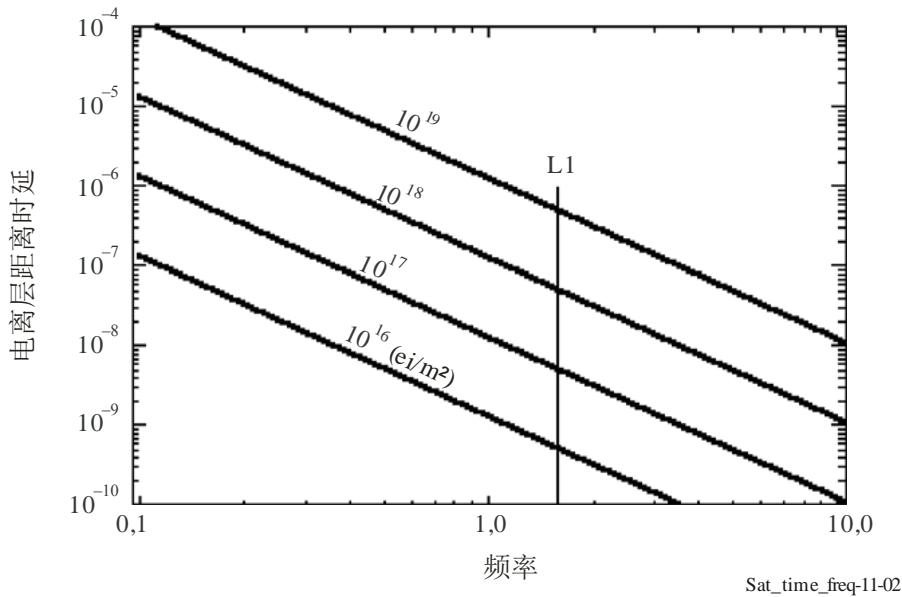
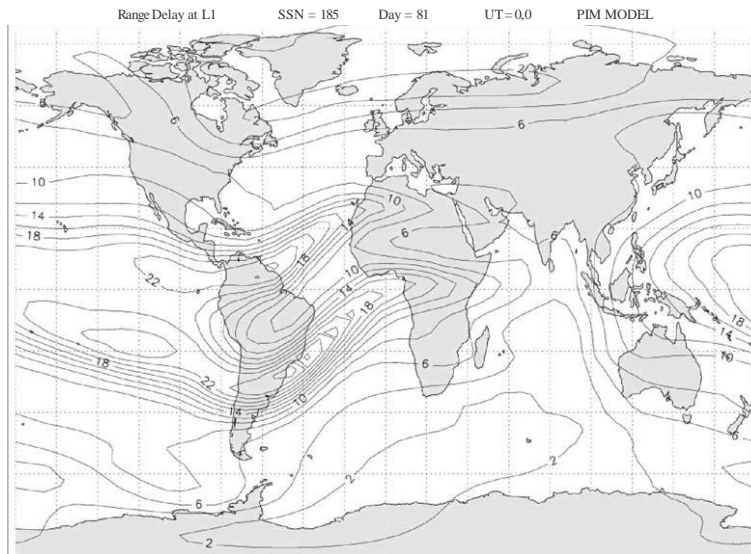


图11-3显示了对于太阳活动极大期平分条件下在GPS L1频率处以米为单位的全世界月平均电离层垂直距离时延。请注意，最大距离时延不是发生在地理赤道处，而是在地磁赤道二侧大约 $\pm 15^\circ$  纬度处。虽然平均距离条件的这个模型表达在L1显示出仅仅24米的最大值，但绝对值可以大得多，而且每天可变性通常也很高。

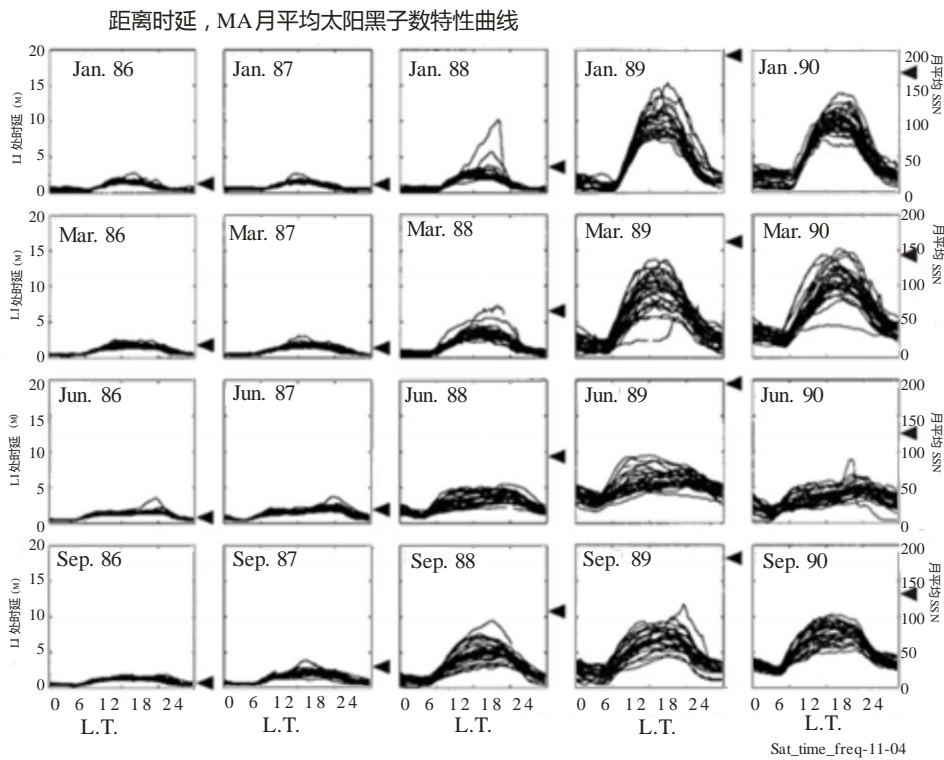
通过对位于靠近马萨诸塞州波士顿的一个电台在从1986年到1990年1月、3月、6月和9月4个月中每天的时延值进行绘图，图11-4显示了北方中纬度电离层的日、季度和太阳活动周可变性，这是太阳活动周中太阳活动增加的一段时间，峰值在1989-90年时间段中。请注意在任何指定月份中周日时延曲线中较大的每天可变性，以及季节效应，在二分点月中具有比在至点月中更大的绝对值，并且在6月份中具有特别低的数值。请注意随着太阳活动周从1986年到1989年和1990年增加时绝对时延中大的改变。不采用一个时间上接近测量进行更新的电离层距离时延模型只能期望复制月平均距离时延；因此，在未修正的电离层距离时延中留下大约25% r.m.s.的残留日可变性。

图11-3  
 太阳活动极大期平分条件下，在GPS L1 频率处  
 世界范围中间电离层距离时延，单位：米



Sat\_time\_freq-11-03

图11-4  
 在GPS L1 频率处，太阳活动增加的5年中4个月的  
 等效垂直电离层距离时延周日曲线的月度图。  
 采用每个月度图右侧的大箭头指示每个月的月平均太阳黑点数量（SSN）





### 11.4.1 对电离层时延的修正方法、月平均模型、更新模型、SBAS/WAAS/IGS电离层实时数据的使用、双频修正

未被修正时，由于TEC造成的典型GPS垂直伪距误差可能是在10-25 m的量级。事实上，作为其中月度平均垂直距离时延值通常仅有10 m量级的一个地区，美国东南大陆正南方的垂直电离层距离时延在最近二次大地磁风暴期间达到了40 m以上。幸运的是，对于电离层对时间传递的影响有多种修正方法。这些在以下给出，以无意进行修正的（平常）情况作为开始，一直到提供最好修正的双频修正技术，虽然在初始设备上有适度的成本增加，但是消除了对电离层的顾虑，至少降到数厘米量级的修正值。

至少有5种不同的修正电离层距离时延影响的方法。将讨论这些方法中的每一种，以及在实现修正中的相对难度。这些方法产生了以下的近似修正：

- 0%** – 无意修正电离层距离时延。这是一个平常的情况，但是出于完整的原因而被包括进来。即使对每个季节和位置都是一个“常数”修正值，不与周日相关，也将是胜于这个“无作为”情况的相当大改善。
- 50%** – 采用设计用来修正大约一半（r.m.s.）电离层距离时延的电离层修正算法（ICA）。这是几乎被所有单频GPS接收机所使用的标准修正。ICA的系数作为卫星电文的一部分被发射，且至少每十天一次由GPS主控设施更新，如果在十天期间5天运行平均太阳无线电流量中有显著变化时，或将更加频繁。因为GPS电文长度的限制，ICA被限制到仅仅8个系数[Klobuchar, 1987年]。
- 75%** – 采用一个最先进的电离层模型，要求数千个系数，但它将电离层距离时延月度平均表现拟合到大约10%的残留偏差之内。典型的模型是国际参考电离层（IRI）[Bilitza, 2000年]，和Bent模型。二种模型都可以通过互联网得到。当包括了根据月度平均设定的偏置时，使用这样的模型仍让GPS用户苦于应付大约20-25%的剩余每天可变性和因此导致的大约22-27%的一个 $\sigma$ 误差。请注意，这个量级的修正值仍不采用任何实时输入，而仅仅依靠一个最先进的模型来比仅仅采用8个系数的ICA更加准确地描述月度平均电离层特性。因此，通过将系数的数量从8个增加到数千个，改善从大约50%增加到大约75% r.m.s。
- 90%** – 采用作为部分SBAS增强电文传输的星基增强系统（SBAS）电离层修正值。这样的电文由WAAS和EGNOS提供，如在第二章中对增强系统所描述。这个极大改善的修正提供从一个SBAS参考站网络得到的近实时电离层距离时延数据，它们被用来在覆盖区域上产生 $5^\circ \times 5^\circ$ 纬度和经度网格点的一个等效电离层距离时延修正网格。当然，这个修正技术仅仅被用在存在一个SBAS和有适当地面参考站来测量电离层距离时延的地区中。采用实际近实时电离层数据进行改善是以需要一个也能接收SBAS信号的单频GPS接收机为代价的。例如采用WAAS，即使采用近实时距离时延数据，仅90%的估计修正是由于需要从WAAS所提供的垂直电离层距离时延的 $5^\circ \times 5^\circ$ 网格值插值到沿着到每颗被用户所监视GPS卫星视线的等效倾斜距离时延而造成的。
- 99%** – 采用如在关于GPS的第一章中和在涉及时间传递的几章中所描述的双频接收机来基本消除沿着到每颗正被监视GPS卫星路径上的所有电离层距离时延。这个方法直接测量沿着每颗GPS卫星路径上的视线倾斜电离层距离时延，并且不涉及模型计算，也不涉及对沿着另外一条路径测量的距离时延值进行插值。它是到目前为止所用的最佳修正技术，并且在新L5频率在未来GPS和伽利略卫星上全面实施时应成为所有民用GPS用户的标准，很可能是在21世纪第二个十年的初期。

以上每个百分比的修正量级都带有某种代价。当然，零修正具有最大误差的代价，99%修正因为需要一个双频GPS接收机而具有明显更高的成本。因为关于ICA实施的方程式已在接口控制文件ICD-200中给出，并且它是用在单频GPS用户接收机中的标准程序，采用ICA来修正电离层距离时延误差的大约50% r.m.s.只有一个小的代价。

#### 11.4.2 电离层对于时延的高阶影响

将电离层时延与TEC相关联的方程式11-1采用电离层折射率的一阶形式。忽略掉幅度小于 $10^{-9}$  [Brunner and Gu, 1991年]的那些项以后，折射率的完整形式包括多个附加项，包括：

$$n = 1 - (X/2) \pm (XY/2) \cos\theta - (X^2/8) \quad (11-9)$$

此处：

- 1: 自由空间项
- X/2: 一阶项，正比于 $1/f^2$
- XY/2 cos $\theta$ : 正比于 $1/f^3$
- X<sup>2</sup>/8: 正比于 $1/f^4$ 。

如果这些项被分别称为A、B、和C，对于最大世界范围电离层条件，在GPS频率处高阶项的幅度是：

$$B \approx 2 \times 10^{-4}, \quad C \approx 2 \times 10^{-7}, \quad D \approx 2 \times 10^{-8}$$

同样，在最差电离层条件下，高阶项C和D与一阶项B的比值是：

$$C/B \approx 10^{-3}, \quad D/B \approx 10^{-4}$$

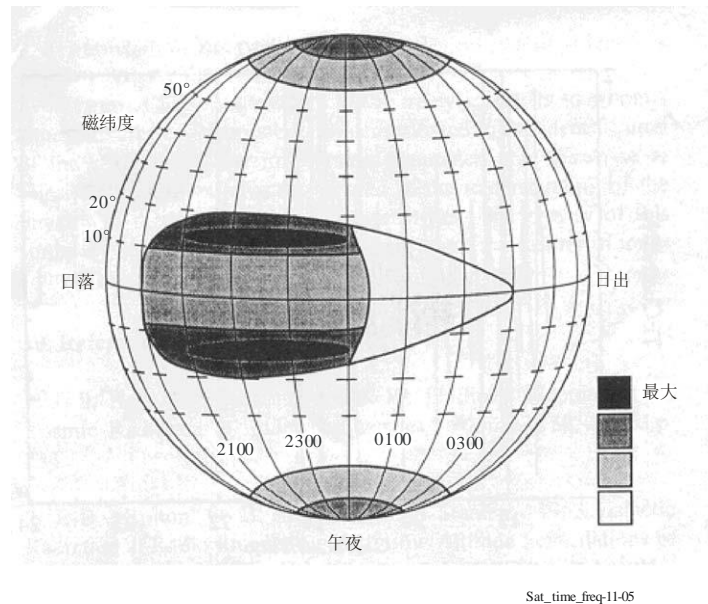
因此，这些高阶项在GPS频率处是一阶项的0.1%和0.01%，甚至对于这里所考虑的极高电离层。Ioannides和Strangeways [Ioannides和Strangeways, 2002年]已经得到了类似的结论，其中对高阶项的最大贡献仅仅是数厘米。

#### 11.4.3 闪烁效应

幅度和相位闪烁都能影响各种GPS接收机的短期性能。但是，在中纬度地区中发生显著闪烁衰落或相位闪烁“抖动”效应可能性是非常小的。即使在靠近赤道的地区，那里采用一些信号的时间平均，闪烁效不应该是问题。在赤道地区，深度幅度衰落效应通常仅仅发生在日落之后直到本地的半夜，而且，仅仅在相对高太阳活动年的二分点月期间。在图11-5中显示了时间和具有各个量级闪烁的世界地区的一个图形表示。已经对闪烁效应进行了各种评论，包括由Goodman和Aarons [Goodman and Aarons, 1990年]所做的评论，在其中，对普遍用在卫星通信和时间传递中的各种频率描述了幅度闪烁的形态。闪烁对通过卫星进行的精确时间传递可以是一个限制，但是可以简单地通过躲避其通常发生的时间和日期段来将闪烁效应降到最低。例如，尽管能够在GPS频率上产生信号中断的深度幅度衰落在极光纬度是罕见的，如果可能，避免在磁干扰期间进行时间传递。类似地，避免在近赤道地区本地日落之后进行时间传递，特别是在高太阳活动年份期间。最后，最好总是实时监视每颗GPS卫星的接收机载噪密度比 $C/N_0$ ，以持续保持一个可靠的方法来确定深度幅度闪烁是否可能正在影响所接收的信号。

图11-5

采用磁坐标和本地时间的世界地图，  
显示闪烁通常发生的地区



## 11.5 结论

能够给予时间传递界的关于电离层时延对时间传递影响的最好建议将是快跑，而不是慢走，到最近的卖双频GPS接收机的地方，并为卫星时间传递链路的每一端购买一部。采用一个双频GPS接收机纯粹是绝对最好的方法，它保证了超过99%的电离层距离时延将自动从所有卫星路径上被消除。当不能使用一部双频GPS接收机时，如果在世界上要进行时间传递的地区中可以得到SBAS（WAAS, EGNOS）电离层修正值，则采用这些修正值来提供电离层时延值。如果没有可用的SBAS电离层修正值，则来自一个附近IGS站的TEC数值应该提供比任何非更新电离层模型更好的一个修正值。

## 参考文献

- BILITZA, D. [2001] The International Reference Ionosphere 2000. Radio Science, Vol. 236, p. 261-275.
- BRUNNER, F. K. and GU, M. [1991] An Improved Model for the Dual Frequency Ionospheric Correction of GPS Observations. Manuscripta Geodaetica, Vol.16, p. 205-214.
- COLLINS, P. and LANGLEY, R. B. [July 1999] Tropospheric Delay Prediction for the WAAS User. GPS World, p. 52-58.
- COLLINS, P., LANGLEY, R. and LAMANCE, J. [19<sup>th</sup>-21 June, 1996] Limiting Factors in Tropospheric Propagation Delay Error Modelling for GPS Airborne Navigation. Presented at The Institute of Navigation 52<sup>nd</sup> Annual Meeting, Cambridge, Massachusetts, USA.
- GOODMAN, J. M. and AARONS, J. [1990] Ionospheric Effects on Modern Electronic Systems. Proc. of the IEEE, Vol. 78, p. 512-528.

- IOANNIDES, R. T. and STRANGWAYS, H. J. [August 2002] Improved Ionospheric Correction for Dual Frequency GPS. Proceedings of the XXVIIth General Assembly of URSI, Maastricht, Netherlands.
- KLOBUCHAR, J. A. [May 1987] Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-23, No. 3, p. 325-331.
- SPIPKER, Jr. J. J. [1996] Tropospheric Effects on GPS. Chapter 12 in *Global Positioning System: Theory and Applications*. Edited by B. W. Parkinson and J. J. Spilker, Jr., publ. by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Washington, DC. Vol. 1, p. 517-546.

## 第12章

全球导航卫星系统 –  
作为时间传递的一个主要工具

页码

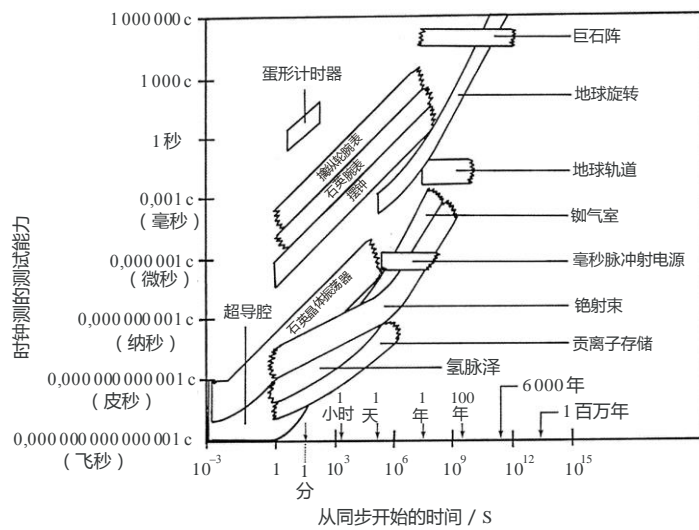
12.1	引言 .....	142
12.2	GPS和时间 .....	143
12.2.1	GPS如何播发时间? .....	143
12.2.2	GPS如何通过长距离来同步时钟? .....	144
12.3	GPS时间传递的应用 .....	144
12.3.1	GPS C/A-码单通道共视时间传递 .....	146
12.3.2	单址比较(零基线) .....	146
12.3.3	GPS差分校准 .....	146
12.3.4	环绕世界闭合 .....	147
12.4	GPS与其他时间传递技术的比较 .....	147
12.4.1	与双向卫星时间和频率传递的比较 .....	147
12.4.2	与激光时间传递的比较 .....	148
12.5	GPS时间传递中最近的进展 .....	149
12.5.1	多通道共视GPS时间传递 .....	149
12.5.2	温度稳定天线 .....	151
12.5.3	使用GPS载频相位 .....	152
12.6	使用GLONASS .....	152
12.7	结论 .....	153
	参考文献 .....	154

### 12.1 引言

经过多年，我们一直用来测时的时钟已经变得不仅更加精确，而且也更加准确。图12-1描绘了在一个广泛时期范围上不同形式时钟的性能水平。从上到下有一个从最不准确到更加准确的进步。此图的下部是对最近历史的描述。今天，我们临近采用具有 $1 \times 10^{-16}$ 频率准确性能力的时钟。这对应于具有维持对应于10 ps/天性能水平能力的一个时钟。

图12-1

时钟的测时能力  
(此图承蒙D. W. Allan提供)



Sat\_time\_freq-12-01

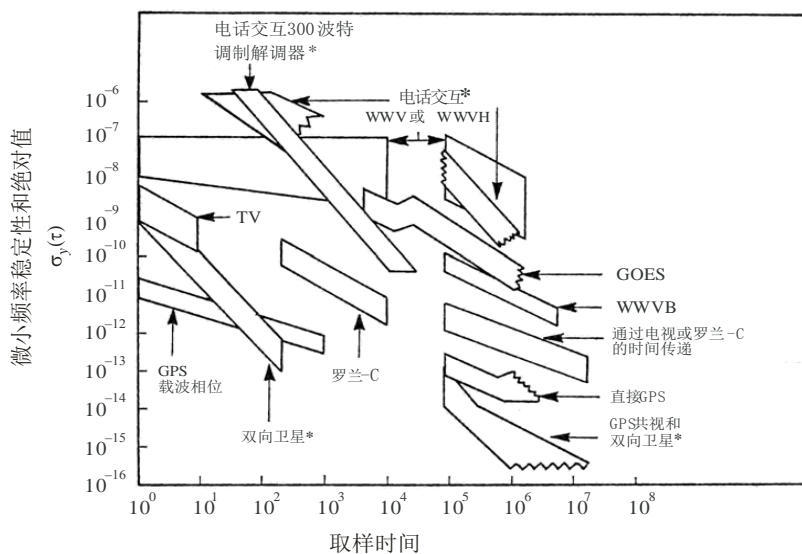
在许多年中，测时界已经使用了很多不同的技术和系统来帮助他们完成同步时钟或时间传递的任务。图12-2显示了这些系统中某些的性能水平。它们包括使用：

- 陆地通信系统，例如电视和电话 (MODEMS)；
- 直接无线电广播 (WWV 和 WWVH)；
- 导航系统，例如罗兰-C 和 GPS；
- 卫星通信系统，例如双向卫星时间和频率传递 (TWSTT)。

因为时钟已经变得更加精确和准确，测时界已经考虑更精确和更稳定的系统来帮助他们进行同步。对测时界，GPS是对解决传统测时问题的一个重要贡献者。它是一个可靠的时间源，而且它也是一个可靠的时间传递系统。

图12-2

不同时间传递技术的性能  
(此图承蒙D. W. Allan提供)



Sat\_time\_freq-12-02

## 12.2 GPS和时间

GPS是已经被证明对军用和民用都是一个可靠定位源的一个导航系统。但鲜为人知的一个事实是GPS已经证明它自己对测时是一个重要和有价值的设施[Klepczynski *et al.*, 1996年]。GPS是能够被用于将时间播发给任意多用户并以高精确性和准确性程度通过长距离同步时钟的一个多用途和全球工具。本文将主要讨论GPS是如何被测时界用于这些目的，并将介绍在此领域中最近的发展。

### 12.2.1 GPS如何播发时间?

作为导航解决方案的一部分，包含在GPS接收机中的计算机能够计算包含在用户接收机中的时钟与GPS时间或用于GPS的参考时间（UTC（USNO），即，在美国海军天文台确定的UTC）之间的差值。包含在一个用户GPS接收机中的时钟通常是一个石英晶体时钟。但是，在某些情况下，一个铷频率标准或一个铯射束频率标准这样的外部时钟可以作为一个GPS接收机的本地参考。本地接收机能够被程序控制来显示如由GPS所广播的UTC（USNO）或GPS时间，因为导航解决方案产生本地接收机时钟与GPS时间之间的差值。应该指出，UTC（USNO）被引导到由BIPM确定的UTC。UTC（USNO）通常被保持在UTC的大约10 ns 之内。

测时界超过导航界的一个优点是它所需要GPS卫星的数量。导航者需要4颗卫星来确定他们的位置；三颗用来获得它们的位置，及一颗用来确定它们本地时钟与GPS时间的偏移。因为测时器是在固定的位置并知道它们的位置，它们仅仅需要一颗GPS卫星来获得它们的本地时钟对于GPS时间的偏移。因此，它们已经利用这一事实修改了它们测时接收机中的算法。

作为导航解决方案的一部分，包含在GPS接收机中的计算机能够计算GPS时间或用于GPS的参考时间（即UTC（USNO））和包含在用户接收机中的时钟之间的差值。包含在一个用户GPS接收机中的时钟通常是一个石英晶体时钟。但是，在某些情况下，像一个铷频率标准或一个铯射束频率标准这样的外部时钟能可以作为一个GPS接收机的本地参考。本地接收机能够被程序控制来显示UTC，因为导航解决方案产生本地接收机时钟与GPS时间之间的差值。

测时界超过导航界的一个优点是它所需要GPS卫星的数量。导航需要4颗卫星来确定它们的位置；三颗用来获得它们的位置，一颗用来确定它们本地时钟对于GPS时间的偏移。因为测时器位于固定位置且知道它们的位置，它们仅仅需要一颗GPS卫星来获得它们本地时钟对于GPS时间的偏移。因此，它们已经修改了它们测时接收机中的算法来利用这一事实。

### 12.2.2 GPS如何通过长距离来同步时钟？

它是通过一种被称为GPS共视的技术来进行的。在共视技术中，二个电台同时观测同一颗GPS卫星。在二个电台的每个用户必须在相同的瞬间利用同一颗卫星使用一个被称为GPS时间传递单元（TTU）的GPS接收机记录其本地时钟（T）或本地时间参考与GPS时间的差值。一个GPS TTU是一个程序控制的计算和显示测时界所关心内容的特别GPS接收机。

$$\text{用户A观测: } A = T_a - \text{GPS时间} \quad (12-1a)$$

$$\text{用户B观测: } B = T_b - \text{GPS时间} \quad (12-1b)$$

为使一些误差的影响最小，至关重要的是二个用户应在相同瞬间观测同一颗卫星 [Allan and Weiss, 1980年]。通过计算二组数字之间的差值：

$$A - B = (T_a - \text{GPS时间}) - (T_b - \text{GPS时间}) = T_a - T_b \quad (12-2)$$

因为共同的GPS时钟抵消了，能够容易地计算二个本地时钟之间的差值。这是一个非常简单但有效的处理，因为它不依赖于GPS时间。

在很多年中，已经在改善GPS的时间播发的精确性和准确性及时钟同步能力上取得了显著的进步。现在，我们在采用一个粗捕获（C/A）码接收机的单向时间播发中处于10-25 ns的水平，而在时间同步处于2-15 ns的水平。很多数值被提供给这些估计来表明经验已经显示所能达到的水平取决于用户和地点特性。这些时数值是在不同领域中的用户当前所得到结果的代表，例如通信和测量学。

## 12.3 GPS时间传递的应用

在一个通信网络内，主要的节点必须被同步[Butterline, 1993年]。这可以从内部（通过同步脉冲）或外部（通过同步）完成。GPS轻易地提供使一个网络内主要节点上的时钟外部同步能够在时间上好于100 ns和频率上好于 $1 \times 10^{-13}$ 的能力。对通信行业而言，这满足了它们要求时间上1 ms和频率上 $1 \times 10^{-11}$ 准确性的Stratum I级要求。

在一些电信网络中，时间和特别是频率是采用一个原子时钟组合来保持的，例如铷频率标准，它们通过GPS同步到UTC。通常，在组合中每个铷钟相对于UTC的速率是通过在一定时间间隔上平均GPS观测值来确定的。选定的间隔取决于所涉及的特定系统的要求。为了保证当因为某些原因失去与GPS的联系时能够采用最后观测的数值来推算铷钟相对于UTC的速率偏移，直到与GPS的联系被重新建立起来，需要以可以达到的最佳精确性和准确性知道每个铷钟速率和UTC之间的差值。如果失去联系，这对所涉及的通信系统可能或可能不意味着立即的问题。它完全取决于将需要多长时间



使节点之间的同步恶化到它们之间不再一致通信的地步。这可能需要1小时到数星期，取决于所涉及的特定系统。

电力行业正越来越多地为了时间而依赖于GPS。为了定位它们所关心区域内电力业务中的故障，电力公司现在正在采用GPS来同步在它们监控站中的时钟。它们通过三角测量来定位一个故障的来源（一条电力线路中断），即，通过知道其在三个时钟被同步的站所发生的时间。电力工业还需要在不同地区服务提供商之间具有同步的时钟。当需要有效地从一个电网向另外一个电网传递电力时，同步很重要。从一个电网向另外一个电网异相传递电力降低了总的可用功率。

时间测量大约在15年前开始使用在国家标准局（NBS，现在是国家标准和技术研究所，NIST）的GPS信号。将GPS卫星的CV观测用于准确时间和频率传递的一个系统被建议 [Allan and Weiss, 1980年]，而且特别设计用于此目的接收机首先在NBS制造出来，继而在多个商业公司。这些是单通道单频C/A码接收机，在一个时间只能跟踪一颗卫星。为了使用它们，必须要发布CV观测的周期性时刻表。CV方法很聪明并且有广泛影响：它不仅减少了物理原点的某些不确定性，并且进而取消了在1990年以选择可用性（SA）名义引入的GPS时间的故意降级[Lewandowski and Thomas, 1991年]。

GPS的引入在时间和频率传递中带来了一个显著的改善。在GPS使用的早期阶段期间，时间比较的不确定性范围从10至20 ns，首次能够采用大约10天的积分时间来比较处于最高水平的世界上最好的原子标准。从那时起，已经引进了很多改进，包括采用超准确天线坐标、精确星历表、和电离层测量[Lewandowski and Thomas, 1991年]。它们使得在1990年代初达到大约3 ns的时间比较不确定性。这与原子标准中的改进并行进行，它们在幅度上进步了一个量级并使得可能对处于最高性能水平的新时钟（例如，HP5071A铯射束频率标准）进行多天时间平均的比较。

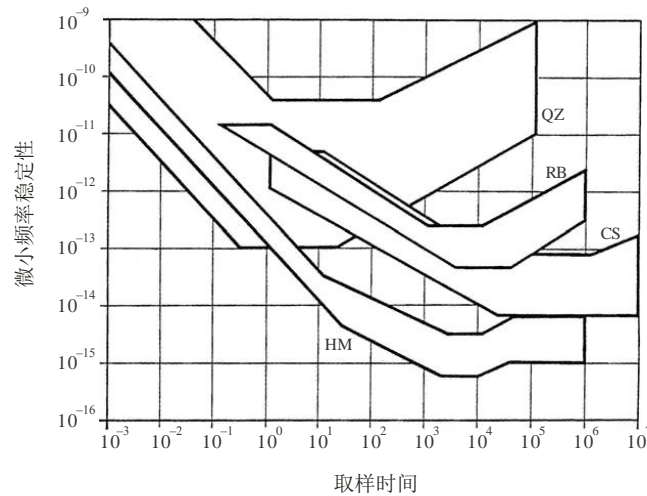
我们今天在测量学中见证了多个新的和创新的频率标准的诞生。这些设备看来正在接近 $1 \times 10^{-15}$ 的准确性，并且使短期不稳定性接近 $1 \times 10^{-16}$ 。经常以从1秒到数月范围广泛的一个时间间隔上频率变化的方差来描述一个频率标准的性能。这些被用于描述一个时钟性能的统计公式有很多不同的数学变化。图12-3显示了一个： $\sigma_y^2(\tau)$ ，或者，如它有时被称呼的艾伦方差[1987年]，用于多种不同的频率标准，例如，石英、铷、铯、和氢脉泽。这样一个频率标准性能的图形表达展示了不同的特性，它们是在频率标准内所发生噪声过程的一个函数。事实上，曲线的斜率能够被用来确定噪声的类型。一条斜率为零或平行于坐标轴的曲线显示出已经达到了一个标准稳定性中的极限性能（闪变底部）。采用这种处理确定的噪声类型是闪变频率调制。

因为最新的设备不是便携的，且不连续工作，重要的是在一个合理的时间中比较它们来确定它们之间存在系统性差异。一个测量在24小时时间段上具有1 ns精确度对应于频率中的 $1 \times 10^{-14}$ 。因此，在今天的现有水平上，将需要数星期来比较二个这样的设备。这就是为什么重要的是开发和改进时间传递方法来使这些比较能够在一个合理时间段中被完成。

时间标度TAI和UTC是基于来自位于全世界大约50个时间实验室中的大约220个原子时钟的数据。BIPM的时间部门计算这些时间标度。比较这些时钟的唯一操作方式是基于C/A码单通道测量的GPS CV技术。出于这个原因，测时界致力于开发时间和频率比较的新方法。它们中有基于多通道GPS C/A码测量、GPS载频相位测量、温度稳定天线、和接收机软件标准化的技术。作为另外的来源，其他的开发采用GLONASS C/A-码和P-码测量。本文主要专注于因为使用GPS多通道观测和特别受保护接收机天线而已经引起的进展。它还指出了采用当前其他技术所经历的困难。它描述了当前GPS测时接收机的时延不稳定性，并将GPS C/A-码时间传递与其他卫星时间传递技术进行了比较。

图12-3

各种频率源的稳定性范围



Sat\_time\_freq-1203

### 12.3.1 GPS C/A-码单通道共视时间传递

很多用户依靠仅仅跟踪一颗卫星（单通道）的单频（C/A-码）接收机用于通过GPS CV技术来同步时钟。在过去15年中，GPS C/A-码CV时间传递的性能已经改善了一个幅度量级。当前，估计的运营单通道GPS C/A-码时间传递的不确定性对于单独一个CV观测是7 ns，而对日平均大约是3 ns，它对应于在频率传递中的几个 $10^{14}$ 。但是，这个性能几乎不足以用于当前原子钟的比较，并且需要被迅速改进来满足现在设计中时钟的挑战。在过去45年中，原子钟的性能已经平均每7年改善一个幅度量级。作为参考国际时间标度，TAI和UTC当前在数周时间段上的稳定性大约是在 $2 \times 10^{15}$ 。因此，预测TAI和UTC的稳定性到2005年将达到几个 $10^{16}$ 是合理的。

### 12.3.2 单址比较（零基线）

单址比较中，CV是在位于相同地点、连接到相同的时钟、并采用相距不超过数米的天线的二个GPS时间接收系统之间计算的。近距离的比较能够消除共用时钟的误差和多种其他误差。如果被比较的接收机采用相同的软件，将不应该出现卫星广播星历表、天线坐标、或电离层和对流层建模不完善所引起的误差。任何测到的恒定偏差来自二个被比较设备之间的时延差，包括接收机自己、天线、电缆等。现在可以得到相当多的描述这样比较的数据[Kirchner *et al.*, 1993年; Buisson *et al.*, 1985年]。所有都显示了类似的特性：对外部温度的一个短期（1天）和有时一个长期（季节）的相关性。周日变化可能是数纳秒，而季节变化是大约10 ns。必须要强调，观察到的现象是一个差分效应，所以由温度相关性所引起的实际时延变化可能更大。

### 12.3.3 GPS差分校准

基于以上所描述单址技术的原理，远距离GPS设备的差分校准在最近数年中已经有所进步。在此情况下，二个被比较的接收机之一是一个本地接收机。另外一个便是便携接收机，它被在要被校准的地点之间传递。通过假设移动GPS时间设备（包括电缆和天线）的接收机时延恒定，能够对每一个被比较地点计算一个差分时间修正值。如果在理想条件下进行，这样一个差分校准的宣称不确定

性大约是2 ns。对GPS时间设备进行差分校准使得可以准确地比较远距离原子时钟。在差分校准中的不确定性和在CV链路中的噪声限值了这个准确性。

在过去15年中，已经由BIPM进行过很多差分校准 [Lewandowski, 1996年]。位于NIST和巴黎天文台(OP)的GPS时间设备已经被比较了大约10次；在这些校准期间确定的差分时间修正值相差不多于数纳秒。这得出了当校准是在包括电缆的GPS时间设备被小心保持的实验室中这样的理想条件下完成时能够得到可再现性的一个观点。它还得出了关于GPS时间设备长期稳定性的一些观点。同样，必须要强调，如同对一个单址比较，这些是差分比较。因为二个接收机都位于北半球，季节影响可能已经被消除。到目前为止，重复的校准还未曾在位于北半球和南半球之间的地点进行过。

并不是在所有地点都看到重复校准之间的明显一致性。在某些情况下，已经发现了大约10 ns的差异。这些可以归因于被比较接收机对于温度的季节变化的不同响应或未确认的多径。在其他情况下，差异很大，有时是数十纳秒；这样的变化很可能来自未记录的GPS时间设备硬件中的有意改变或无意改变。

### 12.3.4 环绕世界闭合

如以前所提到的，GPS CV时间传递发生在电台对之间。某些情况下，有可能采用多对电台在一个方向上环绕地球。闭合条件意味着消除所有时钟误差，且在无噪声时间链路的理想情况下，我们应该得到零。在过去已经进行了多个测试。在大约一年时间中对来自NIST、OP和通信研究实验室(CRL)的数据上进行了一个测试采用了后处理精确星历表和电离层测量，并且显示了随时间改变的一个数纳秒的偏差[Lewandowski, 1993年]。因为硬件时延也被闭合条件消除，剩余的不确定性来源仅仅关联到通过空间或多径的GPS信号路径。似乎观察到的偏差可能来自电离层测量的有限准确性。这个偏差的一部分也可能是由于在所涉及实验室之一中天线坐标的误差所引起。偏差随时间的变化也指向电离层测量，因为这些可能随着恒星GPS轨道一年中每天“移动”4分钟而受到从白天到夜晚条件变化的影响。对流层修正也可以在所观测到的时延变化中起作用。

环绕世界闭合似乎对可以用来计算大气折射率的准确性提供了一个很好的测试，因为在这么长的基线上的CV必须要以非常低的仰角来进行。

## 12.4 GPS与其他时间传递技术的比较

### 12.4.1 与双向卫星时间和频率传递的比较

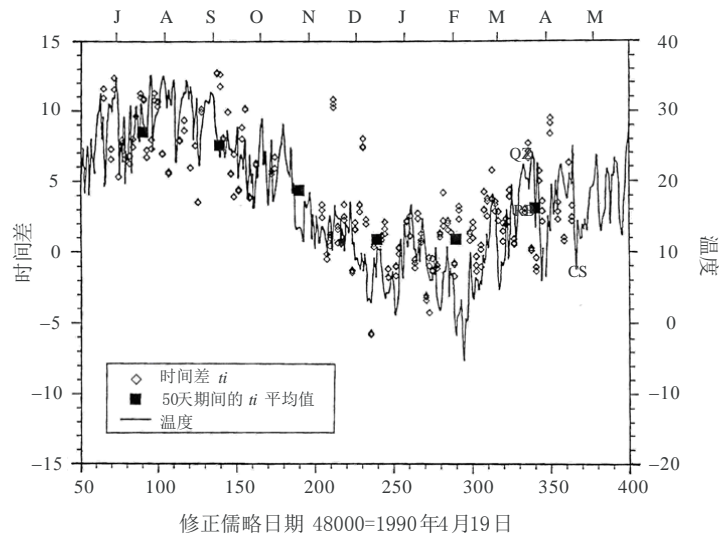
双向卫星时间和频率传递(TWSTFT)是一种利用地球静止通信卫星来以数百皮秒的精度提供时间传递的技术。在这种技术中，二个电台A和B中的每一个电台同时发送一个编码信号给另外一个电台并接收另一个电台的信号。A的编码信号的开始被同步到本地时钟A的1 Hz信号。B的编码信号也被同步到本地时钟B。解码后接收信号被用来停止由该用户本地时钟启动的一个时间间隔计数器。在能够计算二个本地时钟之间的差值之前，需要将电台A和B的时间间隔计数器读数放到一起。通常，因为涉及的噪声过程，需要大约2分钟来得到足够计算一个平均值的数据。这些2分钟的过程通常每周进行3次。在1991年，经过大约1年的时间，借助GPS CV I和TWSTT比较了相距大约800公里的蓝色海岸天文台(Observatoire de la Cote d'Azur)(OCA)和格拉茨技术大学(TUG)的时间标度[Kirchner *et al.*, 1993年]。宣称的GPS链路不确定性是3 ns。

在图12-4中展示的数据显示采用了TWSTT和GPS CV测量所得到的[UTC(TUG)-时钟(OCA)]数值之间的差别。通过把一个GPS接收机和一个卫星终端运送到另外的那个地点来测量GPS接收机和卫星地面站的差分时延，在实验结束时对链路进行了独立校准。因为TWSTT和GPS CV值之间的差值

显示出一个明显的系统性（季节）变化，差值的平均值和标准偏离（分别是3.6和3.9 ns）不是用来描述比较期间这二种技术一致的适当方法。对差值的改进艾伦方差显示了对高达大约50天平均时间的白噪声PM，因此，在高达此值的数据间隔上的平均值和对应标准偏离的计算被证明是合理的。在比较期间，50天平均值的平均是3.2 ns，而标准偏离是2.6 ns。平均值的最大差值是8 ns，而且，同样对应于有可能是在所用GPS接收设备中温度相关时延所引起的一个季节性影响（图12-4）。

图12-4

通过TWSTT测量得到的（UTC(TUG)–时钟（OCA））之间的差值，  
通过GPS共视测量得到的（UTC(TUG)–时钟（OCA））之间的差值，  
和TUG的外部温度



Sat\_time\_freq-12-04

在8个欧洲的和二个美国的时间实验室中实施了TWSTT技术，并处于预运行状态。1997年一次使用的结果显示出与1991年使用中相同的TWSTT和GPS CV测量之间差别的温度相关性。

#### 12.4.2 与激光时间传递的比较

从静止轨道（LASSO）的激光同步是应该能够以大约100 ps不确定性比较远距离原子时钟的一种技术。在从1992年12月8日到1993年1月28日的一个实验期间，采用LASSO和GPS CV对在德克萨斯州的麦克唐纳天文台和法国OCA（相距8000公里）的二个远距离原子钟进行了比较[Friedelance, 1994年; Baumont *et al.*, 1993年]。因为恶劣的天气条件，仅仅进行了5个LASSO进程。GPS CV链路是在没有应用精确星历表或电离层双频测量的情况下计算的，因此其不确定性被认为是10 ns。

借助一个便携接收机对GPS链路进行了校准：LASSO链路具有据信好于100 ps的不确定性，但它没有被校准。这个GPS CV和LASSO时间传递的比较显示出所涉及不确定性之间的一致性和大约192 ns的一个偏差。这二种方法之间差别的测量达到大约15 ns的一个峰峰差值。对平均值残值的均方根误差（r.m.s.）是6 ns。

采用激光的新一代时间传递在近年中正在出现，例如，T2L2（采用激光链路的时间传递，预期它提供一个30 ps的不确定性）或LTT（激光时间传递）。从2008年起，这二种实验正分别装载在

Jason 2和一颗北斗卫星上飞行。欧洲激光测时（ELT）也预期装载在ESA ACES任务框架中的ISS上飞行。

尽管这些系统因为对天气条件的敏感性本质上不适合于运营使用，但它们肯定是评估GNSS和TWSTT时间传递准确性的极佳工具。此外，通过在目前最先进的地面时钟之间进行极为准确的时间传递，它们也可以被用于基础物理学的测试。

## 12.5 GPS时间传递中最近的进展

### 12.5.1 多通道共视GPS时间传递

因为随着GPS星群的完成、接收机价格的降低、和来自测时界的要求而来的多通道测时接收机的开发和可用，最近在GPS时间传递中已经发生了一个复兴。在过去15年中，国际时间传递一直采用单通道C/A-码GPS接收机和一个标准13分钟轨迹的国际CV时刻表来进行[Allan and Weiss, 1980年]。

因为老式接收机具有有限的存储，每天能够安排不超过48个轨迹；但是，实际中，有用的数量更小。选择在一个13分钟积分期间的单个卫星观测是由GPS导航电文的传输速度所造成。需要最高12.5分钟来传送一条完整的电文（25传递页）。对13分钟的积分保证了所有CV测量具有相同的数据。在GPS的初期，在连续导航电文之间观测到一些明显的不连续性。这已经改变了，所以积分时间段也许可以被缩短。

此处考虑的多通道C/A-码接收机观测视野中的所有GPS卫星并且在标准小时每16分钟采用标准的13分钟轨迹。多通道输出数据以标准化的格式存储在单个文件中 [Allan and Thomas, 1994年；Lewandowski, *et al.*, 1996年]。标准小时每天被移动4分钟，以跟随GPS恒星轨道。

标准小时参照1997年10月1日，这是由规约[关于GPS和GLONASS标准化的报告，1997年]采用的一个参考日期。相同的标准小时被用在BIPM国际单通道CV跟踪时刻表中，它每6个月发布一次。使用全视野程序的仪表也观察国际单通道时刻表。这极大地简化了将它们并行引入到现有的单通道观测系统中。似乎有可能将很快停止进行单通道观测，且将不再有对周期性BIPM时刻表的需求。

尽管理论上最多可以有12颗GPS卫星能被同时观测到，但在一个平常的城镇地点在15°以上仅仅观测到大约5颗卫星（并且因此对时间传递是有意义的）。因为一天中有89个有用的16分钟时间段，在每个通道可以有89个轨迹被观测到。采用15°以上的所有可用观测（每个16分钟时间段大约5个），我们因此每天可以观测445个轨迹。所有这些轨迹可以被用于地区CV链路，对大陆之间非常大的基线，采用一个多通道方式可以得到大约100个CV轨迹。

在GPS多通道模式中的CV数量相对于单通道模式增加了10倍，这必将会为时间和频率传递质量提供必然的改善。对其中白相位噪声占优的平均时间，预期在稳定性中有一个  $(10)^{1/2} = 3.2$  的理论增益[Lewandowski *et al.*, 1997年]。

但是，多通道观测可以受到系统性变化的影响，主要是由环境对天线的影晌所引起。这必将会以类似于以上所述对单通道接收机的方式影响所有的通道，除了多径效应。采用以下所描述的一个试验比较举例说明了采用多通道观测所得到的增益和系统性效应。

一个试验比较考虑了BIPM和荷兰代夫特NMI Van- Swinden Laboratorium (VSL) 之间的时间链路，因为它具有大约400公里的一条基线[Lewandowski *et al.*, 1997年]。二个实验室都装备了GPS多通道接收机，并且它们的地面天线坐标以0.3米的不确定性表示在ITRF中。

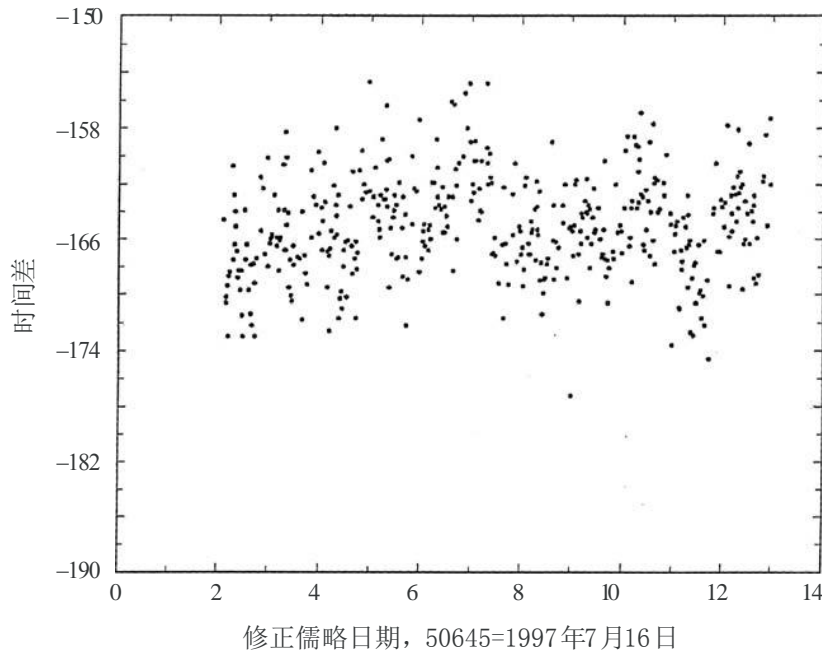
在二个实验室中，接收机都被连接到HP5071A时钟。二个接收机都采用一个便携接收机进行了校准。我们将相同的接收机（经过同样的10天时间）用于单通道和多通道模式时间传递。对单通道模式，我们每天有大约38个有用的观测，而对多通道模式有大约350个（图12-5和12-6）。大约3 ns的噪声水平对二个链路是类似的。

现在考虑通过将每天的CV数量从38个增加到350个所得到的优点。理论上的稳定性增益是  $(350/38)^{1/2} = 3.0$ 。这可以在平均时间少于104秒的400公里时间传递的稳定性曲线上观察到，也可以在BIPM的一个单址比较的稳定性曲线上观察到。在图12-7中报告了一个单址比较的稳定性曲线。多通道比较受在大约  $3 \times 10^4$  秒（轨迹2）处变得明显的一个系统性效应的影响。

当温度稳定天线被启用时（轨迹3）（§ 12.5.2），这个影响被降低。系统性效应对单通道比较（轨迹1）是看不到的，因为它们肯定被更高的噪声水平所覆盖。所以，多通道观测所带来的优点严重受到接收机时延不稳定性的限制，并几乎不允许对处于最高性能水平的普通HP5071A单元进行5天平均时间（这是TAI计算的标准间隔）上的比较。

图12-5

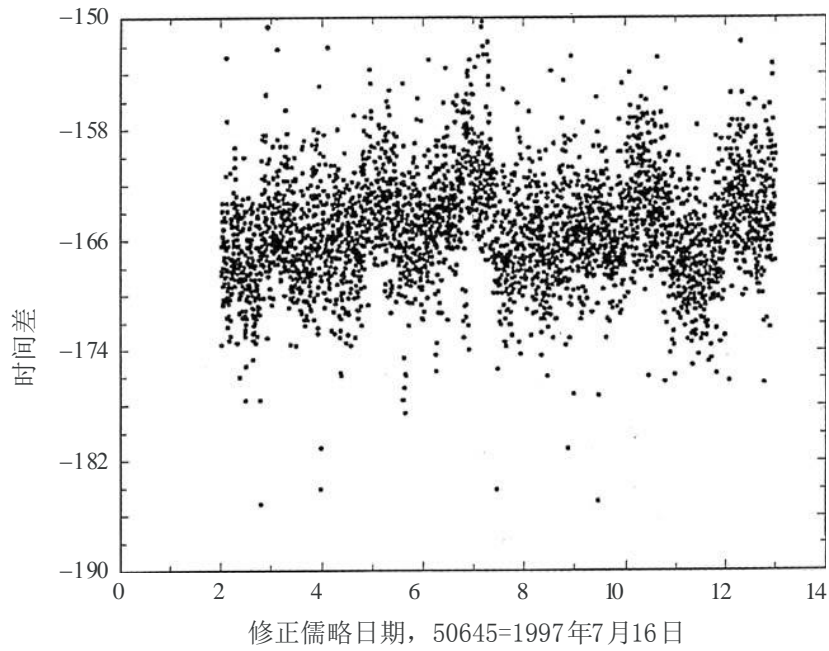
采用单通道GPS 共视的（BIPM时钟-VSL时钟）



Sat\_time\_freq-12-05

图12-6

采用多通道GPS共视的 (BIPM时钟-VSL时钟)



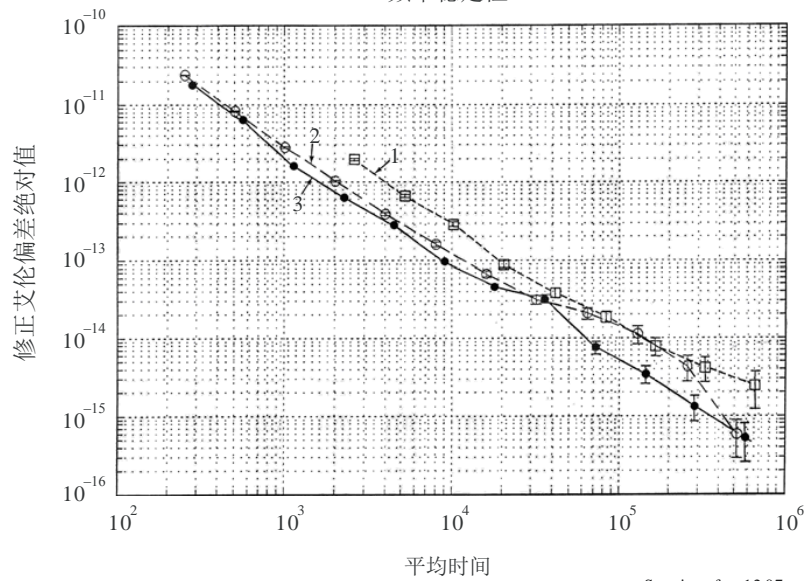
Sat\_time\_freq-12-06

图12-7

位于BIPM的二个GPS时间接收机的单址比较 (单独一个地址的二个分别天线)。  
修正艾伦方差:

- a) 不稳定天线温度的单通道比较;
- b) 不稳定天线温度的多通道比较;
- c) 启用温度稳定天线的多通道比较

频率稳定性



Sat\_time\_freq-12-07

### 12.5.2 温度稳定天线

现在已经充分记录并普遍承认GPS时间接收设备，更尤其是它的天线，对环境条件很敏感[Lewandowski and Tourde, 1990年]。对传统的GPS时间接收系统，这个敏感性可以采用一个大约 $0.2 \text{ ns}/^\circ\text{C}$ 的系数来表示，并能够达到 $2 \text{ ns}/^\circ\text{C}$ 。如其所为，这对较早时所宣布的GPS时间传递 $1 \text{ ns}$ 准确度的目标是一个主要的阻挠障碍。覆盖大约1年时间的GPS CV与双向卫星时间传递的比较显示了一个季节性的 $8 \text{ ns}$ 峰峰值影响，如图12-4，它归咎于GPS时间设备的不稳定性。没有立即找到对此问题的解决方案，而且即使在今天，在时间测量实验室中所用的GPS时间设备的准总体性仍受此影响。更为重要的是，由最近全视野多通道观测所引入的优点严重受接收机时延不稳定性的限制。

因为没有发现从电子上解决此问题的实用方法，建议了另外一个方式[Lewandowski, *et al.*, 1997年]：应用一个带有稳定温度的烤箱来保护天线。天线温度稳定处理的主要目标是要将关键部件维持在某些恒定的温度上。

烤箱的第一个样机是在BIPM建造的。之后，一个被称为温度稳定天线（TSA）的商用版非常快地可以商用了。对在BIPM装备了TSA的二个GPS多通道接收机的一个基本单址比较显示出消除了系统性误差，以及大约一天平均时间上几个 $10^{15}$ 的微小频率稳定性，图12-7。这个改善使得有可能充分利用多通道时间传递并接近对使用GPS载频相位所期望的性能。

### 12.5.3 使用GPS载频相位

为了改善GPS的大地测量应用而建立的国际GPS业务（IGS）已经在GPS时间传递的最近进展中起到了主要作用。现有的时间传递接收机在执行了时间传递算法之后通常丢弃载频相位和伪距数据。如果保持这些数据，采用更复杂算法的后处理可以导致一个更加精确的时间和频率传递。这些数据已经被用在进行差分定位的大地测量中。锁定载频相位降低了多径的影响。采用现在可以得到的多通道接收机和采用在大地测量中典型的CV双重差分技术，二个地点可以很好地维持一个公共载频相位。如果所测量的电离层时延与标准对流层修正结合使用，对一天量级的积分时间可以得到一个 $10^{15}$ 的频率稳定性[Schildknecht *et al.*, 1990; Overney *et al.*, 1998年]。这个性能差不多就是当前主要频率标准比较所需要的。要达到这个性能需要的是连续测量，而不是每天一次测量。

多个尝试已经显示了将载频相位测量用于频率比较的优点[Overney *et al.*, 1998年; Petit *et al.*, 1996年]。与接收机无关的交换格式（RINEX）[Gurtner, 1994年]为记录GPS和GLONASS载频相位和伪距数据提供了一个方便的格式。如果测时接收机有能力，建议对视野中的所有卫星应该以15秒的间隔产生一个RINEX格式的载频相位和伪距数据文件。这个数据文件然后能够被用于精确时间和频率数据的后处理。

对GPS载频相位信号具有更好理解的测时计量学家和大地测量工程师最近已经联手并已经着手被称为“IGS/BIPM试点项目”的一个重要倡议。这个项目研究采用GPS相位和编码测量进行准确时间和频率比较。一个重要的问题是用于测试应用的相位模糊解算，它限制了该技术的准确性。

重要的是要注意，载频相位也受硬件时延不稳定性的影响。此处同样，为了充分利用这个前途光明技术的优点，必须稳定和测量接收设备各个部件的时延。

## 12.6 使用GLONASS

在大多数方面，GLONASS [Gouzhva *et al.*, 1992年]类似于GPS，但是，一直到最近，国际时间大地测量界都极少采用它，因为没有合适的商用接收机可用。现在这正在改变，且第一个永久的国际时间链路已经被建立起来。GLONASS测试接收机现在可用并符合与GPS测试接收机相同的标准。



已经实施了多个研究来比较GPS和GLONASS C/A-码单通道测量的性能 [Lewandowski *et al.*, 1993年]。它们所有都显示出这二个系统对地区性链路具有类似的性能。GLONASS接收机天线也显示出类似于对GPS天线所看到的温度相关性。对大陆间链路，必须要采用后处理精确GLONASS星历表。

最近的一些研究展示了GPS + GLONASS C/A-码多通道时间传递的可行性 [Lewandowski *et al.*, 1997年]。双系统多通道和多代码接收机平稳地运行而没有软件问题。它们采用标准的软件和格式 [Lewandowski *et al.*, 1996年]。与其他GPS测试接收机的比较已经提供了对它们大地测量质量的一个测试。共同使用多通道模式下的GPS和GLONASS几乎加倍了（GLONASS星群是不完整的）观测的数量。GPS + GLONASS多通道时间传递相对于单通道GPS测量的稳定性增益大约是4。GPS多通道自己就提供了一个大约3的稳定性增益。

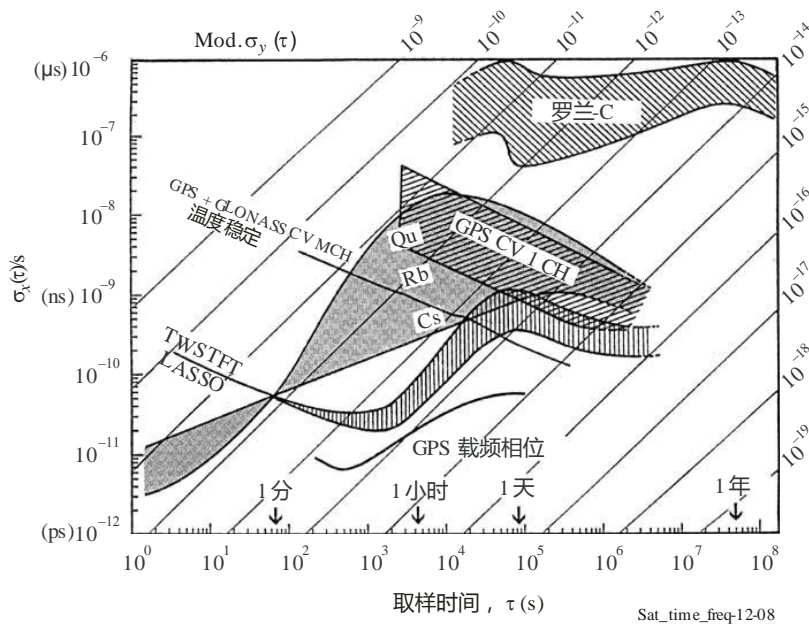
使用GLONASS P-码表现出一个明显的优点。这就是被称为伪距的基本码测量的较低噪声。伪距测量的精确性是所考虑编码波长的1/100量级。这意味着，在GLONASS P-码上所测伪距的精确度是1 ns（GLONASS P-码的波长是30 in或大约100 ns），而GLONASS C/A-码仅仅可达到10 ns的伪距测量精确度（GLONASS C/A-码的波长是300 in或大约1 000 ns）。最近采用刚可用的GLONASS P-码测时接收机进行了一些测试。尽管由于不同GLONASS频率引起不同硬件时延所造成的困难，初次的结果是非常鼓舞人心的[Azoubib *et al.*, 1998年]。

### 12.7 结论

GPS已经成为测时界的主力。它是一个时间源并能够被用来比较时钟。当前，GPS接近于成为一个ns/天的时间传递系统。图12-8对更新改进的GPS技术与现在被使用的标准GPS CV技术及多种其他技术进行了比较。但是，有一些正在发生的进展，它们将极大地改善这个数量。

图12-8

一些更新时间传递技术与经典GPS单通道共视时间传递的比较。  
(承蒙D. W. Allan的时钟数据和罗兰-C、TWSTFT及GPS载频相位数据。)



Sat\_time\_freq-12-08

如现在的实际情况，GPS C/A-码时间传递主要受到硬件不稳定性和在长距离上电离层时延计算中不确定性的限制。一天平均时间的单通道比较的不确定性是3-4 ns，有时更大。这几乎不足以用于普通商用HP5071A时钟的比较。这种技术明显不足以用于高性能实验室频率标准的比较。因为GPS载频相位具有更大的精确性，它为频率比较提供了最大的潜在可能。当投入运行时，它将被用于高性能实验室频率标准的比较以及可以用于对其他时间和频率传递技术的评估。它应该达到100 ps/天量级的稳定性，也许甚至更好。如果GPS载频相位模糊性能够被解决，则这种技术不仅能够被用于频率传递，而且也能够用于时间传递。

还有GPS自身的演进。“GPS现代化”项目将采用一个第二和第三民用编码信号。这将引起显著的进步，因为更多的民用频率将允许更准确的电离层测量和更好地解决GPS载频相位模糊性。此外，未来的GPS星群可以包含更多卫星，而且卫星信号可以有更高的功率。根据1996年三月总统令，SA被设定为零。这极大地改善了通过GPS的直接时间播发。

改善接收机准确性最重要的步骤之一是开发测时接收机内置校准系统。这表现出是对解决当前GPS测时设备时延不稳定性困难的最好解决方案。在内置校准系统普遍可用之前，必须对天线电子组装和任何室外部分、在线放大器、很可能还有天线电缆进行温度稳定。温度稳定封装的使用应不仅改善C/A-码 CV时间传递和时间播发，而且也改善采用载频相位的频率比较。

将GPS和GLONASS码测量组合在测试设备接收机中肯定会为国际时间比较提供一个附加的价值。对于GLONASS，在二个频率上获取精确码的可能性提供了一个测量电离层时延的方法。此外，GLONASS信号在48个频率上广播（未来在24个频率上），与之相比，GPS在二个频率上广播。这提供了一个更抗干扰的强健广播系统。但是，GLONASS必须改善其可靠性并保证运行的连续性。

将来有什么？在过去45年中，原子频率标准的性能已经平均每7年改善一个幅度量级。对它们将来通过长距离进行比较的需求将要求在时间和频率传递中的适当进步。在本文中详述的信息保证，这个挑战将会被先进的GPS时间传递技术所满足。

## 参考文献

- ALLAN, D. W. [November, 1987] Time and frequency (time-domain) characterization, estimation and prediction of precision clocks and oscillators. *IEEE Trans. Ultrasonics., Ferroelectrics., Fre. Contr.*, UFFC-34, p. 647-654.
- ALLAN, D. W. and LEPEK, A. [1993] Trends in international timing. *Proc. 7th European Frequency and Time Forum*, p. 221-227.
- ALLAN, D. W. and THOMAS, C. [1994] Technical directives for standardization of GPS time receiver software. *Metrologia*, Vol. 31, 1, p. 69-79.
- ALLAN, D. W. and WEISS, M. M. [1980] Accurate time and frequency transfer during common-view of a GPS satellite. *Proc. 1980 Frequency Control Symp.*, p. 334-336.
- AZOUBIB, J., LEWANDOWSKI, W. and DE JONG, G., [1998] A new approach to international time transfer: multi-channel multi-code GPS+GLONASS common-view observations. *Proc. 12th European Frequency and Time Forum*, 1998, p. 87-93.
- BAERISWYL, P., T. SCHILDKNECHT, J. UTZINGER, and G. BEUTLER, [1995] Frequency and time transfer with geodetic GPS receivers: First results. *Proc. 9th European Frequency and Time Forum*, p. 46-51.
- BAUMONT, F., FRIEDELANCE, P., GRUDLER, P., VEILLET, C., WIANT, L., LEWANDOWSKI, W and G. PETIT [1993] Preliminary report on the comparison of LASSO and GPS time transfers. *Proc. 7th European Frequency and Time Forum*, p. 641-643.

- BIPM [1997] Report of the open forum on GPS and GLONASS standardization. Presented at 6th CGGTTS Meeting, 1997 (available, on request from).
- BUISSON, J. A., OAKS, O. J. and LISTER, M. J. [1985] Remote calibration and time synchronization (R-CATS) between major European time observatories and the US Naval Observatory using GPS. *Proc. 17th Annual. P7TI Meeting*, p. 201-222.
- BUTTERLINE, E. [January, 1993] Reach out and time someone. *GPS World*, p. 32-40.
- FRIEDELANCE, P. [1994] L'expérience LASSO. Ph. D. dissertation, Université de Paris 6, Paris, France.
- GOUZHVA, J. *et al.* [July/August, 1992] High-precision time and frequency dissemination with GLONASS. *GPS World*, p. 40-49.
- GURTNER, W. [1994] RINEX: The receiver independent exchange format version 2. Astronomical Institute, University of Berne, Berne, Switzerland.
- KIRCHNER, D., RESSLER, H., GRUDLER, P., BAUMONT, F., VEILLET, C., LEWANDOWSKI, W., HANSON, W., KLEPCZYNSKI, W. and UHRICH, P. [September, 1993] Comparison of GPS common-view and two-way satellite time transfer over a baseline of 800 km. *Metrologia*, Vol. 30, 3, p. 183-192.
- KLEPCZYNSKI, W. J., [1996] GPS for precise time and time interval measurement. *Global Positioning System: Theory and Applications*, Vol.11. B. W. Parkinson and J. J. Spilker, Jr., Eds. Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, chapter 17, p. 483-500.
- LEWANDOWSKI, W. [1996] Determination of the differential time correction between GPS time equipment located at the Observatoire de Paris, Paris, France, and the United States Naval Observatory, Washington, DC, USA. BIPM, Rep. BIPM-96/10.
- LEWANDOWSKI, W., AZOUBIB, J., DE JONG, G., NAWROCKI, J. and DANAHER, J.[...] A new approach to international time and frequency comparisons: "All-in-view" multi-channel GPS+GLONASS observations. *Proc. ION GPS97*, p. 1085-1091.
- LEWANDOWSKI, W., AZOUBIB, J., GEVORKYAN, A. G., BOGDANOV, P. P., KLEPCZYNSKI, W. J., MIRANIAN, M., DANAHER, J., KOSHELYAEVSKY, N. B. and ALLAN, D. W. [1996] A contribution to the standardization of GPS and GLONASS time transfers. *Proc. 27th P7TI Meeting*, p. 367-383.
- LEWANDOWSKI, W., MOUSSAY, P., CHERENKOV, G. T., KOSHELYAEVSKY, N. B. and PUSHKIN, S. B. [1993] GLONASS common-view time transfer. *Proc. 7th European Frequency and Time Forum*, p. 147-151.
- LEWANDOWSKI, W., MOUSSAY, P., DANAHER, J., GERLACH, R. and LEVASSEUR, E. [1997] Temperature-protected antennas for satellite time transfer receivers. *Proc. 11th European Frequency and Time Forum*, p. 498-503.
- LEWANDOWSKI, W., PETIT, G. and THOMAS, C. [April 1993] Precision and accuracy of GPS time transfer. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 42, p. 474-478.
- LEWANDOWSKI, W. and THOMAS, C. [July 1991] GPS time transfer. *Proc. IEEE*, Vol. 79, 7, p. 991-1000.
- LEWANDOWSKI, W. and TOURDE, R. [1990] Sensitivity to the external temperature of some GPS timing receivers. *Proc. 22<sup>nd</sup> P7TI Meeting*, p. 307-316.
- OVERNEY, F., PROST, L., DUDLE, D., SCHILDKNECHT, T., BEUTLER, G., DAVIS, J. A., FURLONG, J. M. and HETZEL, P. [1998] GPS time transfer using geodetic receivers (GeTT): Results on European baselines. *Proc. 12th European Frequency and Time Forum*.
- PETIT, G., MOUSSAY, P. and THOMAS, C. [1996] GPS time transfer using carrier-phase and P-code measurements. *Proc. 10th European Frequency and Time Forum*, p. 279-285.
- SCHILDKNECHT, T., BEUTLER, G., GURTNER, W. and ROTHACHER, M. M. [1990] Toward sub-nanosecond GPS time transfer with geodetic GPS receivers: First results. *Proc. 4th European Frequency and Time Forum*, p. 335-346.



## 第13章

## 采用GPS相位和编码测量的大地测量技术

页码

13.1	引言 .....	158
13.2	仪表和硬件考虑 .....	158
13.2.1	GPS卫星组件 .....	159
13.2.2	GPS跟踪天线装置 .....	160
13.2.3	天线电缆和连接 .....	162
13.2.4	GPS接收机 .....	162
13.2.5	评估多径影响和系统测试 .....	162
13.2.6	对跟踪电台时延的校准 .....	163
13.3	数据分析策略 .....	164
13.3.1	GPS观测方程式 .....	164
13.3.2	用于全球解决方案的方法 .....	165
13.3.3	修正项的参考系和模型 .....	166
13.3.4	精确点定位 .....	167
13.3.5	误差对时钟解算值的影响 .....	168
13.4	IGS时钟产品和时间标度 .....	168
13.4.1	可用的产品组 .....	169
13.4.2	IGS时间标度 .....	170
13.5	利用日边界不连续性分析的性能评估 .....	173
13.6	与独立双向时间传递结果的比较 .....	177
13.7	对时间传递性能的评估 .....	179
13.8	未来的趋势 .....	180
	参考文献 .....	181

## 13.1 引言

GPS方法作为大多数高准确性时间和频率传递的基础已经超过20年。保持协调世界时（UTC）的通常方法曾经主要依靠假设消除了大多数系统性误差的单频伪距（C/A-码）数据和简单共视（CV）数据分析 [Allan and Weiss, 1980年]。采用因为多通道接收机普遍替代较早的单通道接收机而产生的改善数据，大陆间CV比较已经达到了在5天间隔上平均的数纳秒不确定性 [Lewandowski *et al.*, 1997年]。相比之下，采用双频GPS载频相位观测的高准确性大地测量方法的并行发展已经显示出对一天积分的厘米级定位可重复性 [Zumberge *et al.*, 1997年]。假设这样的定位结果也能够被实现为等效光行进时间（~33 ps），基于GPS载频相位的大地测量技术能够达到亚纳秒级全球时间比较的潜力是显而易见的，如1990年代所普遍认可。事实上，该方法已经在有利于一天分析弧线情况下显示出在每个历元具有接近~100 ps的一个精确度 [Ray和Senior, 2003年]。但是，由于仪表校准的不确定性，绝对时间传递能力依然限制于>1 ns [Petit *et al.*, 2001年]。除了更高精确性之外（等效于频率稳定性），大地测量方式轻易地使自己适合于全球时间和频率的传播。这与基本GPS运行设计相一致（尽管以更加准确的信息代替GPS广播电文），不像CV的点对点特性，它随着基线距离的增加进一步地劣化。

大地测量方法必不可少的要素是通常每30秒被记录的双频GPS对伪距（通常“无码”P-码）和载频相位进行观测的可用性，并与准确到毫米级别的非差分单向信号传播的综合分析建模相结合。相位和编码测量在每个频率的标准误差分别大约是1 cm和1 m。对二个观测量，多径误差被认为超过热噪声而占主导 [Langley *et al.*, 1996年]。相位数据因为它们更高精确度而对现代大地测量应用是至关重要的；因此，为了保证一颗卫星整个穿越过程中的可靠相位连续性而要求连续取样。对于普遍采用双差分算法来消除卫星和跟踪接收机所有时钟类似影响的相对定位解决方案，通常因为编码数据非常低的权重而不采用它们。但是，为了分析非差分数据和提取时钟估算值，有必要添加编码数据来分开其他方法无法区分的时钟偏移和相位周期模糊性参数。观测值组合以这种方式有效地借助更加精确的相位平缓了带有噪声的编码数据。对每个接收机-卫星对，可以通过保证最长可能无周跳连续相位数据持续时间来使时钟估算值的质量最高，因而使模糊参数的数量最小。新型的大地测量接收机同时跟踪12颗或更多卫星，每一颗各自的穿越时间高达大约4小时。除了观测障碍之外，最有问题的跟踪通常是在最低仰角处，那里信号强度最弱，而且大气路径时延和多径效应最大而且最可能变化。

本章讨论了GPS大地测量时间传递方法和最近的发展动态。原理上，相同的方法可以与其他全球导航卫星系统（GNSS）一起使用。虽然现有的GLONASS星群还未被广泛地利用于此目的，但是普遍预期欧洲伽利略系统可以极大地增强当前的能力。

## 13.2 仪表和硬件考虑

在GPS信号路径上（或者甚至有时在附近）的任何成分可能影响时间和频率的性能。关于时间传递，应用于大地测量装置的硬件考虑基本上遵循与任何其他时间测量设施相同的常识性规则。接收机设备的总体配置应保持尽可能简单，而最大的担心是在系统组件和它们环境的稳定性上。在可行的范围之内，新组件在被运行使用之前应该经过彻底测试。当需要改变时，将其限制在每次单独一个组件可以使对结果的评估更加明确。

### 13.2.1 GPS卫星组件

在接口控制文件ICD-GPS-200中，或更新的接口规范IS-GPS-200中提供了使用GPS所需的基本信息。为了发射机天线阵列的有效相位中心而对卫星的位置进行广播。但是，GPS系统内部计算每颗卫星质量中心点的动态轨道，并将结果转换到相位中心。不正式提供用于此目的的矢量偏移，因为它们不是ICD用户所需要的。

但是，国家地理空间情报局（NGA）在它们的网站（[earth-info.nga.mil/GandG/sathtml/](http://earth-info.nga.mil/GandG/sathtml/)）公布这些偏移。

计算他们自己卫星星历表和时钟值的用户还必须假设一些天线相位中心偏移数组。当比较来自不同来源的卫星时钟值时，必须要考虑假设相位中心偏移径向分量中的任何差异，因为这些将把它们自己显示为卫星时钟中的偏差。对实际天线偏移进行准确测量的难度使形式变得复杂[Mader和Czopek, 2002年]，它已经导致使用了不同的数组。

与GPS广播电文相反，国际GPS业务（IGC）的精确轨道是参照于卫星的质量中心。当在1997年发射第一颗Block IIR卫星时，变得很明显的是它在对地球方向上的偏移不同于更早的航天器。为了保证能够对来自各个IGS分析中心的卫星时钟计算值一致地进行比较和组合，IGS对天线相位中心偏移矢量采纳了一组公共数值，从1998年11月29日开始实施：

Block II & IIA	dx = 0.279 m	dy = 0.000 m	dz = 1.023 m	[IGS]
Block IIR	dx = 0.000 m	dy = 0.000 m	dz = 0.000 m	[IGS]

应用了通常的卫固坐标系，此处，z轴是从卫星的质量中心指向地心，y轴与太阳电池板对齐，x轴与它们正交。Mader和Czopek [Mader和Czopek, 2002年]确定了在地面上一个未被使用Block IIA的天线阵列的dz偏移是1.66 m。GPS运行系统所使用的偏移类似于Blocks II和IIA的IGS偏移：

Blocks II & IIA	dx = 0.2794 m	dy = 0.0000 m	dz = 0.9519 m	[GPS]
-----------------	---------------	---------------	---------------	-------

但对每个Block IIR航天器都明显不同而且有所区别，大多数对dz是大约1.5到1.6米。如果一个用户希望将IGS卫星时钟值与采用不同天线偏移的其他结果相比较，则必须按照下式应用修正值：

$$C_i(\text{user}) = C_i(\text{IGS}) - \{ [dz_i(\text{user}) - dz_i(\text{IGS})] / c \} \quad (13-1)$$

此处：

$dz_i(\text{IGS})$ ：卫星PRNi的IGS dz值

$dz_i(\text{用户})$ ：卫星PRNi的用户dz值

$C_i(\text{IGS})$ ：PRNi的IGS时钟值

$C_i(\text{用户})$ ：PRNi的用户时钟值

$c$ ：光速（299792458 m/s）。

GPS广播当前是在二个L频段内，具有标称中心频率：

$$L_1 = 154 \cdot 10.23 = 1575.42 \text{ MHz} \text{ 和 } L_2 = 120 \cdot 10.23 = 1227.60 \text{ MHz.}$$

$L_1$ 频段包含一个1.023 MHz C/A码调制以及一个加密P1（Y）码（10.23 MHz）和一个50 bit/s电文码。

在 $L_2$ 上目前仅仅调制了一个精确的10.23 MHz P2（Y）码，尽管要在近期添加一个第二民用码。

尽管名义上同相，各种GPS调制相互之间不可避免地具有非零偏移。这些中最重要的是在P1和P2调制之间的伪距偏差。在P1-P2偏差中的峰峰色散超过10 ns。因为广播时钟是对无电离层P1/P2线性组合而确定的（更多见下文），单频用户必须采用在导航电文中给出的 $T_{GD}$ （见ICD-GPS-200）来补偿P1-P2偏差。在产生其电离层地图产品过程中，IGS也报告其自己观测到的P1-P2偏差，称为差分码偏差（DCB）。为了参照，对每颗卫星的广播 $T_{GD}$ 值与IGS DCB之间的标准关系给出如下：

$$DCB = [1 - (77/60)^2] * T_{GD} \quad (+ \text{标度偏移}) \quad (13-2)$$

除了二个标度相差一个时间变化偏移，是因为DCB的平均值由IGS约定设定为零，而广播 $T_{GD}$ 值是参照一个根据经验确定的绝对仪表偏差。度量差异（以 $T_{GD}$ 单位为单位）一直在逐渐下降，从2000年初的大约-4.3 ns到2004年中的-7.1 ns。广播 $T_{GD}$ 值被按季度审查并更新，而IGS按每天间隔连续监视并报告其DCB。

$T_{GD}$ 修正程序假设P1-P2偏差对C/A-码单频用户是合适的，与P1相同。事实上，因为P1-C/A偏差，这不是完全正确的。它们有一个大约5 ns的峰峰范围。尽管当前在ICD-GPS-200中被忽略，但IGS已经从1999年起开始考虑这样的偏差。它是必要的，因为一些大地测量接收机跟踪C/A而不是P1，而且一些接收机报告[C/A + (P2-P1)]而不是真实P2，它们具有不同的偏差[Ray *et al.*, 2000年]。为了避免将数据与不同卫星偏差相混合而劣化IGS卫星时钟产品（以及使用它们的精确点定位），由IGS执行处理和分析不同GPS数据组的程序来保持一致性。随着将来新的调制被添加到GPS信号中，预期附加的信号间偏差的校准值将被包括在导航电文中并受IGS监视。

另外一个卫星发射信号的复杂性是波束的相位图。尽管普遍被假设为完美的半球，但有很强的并非如此的证据[Schmid和Rothacher, 2003年]。对卫星或跟踪天线（更多见下文）忽略非理想相位图大多会引起GPS框架标度（即，径向）上大约10到15 ppb级别的误差。尽管对很多大地测量应用是重要的，但这个影响很可能对大多数时间比较是不明显的，至少在仪表校准达到亚纳秒准确度之前不明显。

关于GPS卫星时钟最后需要注意的一点是在UTC时间2000年5月2日04:00终止了由于选择可变性（SA）引起对GPS时钟信号的故意劣化，在该时间之前，一天时间上的RMS时钟变化大约是在80 ns的量级。从那时起，时钟稳定性就是每个卫星测时系统内所固有的，它要好一个幅度量级以上。除了允许每个平民获取极大改善的GPS定位和测时计算值之外，所有用户，特别是那些利用更加准确IGS产品的用户现在能够以远小于以前的误差对列表的GPS时钟值进行插值。

### 13.2.2 GPS跟踪天线装置

一个大地测量装置通常建立在一个超稳定的基座上，它为长期、高准确度测量提供了物理基础。深深固定的水泥柱、交叉支撑的金属拉杆结构、和钢的桅杆是普遍采用的基座设计，尽管也采用建筑物，特别是对测时应用。

关于各种基座类型的信息可以在以下网址得到：[igsb.jpl.nasa.gov/network/monumentation.html](http://igsb.jpl.nasa.gov/network/monumentation.html)。

该电台坐标所参照的带有雕刻点的大地测量标记被永久和牢固地嵌入基座。最好的实施还要建立一个高准确性的本地大地测量控制网络来监视主要GPS电台的相对移动。

为了将非常局部的基座位移与较大规模的影响区分开，该控制网络应包括覆盖一个从~10-100米向外到大约10公里距离范围的永久标记。本地网络必须被定期地复查以确认可用，并且可以部分地由其他持续运行的GPS电台构成。应以其位置固定并且能够以<1 mm的准确度测量从标记参考点到天线参考点（ARP）偏心率这样的方式将GPS天线自己牢固地直接固定到大地测量标记之上。



IGS已经为每个天线模型指定了一个约定的ARP。为了能够进行本地查勘测量，它必须是一个物理上可接近的点，与L1和L2电相位中心相对。对大多数扼流圈天线，ARP是在位于设备底侧上前置放大器底座上的一个点。涉及ARP和信号相位中心的物理尺寸以及测量的波前相位图被保存在从IGS可以得到的文件中。为了分析观测数据和减少对参考电台坐标的结果，要求关于标记偏心率和天线尺寸的信息。

在不要求最高质量大地测量性能的情况下，例如很多测时装置，可以不使用一个大地测量基座和标记。在这种情形中，电台坐标直接参照ARP（或有时参照相位中心）。虽然方便，但在任何天线模型被改变的时候，这通常将会引起一个电台坐标的变化。遵守标准大地测量导则任何时候都更可取。

高质量、双频天线被要求用于大地测量应用，包括高准确度时间传递。最普遍的设计具有一组内部尺寸略有不同的同心扼流圈，这可以从多个制造商得到。已经为双频接收调整了设计，因为靠近水平线及以下有强烈的信号衰减，在那里多径反射通常较差 [Schupler and Clark, 2001年]。特别是对于时间传递应用，关键是应以使多径信号最小的方式来安置天线，特别是编码多径。通常，这意味着在所有方向保持一个无障碍的水平线并避免在天线附近放置任何反射物。L2信号对来自后面天线的反射特别敏感 [Byun *et al.*, 2002年]。所以，如果天线不能被直接对着一个非反射表面放置，则通常最好尽实际可能高地放置（牢记稳定性和可接近的要求）。在任何情况下，天线相位中心和它的背衬表面应严格避免L频段半波长的整数倍，特别是在天线的近场[Elosegui *et al.*, 1995年]。为了能够对天线位置进行无干扰大地测量计算，需要一个至少向下到10°仰角的净空，最好5°。

曾经有一些缺乏支持的关于大地测量时钟估算值随GPS天线中温度变化而剧烈变化的提法，伴随着采用温度稳定单元的建议。尽管这可以应用于一些低端、单频单元，但对一个标准AOA Dorne Margolin扼流圈天线的直接测量未能检测出时钟估算值对天线温度变化的任何敏感性。Ray和Senior [2001年]对短期（周日）温度敏感性设置了一个2 ps/°C的上限，并在稍后将它对任何可能的长期分量扩展到<10.1 ps/°C [Ray和Senior, 2003年]。[Rieck *et al.*, 2003年]对一个Ashtech扼流圈模型确定了0.17 ps/°C或以下的更小敏感性。

如同卫星发射机天线，而且被确认还要早很多，GPS跟踪天线的波型图偏离完美半球设想 [Schupler *et al.*, 1994年]。实际上，这意味着，天线的相位中心，并且因此大地测量参考点将依赖于来自一颗特殊卫星的信号的方向。方位角的变化通常已经被忽略掉，而仅仅考虑仰角的相关性，尽管这在将来很可能会改变。IGS已经为每个特殊天线模型制定了应用在数据分析中的相位修正值数组。忽略这些影响可能在电台高度计算中引起高达~10 cm的系统性误差。当前的IGS方法将相对于AOA Dorne Margolin T扼流圈天线的差分相位修正值用作一个标准参考，而且大多数测量值遵循Mader的方法论 [1998年]，它在网站 ([www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/](http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/)) 中描述。

卫星发射机的相位图已经被忽略。IGS已经转而采用卫星和跟踪电台的绝对天线图 [Schmid和Rothacher, 2003年]。

很多永久GPS天线已经被安装了天线罩来保护扼流圈单元不受落雪或各种各样废弃物的损伤。这些不变地影响着GPS系统的性能，主要是使波前相位变形，它可能增加电台位置的明显移位，特别是高度。有和没有天线罩时在位置上的差别可能会达到数厘米的级别。测试已经显示出，圆锥型天线罩通常问题最大；一些类型的半球形天线罩表现出影响最小。当前，IGS在它所发表的天线相位中心表中没有考虑天线罩的存在 – 所有天线被视同为没有天线罩，即使已经测量出了因为天线罩的相位中心修正值。最好的通用建议是避免使用天线罩，除非绝对需要。否则，选择一个已经测量过且发现影响很小的半球形天线罩。

### 13.2.3 天线电缆和连接

从GPS天线连接到接收机的电缆应尽可能的短，并且采用单个连续段。应没有信号分配器或其他原件插入，以保证最佳可能功率和阻抗匹配。尽管对分配器或其他单元对时钟性能影响的特殊测试非常有限，传闻证据显示出无论何时进行了这种类型的添加将会有劣化。[Rieck *et al.*, 2003年]报告了温度敏感性结果，但没有研究多径或其他影响。)为了防潮和防曝露应对连接器进行密封。应选择具有良好的相位稳定度特性、低温度敏感性 ( $< 0.1 \text{ ps}/^\circ\text{C}/\text{m}$ )、和低损耗的电缆类型。应避免电缆通过开放地面布放，而是应该在一个埋放的管道中。总之，任何减少暴露在环境影响下的努力是可取的。

### 13.2.4 GPS接收机

大地测量GPS接收机必须报告在L1和L2频率上的伪距和载频相位观测值。为了时间比较，接收机还必须具有接受来自一个外部标准的参考频率和1 PPS输入并忠实地将它们用于其内部定时功能的能力。这样的功能经常是其他标准大地测量设备的购买选项。在L1，IGS网络中的大多数接收机跟踪P1码而不是较窄的C/A码，因此对仅仅C/A类型设备的经验是有限的。还没有报告过对不同类型编码跟踪时钟性能的并排比较。另一方面，尚未看到普通使用中几种类型设备的可辨别差异[Ray and Senior, 2003年]。基本要求是编码的易受多径影响性应该要低。

各种研究已经显示出温度变化对GPS接收机频率稳定性的有害影响[Rieck *et al.*, 2003年]、[Overney *et al.*, 1997年]、[Petit *et al.*, 1998年]、[Bruyninx and Defraigne, 1999年]、[Schildknecht和Dudle, 2000年]。典型的敏感度是在 $\pm 100 \text{ ps}/^\circ\text{C}$ 量级，在各个设备中有较大的变化，即使是相同的型号。因此，对高性能时间和频率应用，至关重要是GPS接收机应被保持在一个环境受控的场所，其热波动最好不超过 $\sim 0.1^\circ\text{C}$ 。

很多接收机对各种功能具有用户可选设置，例如开启星载码平滑或将内部接收机时钟对GPS时间进行引导。后一个设置对有用的时间比较必须要关闭。通常还建议关闭码平滑，因为这在随后的数据分析中能被更好地处理。

如同任何时间和频率播发系统，必须应使输入参考频率和1 PPS信号保持相互相干并与干扰源隔离开。如有要求，应特别注意二次输入频率的产生。此外，为了使接收机工作正常，1 PPS标记通常必须是在GPS时间的某个小容限之内，例如 $< 30 \text{ ms}$ 。

GNSS观测数据普遍地采用RINEX（与接收机无关的交换）格式发射，它描述于：<ftp://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/data/format/rinex210.txt>。这个文件还包含用于导航电文、气象数据、和相关信息的格式规范。通常，除了RINEX文件外，建议将来自接收机的原始、本地数据文件归档，以防稍后在解译中发现问题。测时用户能够采用在比利时皇家天文台开发的一个工具从RINEX文件中得出用于CV的文件类型（“CGGTTS格式”）[Defraigne *et al.*, 2001年]。

### 13.2.5 评估多径影响和系统测试

一旦已经建立了一个大地测量电台，在它投入运营前，应对数据质量进行彻底的评估。如果发现问题，它们应尽可能被改进。导航卫星测时测距大学联盟协定（UNAVCO）已经建立了一个信息非常丰富的网站（[www.unavco.org/facility/facility.html](http://www.unavco.org/facility/facility.html)），它包含关于连续运行GPS电台设备的有用建议和测试报告。它们还维持广泛的软件工具。特别是，“teqc”工具组对处理和检验原始GPS数据是不可或缺的，包括RINEX文件解译、数据编辑、和质量检验[Estey and Meertens, 1999年]。采用teqc输出，能够发现大多数与数据质量有关的基本问题，例如过多的周跳、不完整的数据捕获、天空覆盖遮蔽等。teqc诊断MP1和MP2分别测量在L1和L2频率上的编码多径RMS变化，假设相位多径影

响是可忽略的。对每个卫星穿越重置一个未知偏差，因此使这些多径度量对长期信号不敏感，这对测时会是很重要的。此外，因为不同接收机类型的固有不同特性，MPi测量通常缺少绝对意义且不能方便地逐个地点进行比较。但是，随着仰角和在时间上的大得出乎意料的多径变化可以显示地点或配置问题。至少在一个情况下发现MP2的变化与大地测量数值性能中的变化密切相关 [Ray and Senior, 2003年]。

如果能够采用来自IGS的精确轨道和卫星时钟产品为接收机时钟特性产生精确点定位解算值，则一个仅仅编码解算值与编码+相位相比较能够揭示意料不到的伪距数据问题。另外一个有用的诊断是在接连的1天分析弧线之间的时钟估算值中不连续性的水平[Ray和Senior, 2003年]，它主要反映出在伪距多径噪声中的变化（见下文）。研究多径误差的其他方法 – 例如来自一个大地测量解算值的后拟合残留的天空分布或GPS信噪比中的高频变化 – 通常专注于相位影响，而不是专注于伪距。然而，传统测试是一个特殊误差图形以一个23小时56分4秒的恒星日标称周期一天又一天的重复，近似对应于星-地几何的重复周期。

### 13.2.6 对跟踪电台时延的校准

采用任何中间系统将一个电台时钟的读数与另一个电台相比较要求必须要准确知道所有仪表硬件内的内部时延。这样做的过程被称为校准。通常，我们可以考虑二类校准方法：绝对确定，其中采用一个GPS信号模拟器建立对偏差测量的一个端到端设置，模拟器自己必须已经被准确地校准；以及差分确定，其中对作为标准参考的另外一个类似系统进行一个并排比较。实际中，二种方法都被使用。少量大地测量接收机已经以一个绝对模式被校准。然后这些接收机被用作移动标准来差分校准更多数量投入运行使用的接收机[Petit *et al.*, 2001年]。

一个大地测量GPS接收机类型已经被绝对校准，Ashtech Z-XII3T，采用在美国海军研究实验室的一个模拟器设施[White *et al.*, 2001年]、[Petit *et al.*, 2001年]、[Plumb *et al.*, 2005年]。绝对结果与相对于一个以前校准的传统CV测时接收机所进行的一个差分测量在它们大约3.5 ns的报告不确定性之内相一致[Petit *et al.*, 2000年]。在绝对校准程序中主要的误差源被认为是GPS模拟器自己[Plumb and Larson, 2005年]。可以以大约1.6 ns的较小不确定性相对于一个绝对标准进行后续的差分校准[G. Petit, 专用通信]。

为了用户方便，可以在生成RINEX交换文件的过程中调整来自一个校准过接收机的GPS数据以消除仪表偏差。指定完成这个操作的方法是将时钟偏移修正值dT写入在每个观测历元记录上保留的一个区域，并按照以下关系来修改所报告的观测值，以保持它们严格的一致性：

$$\text{时间（修正后）} = \text{时间} - Dt \quad (13-3)$$

$$\text{PR（修正后）} = \text{PR} - (dT * c) \quad (13-4)$$

$$\text{相位（修正后）} = \text{相位} - (dT * \text{freq}) \quad (13-5)$$

此处：

时间： 观测历元

PR： 伪距

相位： 频率“freq”的载频相位。

如果有必要，为每个观测历元提供时钟偏移修正值使得可以重新构成原来的观测。但是，这个RINEX特性被格式规范限制到缩短到最近纳秒值的时钟偏移值。如果应用亚纳秒校准修正值而不采用RINEX时钟偏移区，则时钟修正值应被记录为RINEX文件头中的一个注释。

### 13.3 数据分析策略

对GPS可以被用来达到比原来设想好几个幅度量级的大地测量准确性的认可通常归功于Counselman和Shapiro[Counselman和Shapiro, 1979年]。通过应用为甚长基线干涉(VLBI)开发的天文技术,他们建议采用载频相位而不是伪距作为主要的GPS观测值。通过对GPS信号相位中变化的非常精确跟踪,显示了如何能够使相对位置计算达到厘米级别而不是数十米。之后很快, Bossler *et al.* [1980年]描述了解决载频信号整周相位模糊度的方法。之后发展跟进很快,极大地利用了VLBI方法和模型的传承,其中大部分也直接应用于GPS。主要的分析差别是GPS的附加轨道相关参数和群时延观测值的相对加权(对VLBI至关重要,但除了时钟解决方案外对GPS不重要)和相位观测值(对GPS至关重要,通常仅作为VLBI中的低权重时间派生物而被包括)。

#### 13.3.1 GPS观测方程式

在ICD-GPS-200和很多随后的出版物中叙述了减少GPS观测的基本步骤。对一颗给定卫星和跟踪电台对,每个观测频率*i*的伪距观测方程式可以写作:

$$P_i = R + c(C_r - C_s) + I_i + T + e_i \quad (i=1,2) \quad (13-6)$$

此处:

- $i=$  1, 2对应于二个频率 $L_1$ 和 $L_2$
- $R$ : 卫星和接收机相位中心之间的距离
- $c$ : 真空中光速
- $C_r$ : 在信号接收时刻跟踪电台的时钟同步误差(包括所有内部时延分量)
- $C_s$ : 在发射时刻发射卫星的时钟误差
- $I_i$ : 电离层时延
- $T$ : 由于中性大气层所引起的时延(主要是对流层)
- $e_i$ : 测量误差(包括热噪声和多径这样的其他噪声源)。

在天线和接收机中的热噪声为测量误差大小确定了一个下限,一定程度上取决于接收机所使用的特殊跟踪技术。像多径这样的大多数外部效应可以被消除的零基线实验显示出一对Ashtech Z-12接收机的C/A伪距和 $L_1$ 载频相位测量噪声的RMS分别是4 cm和0.2 mm[Langley, 1996年]。但是,本地环境影响总是主宰实际的测量噪声。根据观测的后拟合残值,对于伪距和载频相位与误差的大地测量处理的标准先验值分别是大约1 m和1 cm [Zumberge *et al.*, 1997年]。

电离层是色散性的(时延近似正比与频率平方的倒数)且对于伪距和相位符号相反。二个频率的线性组合:

$$P_3 = 2.5457 * P_1 - 1.5457 * P_2 \quad (13-7)$$

对一阶是无电离层影响的(但对二阶影响的一个研究请参见[Kedar *et al.*, 2003年])。所以:

$$P_3 = R + c(C_r - C_s) + T + e \quad (13-8)$$

此处:

- $e$ :  $P_1$ 和 $P_2$ 的组合误差。

相位观测值的观测方程式相同（以距离单位表示），增加了一项在每个载频处未知数量相位周期的模糊度（ $N_i\lambda_i$ ）。根据卫星（ $X, Y, Z$ ）和接收机（ $x, y, z$ ）天线相位中心的地心坐标给出范围  $R$  如下：

$$R = \sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + (Z-z)^2} \quad (13-9)$$

当采用卫星质心或接收机大地测量标记的坐标而不是相位中心的坐标时，必须根据外部测量应用适当的偏心率。GPS 广播电文提供作为时间函数的每颗卫星位置（相位中心）和时钟读数的数值，准确到数米。采用对至少4颗不同卫星同时观测和对流层时延的一个原始模型，一个用户接收机的位置和时钟读数在每个历元能够被确定到  $< 10 \text{ m}$ 。如果用户位置是已知先验值且只有时钟是未知的，则仅仅需要一个卫星观测。

共视时钟比较是通过差分来自具有已知坐标的二个接收机的同时数据来进行的。这消除了卫星时钟误差，一起还有很多卫星位置误差和对流层时延。对传统CV测量，仅仅采用单频C/A伪距，电离层模型误差通常限制了远距离时钟差计算的准确性。通过采用无编码P1和P2观测的线性组合可以对此极进行大地改善，做法如同P3CV方法[Defraigne *et al.*, 2001年]。作为一个规则，CV时钟比较的准确性随着接收机之间距离的增加而恶化，因为被忽略项的共模消除有效性逐渐变差。为了减弱这些影响，用于UTC的CV方法在近年已经被修改。高度准确的IGS轨道和电离层图（[igsb.jpl.nasa.gov](http://igsb.jpl.nasa.gov)）现在被用来计算对这些影响的修正值[G. Petit, 专用通信]。可以进行进一步的改进，例如更好的对流层建模和考虑地理移动（例如，潮汐移位）。但是，这样的增加性修改不能利用相位观测的固有精确性，因此CV测时结果不能达到完美大地测量技术的水平，特别是在少于1天左右的间隔上。

在大地测量分析中，除了可能用于数据筛选和编辑的一级水平外，不使用广播导航信息。对所有已知地理影响评估了最高质量的先验模型，并采用物理上似乎合理的参数化法将剩余未知部分从数据中调整出去。在大多数情况下，将卫星时钟和轨道值固定到由IGS发布的非常准确的计算值是有利的，因为一般的GPS用户不可能也同样做。只要也严格遵守IGS规定和模型，这将极大地简化接收机时钟的估算。

### 13.3.2 用于全球解决方案的方法

在要计算卫星时钟和轨道的情况中，代替取自一个外部来源，我们首先考虑像IGS分析中心所使用的那些来源，在其中，来自一个全球跟踪网络的数据在大量同时调整中被减少。为了确定卫星轨道和时钟，需要有一个全球适当分布的接收机网络。分析弧线通常被划分成24小时的段落，与通常包含从00:00:00至23:59:30观测值的标准RINEX的每日文件相一致。（请注意，IGS规定在其所有数据文件中采用GPS时间作为时间标签。）对于一些类型的解决方案，通过将多个接连的一天弧线链接到一起可以构成多天分析弧线。初步处理步骤包括筛选来自每个电台的数据文件。必须要检验并编辑潜在有问题的数据、修复或标示载频相位中的滑动、对一些类型接收机中小的时间标签偏移进行调整、和在P1和P2不可用的情况下修正伪距偏差。筛选后的数据通常被重新格式化为适合于所选分析系统的直接访问文件。

所有大地测量调整方法假设可以得到足够准确的先验信息，它们的参数估算是线性的并因此可以应用普及的最小二乘法。如果没有更好的现成来源，可以使用广播导航电文。如果需要，例如对一个新的电台，可以使用解算迭代法来满足线性条件。采用一个假设的地球定向参数（EOP）值数组，将先验卫星轨道从一个地球地壳固定坐标系（用于在广播电文中及被IGS播发的轨道）旋转到一个地心惯性（ECI）坐标系。通常，EOP是由IGS或由国际地球旋转和参考系统服务（IERS）所产生的那些；参见它们的网站：[www.iers.org](http://www.iers.org)。在ECI坐标系中，卫星轨道可以被拟合到动态移动的

参数化模型并被积分。如果轨道将在随后的数据拟合中被调整，需要这个步骤来产生参数偏导数。已经开发出各种形式来描述GPS卫星运动，从Fliegel *et al.* 的有限元方法[1992年]到Beutler *et al.* 的经验模型[1994年]。即使认为一个更好的卫星特性物理模型将会优于一个纯经验的方法，但是经验表明，任何增益是微不足道的。这是因为，对高准确性大地测量应用，轨道参数化必须细致到足以捕获厘米级的运动，这对真实卫星不采用至少某些经验参数是极其难以完成的。由于暴露于太阳辐射压变化而引起的加速度变化和特别是被用于保持一些较早卫星姿态的微推动使得运动复杂化。

对每个数据点进行观测方程式求值，采用也旋转到ECI坐标系的先验电台坐标。除了已经提及的基本影响，由许多较小影响所引起的贡献也必须被包括（见下节）。通过采用标准方法使残值最小对参数进行调整来拟合观测值，例如批处理最小二乘法、序列最小二乘法、或一个卡尔曼滤波器。卡尔曼和相关的滤波器特别擅长于处理时钟参数，因为它们容易适应适合于实际时钟变化的随机性噪声过程。对于有大约数十个跟踪电台的一个全球网络，通常被调整的完整参数组包括：

- 对每个电台最多到三个地心坐标（服从于一些地面基准的规范，例如对某些参考电台位置的限制）；
- 随时间变化的接收机时钟参数（它们必须足以允许历元间近乎任意大的变化）；
- 每颗卫星的轨道参数（至少 6 个开普勒轨道根数，或等效，加上一个 Y 偏差和其他经验项）；
- 随时间变化的卫星时钟；
- 随时间变化的天顶对流层时延（以及可能的方位角成分）；极移的 EOP 偏移和速率及一天长度；和
- 载频相位模糊度。

有时，还包括了额外的次要参数，例如卫星姿态的变化或跟踪网络原点相对于地球质心的净偏移这样的影响。因为没有任何时钟历元的绝对信息，所以时钟参数组有一个一级缺陷。标准大地测量分析通过选择一个要被去调整来作为估算过程中参考的特定时钟（通常是一个非常稳定的地面时钟）来解决这个缺陷。然后相对于那个固定时钟计算所有其他时钟的估算值。或者，可以通过将一个可用时钟线性组合固定为等于零（或任何指定数值，例如GPS时间）来指定时钟基准。

对于最高质量结果，至少“固定”一些相位模糊度参数是可取的。因为采用未差分单向观测来尝试完成这个任务的巨大困难，正规的步骤是对选定电台对双重差分模糊度的整数予以严格的限制。对模糊度参数的主要部分成功地这样做将极大地稳定总体解算值。在大多数情况下，对解算值的迭代能够增加被成功固定参数的数量并改善数据编辑。

### 13.3.3 修正项的参考系和模型

在评估基本GPS观测方程式的过程中，如果期望厘米级结果，还必须考虑多个次要影响。这些中的大多数记录在IERS规约中[McCarthy和Petit, 2003年]。用于关联到地球表面点的地心坐标系是国际地球参考框架（ITRF）[Altamimi *et al.*, 2002年]。从ITRF变换到ECI坐标系考虑了地球框架中的地极移动和围绕地极的旋转。地极在惯性空间中的移动（即，章动[Altamimi *et al.*, 2002年]）有时被忽略掉或仅仅近似地处理，因为近地卫星对此影响不是非常敏感。所以，ECI坐标系不总是精确地与国际天球参考架（ICRF）（由银河系外无线电源的VLBI位置构成且原点是太阳系质心的一个近惯性系）相一致。

对卫星的修正项是前面所描述的在质心和天线相位中心之间的偏移，以及由于视野中的变化所引起卫星极化的相位旋转。因为GPS信号是右旋圆极化的，出现了在天文学中被称为视差角的后一

项影响。随着接收机和卫星之间视图几何形状的变化，极化相位表现出对应的变化。一个修正值必须被应用到对载频相位观测值的计算中，而不是对伪距的计算中，如Wu *et al.* 所描述[1993年]。

因为地理物理的影响，对接收机位置的修正要更加多种多样和复杂[McCarthy and Petit, 2003年]。由于固态地球（“球体”）潮汐所引起表面点的大部分垂直移动在中纬度有一个数厘米的幅度，且必须被准确地建模。由于海洋潮汐负荷所引起的对应地壳运动在大多数地方几乎小一个幅度量级，但在一些海岸地区可能被放大。如果估算GPS轨道，则由于固态地球和海洋潮汐所引起的势能中的变化也应被包括在先验轨道积分中。极潮修正负责由于极点相对于地壳的位置变化所引起的大规模旋转变形。极移自己和旋转速度经受由于海洋潮汐移动所引起的相当大的周日和半周日调制。当在一个惯性系中表示GPS卫星时，应对这些地壳框架的大规模移动应用修正。在一个地固系中，IGS轨道已经包括了亚日EOP变化，因此对一个地球观测者没有净影响。所有这些影响的准确模型已经由McCarthy和Petit给出 [McCarthy and Petit, 2003年]。此外，用户应该应用IGS所建议并在前面描述过的天线特定相位中心修正值。

尽管国际科学联盟提倡将地心坐标时间（TCG）用于近地卫星数据分析，但大多数（如果不是所有的）分析组继续使用地球时（TT），它与UTC和TAI仅仅差一个偏移值。另一方面，TCG因为广义相对论效应而在速率（频率）上不同于TT。因此，应将来自IGS和其他GPS分析组的时钟频率直接与在测时实验室中所测量的那些相比较。一些物理常数，例如引力常数和地球质量的乘积GM，取决于对相对论参考系的选择，因此在使用适当数值时必须要小心。

通常在GPS处理中应用三种相对论修正值：

1. 假设是标称轨道根数，由于时间膨胀和引力势能差所引起的相对于 TT 的一阶频率移位已经在航天器中设定振荡器偏移被应用到 GPS 系统中。用于非圆形 GPS 轨道的二阶修正值必须由用户应用；（见 ICD-GPS-200）。
2. 在 IERS 规约中给出了对近地卫星加速度的一个“动态”修正值[McCarthy and Petit, 2003年]。
3. 在 IERS 约定中分别给出了包括引力时延的传播坐标时间（但经常被忽略）。

（进一步细节见 Kouba [2004]。）

### 13.3.4 精确点定位

与形成大规模全球网络的GPS解决方案相比，对大多数应用来说，更加经济和有效的是分析来自各个工作在精确点定位模式（PPP）电台的数据[Zumberge *et al.*, 1997年]。以这种方式，卫星轨道和时钟取自先前的来源并且被不加调整地应用。（在一些PPP方法的变形中，允许对轨道和时钟部分放宽松。）应用所有与以上所讨论相同的模型，用户能够为一个隔离的单个接收机计算坐标、时钟变化、和对流层时延[Kouba and Heroux, 2000年]。结果的质量将直接取决于先验卫星信息的准确性和一致性。假设轨道和时钟的参考系和基准将由PPP结果传承，因此，重要的是这些应该是适当规定和稳定的。IGS的产品（见下文）是明确针对此目的的。Kouba [2004年]为将IGS结果恰当用于PPP分析提供了一个指导。对于一天解算弧线，典型的位置可重复性在垂直方向应在大约10 mm的水平，在水平方向应在大约3至5 mm的水平。PPP接收机时钟结果应精确到类似的水平，< 100 ps，但是，准确性（不包括校准不确定性）通常将会更大（见下文）；PPP时间标度将是先验卫星时钟的时间标度。

### 13.3.5 误差对时钟解算值的影响

在分析模型、先验信息、或观测数据中的误差将影响GPS时钟估算。Dach *et al.* [2003年]已经使用模拟来检验各种类型输入误差的特征。例如，一个电台高度误差将对长的东西向基线引起一个频率偏移。在时域中，由于这个误差造成在处理弧线之间的边界处引入了一个不连续性。卫星轨道误差可以有类似的影响。在实际使用中，这些误差的影响在IGS产品中不可能非常明显，因为电台和卫星位置与时钟一起被进行了调整。可能更加重要的是Dach *et al.* 确认，即使假设具有白噪声分布，0.5 m量级的伪距噪声将在离散一天处理弧线之间引起在实际时钟结果中所见水平的偏移（见下文）。涂色的伪距噪声可能对弧线之间时钟跳跃有一个更加显著的影响。

预期采用更多伪距数据（更高取样速率和/或更长弧线）将改善时钟的准确性。更高取样速率将只有在主导多径波长短于取样周期时才有效；否则，时钟误差将不会随着增加更多数据而被平均下来。如Senior *et al.* [1999年]对时钟正规不确定性所演示的，尽管比 $\sqrt{N}$ 效率更低，但是更长的分析弧线应会将编码噪声影响平均下来。但是，这尚未对实际时钟结果证实过，而仅仅是对它们的正规误差。也尚未证实更长弧线是否仅仅差一个净时钟偏差，或者频率内容是否也被改变（改善）。如果更长弧线仅仅在偏差的意义上提供更好的时钟准确性，则其他分析方式应提供近似相等的结果，例如对较短弧线结果进行一个适当的后分析滤除。可以证明后一种方式更经济或更适合于某些应用。

独立分析弧线之间的不连续性对所有大地测量参数是正常和意料之中的，包括轨道、对流层时延、以及时钟。偏移应反映GPS数据和分析方法的固有质量。尽管对分析弧线进行有效地平均，因为仅仅编码数据有所贡献，所以时钟跳跃的幅度倾向于比大多数其他参数更大。已经考虑了各种使日分界不连续性减少的方法。明显的方法将是避免不关联分析组合在一起，并使用一些类型的连续处理机制[Petit *et al.*, 1999; Senior *et al.*, 1999年]。

但是，这在实际中是难于实现的，并且会导致一些误差影响积累[Senior *et al.*, 1999年]。长分析弧线也将引起时钟估算在相同时期上被相关（随机漫步类型统计），它将会限制另外采用独立分析弧线（白噪声特性）可以得到的稳定性。消除分析不连续性的一个替代方法是将采用重叠弧线的时序序列串联起来去计算偏移[Bruyninx和Defraigne, 1999年]、[Larson *et al.*, 2000年]。即使在弧线边界的时钟跳跃遵守一个白噪声分布[Ray和Senior, 2003年]，对串联序列的影响将是一个随机漫步噪声成分的相加。换句话说，串联处理也会引起长期时钟相关，并且可能限制另外可能得到的长期稳定性。Dach *et al.* [Dach *et al.*, 2006年]考虑了其他通过将信息从一个弧线传给下一个来在计算处理自身中产生接近连续时钟结果的更加复杂的方法。这些操作很像一个滤波器/校平器，以更长间隔上较小的影响来改善短期时间传递的稳定性。

理解对在弧线边界处压缩时钟跳跃的广泛痴迷是困难的，特别是在它们是很小（在100到200 ps量级）的情况下。采用将长期相关性引入到时钟时序序列中的方法（例如通过串联）似乎将是特别事与愿违的。如果真正需要消除不连续性，则一个滤波器/校平器方法可能更适合于避免相关时序问题，尽管这可能扭曲短期时间特性。另一方面，不连续性自己对电台装置质量提供有价值的诊断信息（见下文）。如果跳跃大于大约120 ps的标准噪声水平[Ray和Senior, 2003年]，则应确定其下层原因并进行改善，而不是通过后分析操作来避而不见。

## 13.4 IGS时钟产品和时间标度

自从1999年全面启动以来，IGS已经每天提供了准确卫星位置和时钟读数文件，以15分钟间隔列表。自从那时起，已经不时添加了新的或改进的产品。所有IGS产品（<http://igs.cb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>）是通过由高达8个有贡献的分析中心所提供解算值的加权平均来形成的。尽管各个组所使用的数据组通常重叠，但不同分析策略、建模、和软件的影响是极为独立的。因此，



对各个结果的适当加权组合通常超过任何单个结果。通过这种方式，与任何分别的分析组相比，IGS产品很可能在精确性和准确性上受益，但肯定在稳定性、可靠性、和强健性上受益。

### 13.4.1 可用的产品组

当在2000年11月5日（GPS第1087周）实施了一个新的组合算法时，IGS“典型”时钟产品被改变了，而且时钟产品被扩展到包括很多在跟踪网络中的接收机，以及卫星[Kouba and Springer, 2001年]。与卫星时钟以前的15分钟取样相比，新时钟（卫星和跟踪电台）的列表间隔被减少到5分钟。

三个系列的产品线是基于数据延迟而产生的；

1. 超快速产品（采用卫星时钟，但没有接收机），它们的目的是用于实时用户；
2. 快速产品，在每天结束之后大约 17 个小时发布；
3. 不可更改的最终产品，在每周结束后大约 13 天发布。

表13-1总结了IGS轨道和时钟产品、延迟、和估算的准确性。（除了在表中所示的那些之外，IGS还提供电离层图、对流层天顶路径时延、地球定向参数等。）所有产品可以从IGS数据中心或中央局得到；（[igs.cb.jpl.nasa.gov](http://igs.cb.jpl.nasa.gov)）。采用IGS快速或最终产品替代广播信息可以使PPP计算对于24小时弧线达到1 cm量级。

IGS跟踪网络由超过350个分布在全球的接收机装置组成。所有的电台连续工作并每天（至少）报告具有30秒取样的RINEX观测文件。大多数电台采用内部晶体振荡器，它们通过被它们自己的观测引导来跟踪GPS时间，但超过100个IGS电台装备了外部频率标准。图13-1显示了在IGS网络中外部标准的分布和类型（截止到2004年11月）。大约51个采用氢脉泽标准，28个采用铯时钟，而27个采用铷时钟。这些的一个子集，大约20个，共处在测试实验室中。

表13-1

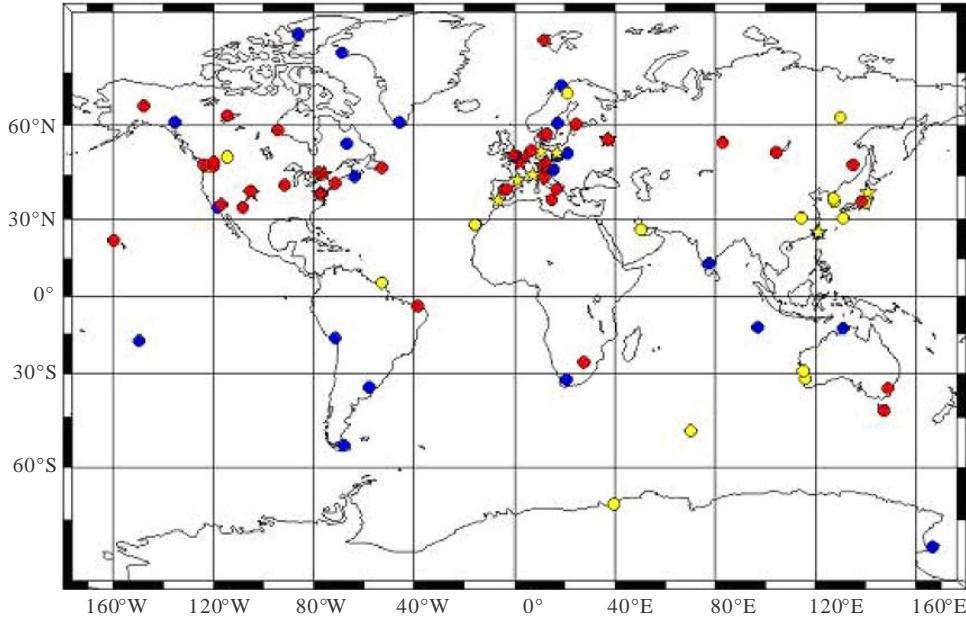
IGS组合轨道和时钟产品及其特性  
与广播值比较

GPS卫星星历表和卫星/电台时钟		准确度估值	时延	更新间隔	取样间隔
广播	轨道	~200 cm	实时	--	每天
	卫星时钟	~7 ns			
超快速（预测的一半）	轨道	~ 10 cm	实时	每天4次	15 min
	卫星时钟	~ 5 ns			
超快速（观测的一半）	轨道	< 5 cm	3小时	每天4次	15 min
	卫星时钟	~ 0.2 ns			
快速	轨道	< 5 cm	17小时	每天	15 min
	卫星和电台时钟	~ 0.1 ns			5 min
最终	轨道	< 5 cm	~ 13天	每周	15 min
	卫星和电台时钟	~ 0.1 ns			5 min

除了对预测的轨道，轨道准确性估值是基于与独立激光测距结果的比较。精确性好于引用准确性。产品文件是24小时周期，除了超快速是48小时。在“时钟RINEX”格式文件中可以得到5分钟时钟数据，而15分钟时钟取样可以在SP3格式文件中得到，一起还有卫星星历表。

图13-1

显示采用外部频率标准IGS电台的分布地图（截止到2004年11月）。  
 彩色表示标准的类型：红色是氢脉泽，黄色是铯，  
 而蓝色是铷。共处在测试实验室中的IGS电台用星号标示



Sat\_time\_freq-13-01

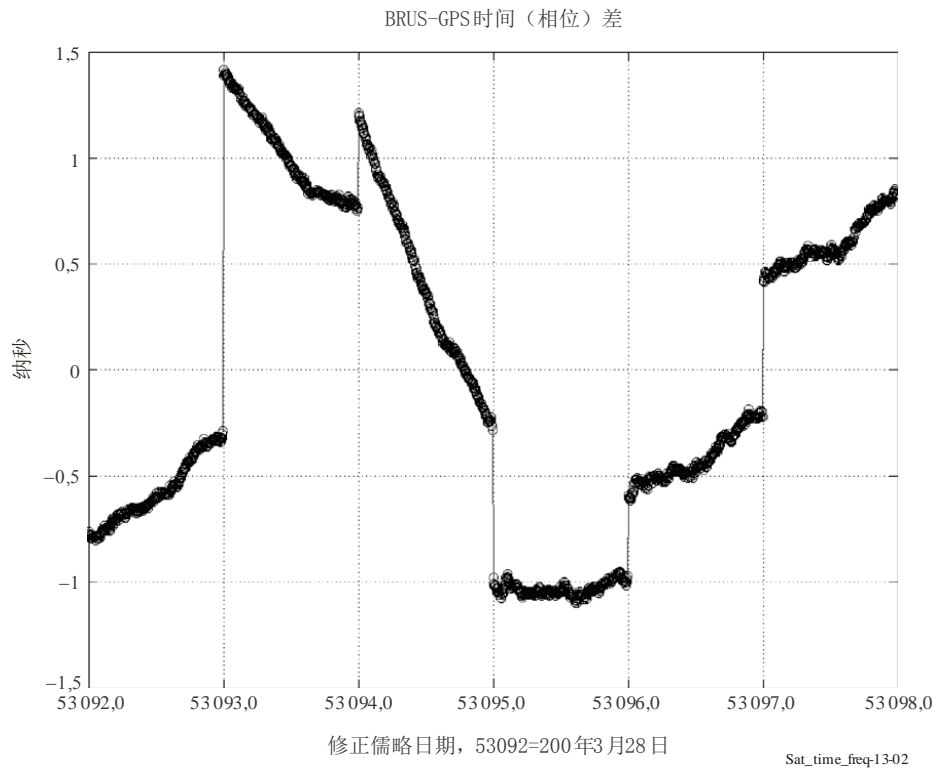
### 13.4.2 IGS时间标度

当用于大地测量定位应用时，除了应该适当靠近GPS时间外，对时钟产品基础时间标度没有特别的要求。GPS大地测量学的一个重要强项是它对一阶近似不依赖于时间标度的稳定性或准确性，因为时钟的影响可以通过双重差分被消除掉。但是，期望参考时间标度具有其他特性，例如高度稳定和对UTC可准确跟踪。这些质量提高了IGS时钟产品对纯大地测量学以外应用的价值，特别是对测时操作。

IGS最初将所观测卫星时钟相对于广播GPS时间的一个简单每天线性校准用作其时钟产品的参考。但是GPS时间的不稳定性相当大，大约一天 $2 \times 10^{-14}$ ，它比IGS网络中最好频率标准的不稳定性至少差一个幅度数量级。甚至一些新的Block IIR卫星具有比组合GPS时间更稳定的时钟，部分是由于用来使广播时间标度保持对UTC（通过美国海军天文台保持的实现）校准的Bang-bang控制算法所致。IGS将其时钟每天相对于GPS时间校准的老程序在时间和频率中都引入了大的每天之间的不连续性（图13-2）。这个程序对精确定位产品的有效性没有影响，但是对时间和频率播发的效用肯定受到了限制。

图13-2

在2004年3月28日到4月2日期间对布鲁塞尔  
BRUS站的GPS大地测量时间传递的估值



在图13-2中的时间传递估算值是参照对GPS时间的每天线性校准。BRUS不稳定性受相对于广播GPS时间的每天线性时间标度校准控制，它对时间和频率中大的不连续性负有责任。为了绘图已经去除了一个线性趋势。

为了改善其快速和最终时钟产品的不稳定性，制定出了新的IGS内部时间标度。新时间标度是作为所包含电台和卫星时钟的加权组合而形成的。Senior *et al.* 给出了对算法的一个详细描述[Senior *et al.*, 2003年]。

每个时间标度（对快速是“IGRT”，对最终是“IGST”）主要受可用氢脉泽驱动，尽管较少的时钟可以稍微有所贡献，包括在Block IIR卫星上的铷钟。

算法是采用每个时钟简单多项式模型对一个卡尔曼滤波器的实施，后面跟随着用于将时间标度宽松地引导到GPS时间的一个线性二次高斯（LQG）算法。

对每个时钟的权重是根据在多个少于一天的平均间隔中所观察到的不稳定性被迭代和动态确定的。对每个时钟施加一个权重上限，以避免单独一个时钟超越时间标度的情形[Thomas and Azoubib, 1996年]。

LQG引导算法受到一个大约30-40天的时间常数的严重限制。结果是具有一天不稳定性一般好于  $1 \times 10^{-15}$  的时间标度，但由于对GPS时间的引导在中长期中仍受到限制。但是，存在时间标度不稳定性可能被稍微劣化的时期，例如当在时钟产品中氢脉泽数量不同寻常地小时。

图13-3显示了在将参考改为IGS最终时间标度IGST后BRUS时钟的性能。电台间时钟信息与图2中相同；仅仅基础时间标度不同。采用IGS时间标度极大改善的稳定性是明显的。在某些日边界处的剩余微小不连续性主要反映了本地BRUS数据的质量。

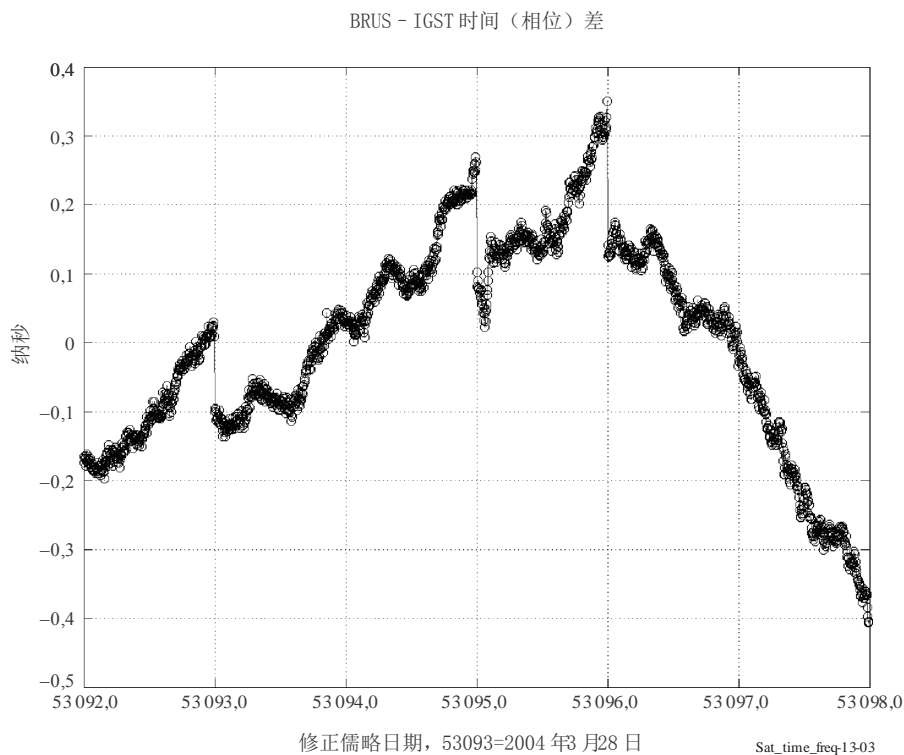
各个时钟的某些影响（包括日边界的跳跃）有可能可以反过来影响组合时间标度，例如，因为未检测到的数据编辑问题。但是，迹象显示，任何这样的限制是次要的，而且组合时间标度远优于任何单一贡献时钟。

新IGS时间标度在2004年3月初被实施到正式产品中（见IGS信件No. 4875：[igsb.jpl.nasa.gov](http://igsb.jpl.nasa.gov)）。

从2000年11月起，可以在以下网站得到对相同内部时间标度校准的时钟产品：  
(<https://goby.nrl.navy.mil/IGStime>)

图13-3

与显示在图13-2中相同的BRUS时钟数据，除了参照于IGS最终时间标度，IGST。为了绘图已经去除了一个线性趋势

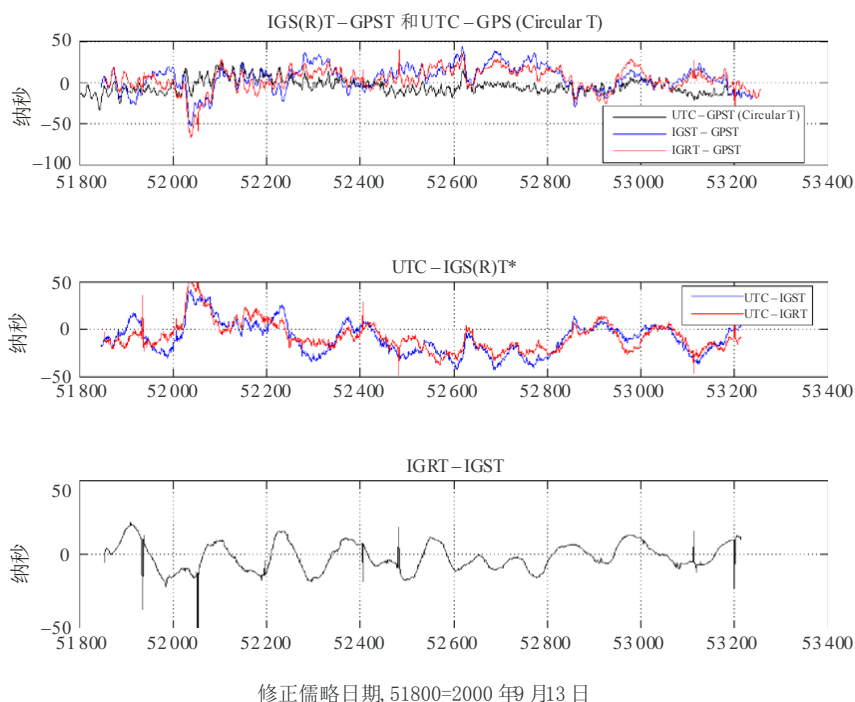


在图13-4中显示了每个IGS时间标度相对于GPS时间和相对于UTC的长期变化（近似）。尽管IGS时间标度的亚日到日不稳定性被极大地改善而超过了GPS时间，因为持续对GPS时间的依赖，更长期的不稳定性类似。正在努力通过采用来自BIPM的数据和利用共处于测试时实验室的IGS电台来将IGS时间标度与UTC更准确地绑定[Senior *et al.*, 2004年]。

在图13-4顶部的曲线显示了UTC减去来自BIPM Circular T系列的GPST以及IGS时间标度IGST和IGRT减去GPST。因为不同的观测值和分析策略，GPST的IGS和BIPM实现可能相差数纳秒 [Senior *et al.*, 2004年]。中间的曲线显示了通过对顶部曲线中的时间系列进行差分得到的UTC-IGST和UTC-IGRT，它假设GPST等效于来自Circular T和IGS。与这个假设的偏离对所绘差别的微小部分负有责任，特别是在高频。最后，底部的曲线显示了IGRT减去IGST，假设每个等同地观测GPST。偶尔的尖峰是由于IGS快速时钟对GPST不常见的未校准误差所引起的，且实际上不出现在二个时间标度中。

图13-4

从2000年11月5日到2004年6月28日IGS时间标度IGST和IGRT  
与GPS时间（GPST）和与UTC（模数跳秒）的比较



Sat\_time\_freq-13-04

### 13.5 利用日边界不连续性分析的性能评估

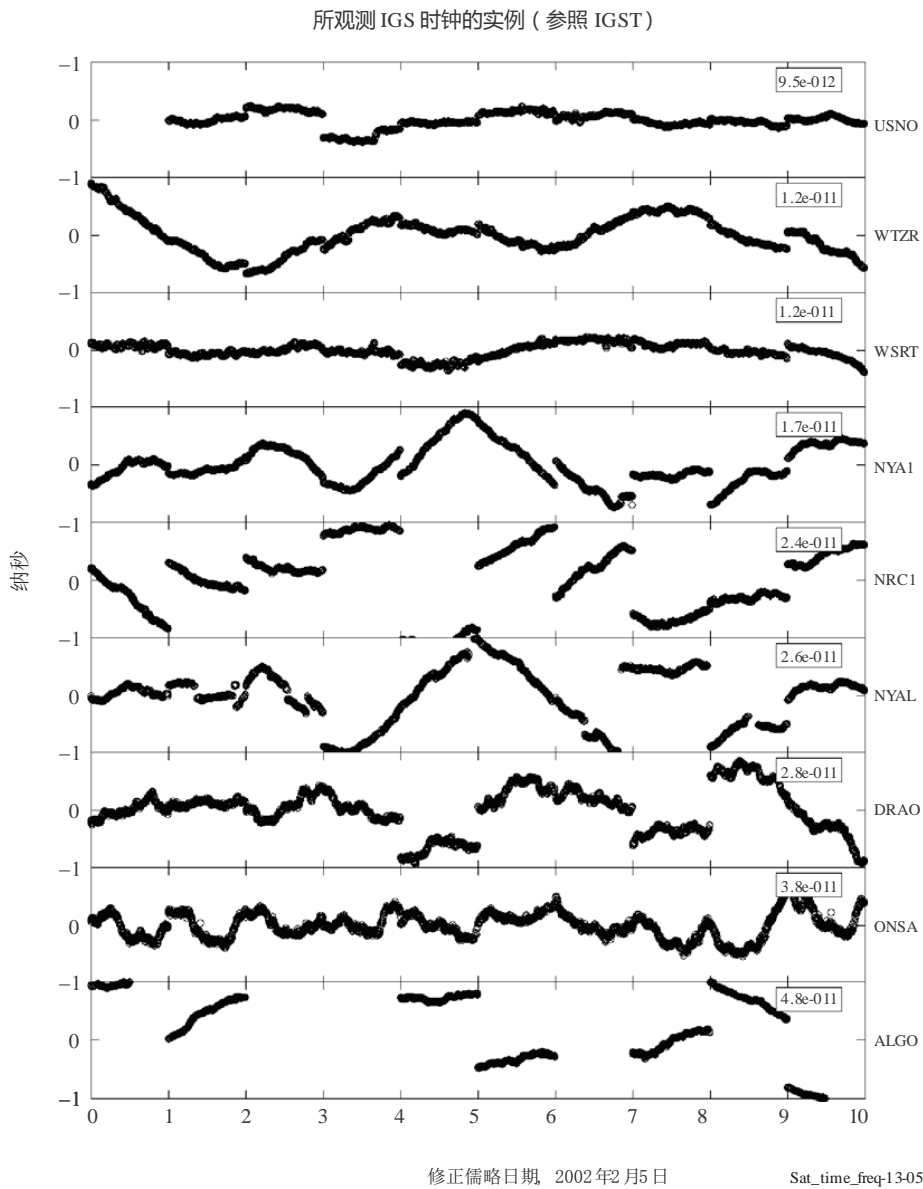
基于GPS时钟估值的“绝对”准确性（模数校准偏差）完全由伪距数据确定，对分析间隔进行平均，通常为24小时。当分析以5分钟间隔取样的全球数据的一天弧线时，时钟的形式误差估算值通常大约是120 ps，假设每个伪距观测具有1米的不确定性。通过比较在装备了非常稳定振荡器接收机的独立分析弧线之间边界处的时钟估算值可以对实际测量准确性进行一个更加现实的测试。（如果采用重叠分析弧线来消除插值误差，也可以对不太稳定时钟进行测量，但相邻的时钟估算值则将不再独立。）这类似于对一个位置计算时间序列的传统大地测量可重复性。

可以对基线解算或对单一电台时钟已经被保持固定为参考的网络分析日边界时钟跳跃。但是，因为在二个电台的影响将在每个时钟时间序列中被卷积，结果可能很难解释。一个较好的方式是将具有新的高稳定组合时间标度的IGS时钟产品用于这样一个分析 [Senior *et al.*, 2003年]。通过解除时钟对，有可能将所观测的特性分离到各个电台。图13-5是8个氢脉泽电台IGS时钟估算值的同时时间

序列的一个实例。请注意，在电台之间不连续性中的可变性与各个时钟的稳定性无关，因为一些地点显示出大的跳跃，但是非常好的亚日稳定性，反之亦然。由Ray和Senior所研究的日边界偏移分布被发现是零平均和高斯分布的，但是具有高地点特定的RMS变化。

图13-5

在2002年2月5日至15日期间9个具有氢脉泽IGS地点的时钟估算值



已经对图13-5曲线从每个时钟消除了一个分开的二次趋势。在每个分格中加框的数值给出了在300秒处的艾伦偏差，忽略了在日边界处的时钟跳跃。日边界跳跃的幅度在电台之间变化极大，且与亚日时钟稳定性无关。

以前的IGS时钟跳跃分析已经被更新，并在表13-2中延伸。已经从IGS快速和最终时钟对在2000年10月和2004年6月之间的1 310天进行了检验。

编辑和处理标准与在Ray和Senior的[Senior *et al.*, 2003年]中相同。在日边界处的最大数据差距是30分钟（通常是5分钟），因此，因为氢脉泽标准中的不稳定性所引起的插值噪声应该是可以忽略的。因为RMS统计是对于独立日对之间的差值，每个日准确性估值应除以 $\sqrt{2}$ 。特别注意的是电台之间在RMS性能中非常大的分散，几乎一个幅度数量级。这大概反映了这些电台之间广泛的编码性能范围，并且反过来，反映了在多径环境中的巨大变化，外部对于天线，以及内部对于GPS仪表。在某些情况下，性能曾经明显地随时间变化，有时与地点日志中所报告的变化相关。在一些情况下发现了季节性变化。RMS变化以前被显示是与接收机或天线模型的选择或天线罩的使用无关的。

表13-2

## 对具有氢脉泽频率标准的38个IGS电台的日边界时钟不连续性统计汇总

IGS地点	RMS时钟跳跃 (ps)	备注
ONSA	149	极佳
BREW	152	极佳
OPMT (TL)	158	新电台，因此非常有限的的数据
BRUS (TL)	165	在2003年夏天的改变之后改善到118 ps
MAD2	170	非常有限的的数据，因此 RMS不可靠
WTZR (TL)	189	
GODE	205	
USN1 (TL)	225	电台在2004年7月被USN3替换
WSRT	227	自从2003年夏天以来有轻微的劣化
KHAJ	233	有限数据
CRO1	236	不再使用脉泽
USUD	266	不再使用脉泽
NPLD (TL)	268	
TID*	269	自从2003年夏天以来表现出改善
YEBE	271	
GOL2	271	非常有限数据，因此RMS不可靠
AMC2 (TL)	283	在2002年6月天线/接收机改变之后有所改善
SPT0 (TL)	286	
WES2	296	
PIE1	305	自从2002年10月接收机改变以来有所改善
STJO	334	
USNO (TL)	354	自从2003年春天以来显得更差
IRKT	359	
NYAL	363	在2004年比NYA1好得多
NLIB	368	
MATE	389	明显的时间变化；在2004年更好

IGS地点	RMS时钟跳跃 (ps)	备注
KOKB	460	在2004年5月天线/电缆改变之前有大的劣化
FAIR	478	自从2003年夏天以来稍微有所改善
DRAO	522	
YELL	564	大的季节性变化，在冬天更差
ALBH	587	在2003年9月之后极大地改善到97 ps
HOB2	631	与电台改变相关的变化
MEDI	703	
FORT	706	
NYA1	750	自从2003年夏天以来有大的劣化
ALGO	877	大的季节性变化，在冬天更差
NRC1 (TL)	936	大的季节性变化，在冬天更差
METS	1 065	不再使用脉泽

从2000年10月到2004年6月使用了IGS快速和最终时钟。采用 (TL) 标示共处在测试实验室中的电台。

在所研究IGS电台中最佳的长期性能是在ONSA (瑞典翁萨拉)，对应于一个  $(149/\sqrt{2}) = 105$  ps 的日时钟准确性。

BREW (美国华盛顿州布鲁斯特)、OPMT (法国巴黎)、BRUS (比利时布鲁塞尔)、MAD2 (西班牙马德里)、WTZR (德国Wetzell)、和GODE (美国马里兰州格林贝尔特) 仅仅有略微比较大的日时钟误差，从107到145 ps。

在其他电台中有有一个持续的更差性能发展，对ALGO (加拿大安大略省阿岗昆)、NRC1 (加拿大安大略省渥太华)、和METS (芬兰Metsahovi) 高达620到753 ps。

时钟准确性幅度范围的量级反映了在本地条件中的变化，例如，不是一个IGS时间标度的人为结果。对此结论给予强烈支持的是在很多电台所看到性能中的暂时变化。

突发变化通常对应于在配置或设备中的已知变化。(遗憾的是，不是所有电台变化都被公开报告。) 有几个电台显示出大的季节性变化，特别是在YELL、ALGO、和NRC1的三个加拿大电台 (图13-6)。

我们以前推测，在冬天期间这些地点时钟跳跃中大幅度的增加是由雪和冰在天线之下及近场中地面上的积累。

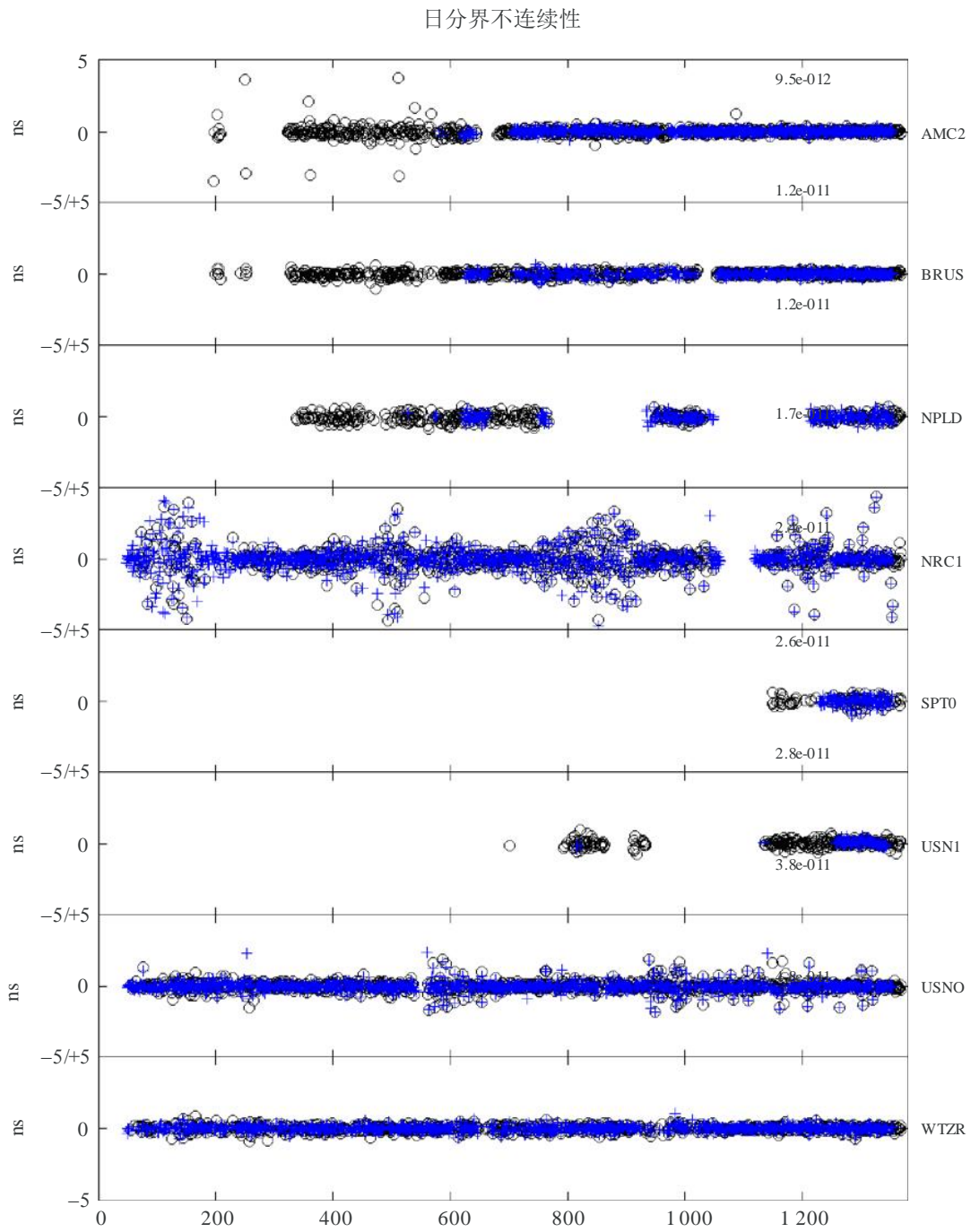
图13-6显示了在测试实验室 (在表13-2以TL标示) 中装备了氢脉泽的那些IGS电台日边界时钟跳跃的记录。因为其非常稀少的数据，OPMT已经被忽略掉。BRUS装置应被视为是值得仿效的，并且是其他测时实验室的一个典范，特别是自从2003年夏天以来。

在图13-6上的研究期间是从2000年10月到2004年6月。来自IGS快速时钟的结果显示为黑色圆圈；最终时钟是蓝色“+”号。



图13-6

在测时实验室中8个IGS氢脉泽电台的日边界时钟偏移中的暂时变化



修正儒略日期，51800 - 2000年9月13日

Sat\_time\_freq-13-06

### 13.6 与独立双向时间传递结果的比较

除了以上讨论的内部评估之外，重要的是将大地测量时钟估值与来自独立系统的那些相比较。尽管在测时实验室中广泛地被采用，传统CV不足以准确地提供信息非常丰富的比较，除了可能对最长平均间隔。更加有希望的是P3 CV和TWSTT方法。在大陆间基线上的一些最佳结果验证了与经过高达数月平均时间的大地测量数值一致到大约0.5 ns RMS或大约0.3 ns TDEV [Plumb *et al.*, 2005; Petit *et al.*, 2004年]。

表13-3总结了来自最近高质量比较研究的结果。

表13-3

对多个变化长度链路的大地测量和P3 CV或TWSTT方法之间已公布比较的总结

链路	基线长度	方法/统计/数值	数据时间段	来源
NPL-PTB	749 km	P3 / RMS / 0.48 ns TW / RMS / 0.57 ns	5 个月 4 个月	Petit & Jiang, 2004年
IEN-PTB	835 km	P3 / RMS / 0.49 ns TW / RMS / 0.64 ns	2 个月 2 个月	Petit & Jiang, 2004年
TL-CRL	2 112 km	P3 / RMS / 0.58 ns TW / RMS / 1.27 ns	8 个月 8 个月	Petit & Jiang, 2004年
USNO-NPL	5 695 km	P3 / RMS / 0.48 ns TW / RMS / 0.59 ns	5 个月 3 个月	Petit & Jiang, 2004年
USNO-PTB	6 275 km	P3 / RMS / 0.45 ns TW / RMS / 0.49 ns	5 个月 5 个月	Petit & Jiang, 2004年
USNO-AMC <sup>(1)</sup>	2 361 km	TW / 差 ± RMS / -2.10 ± 0.69 ns (计算协议) TW / TDEV / < 0.1 ns, 300 ≤ τ ≤ 2 000 s < 0.34 ns, 2 000 ≤ τ ≤ 7 × 10 <sup>6</sup> s TDEV / 0.34 ns 在 7 × 10 <sup>6</sup> s	7 个月	Plumb & Larson, 2004年
USNO-NIST	2 405 km	TW / RMS / 0.83 ns TW / TDEV / < 0.3 ns, 3 600 ≤ τ ≤ 6 × 10 <sup>6</sup> s < 0.72 ns, 6 × 10 <sup>6</sup> ≤ τ ≤ 7.4 × 10 <sup>6</sup> s TDEV / 0.72 ns 在 7.4 × 10 <sup>6</sup> s	5.5 个月	Plumb & Larson, 2004年
PTB-NIST	7 532 km	TW / RMS / 0.79 ns TW / TDEV / < 0.5 ns, 2 × 10 <sup>5</sup> ≤ τ ≤ 7.5 × 10 <sup>6</sup> s TDEV / 0.24 ns 在 7.5 × 10 <sup>6</sup> s	7 个月	Plumb & Larson, 2004年
USNO-PTB	6 275 km	RMS / 2 ns	2 年	Dach <i>et al.</i> , 2002年

<sup>(1)</sup> 分开对仪表时延进行校准的TW和大地测量链路。

TWSTT测量与连续GPS数据相比是相对稀疏的，最近这年中大约每天4次。差值是通过将大地测量和P3 CV结果针对TWSTT历元进行插值计算出来的。对P3 CV数据的减少使用了IGS精确轨道和电离层图，以及将模型移位应用于固态地球潮汐运动。Vondrak平滑也已经被应用于P3结果，等效于截止周期大约为0.4天的一个低通滤波器。如Petit和Jiang所指出 [Petit and Jiang, 2004年]，同时时间序列之间的差值对每个时钟对应该是一个常数（等效于一个校准偏差）。

因此标准偏差应是对于二种时间传递方法相对长期不稳定性的一种测量。大地测量和P3数据经常是来自相同的GPS接收机，因此预期一些基于接收机和天线的误差对每一个方法将是共同的，而且在它们中的差别不明显（例如温度敏感性影响）。因此，仅仅与TWSTT的比较是完全独立的。对Plumb和Larson所研究的所有三个长基线 [Plumb and Larson, 2005年]，高达 $10^5$ 至 $10^6$ 秒间隔的TWSTT不稳定性控制了TW-大地测量时钟差值的艾伦偏差。在更长的间隔上，时钟不稳定性超过来自二种方法的传递噪声而占主导。

基于所公布的与TWSTT的比较，大地测量时间传递结果的准确性明显至少好到  $(0.5 \text{ ns} / \sqrt{2}) = 0.35 \text{ ns}$  (RMS)，假设每种方法对所观测到的差异同等贡献。这比大约0.12 ns的一天分析的大地测量正规误差要大很多，但它是在一些较差GPS电台性能范围之内（表13-2）。考虑到这些比较还一致显示出大地测量数值高达数天间隔上更好的稳定性，TWSTT的实际RMS噪声几乎肯定更大并且典型的大地测量准确性要好于0.35 ns。

### 13.7 对时间传递性能的评估

图13-7显示了24小时大地测量时钟计算的稳定性平台，如同Ray和Senior从对IGS时钟日边界跳跃的一个分析所做出的推断 [Ray and Senior, 2003年]。此特性与 $\tau^{-0.5}$ 没有明显差别，与一个随机漫步过程相一致。在一个一天平均时间上，推断出来的不稳定性是 $1.4 \times 10^{-15}$ 。

一些最好的IGS电台接近这个性能水平，但是，如我们已经看到的，其他的要差得多。超出一天分析间隔，时钟估算值应该几乎是独立的且预测性能更接近于一个白噪声过程的 $\tau^{-1}$ ，如图13-7中所示。

但是，由于公共使用中的频率标准的不稳定性，仍不可能对此领域进行这样仔细的研究。当铯原子喷泉数据变得更可用时，大地测量时钟在超过一天间隔上的稳定性将被显露出来。例如，图13-7画出了METAS铯原子喷泉的设计目标 [Dudley *et al.*, 2001年]。

如果分析弧线延伸超过了24小时，则稳定性平台将很可能低于在此处所显示的水平，尽管这尚未被证实。另一方面，这样做将肯定扩大了在相同较长间隔上大地测量时钟的随机漫步特性，并可能因此危害采用独立一天弧线在较长时间上达到更高稳定性。

显示在图13-7中的还有来自迅腾（Symmetricon）公司（前Sigma Tau氢脉泽的继任者）的MHM2010有源氢脉泽规范的稳定性（可能保守）。这显示出大地测量方法对在一天间隔上比较这样高性能时钟并不必须是一个限制，尽管时间传递噪声很可能超过少于大约14000秒间隔上的时钟不稳定性而占主导。在IGS氢脉泽电台之间所看到的一天稳定性中的分散 – 相对于我们推断的高达 $10^{-14}$ 的稳定性平台 – 很可能是本地频率标准（一些是旧设备，而一些未保持在严格的环境控制之下）固有稳定性和本地伪距多径条件的一个组合。

图13-7

以黑实线显示大地测量时间传递的艾伦偏差稳定性平台

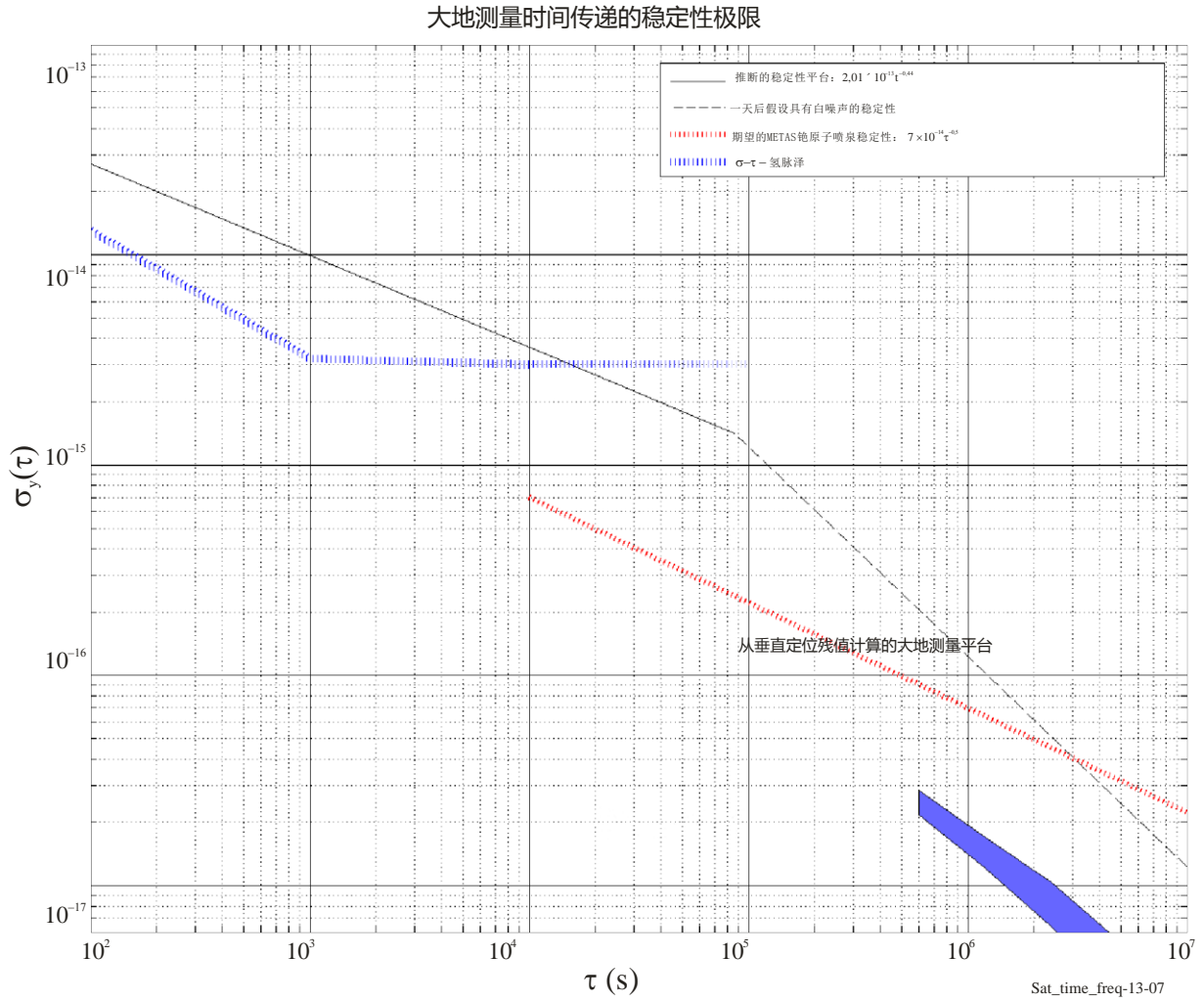


图13-7中极限的特性与高达一天间隔的一个随机漫步过程相一致。在此之外，预期独立日时钟估算将有白噪声分布误差并遵循一个 $\tau$ 艾伦偏差，以黑虚线表示。为了比较，红色趋势显示了METAS铯原子喷泉的设计目标，而蓝色趋势是对于一个 $\sigma\tau$ 氢脉泽（来自迅腾）。基础大地测量极限由下面的蓝带表示，基于电台高度测量的可重复性。

### 13.8 未来的趋势

大地测量方法应用于全球时间和频率传递仅仅处于其初期。它仍未被在测时界内广泛使用。我们期待在将来会更大程度地采纳该技术用于国际时间和频率比较之中，特别是从其高性能和适度成本的观点出发。安装新的、更稳定的实验室频率标准无疑将加速这样一个趋势。对更广泛使用的最大障碍很可能是大地测量方式所要求的更为复杂的数据分析。尽管存在很多软件包并且在定位界非常普遍地使用，但它们在测时群体中却较少为人所知，这是可以理解的。几乎可以肯定，开发用于PPP时钟解算的简单通用工具将极大地有助于大地测量时钟估算的更广泛使用。

因为大地测量测时的性能极限是由伪距数据的质量所设定，特别是多径影响，因此在此技术中的任何主要改善将很可能与减少伪距和多径误差相关。GPS接收机跟踪技术和大地测量天线设计中的改善可以提供一些益处。对现有设备的更好选址和安装在很多情况下肯定会有用的。但是，最大的受益将可能来自新的GNSS广播信号和调制机制。例如，一些为GALILEO而建议的信号设计为极大减少多径误差提供了前景 [Hein and Pany, 2002年]。总之，所建议的将更多功率移向频段边缘的信号结构，包括一些新的GPS调制，对显著改进多径缓解提供了潜在可能[Weill, 2003年]。

对于采用任何现有方法进行时间比较，硬件校准的不确定性是主要的绝对误差。校准误差至少比大地测量时钟估算值的典型误差大一个幅度量级。未来重大校准改善的前景尚不明确。

### 参考文献

- ALLAN, D. and WEISS, M. [1980] Accurate time and frequency transfer during common-view of a GPS satellite, *Proc. 1980 IEEE Freq. Contr. Symp.*, Philadelphia, PA, p. 334-356.
- ALTAMIMI, Z., SILLARD, P. and BOUCHER, C. [2000] ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for Earth science application. *J. Geophys. Res.*, **107**(B10), 2214, doi: 10.1029/2001-JB000561, 2002.
- BEUTLER, G., BROCKMANN, E., GURTNER, W., HUGENTOBLER, U., MERVART, L. and ROTHACHER, M. [1994] Extended orbit modeling techniques at the CODE processing center of the International GPS Service for Geodynamics (IGS): Theory and initial results. *Manuscripta Geodaetica*, **19**, p. 367-386.
- BOSSLER, J.D., GOAD, C.C. and BENDER, P.L. [1980] Using the Global Positioning System (GPS) for geodetic positioning. *Bull. Geod.*, **54**, p. 553-563.
- BRUYNINX, C. and DEFRAIGNE, P. [1999] Frequency transfer using GPS codes and phases: Short- and long-term stability. *Proc. 31st Precise Time and Time Interval Meeting*, Washington, DC: The U.S. Naval Observatory, p. 471-480.
- BYUN, S.H., HAJJ, G.A. and YOUNG, L.E. [2002] GPS signal multipath: A software simulator. *GPS World*, **July 13**(7), p. 40-49.
- COUNSELMAN, C.C. and SHAPIRO, I.I. [1979] Miniature interferometric terminals for Earth surveying. *Bull. Geod.*, **53**, p. 139-163.
- DACH, R., BEUTLER, G., HUGENTOBLER, U., SCHAER, S., SCHILDKNECHT, T., SPRINGER, T., DUDLE, G. and PROST, L. [2003] Time transfer using GPS carrier phase: Error propagation and results. *J. Geodesy*, **77**, doi 10.1007/s00190-002-0296-z, p. 1-14.
- DACH, R., SCHILDKNECHT, T., HUGENTOBLER, U., BERNIER, L.G. and DUDLE, G. [2006] Continuous Geodetic Time Transfer Analysis Methods. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, **53**(7), p. 1250-1259.
- DEFRAIGNE, P., PETIT, G., and BRUYNINX, C. [2001] Use of geodetic receivers for TAI, *Proc. 33rd Precise Time and Time Interval Meeting*, Washington, DC: The U.S. Naval Observatory, p. 341-348.
- DUDLE, G., JOYET, A., BERTHOUD, P., MILETI, G. and THOMANN, P. [2001] First results with a cold cesium continuous fountain resonator. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, **50**(2).
- ELOSEGUI, P., J.L. DAVIS, R.T.K. JALDEHAG, J.M. JOHANSSON, A.E. NIELL, and I.I. SHAPIRO [1995] Geodesy using the Global Positioning System: The effects of signal scattering on estimates of site positions. *J. Geophys. Res.*, **100**, p. 9921-9934.
- ESTEY, L.H. and MEERTENS, C.M. [1999] TEQC: The multi-purpose toolkit for GPS/GLONASS data. *GPS Solutions*, **3**(1), p. 42-49.

- FLIEGEL, H., T. GALLINI, and SWIFT, E. [1992] Global Positioning System radiation force model for geodetic applications. *J. Geophys. Res.*, **97**(B1), p. 559-568.
- HEIN, G. W. and PANY, T. [December, 2002] Architecture and signal design of the European satellite navigation system Galileo – Status. *J. Global Positioning Systems*, **1**(2), 2002, p. 73-84.
- KEDAR, S., HAJJ, G.A., WILSON, B.D. and HEFLIN, M.B. [2003] The effect of the second order GPS ionospheric correction on receiver positions. *Geophys. Res. Lett.*, **30**(16), 1829, doi:10.1029/2003 GL017639.
- KOUBA, J. [2004] Improved relativistic transformations in GPS. *GPS Solutions*.
- KOUBA, J. and P. HEROUX, [2000] Precise point positioning using IGS orbit products. *GPS Solutions*, **5**(2), p. 12-28.
- KOUBA, J. and SPRINGER, T. [2001] New IGS station and satellite clock combination. *GPS Solutions*, **4**(4), p. 31-36.
- LANGLEY, R. B. [1996] GPS receivers and the observables. *GPS for Geodesy*, Teunisen, P.J.G. and A. Kleusberg (editors), Berlin: Springer-Verlag, p. 141-173.
- LARSON, K.M., LEVINE, J., NELSON, L.M., T.E. and PARKER [2000] Assessment of GPS carrier-phase stability for time-transfer applications. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, **47**(2), p. 484-494.
- LEWANDOWSKI, W., AZOUBIB, J., De JONG, G., NAWROCKI, J. and DANAHER, J. [1997] A new approach to international time and frequency comparisons: All-in-view multi-channel GPS+GLONASS observations. *Proc. Institute of Navigation GPS97*, p. 1085-1091.
- LICHTEN, S. and BORDER, J. [1987] Strategies for high precision GPS orbit determination. *J. Geophys. Res.*, **92**, 1987, p. 12751-12762.
- MADER, G.L. [1998] GPS antenna calibration at the National Geodetic Survey. *GPS Solutions*, **3**(1), p. 50-58.
- MADER, G.L. and CZOPEK, F. [2002] Calibrating antenna phase centers. *GPS World*, **13**(5), p. 40-46.
- MCCARTHY, D. D. and PETIT, G. [2003] IERS Conventions 2003, IERS Technical Note 32, Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2003.
- OVERNEY, F., Th. SCHILDKNECHT, G. BEUTLER, L. PROST, and U. FELLER, [1997] GPS Time transfer using geodetic receivers: Middle-term stability and temperature dependence of the signal delays. *Proc. 11th European Frequency and Time Forum*, p. 504-508.
- PETIT, G. and JIANG, Z. [28 May 2004 and 16 July 2004] Study of time transfer methods: II. TWSTT vs. geodetic clock comparisons, internal BIPM reports.
- PETIT, G., JIANG, Z., MOUSSAY, P., WHITE, J., POWERS, E., DUDLE, G. and UHRICH, P. [2001] Progresses in the calibration of “geodetic like” GPS receivers for accurate time comparisons. *Proc. 15th European Frequency and Time Forum*, p. 164-166.
- PETIT, G., JIANG, Z., TARIS, T., UHRICH, P., BARILLET, R. and HAMOUDA, F. [1999] Processing strategies for accurate frequency comparison using GPS carrier phase. *Proc. 1999 Joint European Frequency and Time Forum and 1999 IEEE International Frequency Control Symposium*, p. 235-238.
- PETIT, G., JIANG, Z., UHRICH, P. and TARIS, F. [2000] Differential calibration of Ashtech Z12-T receivers for accurate time comparisons. *Proc. 14th European Frequency and Time Forum*, p. 40-44.
- PETIT, G., JIANG, Z., WHITE, Z., J., BEARD, R. and POWERS, E. [2001] Absolute calibration of an Ashtech Z12-T GPS receiver. *GPS Solutions*, **4**(4), p. 41-46.
- PETIT, G., THOMAS, C., JIANG, Z., UHRICH, P. and TARIS, F. [1998] Use of GPS Ashtech Z12T receivers for accurate time and frequency comparisons. *Proc. 1998 IEEE International Frequency Control Symposium*, p. 306-314.
- PLUMB, J. and LARSON, K. [2005] Long-Term Comparisons Between Two-Way Satellite and Geodetic Time Transfer Systems. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, **52**(11), p. 1912-1918.
- PLUMB, J., LARSON, K., WHITE, J. and POWERS, E. [2005] Absolute Calibration of a Geodetic Time Transfer System. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, **52**(11), p. 1904-1911.

- RAY, J. R., DRAGERT, H. and KOUBA, J. [2000] Recommendations for handling non-Rogue data. *IGS 1999 Technical Reports*, Jet Propulsion Laboratory Publication, Pasadena, California, p. 445-451.
- RAY, J.R. and SENIOR, K. [2001] Temperature sensitivity of timing measurements using Dorne Margolin antennas. *GPS Solutions*, **5**(1), p. 24-30.
- RAY, J. R., and SENIOR, K. [ 2003] IGS/BIPM Pilot Project: GPS carrier phase for time/frequency transfer and time scale formation. *Metrologia*, **40**(3), p. S270-S288.
- RIECK, C., JARLEMARK, P., JALDEHAG, K. and JOHANSSON, J. [2003] Thermal influence on the receiver chain of GPS carrier phase equipment for time and frequency transfer. *Proc. 2003 IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition Jointly with the 17<sup>th</sup> European Frequency and Time Forum*, p. 326-331.
- SCHILDKNECHT, Th. and DUDLE, G. [2000] Time and frequency transfer: High precision using GPS phase measurements. *GPS World*, 2000 **11**(2), 2000, p. 48-52.
- SCHMID, R. and ROTHACHER, M. [2003] Estimation of elevation-dependent satellite antenna phase center variations of GPS satellites. *J. Geodesy*, **77**, doi: 10.1007/s00190-003-0339-0, p. 440-446.
- SCHUPLER, B.R., ALLSHOUSE, R.L. and CLARK, T.A. [1994] Signal characteristics of GPS user antennas. *J. Inst. Navigation*, **41**, p. 277-295.
- SCHUPLER, B.R. and CLARK, T.A. [2001] Characterizing the behavior of geodetic GPS antennas. *GPS World*, **12**(2), p. 48-55.
- SENIOR, K., KOPPANG, P. and RAY, J. [2003] Developing an IGS time scale, *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, **50**(6), p. 585-593.
- SENIOR, K., MATSAKIS, D. and POWERS, E. [1999] Attenuating day-boundary discontinuities in GPS carrier-phase time transfer. *Proc. 31<sup>st</sup> Precise Time and Time Interval Meeting*, p. 481-489.
- SENIOR, K., RAY, J. and PETIT, G. [2004] Comparison of instrumental and empirical station timing biases for a set of Ashtech GPS receivers, *Proc. 2004 European Frequency and Time Forum*.
- THOMAS, C. and AZOUBIB, J. [1996] TAI computation: Study of an alternative choice for implementing an upper limit of clock weights. *Metrologia*, **33**, p. 227-240.
- WEILL, L. R. [2003] How good can it get with new signals? Multipath mitigation. *GPS World*, **14**(6), p. 106-113.
- WHITE, J., BEARD, R., LANDIS, G., PETIT, G. and POWERS, E. [2001] Dual frequency absolute calibration of a geodetic GPS receiver for time transfer. *Proc. 15th European Frequency and Time Forum*, p. 167-172.
- WU, J.T., WU, S.C., HAJJ, G.A., BERTIGER, W.I. and LICHTEN, S.M. [1993] Effects of antenna orientation on GPS carrier phase. *Manuscripta Geodaetica*, **18**, p. 91-98.
- ZUMBERGE, J.F., HEFLIN, M.B., JEFFERSON, D.C., WATKINS, M.M. and WEBB, F.H. [1997] Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *J. Geophys. Res.*, **102**(B3), p. 5005-5017.





## 第14章

## 双向卫星时间和频率传递 (TWSTFT)

页码

14.1	引言 .....	186
14.2	TWSTFT技术描述.....	186
14.3	TWSTFT测量.....	188
14.4	电台实验室设备 .....	189
14.4.1	扩频调制解调器 .....	189
14.4.2	时间间隔计数器 .....	190
14.5	链路相关测量 (路径和设备) .....	190
14.5.1	萨格纳克效应 .....	190
14.5.2	对萨格纳克效应的二阶相对论修正值 .....	190
14.5.3	上行链路和下行链路频率中的差异 .....	191
14.6	校准方法 .....	191
14.6.1	采用一个卫星模拟器的电台校准r.....	191
14.6.2	采用一个便携地面电台的电台校准 .....	192
14.6.3	在1993年和1998年进行的校准行动 .....	192
14.6.4	X频段校准行动 .....	192
14.7	当采用不同卫星转发器时所引起的问题 .....	193
14.8	当采用不同卫星转发器时所引起的问题 .....	193
14.9	TWSTFT的长期稳定性.....	194
14.9.1	GPS和TWSTFT之间的长期比较 .....	194
14.10	结论 .....	195
	参考文献.....	196

## 14.1 引言

在时间传递中，主要目的之一是在分开极远的距离上比较时钟和/或频率标准。有很多理由进行这样比较。一个理由可能仅仅是关心对分开很远的时钟进行同时测量，以通过被比较的中间时钟来监视时间标度的性能。一个理由也可能是关心对先进频率标准进行比较，例如铯原子喷泉，和/或检验这样标准的长期稳定性。计量学所关心的是能够实现这些测量的精确性和准确性。

被称为TWSTFT的技术是一种方法，采用它可以通过经过一颗地球静止通信卫星进行主动测时信号交换来得到对二个电台之间时钟差值的估算[Kirchner, 1991年]。秒定义咨询委员会（CCDS）（现在的时间和频率咨询委员会（CCTF））的第11届大会在1989年发布了一个声明1989/1，鼓励采用TWSTFT，并建议由BIPM建立一个关于TWSTFT的临时工作组。

按照1993年CCDS第12届会议的决定，此临时工作组被转变为一个永久的CCTF工作组。该工作组的主要成就是：

- 制定一个标准格式；
- 安排 TWSTFT 时间链路；
- 选择调制解调器；
- 确定观测安排；
- 确定观测持续时间；
- 数据交换；
- 协商使用卫星；
- 评估 TWSTFT 链路；
- 与其他时间传递技术进行比较。

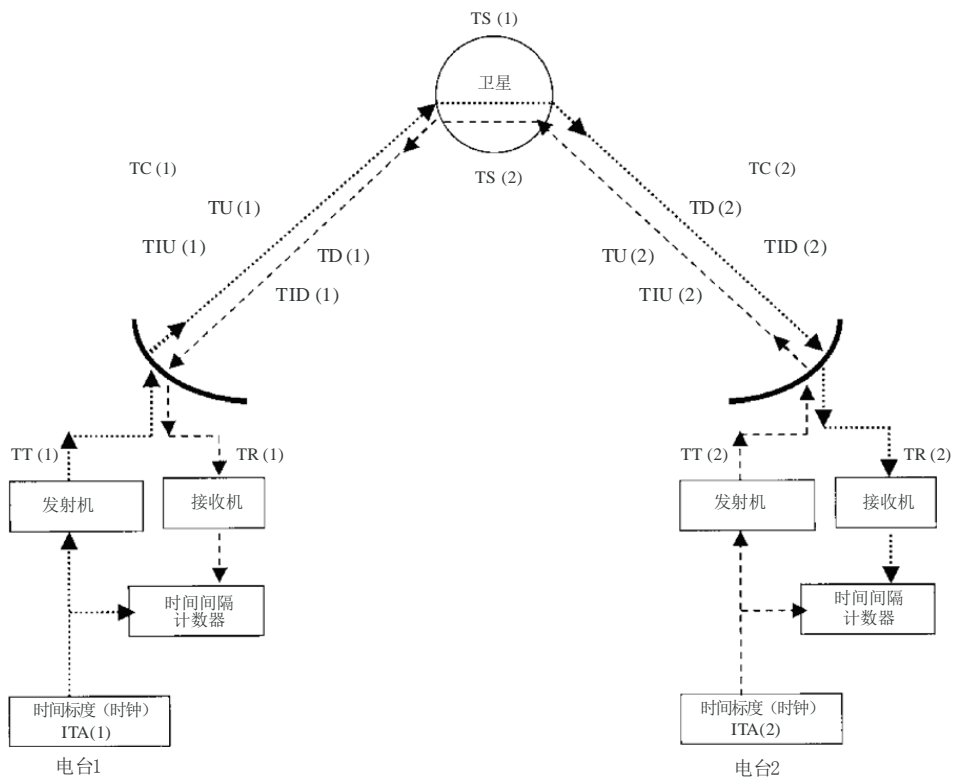
此方法作为获得测时实验室之间高精确性比较的一种手段而一直名气大增。BIPM现在使用通过此技术得到的关于为TAI做贡献时钟的信息（见BIPM第20期TWSTFT报告）。

## 14.2 TWSTFT技术描述

为了进行TWSTFT，实验室必须组对进行工作（图14-1）。为了采用伪噪声（PN）编码信号和码分多址（CDMA）通过通信卫星交换测试信息，二个实验室都需要接收与发射电台和扩频调制解调器。在发射地点，借助于调制解调器，一个每秒1个脉冲（1 PPS）的信号被调制到电台的IF上，通常在70 MHz。然后，信号被上变频到射频（RF）、放大、并发射到卫星。在卫星转发器中，它被放大、通过卫星转换频率进行频率偏移、并被再次放大和再次发射。在接收地点，接收的RF信号被放大、下变频到IF、并利用调制解调器进行解调制，以产生一个接收的1 PPS。该测量包括在二个地点的同时时间间隔测量。由本地时钟所产生的1 PPS启动本地时间间隔计数器，并在被通过卫星发射之后，停止远端的时间间隔计数器。

图14-1

双向卫星时间和频率技术比较原理



Sat\_time\_freq-14-01

电台1和电台2 ( $k = 1, 2$ ) 的以下参数显示在图14-1中:

- TA (k) : 在电台 k 的时钟或时间标度
- TI (k) : 时间间隔计数器读数
- TT (k) : 发射机时延
- TR (k) : 接收机时延
- TU (k) : 通过大气层的上行链路时延
- TD (k) : 通过大气层的下行链路时延
- TS (k) : 通过卫星转发器的传播时延
- TC (k) : 对相对论效应的修正值

- TIU (k) : 上行电离层时延
- TID (k) : 下行电离层时延

位于电台1和2时钟之间的差值由下式给出:

$$TA(1)-TA(2)$$

此处:

TA (1) 通过下式与TI (1) 相关:

$$TI(1) = TA(1) - TA(2) + TT(2) + T_U(2) + TS(2) + T_D(1) + TR(1) + TC(1) + TI_U(1) + TI_D(1) \quad (14-1)$$

TA (2) 通过下式与TI (2) 相关:

$$TI(2) = TA(2) - TA(1) + TT(1) + T_U(1) + TS(1) + T_D(2) + TR(2) + TC(2) + TI_U(2) + TI_D(2) \quad (14-2)$$

这二个表达式之间的差得出:

$$\begin{aligned} TI(1) - TI(2) = & 2 [TA(1) - TA(2) + TT(2) - TT(1) + T_U(2) - T_U(1) + TS(2) - TS(1) \\ & + T_D(1) - T_D(2) + TR(1) - TR(2) + TC(1) - TC(2) + TI_U(1) - TI_U(2) + TI_D(1) - TI_D(2)] \quad (14-3) \end{aligned}$$

这可以被写为:

$$\begin{aligned} TA(1) - TA(2) = & \frac{1}{2} [TI(1) - TI(2) + TT(1) - TT(2) + T_U(1) - T_U(2) + TS(1) - TS(2) \\ & + T_D(2) - T_D(1) + TR(2) - TR(1) + TC(2) - TC(1) + TI_U(1) - TI_U(2) + TI_D(1) - TI_D(2)] \quad (14-4) \end{aligned}$$

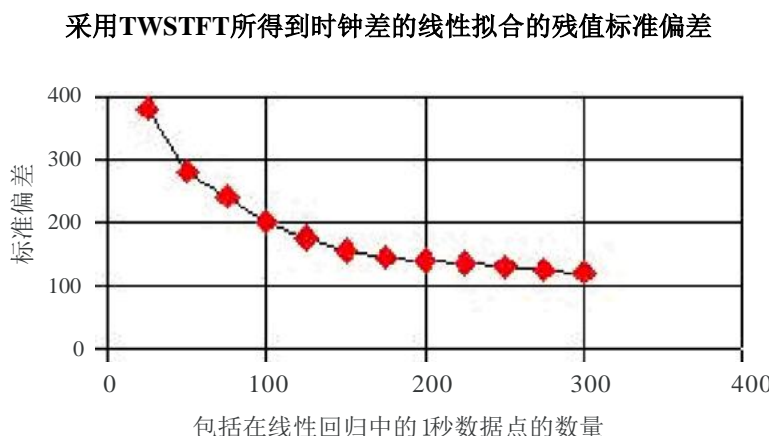
如果信号通过卫星中同一个转发器, 则TS (1) 等于TS (2) 且它们的时延抵消。如果卫星不是太快速地移动, 则TU (1) 等于TD (1) 及TU (2) 等于TD (2), 且它们的时延抵消。可以计算TC (1) 和TC (2), 但受已知电台坐标不确定性的影响。如果电台相互接近, 则TIU(1) = TIU(2)和TID(1) = TID(2)。

### 14.3 TWSTFT测量

采用TWSTFT进行的基本测量是对二个时钟之间的差值进行的一个估算。可以计算对采用TWSTFT得到的二个时钟之间测量差值的残值标准偏差。在合理假设展现白噪声的标准时钟特性情况下, 可以期望, 随着更多测量被包括在时钟差值的一个线性回归当中, 该回归的标准偏差将逐渐趋于一个极限。

图14-2显示了标准偏差, 它是包括在曲线拟合间隔中1秒数据点数量的一个函数[Klepczynski, 1995年]。在大约300秒观测时间之后, 接近了一个大约125 ps的极限。

图14-2



Sat\_time\_freq-1402

## 14.4 电台实验室设备

对在地面所用TWSTFT设备中的不确定性已经进行了很多的研究。由Kirchner对它们进行了总结[Kirchner, 1999年]。在这个领域中所涉及的主要不确定性来源是：

- 扩频调制解调器，用来产生由一个电台发射并由另外一个电台接收的 1 PPS；
- 一个时间间隔计数器，用来测量一个本地时钟和已经由扩频调制解调器重构的测试脉冲之间的差值；
- 由所用扩频调制解调器内载噪密度比 ( $C/N_0$ ) 中的变化所引起的不确定性。

### 14.4.1 扩频调制解调器

MITREX调制解调器是第一个商用化扩频调制解调器，特别为采用地球静止通信卫星进行高精度和准确性的测距及点对点时间传递而设计[Hartl *et al.*, 1983年]。它利用所谓的直接序列或PN技术。二进制相移键控 (BPSK) 被用于载频的调制。一个采用PN码系统的分辨率取决于一个码元的长度 (码片长度)，而且所需要的带宽是由其倒数值码片速率 ( $f_c$ ) 给出。采用具有低交叉相关性的编码，多个这样的编码可以在相同的信道 (CDMA) 上传输而不相互干扰。MITREX使用一个2.5 MHz的码片速率，并且，取决于信号滤波和所使用的卫星业务，它要求具有一个3.5 MHz典型带宽的卫星信道[Veenstra, 1990年]。

目前，二种调制解调器已经可以商用：ATLANTIS调制解调器，由美国Allen Osborne Associates制造，和SATRE调制解调器，由德国Time Tech GmbH制造。SATRE调制解调器完全与MITREX调制解调器兼容，但是ATLANTIS调制解调器采用其自己的标准 (略微不同的码片速率，其他的编码)，因此不提供兼容性。在日本通信研究实验室 (CRL) 开发的一个调制解调器不与MITREX调制解调器兼容。

### 14.4.2 时间间隔计数器

此外，作为良好的做法，当使用一个带有内部时间间隔测量能力的调制解调器时，电台应采用一个外部计数器。通常需要一个外部计数器来辅助测量。

#### 14.4.2.1 载噪密度比 ( $C/N_0$ )

对TWSTFT电台，电台的运行参数是由调制解调器的载噪密度比 $C/N_0$ 和卫星（等效电离层辐射功率EIRP和卫星终端的品质因数 $G/T$ ）所决定。后一个参数是通过链路预算来计算的。载噪密度比 $C/N_0$ 对达到为了测量所要求的测量精确度是必要的。

### 14.5 链路相关测量（路径和设备）

在此领域所涉及不确定性的主要来源是：

- 由于在信号到卫星和从卫星返回的传播期间二个参与电台和卫星环绕地球旋转轴的运动所引起的一个效应（萨格纳克效应）；
- 由于地球静止卫星相对于地球表面的运动所引起的一个效应；
- 由于在用户和卫星发射信号所使用的上行链路和下行链路频率上信号电离层延迟的差别所引起的一个效应。

#### 14.5.1 萨格纳克效应

萨格纳克效应是因为在信号到卫星和从卫星返回传播期间二个地面站和卫星环绕地球旋转轴的运动所引起 [Ashby和Allan, 1979年]。它正比于四边形面积的赤道投影，四边形的顶点是地球地心和地面站在地球表面上的位置，和卫星相对于地球表面的位置。因此它是地面站1和2及卫星位置的函数。对地面站1和2在赤道处，每个地面站有一个 $6^\circ$ 仰角的极端情况大约是420 ns，由一个最大经度分离（大约 $150^\circ$ ）所引起。为了计算萨格纳克效应，对像GPS这样的单向方法，位置准确性要求是在计算信号时延所需的准确性之下几个幅度量级。因为TUG-USNO之间萨格纳克效应原因所导致的地面站坐标误差所引起不确定性的估算值是150 ps，而因为TUG-OCA之间萨格纳克效应所导致的是16 ps。

#### 14.5.2 对萨格纳克效应的二阶相对论修正值

由于卫星相对于地球表面运动而造成一个二阶修正正是卫星速度和卫星对地面站1和2的仰角的函数 [Petit and Wolf, 1993年]。极端情况是一个地面站具有 $6^\circ$ 仰角而另一个是 $90^\circ$ 。则在卫星同时发射信号的到达时间 (TOA) 差将大约是17 ms。如果我们假设一个3 m/s的相当高的径向卫星速度，导致的误差大约是170 ps。通过选择使二个地面站以相同仰角观测的一颗卫星，能使这个效应最小。它也可以通过偏移发射时间而被完全消除。对在美国海军天文台 (USNO) 和格拉茨技术大学 (TUG) 之间进行的实验，估计的影响是100 ps的量级。在蓝色海岸天文台 (Observatoire de la Cote d'Azur) (OCA) 和格拉茨技术大学 (TUG) 之间，它们是10 ps的量级。

### 14.5.3 上行链路和下行链路频率中的差异

一个穿透电离层信号的电离层过度时延取决于频率（正比于 $1/f^2$ ）、电离层总电子含量（TEC）、和仰角[Flock, *et al.*, 1982年; Jespersen, 1989年]。TEC是具有 $1\text{ m}^2$ 截面积的一个垂直圆柱的总电子含量，单位是电子/ $\text{m}^2$ 。采用一个映射函数，可以计算一个倾斜路径的电离层总电子含量。由于电离层所引起的不确定性是地面站1和2上行链路和下行链路频率、地面站1和2的TEC、及地面站1和2仰角的一个函数。极端情况下在非互易性中的不确定性大约是150 ps:

- 一颗卫星的仰角是 $90^\circ$ ，而另一颗的仰角是 $6^\circ$ ;
- 上行链路和下行链路频率是14 GHz和12 GHz，及14 GHz和11 GHz;
- TEC是 $10^{17}$  电子/ $\text{m}^2$ 和 $10^{18}$  电子/ $\text{m}^2$ （假设一个地面站在晚上，另一个在白天）。

对C频段频率（6/4 GHz），此影响当然高得多。可以通过选择一颗卫星来使此影响最小，在二个地址对它的二个仰角要大致相同，要具有相同的TEC和相同的上行链路和下行链路频率，或者通过采用更高的频率（Ka频段：30/20 GHz）。

被忽略的一个影响是对流层时延。它在用于卫星通信的频率上是频率无关的（可忽略）。

## 14.6 校准方法

一些不确定性是统计上不可测量的或估计的。必须通过一个被称为校准的过程来对它们进行评估。在某些情况下，这意味着测量通过被用来进行测量系统的各个组件的时延，或者测量通过整个系统的时延。也可以通过运送一个已经展示出合理稳定性的系统或者一个已经被校准的系统来进行校准。这有时被称为相对校准。在某些情况下，甚至可以通过一个完全不同的系统进行比较。

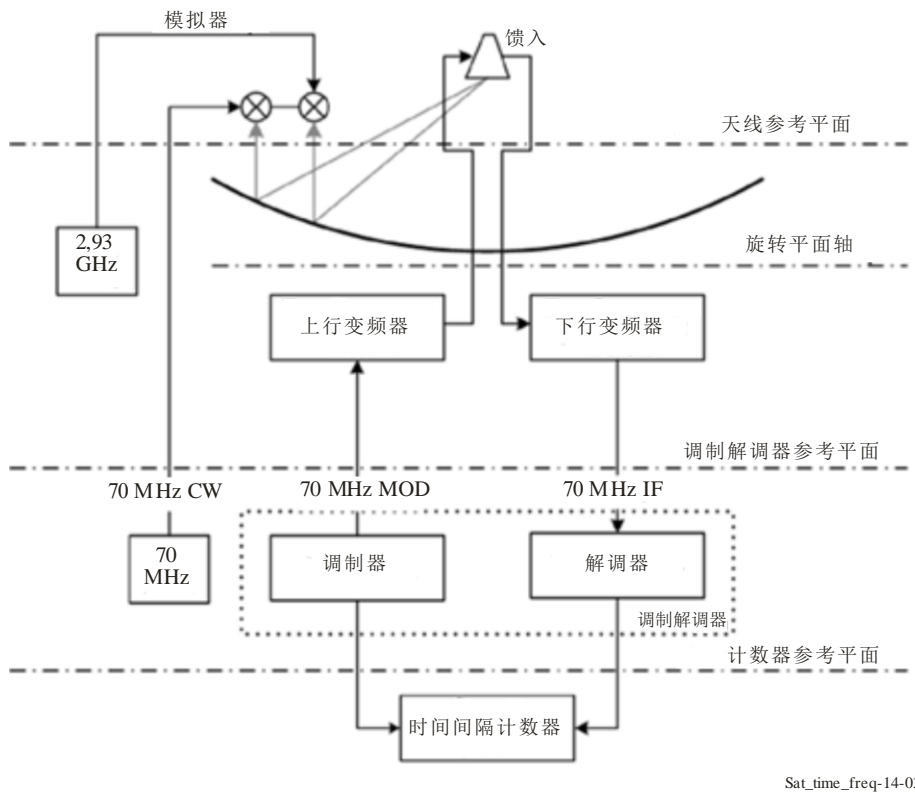
### 14.6.1 采用一个卫星模拟器的电台校准

尽管可以测量一个系统的某些分别组件的时延，但是因为信号可能横穿复杂的路径，不能对总的系统不确定性进行简单估算。有二种方法可以被用于此目的。或者可以测量电台1和2的时延差，或者分别测量二个电台的时延。

在第一种方法中，将通过其特性被完善记录的一个卫星模拟器注入一个信号来产生通过系统各个组件的时延[De Jong和Polderman, 1994年; De Jong和Van Bemmelen, 2001年]。该校准系统被自动化，且一个测量行动是与一个Fly-Away卫星终端（FAST）联合起来进行的[De jong *et al.*, 1995年]。这样一个卫星模拟器也可以被用来永久测量一个电台的时延变化，提供一个电台的长期稳定性。图14-3是用来进行这样测量的一个VSL卫星模拟器的原理图。

图14-3

用来测量通过一个TWSTFT地面电台时延的VSL卫星模拟器的原理图



Sat\_time\_freq-14-03

#### 14.6.2 采用一个便携地面电台的电台校准

第二种方式可以通过一个地面电台与二个参与电台共址或通过使用一个第三电台作为一个传递标准来实现。在1993年和1998年采用这种技术进行了测量行动。

#### 14.6.3 在1993年和1998年进行的校准行动

在第一次行动中，一个TWSTFT电台被在法国蓝色海岸天文台（OCA）和奥地利格拉茨技术大学（TUG）之间传送，大约800 km的一个距离[Kirchner, *et al.*, 1993年]。在旅行期间所进行测量的正式标准偏差大约是1 ns。对改进这个实验的方法进行了讨论，并进行了第二次行动[Kirchner *et al.*, 1998年]。在这次行动中，正式标准偏差是在200 ps的量级，超过第一次实验的一个显著改善。在二次行动期间，采用GPS共视进行了比较，并且注意到了二种方法之间的系统性差异。在进行外部校准的二种方式中，测量应在一个连续的基础上进行。这将使得能够形成一个不确定性的统计历史。

#### 14.6.4 X频段校准行动

在华盛顿特区美国海军天文台（USNO）和英国特丁顿国家物理实验室之间进行了采用一个便携X频段电台的实验。



## 14.7 当采用不同卫星转发器时所引起的问题

除非在卫星被发射之前就已经对通过不同卫星转发器的时延进行过测量，否则要得到通过它们的时延不确定性的估值是非常困难的。只能通过传送一个校准过的系统到参与电台的相对校准来完成。应尽可能频繁地重复这样的测量。最好还应采用不同的独立技术来验证通过其他技术所得到的结果。此处的主要问题是用来验证其他技术的技术可能不具有与主要技术相同的不确定性。当在此方式评估不确定性时需要极端地谨慎。

如果对于已被校准的独立系统不存在未知差分卫星时延的问题，这个系统也可以是一个TWSTFT系统。如果差分卫星时延已知（例如，来自卫星发射之前的测量），可以采用在前一节中给出的方法来校准电台时延。

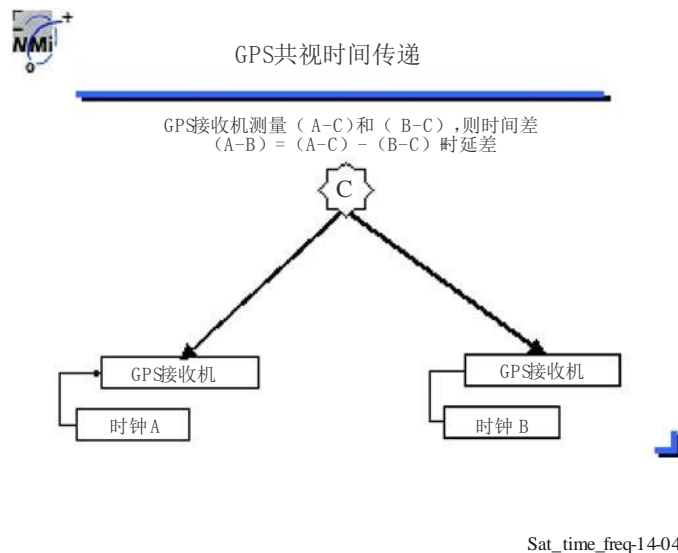
## 14.8 当采用不同卫星转发器时所发生的问题

除了以前提到的二个系统之外，可以采用其他方法，例如GPS。当然，得到的准确性不可能好于GPS自己的准确性。

GPS CV的测量配置显示在图14-4中。在接收机中接收来自导航卫星（C）的信号并对照位于A和B的时钟A和时钟B的时间标度进行测量。测量值（A-C）和（B-C）被相减，结果是时间标度的差值（A-B）。

图14-4

### GPS共视

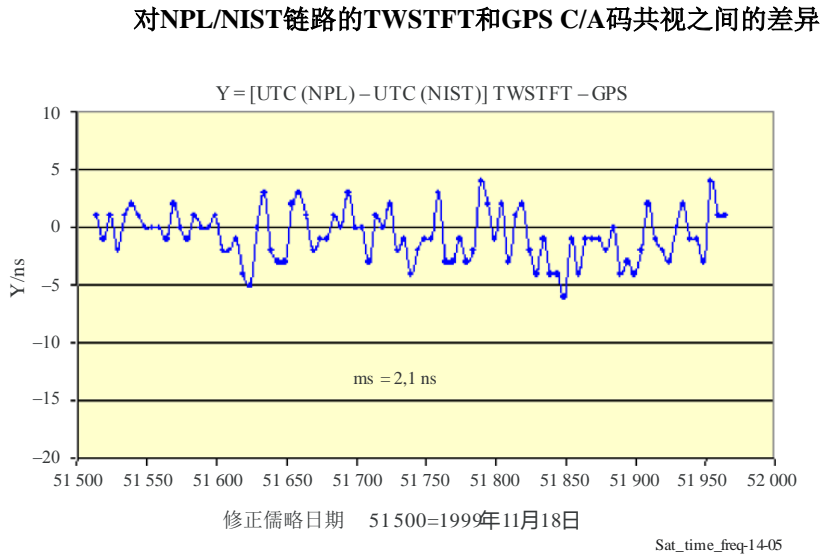


在卫星和其时钟中的共同时延抵消。在电离层中和在对流层中过量时延的差异仍必须被考虑。在每个地点的天线、天线电缆、时钟电缆和接收机中的时延应是已知的（校准的），因此，能够根据在A和B的设备时延差对结果进行修正。这些时延应是对环境稳定的。

首先，一个校准的GPS时间传递单元（TTU）被送到参与电台，这样，就可以在校准期的开始时对应于在整个评估期间将处于参与电台的一个GPS TTU进行基线测量。然后，在后续的时间间隔期间，校准的接收机再被送到参与电台。

图14-5显示了在长时间段上所进行的这些比较的结果。

图14-5



## 14.9 TWSTFT的长期稳定性

对于频率比较，150 ps对于与采用TWSTFT所进行的测量相关的不确定性很可能是一个好的估值。

### 14.9.1 GPS和TWSTFT之间的长期比较

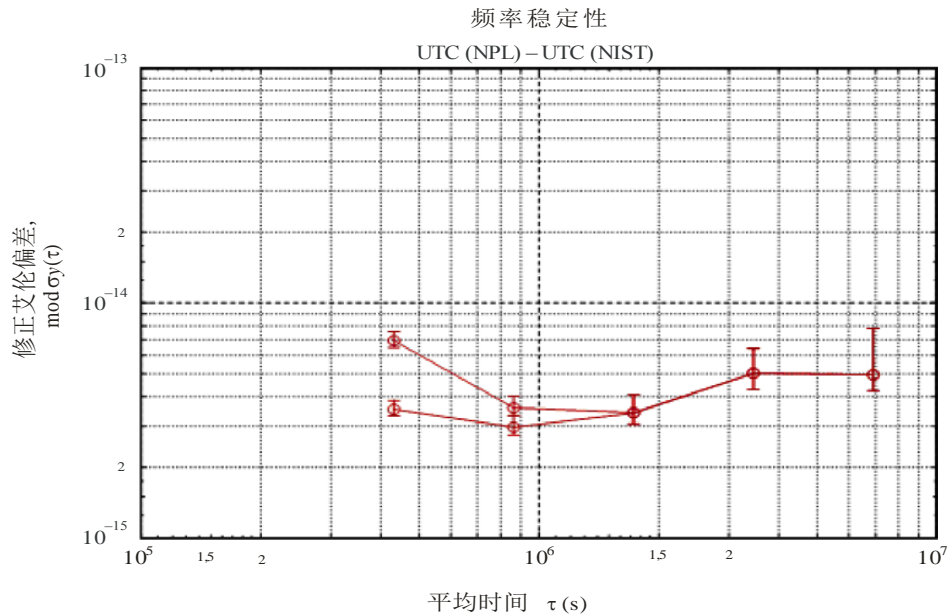
2002年9月在欧洲、北美和环太平洋有12条运行的TWSTFT链路。其中10条被用于构建TAI。采用GPS共视对所有TWSTFT链路进行了比较，并发布在BIPM TWSTFT报告中。这个永久的监视提供了关于这二种方法长期稳定性的有价值的信息：这些链路中有些自从3年前就已经投入运行。在图14-5中给出了在修正儒略日51 510-51 970期间对相距大约8000 km的NPL/NIST进行的一个典型比较。NPL/NIST TWSTFT链路是采用GPS校准的。

针对TAI标准日期（以4和9结尾的修正儒略日）对在三个星期行动期间在星期一、星期三和星期五收集的TWSTFT数据进行了线性插值。采用IGS精确星历表和IGS电离层图计算了GPS共视，然后进行了平滑和针对标准日期插值。在比较期间，我们没有观测到任何偏离或季节性影响。对比较期间二种方法之间差值的r.m.s.是2.1 ns。

TWSTFT链路的估算不确定性低于1 ns，而GPS的是2.5 ns。这就是为什么相信在这二种方法之间差值中大多数观测到的噪声是由于GPS共视所引起。这得到了在图14-6中给出的 $[\text{UTC}(\text{NPL}) - \text{UTC}(\text{NIST})]$ 的频率稳定性分析确认。

图14-6

修正艾伦偏差显示了GPS共视（上方曲线）和  
TWSTFT（下方曲线）这二种技术的频率稳定性



GPS共视数据显示了高达20天平均时间中由于比较的方法所引起的白相位噪声。TWSTFT数据显示了已经经过5天平均时间的对于时钟运行的白频率噪声特性。它意味着，对于5天的平均时间，我们没有任何更多的TWSTFT的噪声。换句话说，利用没有时间传递噪声的TWSTFT对位于相距8000公里的NPL和NIST的二个时钟进行了5天平均时间的比较。GPS数据显示了此技术的噪声。TWSTFT显示了时钟噪声。

#### 14.10 结论

此数据似乎支持将TWSTFT用作一个高精度时钟和频率比较技术。尽管建立一个TWSTFT能力的成本初始很高，但是减少数据的便利性也使它成为一个具有吸引力的对其他技术的替代。因为这个技术的潜力现在刚被扩展到包括像载频相位跟踪这样的实验，TWSTFT有希望在将来提供改进的能力。

## 参考文献

- ASHBY N. and ALLAN, D. W. [1979] Practical Implications of Relativity for a Global Coordinate Time Scale. *Radio Science*, **14**, p. 649-669.
- 20<sup>th</sup> BIPM TWSTFT Report, ([http://www.bipm.fr/pdf/cctf/wg\\_twstft.html](http://www.bipm.fr/pdf/cctf/wg_twstft.html)).
- De JONG, G. *et al.* [1995] Results of the Calibration of the Delays of Earth Stations for TWSTFT using the VSL Satellite Simulator Method. *Proceedings of the 27th Annual PTTI Meeting*, p. 359-372.
- De JONG, G. and POLDERMAN, M. C. [1994] Automated Delay Measurement System for an Earth Station for Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer. *Proceedings of the 26th Annual PTTI Meeting*, December 6-8, Reston, Virginia, USA, p. 305-317.
- De JONG, G. and VAN BEMMELEN, R. [2001] Evaluation and Improvement of the Calibration of a TWSTFT Station Using SATSIM. *Proceedings of the 33<sup>rd</sup> Annual PTTI Meeting*, p. 256-262.
- FLOCK, W. L., SLOBIN, S. D. and SMITH, E. K. [1982] Propagation effects on radio range and noise in earth-space telecommunications. *Radio Science*, **17**, No. 6, 1982, p. 1411.
- HARTL, Ph., GIESCHEN, N., MOSSNER, K. M., SCHAFFER, W. and WENDE, C. M. [1983] High Accuracy Global Time Transfer via Geosynchronous Telecommunication Satellites with MITREX. *Journal of Flight Sciences and Space Research*, **7**, p. 335-342.
- JESPERSEN, J. [May 31-June 2, 1989] Impact of Atmospheric Non-reciprocity on Satellite Two-Way Time Transfers. *Proceedings of the 43rd Annual Symposium on Frequency Control*, Denver, Colorado, USA, p. 186-192.
- KIRCHNER, D. [1991] Two-Way Time Transfer via Communication Satellites, *Proceedings of the IEEE (Special Issue on Time and Frequency)*, **79**, p. 186-192.
- KIRCHNER, D., RESSLER, H., GRUDLER, P., BAUMONT, F., VEILLET, Ch., LEWANDOWSKI, W., HANSON, W., KLEPCZYNSKI, W. and UHRICH, P. [1993] Comparison of GPS Common-View and Two-Way Satellite Time Transfer over a Baseline of 800 km.
- KIRCHNER, D., RESSLER, H., HETZEL, P., SORING, A. and LEWANDOWSKI, W. [1998] Calibration of Three European TWSTFT Stations using a Portable Station and Comparison of TWSTFT and GPS Common-View Measurement Results. *Proceedings of the 30<sup>th</sup> PTTI Meeting*, p. 365-375.
- KIRCHNER, D. [1999] Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer (TWSTFT): Principle, Implementation and Current Performance. *Review of Radio Science 1996-1999*, Oxford University Press.
- KLEPCZYNSKI, W. [1995] Two Way Satellite Time Transfer", Tutorial at PTTI Meeting.
- PETIT, G. and WOLF, P. [1993] Relativistic Theory for Picosecond Time Transfer in the Vicinity of the Earth. *Proceedings of the 25<sup>th</sup> Annual PTTI Meeting*, p. 205-214.
- VEENSTRA, L. B. [1990] International Two-Way Satellite Time Transfers Using INTELSAT Space Segments and Small Earth Stations. *Proceedings of the 22nd Annual PTTI Meeting*, December 4-6, 1990, Vienna, Virginia, USA, p. 383-398.

## 第15章

### 时间和频率播发的总结

时间和频率能够根据所需要的准确性被通过多种技术进行传递。准确时间传递的主要方式是全球定位系统（GPS）。GPS采用每颗卫星都包含原子时钟的一个卫星星群。这些星载原子时钟与监视站铯标准相结合建立了GPS时间，即系统同步时间。将GPS用于时间和频率播发依赖于用于定位的GPS时间的稳定性和精确性。对多颗GPS卫星的同时被动接收要求这些卫星要以比对采用用户接收机的分别卫星伪距测量所期望要少的误差被精确地相互同步。各个卫星时钟在更新或与GPS时间重新同步之间的稳定性确定了系统的同步误差。对于用户，GPS信号的信号传播、接收机测试仪表、用户定位不确定性和UTC（USNO）卫星修正电文偏移是在对用户被动时间传递准确性中的其他决定因素。GPS时间传递采取二种形式：

1. 主要被无线电通信用户采用的被动时间传递；
2. 用于科学和国际时间标度活动的共视和载频相位共视时间传递。

被动运行是绝大多数用户的主要时间传递模式。作为一个被动服务，可以在一个广泛区域上不依赖于用户的位置获取GPS广播。测时信息与位置和速度一起是在飞行或其他移动行为期间的用户计算中确定的。因此，时间传递准确性的估算取决于导航过程中用户位置的不确定性。对具有准确位置信息的固定地点可以期望少于10 ns,  $1\sigma$ 的近乎最佳结果。在移动平台中有效使用这个能力取决于用户的仪表和使用高精度测时信息的能力。

在世界授时中心和科学界团体之间的GPS时间传递采用另一个被称为共视的技术及其变化形式-载频相位共视。共视是一个点对点技术，而不是像在上面所讨论的被动接收中的常规广播。需要时间传递的二个地点交换从各个GPS卫星得到的测量值。对这些跟踪数据进行差分完就形成了在这二个地点本地时钟之间的一个精确比较。载波相位测量增加了接收机和各个卫星之间的伪距或距离测量的精确性。增加的精确性是由于测量的是模糊的RF载频相位而不是明确的PRN码调制所引起。连续RF信号的模糊度导致精确的频率测量而不是时间测量。对使用运营GPS载频相位技术的开发正由国际GNSS业务（IGS）进行。参与的IGS站和分析中心已经能够在参与电台网络之间达到亚纳秒级精确度的频率比较。截止到目前的结果已经显示，为了达到这种技术的完全能力，必须开发以皮秒水平校准接收系统的技术。采用GPS系统模拟器对大地测量接收系统进行校准是在NRL小尝试的课题。这种对所有信号接收条件提供完全控制的技术为时间历元传递的计算提供了一个绝对校准的潜在可能。

一般使用中最精确的时间传递技术是TWSTFT。这种技术利用通信卫星的双向能力在二个方向上发射测时信号，以实际消除二个参与地点之间的传输和公共仪表时延。它是一个主要用在适当配置的授时中心之间的点对点技术。单独一个双向传递的单次测量精确性大约是10 ps。总的准确性取决于非互易仪表和卫星转发器的时延、在传递过程期间可能的卫星移动。如果非互易误差能够被充分地减少，100 ps的时间传递准确性在理论上是可能的。

以上所讨论的方法是直接时间传递系统。它们或者被特别设计用于时间传递，例如TWSTFT，或者采用时间同步作为操作的一个主要手段，例如GPS。其他为了CDMA或TDMA通信协议和数据传递而需要同步的本地通信系统能够被潜在地用于在它们的本地覆盖区内播发从GPS或其他作为替代时间传递机制的来源所获取的测时信息。

在以下表15-1和15-2中提供了对不同技术性能的一个汇总，作为对在本手册中所讨论的技术和技术理论的全面总结。

表15-1  
GNSS时间传递技术

参数	被动GPS (SPS)	被动GPS (PPS)	共视 (短基线)	共视 (长基线)	先进共视	载频相位	WAAS/GPS
精确度 (ns) r.m.s. (范围)	≤ 8 ns <sup>(1)</sup> (2) wrt UTC (USNO)	≤ 8 ns wrt UTC (USNO)	3-8 ns (点对点)	5-10 ns (点对点)	≤ 5 ns (点对点)	≤ 5-10 ns (点对点)	≤ 20 ns w.r.t. UTC (USNO)
主要误差源	SA、多径、时钟、电离层、对流层、UE、RF环境、温度 (接收机 & 天线)	多径、时钟、UE、RF环境、温度 (接收机 & 天线)	UE、路径互惠、星历表、环境 (温度)			UE、多径、周跳	时钟、星历表
稳定性 (数值 @ 平均)	≤ 8 ns @ 13 min ≈ 1 ns @ 1 天	≤ 5 ns @ 13 min ≈ 1 ns @ 1 天	≤ 4 ns @ 1 h ≤ 1 ns @ 48 h	≤ 4 ns @ 1 h ≤ 1 ns @ 48 h	≤ 4 ns @ 1 h ≤ 1 ns @ 48 h	<< 1 ns @ 6 min	< 被动SPS
可校准性	3-5 ns 相对于标准接收机					<< 1 ns 采用绝对校准	3-5 ns 相对于标准接收机
取样速率	每13 min一次	每 5 min一次 每 13 min一次	每 13 min一次	每 13 min大于一次 (后处理)	每 5 min一次 每 13 min一次	类似于被动&共视	待定
可用性	实时		时刻表相关			处理相关	实时

- (1) 具有已知 > 1 m (三维) 维定位的固定位置。
- (2) 取决于用户设备。

表15-2  
卫星和地面的双向技术

参数	TWSTFT	光纤LAN-WAN	光纤长途	双向通信 (OTA)
准确性 (点对点) (范围) (ns r.m.s)	≈ 1 ns (Ku频段) ≈ 1 ns (X频段) ≈ 3 ns (C频段)	≤ 1 ns @ 200 km	≤ 2 ns @ 8 000 km	≤ 5 ns @ 200 km
主要误差源	路径互易、系统校准、环境 (温度)	路径互易 环境 (温度)		路径互易、系统校准、环境 (温度)
稳定性 (数值 @ 平均时间)	200 ps @ 1 h 100 ps @ 12 h	100 ps rms	待定	待定
可校准性 (量级, 单位 ns)	≈ 1		≈ 2	≈ 3-5
取样速率	每 5 min一次	连续		
时间性	接近实时			







ISBN 978-92-61-13305-4      SAP id



瑞士印刷  
2014年，日内瓦

图片鸣谢：[www.itu.int](http://www.itu.int)