# 绪论

## GPS系统的组成

### 空间部分——GPS卫星星座

1. GPS卫星星座
2. 卫星数量：共24颗卫星，包括21颗工作卫星，3颗在轨备用卫星。
3. 周期：11h58min。
4. 卫星轨道：均匀分布在6个轨道平面内，轨道倾角为55°，各轨道面的升交点赤经相差60°（即各轨道平面之间相距60°），每个轨道平面内各颗卫星之间的升交角距相差90°，相邻轨道上卫星的升交距相差30°，轨道平均高度20200km。
5. GPS卫星的作用
6. 用L波段的两个无线载波向广大用户连续不断地发送导航定位信号。
7. 在卫星飞越注入站上空时，接收由地面注入站用S波段发送到卫星的导航电文和其他有关信息，并通过GPS信号电路适时地发送给广大用户。
8. 接收地面主控站通过注入站发送到卫星的调度命令，适时地改正运行偏差或启用备用时钟等。

### 地面控制部分—地面监控系统

1. 1个主控站

收集处理本站和监测站收到的全部资料，编算出每颗卫星的星历和GPS时间系统，将预测的卫星星历、钟差、状态数据及大气传播改正编制成导航电文传送到注入站。另外，还负责纠正卫星的轨道偏离、监测地面整个监测系统。

1. 3个注入站

将主控站发来的导航电文注入到相应卫星的存储器，每天注入3次，每次注入14天的星历。

1. 5个监测站

除了位于主控站和3个注入站外，还在夏威夷设置了一个监测站。主要作用是为主控站提供卫星的观测数据。

### 用户设备部分—GPS信号接收机

捕获到按一定卫星高度截止角所选择的待测卫星的信号，测量出信号传播时间，解译出导航电文，实时地计算出测站的三维位置，甚至三维速度和时间。

# 坐标系统和时间系统

## 天球坐标系

1. 完全定义一个空间直角坐标系的三个条件
2. 关于天球和地球的基本概念
3. 天球：以地球质心为中心，以无穷大为半径的一个假想球体。
4. 天轴：地球自转轴的延长线。
5. 北天极、南天极：天轴与天球的2个交点。
6. 黄道面：地球绕太阳公转的轨道面与天球相交的平面，相交的大圆为赤道，夹角为黄赤交角约23.5°。
7. 黄极：通过天球中心且与黄道面垂直的直线与天球的交点。
8. 春分点：黄道与赤道有2个交点，其中太阳的视位置由南向北通过赤道的点为春分点，另一个为秋分点。
9. 时圈：过天球的平面与天轴相交的半个大圈。
10. 赤经：
11. 赤纬：

### 岁差和章动

1. 岁差

图2‑1 天球示意图

北天极

南天极

黄南极

黄北极

春分点

天球赤道

黄道

由于天球赤道和天球黄道的长期运动而导致的春分点的进动。其中由于天球赤道的长期运动而引起的岁差称为赤道岁差；由于天球黄道的长期运动而引起的岁差称为黄道岁差。

1. 章动

由岁差产生的有规律运动的北天极称瞬时平北天极，简称平北天极，与之相应的天球赤道和春分点称为瞬时天球平赤道和瞬时天球平春分点。在日月引力等因素影像下，瞬时北天极（观测时的真北天极）将绕瞬时平北天极产生旋转（顺时针），大致呈椭圆轨迹，称为章动。

### 天球空间直角坐标系与天球球面坐标系

* 引入原因

地球坐标系不是惯性坐标系，其坐标轴指向是不断变化的，不能直接运用牛顿第二定律，对研究卫星运动很不方便。为此，需建立一个三轴指向不变的天球坐标系，以便在此坐标系内研究人造卫星的运动（计算卫星位置）。

1. 天球空间直角坐标系

以地球质心为原点，轴指向春分点，轴指向北天极，轴垂直于平面构成右手系。

* 注意：天球空间直角坐标系的轴指向和地球坐标系不同，地球赤道面与起始子午面的交线为地球坐标系的轴。

1. 天球球面坐标系

以地球质心为原点，赤经为含天轴和春分点的天球子午面与过空间点的天球子午面之间的夹角（自平面起算右旋为正），赤纬为原点至空间点的连线与天球赤道面间的夹角，向径为原点至空间点的距离，坐标为()。两坐标系之间的关系为

### 真天球坐标系（瞬时天球坐标系）

坐标原点位于地球质心，轴指向真春分点，轴指向真北天极，轴垂直于平构成右手系。三轴指向不断变化。

### 平天球坐标系

坐标原点位于地球质心，轴指向平春分点，轴指向平北天极，轴垂直于平构成右手系。三轴指向仍然是变化的。

### 协议天球坐标系

1. GCRS

坐标原点位于地心，轴指向J2000.0时的平春分点，轴指向J2000.0的平北天极，轴垂直于平构成右手系。用于计算卫星轨道，编制卫星星历，GPS卫星的轨道运动方程通常在GCRS中建立和解算，然后在通过坐标转换，换算至ITRS中去。

1. BCRS

坐标原点位于太阳系质心，用于计算行星的运行轨道，编制星表。

## 地球坐标系

1. 大地坐标系
2. 地球空间直角坐标系
3. 站心赤道直角坐标系与站心地平直角坐标系
4. 站心赤道直角坐标系（右手系）

以测站点为原点建立的坐标轴与地球空间直角坐标系-相应轴系平行的坐标系-，称为站心赤道直角坐标系。

1. 站心地平直角坐标系（左手系 ）

以测站点为原点，过测站点的椭球面法线为轴，指向天顶为正，以大地子午线方向为轴，向北为正，轴与平面垂直（平行圈方向），向东为正，由此建立的坐标系-称为站心地平直角坐标系，属于左手系。

* 站心地平坐标系在卫星导航定位中的作用

利用站心地平坐标系能够直观方便地描述卫星与测站之间的瞬时距离、方位角和高度角，了解卫星在天空中的分布情况。

### 瞬时地球坐标系

原点位于地球质心，轴指向瞬时地球自转轴方向，轴指向瞬时赤道面和包含瞬时地球自转轴与平均天文赤道参考点的子午面（起始子午面）之交点，轴按构成右手系取向构成的坐标系称为瞬时极地球坐标系。

### 固定极地球坐标系——平地球坐标系（协议地球坐标系）

1. 极移

因地球内部质量不均匀地球自转轴相对地球体的位置并不是固定的，地极点在地球表面上的位置随时间发生变化，称为极移。

1. 平地球坐标系

轴指向国际协定原点（CIO，Conventional International Origin）即平地极。

### ITRS与ITRF

### 协议天球坐标系与协议地球坐标系的转换

1. 瞬时天球与瞬时地球坐标系之间的联系

1. 协议天球与协议地球坐标系的转换过程

协议天球瞬时天球瞬时地球协议地球

## 时间系统

1. 定义时间系统的两个条件
2. 时间尺度的选取

理论上，任何一个周期运动，只要它的运动是连续的，其周期是恒定的，并且是可观测和用实验复现的，都可以作为时间尺度（单位）。概括为周期性、稳定性、复现性。

### 恒星时ST（Sidereal Time）

以春分点为参考点，由春分点的周日视运动所定义的时间系统。其时间尺度为：春分点连续两次经过本地子午圈的时间间隔为一恒星日

### 平太阳时MT（Mean Solar Time）

假设一个平太阳以真太阳周年运动的平均速度在天球赤道上做周年视运动，其周期与真太阳一致。以平太阳为参考点，由平太阳的周日视运动定义的时间系统称为平太阳时。

其时间尺度为：平太阳连续两次经过本地子午圈的时间间隔为一平太阳日。

### 世界时UT（Universal Time）

以平子午夜为零点起算的格林尼治平太阳时定义为世界时。

### 协调世界时UTC（Coordinated Universal Time）

以原子时秒长为基准，采用跳秒（闰秒）的方法使协调时与世界时的时刻相接近。

### 原子时AT（Atomic Time）

以物质内部原子运动特征为基础，起点为1958年1月1日0h整，此时原子时AT与世界时UT对齐。但由于技术方面原因，事后发现这一瞬间原子时AT与世界时UT并未精确对准，两者之间存在0.0039s的差异，即

### 国际原子时TAI（International Atomic Time）

原子时由原子钟来确定和维持，但同一瞬间每台原子钟给出的时间并不严格相同，，为避免混乱，需要建立一种更为可靠、更为精确、更为权威且能被世界各国所共同接受的统一的时间系统——国际原子时TAI。

### GPS时（GPST）

以原子时秒长为时间基准，起点为1980年1月6日0h00m00s，启动后不跳秒，保持时间的连续。

1. GPST与UTC的关系

GPST在其起始时刻与UTC对齐，但由于UTC存在跳秒，因此经过一段时间后，两者之间会相差n个整秒数，n是这段时间内UTC的累计跳秒数。

1. GPST与TAI的关系

由于在GPS时的起始时刻1980年1月6日，UTC与国际原子时TAI已相差19s，固GPST与TAI在任一瞬间有一常量偏差：

# 卫星运动基础及GPS卫星星历

## 卫星的无摄运动

只考虑地球质心引力作用的卫星运动称为卫星的无摄运动，即作为二体问题研究两个质点在万有引力作用下的运动。

### 开普勒三定律

1. 卫星运行的轨道是一个椭圆，该椭圆的一个焦点与地球质心重合。
2. 卫星的地心向径，即地球质心与卫星间的距离向量，在相同的时间里扫过的面积相等。
3. 卫星运行周期的平方与轨道椭圆长半径的立方之比是一常量，而该常量是地球引力常数的倒数。

### 卫星运动的轨道参数（开普勒轨道参数，轨道根数）

升交点

春分点

卫星

近地点

赤道面

轨道面

图3‑1 卫星轨道参数

——轨道椭圆的长半径。

——轨道椭圆的偏心率。

——升交点的赤经，即地球赤道平面上升交点与春分点之间的地心夹角，0°~360°。

——轨道面的倾角，即卫星轨道平面与地球赤道平面夹角，0°~180°。

——近地点角距，即在轨道平面上，近地点与升交点之间的地心角距，0°~360°。

——真近点角，即轨道平面上卫星与近地点之间的地心角距。

上述6个参数一旦确定，（在二体问题下）即可唯一确定卫星的运动状态（任意时刻卫星的位置和运动速度）。

### 二体问题的运动方程

### 二体问题微分方程的解

### 轨道空间直角坐标系

-，以地球质心为原点，指向近地点，垂直于轨道平面向上，在轨道平面上垂直于轴，构成右手系。

轨道空间直角坐标系到天球空间直角坐标系的转换过程（旋转矩阵）如下：

## 卫星的受摄运动

1. 中心力：假定地球为均 匀球体的地球引力。
2. 摄动力（非中心力）：包括地球非球形对称的作用力、日月引力、太阳辐射压力、地球潮汐作用力、大气阻力等。

## GPS卫星星历

GPS卫星的星历用于描述有关卫星运行轨道的信息，包含在导航电文中。

### 预报星历（广播星历）

GPS卫星将含有轨道信息的导航电文发送给用户接收机，然后经过解码获得的卫星星历，根据美国GPS控制中心跟踪站的观测数据进行外推得到。包括16个卫星参数：

* 1. 1个参考时刻
  2. 6个相应参考时刻的开普勒轨道参数（也叫参考星历）
  3. 9个摄动力影响参数

用轨道摄动项参数对已知的参考星历加以改正，从而外推出任一观测历元的卫星星历。

### 后处理星历

后处理星历是一些国家某些部门根据各自建立的卫星跟踪站所获得的对GPS卫星的精密观测资料，应用与确定广播星历相似的方法而计算的卫星星历。它可以向用户提供在用户观测时间内的卫星星历，避免了星历外推的误差。

# GPS卫星信号和导航电文

## GPS卫星信号

* 基本频率

1. 载波
2. L1载波：，
3. L2载波：，
4. L5载波：，（GPS现代化措施增加的码）
5. 测距码（承载导航电文，二进制码）

* 伪随机噪声码（Pseudo Random Noise，PRN）

又称伪随机码，简称PRN，是一个具有一定周期的取值为0或1的离散符号串。

1. C/A码（粗码，易捕获码，民用码）

，

C/A码是用于粗测距和捕获GPS卫星信号的伪随机码，码的结构公开，依据测距码的独特结构可以将微弱的卫星信号从噪声中提取出来。

1. P码（精码，军用码）

，

由两个伪随机码P*N*1(*t*)和P*N*2(*t*)的乘积得到。采用C/A码的搜索方式无法实现直接捕获，先捕获C/A码，然后根据导航电文给出的有关信息来实现P码的捕获。

1. LC码等其他码？
2. 导航电文（数据码或D码，二进制码）

## 导航电文及其结构

导航电文是包含卫星星历、卫星工作状态、时间系统、卫星钟运行状态、轨道摄动改正、大气折射改正和由C/A码捕获P码等导航信息的数据码（D码），是利用GPS进行定位和导航的数据基础。

导航电文的基本单位是长1500bit的一个主帧，传输速率为50bit/s，30s传送完毕一个主帧。一个主帧包括5个子帧，第1、2、3子帧各有10个字码，每个字码30bit，第4、5子帧各有25个页面，共有37500bit。

第1、2、3子帧每30s重复一次，内容每小时更新一次。第4、5子帧的全部信息要750s传送完，然后重复之，其内容仅在卫星注入新的导航数据后才更新。

1. 遥测码（Telemetry Word，TLW）

位于各子帧的开头第1个字码，表明卫星注入数据的状态。

1. 转换码（Hand Over Word，HOW）

位于每个子帧的第2个字码，帮助用户从捕获的C/A码转换到捕获P码的z计数。

1. 第一数据块

位于第1子帧的第3~10字码，主要内容包括：

1. 标识码，时延差改正（卫星内部，从信号产生到卫星发射天线所走的时间）。
2. 数据龄期，是时钟改正数的外推时间间隔，指明卫星钟改正数的置信度。

式中：是第一数据块的参考时刻，是计算时钟改正数所用数据的最后观测时间。

1. 星期序号WN，即从1980年1月6日子午夜零点（UTC）起算的星期数，即GPS星期数。
2. 卫星时钟改正。
3. 第二数据块（星历）

包含第2和第3子帧：

1. 开普勒六参数
2. 轨道摄动改正九参数
3. 时间二参数：包括从星期日子午夜零点开始度量的星历参考时刻和星历表的数据龄期。

式中：作为预报星历的最后观测时间，因此就是预报星历的外推时间长度。

1. 第三数据块

包括第4、5两个子帧，包括了所有GPS卫星的历书数据。

## 卫星信号调制

为有效传播信息，将频率较低的信号加载在频率较高的载波上，此过程称为调制。调制前的载波可用下列公式表示：

式中：为振幅，为角频率，为初相。

信号调制的方式一般有以下几种：

GPS卫星信号采用二进制相位调制法。用模二相加的方法先将导航电文调制在测距码上，然后再将组合码调制在载波上。调制信号属于二进制码，只有“0”和“1”两种状态：

当调制信号为“0”时，载波相位不变化，载波仍为；

当调制信号为“1”时，载波相位变化180°（或称倒相），此时的载波表达式为。调制后的调制波为

GPS卫星发射的信号分量包括：L1-C/A码、L1-P信号、L2-P信号。

## GPS卫星位置的计算

求卫星在协议地球坐标系中的坐标。

## GPS接收机基本工作原理

### GPS接收机的分类

1. 按接收机用途分类
2. 导航型接收机

实时给出载体的位置和速度，一般采用C/A码伪距测量，单点实时定位精度较低，一般为±25m，采用差分动态定位则精度有所提高。可细分为车载型、航海型、航空型、星载型接收机。

1. 测地型接收机

主要采用载波相位测量值进行相对定位，精度高，主要用于精密大地测量和精密工程测量。

1. 授时型接收机

主要利用GPS卫星提供的高精度时间标准进行授时，常用于天文台及无线电通信中的时间同步。

1. 按接收机载波频率分类
2. 单频接收机

只接收L1载波信号，测定载波相位观测值进行定位。由于不能有效消除电离层延迟误差，单频接收机只适用于短基线（<15km）的精密定位。

1. 双频接收机

可以同时接收L1、L2载波信号，利用双频对电离层延迟的不同来消除电离层对信号延迟的影响，可用于长达几千公里的精密定位。

1. 按接收机通道数分类

GPS接收机能同时跟踪多颗GPS卫星的信号，为分离接收到的不同卫星的信号，以实现对卫星信号的跟踪、处理和量测，具有这样功能的器件称为天线信号通道。可分为多通道接收机、序贯通道接收机、多路多用通道接收机。

1. 按接收机工作原理分类
2. 码相关型接收机：码相关技术得到测码伪距观测值。
3. 平方型接收机：平方法重建载波，得到载波相位观测值。
4. 混合型接收机：既可以测码伪距，也可以载波相位测量。
5. 干涉型接收机：将GPS卫星视为射电源进行干涉测量。

### GPS接收机的组成和工作原理

1. GPS接收机天线

分为接收机天线和前置放大器两部分。天线将GPS卫星信号的极微弱的电磁波转化为相应的电流，前置放大器将GPS信号电流予以放大。

1. 接收机主机
2. 变频器及中频放大器
3. 信号通道
4. 存储器
5. 微处理器
6. 电源

## 美国的GPS政策

### SA（Selective Availability）政策——选择可用性

人为的将误差引入卫星钟和卫星数据中，故意降低GPS定位精度，使C/A码定位精度从原来的20m降低到100m。主要内容如下：

1. 技术：在广播星历中人为地加入误差，以降低卫星星历的精度，其变化为无规律的随机变化。
2. 技术：在卫星钟的钟频信号中加高频抖动。

* 注解：SA政策已于2000年取消。

### AS（Anti-Spoofing）政策——反电子欺骗

在P码上增加一个极度保密的W码，形成新的Y码，绝对禁止非特许用户使用。AS政策仅在特殊情况下使用。

### GPS现代化计划

# GPS卫星定位基本原理

GPS卫星定位的基本原理是距离后方交会，包括确定一个点的三维坐标及实现同步的时间4个未知参数，因而至少需同时观测4颗卫星才能定位。

## 伪距测量

### 伪距和伪距法定位

1. 伪距

伪距是由卫星发射的测距码信号到达GPS接收机的传播时间（量测得到，并非信号实际传播时间）乘以光速所得出的量测距离。由于卫星钟、接收机钟的误差以及卫星信号经过电离层和对流层中的延迟，实际测出的距离与卫星到接收机的几何距离存在一定差值，因此一般称量测距离为伪距。

1. 伪距法定位

伪距法定位是由GPS接收机在某一时刻测出得到四颗以上GPS卫星的伪距以及已知的卫星位置，采用距离交会的方法求定接收机天线所在点的三维坐标，用C/A码进行测量的伪距为C/A码伪距，用P码测量的伪距为P码伪距。

### 伪距测量原理及其观测方程

1. 伪距的确定方法——码相关技术
2. 接收机在接收机钟的控制下产生一组与GPS卫星发出的测距码结构完全相同的复制码。
3. 通过时延器调整延迟时间，使接收机产生的复制码与接收到的GPS测距码完全对齐（这一过程称搜索GPS卫星信号）。自相关系数，卫星信号锁定，一般在时锁定。
4. 延迟时间即为GPS卫星信号从卫星传播到接收机所用的时间，由于信号从卫星发出时刻和到达接收机时刻分别由GPS卫星钟和接收机钟量测，两者均存在钟差，所以本地码延迟并非信号实际传播时间，而延迟时间与信号传播速度的乘积即为伪距。
5. 基本原理

设、分别为卫星发出信号瞬间的GPS标准时刻和卫星钟钟面时刻，、分别为接收机收到信号瞬间的GPS标准时刻和接收机钟钟面时刻，、分别为卫星钟和接收机钟相对于GPS标准时间的钟差，则有

(5‑1)

两式求差得

(5‑2)

式中：本地码延迟，GPS信号实际传播时间。

等式两边同时乘以光速得

(5‑3)

式中：为卫星至接收机间的几何距离，为伪距。

考虑到大气延迟误差，信号在穿过电离层和对流层时并不是以光速在传播，因此几何距离和伪距的关系式(5‑3)可改写为

(5‑4)

式中：和分别为电离层延迟和对流层延迟。

顾及星历误差、多路径效应及测量噪声的影响，结合(5‑4)式得伪距的严密表达式

(5‑5)

其中星历误差可以通过选择足够精确的卫星星历达到忽略不计的程度；多路径误差难以模型化，但可以通过选择合适的测站位置和接收机来限制其值，以便忽略不计；测量噪声作为随机误差，只能从数理统计的角度来描述其特点，如数学期望、方差等，可采取必要的措施使其忽略不计。因此所测伪距与真正几何距离之间的关系式简化为

(5‑6)

1. 观测方程

根据(5‑6)式得接收机对卫星的伪距测量观测方程为

(5‑7)

式中：，卫星的坐标和卫星钟差均可由导航电文得出，电离层延迟和对流层延迟可用模型计算，因而只有接收机坐标、、和接收机钟差四个未知参数。

## 载波相位测量

### 重建载波

1. 码相关法

在GPS信号中，由于采用二进制相位调制方法在载波上调制了测距码和导航电文，因而接收到的载波的相位已不再连续，所以在进行载波相位测量以前，首先要进行解调工作，设法将调制在载波上的测距码和卫星电文去掉，重新获取载波，这一过程称为重建载波。重建载波一般采用码相关法和平方法两种方法。

优点：用户可同时提取测距信号和导航电文，可获得全波长的载波，所获结果的信噪比较好。

缺点：必须知道测距码的结构，C/A码的结构公开，可用码相关法来恢复L1载波，但L2载波上未调制C/A码，只调制了结构未知的Y码，故不能用码相关法来恢复L2载波。

GPS现代化后，L2载波上调制了民用码L2C码，在L5上调制了L5I5和 L5Q5码，这些码结构公开，为用码相关法恢复L2和L5载波提供了可能性。

1. 平方法

采用二进制相位调制后的调制波为，将接收到的卫星信号平方得

这样使载波的相位保持连续，但恢复得到的不是载波本身，而是载波的二次谐波，波长为原来的一半。

优点：无需掌握测距码结构就能恢复载波。

缺点：①只能获得载波信号而无法获得测距码和导航电文，从而无法获得伪距观测值和卫星星历；②恢复的是半波长的载波，其整周模糊度更加难以确定；③所获结果的信噪比较差；④由于失去了导航电文中提供的时间信息，为了保证接收机间的时间同步，在每时段观测前后，均需将接收机集中在一起进行时间比对。

### 载波相位测量原理及其观测方程

1. 基本原理

在某一瞬间，卫星*S*发出的载波信号在接收机*R*处的相位值为，在卫星*S*处的相位值为，注意这里的和是包括整周数在内完整载波相位，则卫地距

式中：为载波的波长，对于L1载波，对于L2载波。

但上述方法实际上无法实施，因为GPS卫星并不量测载波相位，所以需要由接收机产生的基准振荡信号（即复制的载波）去取代卫星产生的载波，使得任一时刻下接收机处基准振荡信号的相位值都等于卫星处的载波相位，据此求得卫星*S*与接收机*R*之间的距离为

1. 载波相位测量的实际观测值

时刻卫星*S*到接收机*R*的包含整周数的载波相位差为

此后接收机继续跟踪卫星信号，不断测定小于一周的相位差，并利用整波计数器（多普勒计数器）记录从到时刻的整周数变化量，并且只要卫星*S*在到之间信号没有中断，整周模糊度就始终为一常数。

时刻卫星*S*到接收机*R*的包含整周数的载波相位差（完整的载波相位观测值）为

接收机在时刻的实际载波相位观测值为

从第一次开始，在以后的观测中，其观测量包括了不足一周的小数部分和整周计数。

根据实际载波相位观测值得到的卫地距为

1. 观测方程

考虑到各种观测误差(伪距和载波相位的电离层延迟是不一样的？)，根据载波相位观测值得到的卫地距实际上属于伪距，并考虑在仅顾及f平方项的情况下载波相位观测值的电离层延迟与伪距测量的电离层延迟大小相同，符号相反，将其代入伪距测量的观测方程得

所以接收机对卫星的载波相位测量观测方程为

式中：是以周（cycle）为单位的载波相位观测值，为卫星与接收机之间的几何距离，和分别为接收机钟差和卫星钟差，和分别为电离层延迟和对流层延迟，为整周模糊度，为载波频率，为真空中的光速。

已知卫星和接收机数量以及观测历元数，如何确定未知量的个数（整周模糊度个数、接收机和卫星钟差个数等）

1. 对载波相位测量的几点解释
2. 与测码伪距观测方程相比多了一个未知参数——整周模糊度，连续跟踪的所有载波相位观测值中均含有相同的整周模糊度。
3. 根据广播星历所求的卫星钟差不可视为已知量，因为其引起的测距误差可超过1m，远大于载波相位测量误差。处理方法：
4. 与伪距测量一样，星历误差、多路径效应及测量噪声通过一定方法可以忽略不计。

### 伪距测量与载波相位测量的对比

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **测距方法** | **伪距定位** | **载波相位测量** |
| **测量对象** | 测距码 | 载波 |
| **测量内容** | 延迟时间 | 相位差 |
| **测量原理** |  |  |
| **实际测量值** | 本地码延迟 | 差频信号的相位 |
| **优点** | 无多值性问题；定位速度快；  作为载波相位测量中解决整波数  不确定问题的辅助资料 | 定位精度高 |
| **缺点** | 精度低，单点定位的应用受到限制 | 存在多值性问题和周跳现象，解算复杂； |
| **测距精度** | 、，若观测精度取至测距码波长的1/100，则C/A码伪距测量精度约为3m；P码伪距测量精度约为30cm |  |

## 整周模糊度的确定

### 通过伪距观测值来确定模糊度

在进行载波相位测量的同时又进行了伪距测量，将伪距测量值减去载波相位测量的实际观测值（化为距离）后即得到。但由于伪距测量的精度较低，所以需要较多的取平均值后才能得到准确的整波段数。

由伪距观测值与与载波相位观测值间的关系可得，（有些误差对伪距观测值和载波相位观测值的影响不同，从而相减并不能完全消除误差的影响，伪距和载波相位测量得到的伪距不相等？因为存在对两者影响程度不同的误差，理论上应该相等）

### 依据较为精确的先验站坐标及卫星星历来确定模糊度

### 将模糊度作为待定参数通过平差计算进行估计（经典方法）

1. 整数解

短基线定位时一般采用此种方法。首先根据卫星位置和修复了周跳后的相位观测值进行平差解算，求得基线向量和整周模糊度。由于各种误差的影响，解得的整周模糊度往往不是一个整数，称为浮点解。然后将其固定为整数（通常采用四舍五入法），并重新进行平差计算。在计算中，整周模糊度采用整周值，并视为已知量，以求得基线向量的最后值。

1. 浮点解

当基线较长时，误差的相关性将降低，许多误差消除得不够完善。所以无论是基线向量还是整周模糊度，均无法估计得很准确，再将整周模糊度固定为某一整数往往无实际意义，所以通常将浮点解作为最后解。

采用经典方法解算整周模糊度时，为了能正确求得这些参数，往往需要一个小时甚至更长的观测时间，从而影响了作业效率，所以只有在高精度定位领域中才应用。

### 快速确定整周模糊度法

基本思路是利用初始平差的解向量（接收机点的坐标及整周模糊度的浮点解）及其精度信息（单位权中误差和方差协方差阵），以数理统计理论的参数估计和统计假设检验为基础，确定在某一置信区间整周模糊度可能的整数解的组合，然后依次将整周模糊度的每一组合作为已知值，重复地进行平差计算。其中使估值的验后方差或方差和为最小的一组整周模糊度即为最佳估值。

采用此种方法进行短基线定位（<15km）时，只需根据数分钟双频观测值便能精确地确定整周模糊度的最佳估值，使相对定位精度达到厘米级。

### LAMBDA（Least-square Ambiguity Decorrelation Adjustment）算法——最小二乘模糊度降相关平差法

针对模糊度参数间强相关问题而提出的算法。

1. 求浮点解
2. 模糊度降相关

对模糊度参数及其协方差阵进行整数高斯变换（***z***变换）

式中：、、为原空间中的实数模糊度、整数模糊度及协方差阵，、、为新空间中的实数模糊度、整数模糊度及协方差阵，为整数变换矩阵。

1. 整数变换矩阵的特性
2. （改进的？）Cholesky分解（改进的平方根法）

Q为对称正定矩阵？，可以进行楚列斯基分解，且其对角线元素均大于零

1. 在新空间中进行整数模糊度搜索
2. 回代求固定解，模糊度确认

## 整周跳变的探测与修复

在跟踪卫星过程中，由于某种原因，如卫星信号被障碍物挡住而暂时中断，或受无线电信号干扰造成失锁，导致计数器无法连续计数。因此，当信号重新被跟踪后，整周计数就不正确，但不到一个整周的相位观测值仍是正确的。这种现象称为周跳。

如果是因为电源故障或振荡器本身的故障使信号中断，那么中断前后信号本身失去了连续性。恢复正常工作后的观测值中不但整周计数不正确，而且不足整周的部分也不对。这时，修复周跳没什么意义，而必须将资料分为两个时段，各设一个整周模糊度单独进行处理。

1. 屏幕扫描法

在计算机屏幕前依次对每个站、每个时段、每个卫星的相位观测值变化率的图像进行逐段检查，观察其变化率是否连续，如果出现不规则的突然变化则说明在相应的相位观测中出现了周跳。然后用手工编辑的方法逐点、逐段修复。

1. 高次差或多项式拟合法
2. 高次差法

根据周跳现象的发生将会破坏载波相位测量的观测值随时间而有规律变化的特性来探测。GPS卫星的径向速度最大可达0.9km/s，L1、L2载波的波长、，因而整周计数每秒可变化数千周。因此如果每15s输出一个观测值，则相邻观测值间的差值可达数万周，对于几十周的跳变就不易发现。

但如果在相邻的两个观测值间依次求差而求得观测值的一次差，则这些一次差的变化就要小得多。在一次差的基础上再求二次差、三次差、四次差、五次差时，其变化则小得更多（四、五次差的变化已趋于零），此时就能发现有周跳现象的时段和观测历元。找出含有周跳的观测历元后，根据相邻的几个正确的相位观测值，可采用高次插值或多项式拟合的方法外推该历元的正确整周计数。

对于稳定度为10-10的接收机时钟，观测时间间隔为15s，L1载波的频率为1.57542109Hz，由于振荡器的随机误差而给相邻的L1载波相位造成的影响为2.4周，所以求差的方法一般难以探测出只有几周的小周跳。

1. 多项式拟合法

根据几个相位测量观测值拟合一个n阶多项式，据此多项式来预估下一个观测值，并与实测值比较，从而发现周跳并修正整周计数。

1. 卫星间求差法
2. 双频观测值修复周跳
3. 根据平差后的残差发现和修复周跳

(电离层残差模型即GF模型可用来探测周跳，参考博士论文)

## 线性组合观测值（Linear Combination，LC观测值,见rtklib说明书）

### 同类型不同频率观测值的线性组合

1. 载波相位观测值线性组合的一般形式

L1的载波相位观测值和L2的载波相位观测值间的线性组合的一般形式为：

线性组合观测值的频率、波长、整周模糊度、电离层延迟改正以及观测噪声与L1和L2中相应值之间的关系为：（用电离层延迟还是延迟改正？）

式中：，为真空中的光速。

1. 宽巷观测值
2. 窄巷观测值
3. 消电离层组合观测值

吸收了UPD的整周模糊度：

### 不同类型观测值的线性组合

## GPS绝对定位

根据卫星星历给出的观测瞬间卫星在空间的位置和卫星钟差，以及由一台GPS接收机所测定的从卫星至接收机间的距离，通过距离交会的方法测定该接收机在地球坐标系中的绝对坐标，又称单点定位。

绝对定位可分为静态和动态绝对定位，基于测距方法又可分为两类：

### 标准单点定位（Standard Point Positioning，SPP）

1. 标准单点定位的观测方程和误差方程

伪距观测方程的实用形式如下

在测站坐标初始值处展开为泰勒级数且仅保留一次项，得到线性化的观测方程

式中：。

误差方程

坐标参数改正数用还是还是dx?

式中：，，，

设接收机r在某一历元同步观测了j颗卫星，为便于计算，令，则误差方程的矩阵形式为

1. 标准单点定位的精度评价（DOP精度衰减因子英文：见教材）
2. 平面位置精度因子
3. 高程精度因子

，

1. 空间位置精度因子

，

1. 接收机钟差精度因子

，

1. 几何精度因子

### 精密单点定位（Precise Point Positioning，PPP）

1. 基于原始观测值的非差非组合模型

精密单点定位的非差非组合观测方程可表示为

式中：

为卫星号；

代表信号频率；

、分别是以米为单位的伪距和载波相位观测值；

，为卫星至接收机的几何距离；

用哪个表达式？

、分别为接收机钟差和卫星钟差；

和分别为电离层延迟和对流层延迟；

为载波相位观测值的整周模糊度；

和分别为接收机端和卫星端伪距硬件延迟；

和分别为接收机端和卫星端相位未校准硬件延迟（UPD）；

和分别为伪距多路径效应和相位多路径效应；

和分别为伪距观测噪声和载波相位观测噪声；

为各种模型改正项之和。

对伪距和载波相位观测值产生相同影响的误差：对流层延迟、相对论效应···

对伪距和载波相位观测值产生不同影响的误差：电离层延迟、多路径效应、硬件延迟···、测量噪声对伪距和相位观测值的影响也不同？（从下标可以看出）

与频率有关的误差

对单点定位和相对定位产生不同影响的误差

由于PPP—般釆用精密星历与精密卫星钟差产品，上述模型已不再考虑卫星轨道误差（即星历误差？）、卫星钟误差。信号在接收机内部的延迟可被接收机钟差吸收，而初始相位和相位延迟则会被模糊度参数吸收，在浮点解中一般不予考虑。对于一些其他的系统误差的影响，如对流层延迟干分量、卫星与接收机端天线相位中心偏差及其变化、相位缠绕、相对论效应、固体潮与海洋潮、地球自转等误差，可采用现有的模型精确改正。对于一些难以精确模型化的误差，如对流层延迟湿分量，则附加参数进行估计；多路径效应及观测噪声则主要通过随机模型来处理

从而得到简化后的模型（简化后一共有哪些待定参数？至少一个天顶对流层湿延迟分量，每个历元接收机钟差不同？参考张小红的书和李征航视频课）：

各类误差影响量级，对绝对和相对定位的影响不同

1. 双频消电离层组合模型（英文？）

测量噪声：设测码伪距观测值和的测量噪声分别为和，则消电离层组合观测值的噪声将扩大为=，若，则有

1. UofC模型

参考学术论文和博士学位论文

1. 无模糊度模型

### 精度对比

## 静态相对定位

确定同步跟踪的GPS卫星信号的若干台接收机之间的相对位置（坐标差）的定位方法称为相对定位。

基线向量

求差法的种类：接收机间求差，卫星间求差，历元间求差

* 注意

1. 这里的单差、双差、三差观测值属于同一频率、同一类型观测值（指载波相位观测值或伪距观测值）之间的线性组合。
2. 在相对定位中，由于起算点坐标带有一定随意性（对起算点坐标精度要求不高），求得的绝对位置并无太大的实际意义，而真正有意义的是测站间的相对位置。

### 单差模型

1. 观测方程

设接收机i、j对卫星p的载波相位同步观测值如下

两式求差得载波相位单差观测值的观测方程

式中：，，，，，。

1. 误差方程

将接收机i、j对卫星p的载波相位测量观测方程线性化得

由于测站i和j的坐标改正数前所乘系数并不相同，因此求差时无法简单地将组合为，于是可设测站i为基线的已知端，其坐标已知，则i对卫星p的观测方程无需线性化，以上方程组改写为

坐标参数改正数用还是还是dx?

以上第一式中的可根据i点的坐标及由卫星星历给出的卫星坐标求得，为已知值。两式求差得

1. 单差模型的特点
2. 消除卫星钟差
3. 削弱卫星星历误差
4. 削弱对流层和电离层延迟误差

对卫星星历误差、对流层和电离层延迟误差的削弱在短基线定位中尤为明显。

### 双差模型

1. 观测方程

设接收机i、j在同一历元对卫星p、q的单差观测值如下

两式求差得载波相位双差观测值的观测方程

式中：，，，，。

* 卫星间求双差的实际操作方法

选择视场中可观测时间较长且高度角较大的一颗卫星作为基准星，然后将其余各卫星的单差观测方程分别与基准星的单差观测方程相减，组成双差观测方程。

* 双差模型的特点

1. 消除接收机钟差。
2. 消除信号在卫星内部和接收机内部的时延，使得双差模型的整周模糊度仍具有整数特性，仍能求得固定解。
3. 在保持原有精度的情况下，可大大减少未知数个数，从而大幅减少数据处理工作量。

### 三差模型

* 观测方程

设接收机i、j在观测历元、对卫星p、q的双差观测值如下

两式求差得载波相位三差观测值的观测方程

式中：，，，。

* 三差模型的特点：消除整周模糊度。
* GPS测量广泛使用双差固定解而不采用三差解的原因

1. 三差模型中未知参数个数进一步减少为3个（哪三个），但对计算机而言，相比双差模型未知参数求解所节省的时间是微不足道的，且组成三差模型也需要花费一定时间，因而三差解和双差解的工作量是基本相当的。
2. 三差解实际上是一种浮点解。因为若将双差模糊度（有这种说法吗？）解出，由于各种误差的影响，其值一般为实数。在三差解中只是通过对双差观测方程在历元间求差将消去，由于根本未做取整和回代等工作，故三差解是与浮点解对应的。

### 求差法的缺点

## GPS动态定位

### 动态绝对定位

### 动态相对定位

## 差分GPS定位原理

### 单站GPS差分（SRDGPS）

### 局部区域GPS差分系统（LADGPS）

### 广域差分（WADGPS）

## CORS及网络RTK技术

### CORS

连续运行参考站（Continuous Operation Reference System，CORS），也称连续运行卫星定位服务系统，是利用GPS卫星导航定位、计算机、数据通信和互联网技术（LAN/WAN），在一个城市、一个地区或一个国家根据需求按一定距离建立起来的长年连续运行的若干个固定GPS基准站组成的网络系统。

CORS有一个或多个数据处理中心，各个基准站与数据处理中心之间具有网络连接，数据处理中心从基准站采集数据，利用基准站网软件进行处理，向用户自动地发布不同类型的卫星导航原始数据和电离层、对流层、卫星轨道误差等各类误差改正数据。CORS全年全天运行。

### 网络RTK

网络RTK又称多基准站RTK，是一种基于多基准站网络的实时差分定位系统，可克服常规RTK的缺陷，实现长距离（70~100km）RTK定位。

# GPS测量的误差来源及其影响

## GPS测量主要误差分类

1. 按误差来源划分

表6‑1 GPS测量误差的分类及其对距离测量的影响

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **误差来源** | | **测距影响**/m |
| 卫星端 | 星历误差；卫星钟差；相对论效应；  卫星端信号内部时延；卫星天线相位中心偏差 | 1.5~15 |
| 信号传播 | 电离层延迟；对流层延迟；多路径效应 | 1.5~15 |
| 接收机端 | 接收机钟差；位置误差；接收机端信号内部时延；  接收机天线相位中心偏差；测量噪声 | 1.5~5 |
| 其他影响 | 地球潮汐；负荷潮 | 1.0 |

1. 按误差性质划分
2. 系统误差（GPS测量的主要误差源）：星历误差、卫星钟差、接收机钟差、大气折射误差等。主要处理措施如下：
3. 偶然误差：多路径效应、接收机测量噪声（是偶然误差吗？）、观测误差。

难以建立改正模型，也不能采用求差法来抵消，通过选择较好的硬件和较好的观测条件进行削弱。

## 钟误差

### 卫星钟误差（参考新教材）

卫星钟钟面时间相对于GPS标准时间的钟差、频偏、频漂等产生的误差（定义不好）。这些偏差的总量在1ms以内，等效距离差约可达300km。

* 削弱或消除措施

1. 模型改正

卫星钟在时刻的钟误差可表示为：

式中：为参考历元，、、分别表示钟在时刻的钟差、钟速（频偏）、钟速的变率（卫星钟加速度的一半，也称钟的老化率或频漂项）。经改正后各卫星间的同步差在20ns以内，等效距离差不超过6m。

1. 接收机间同步观测值求差

卫星钟差和经模型改正后的残余误差采用在接收机间求一次差的方法进一步消除。

### 接收机钟差

* 削弱或消除措施

1. 作为未知参数平差求解
2. 多项式模型改正（类似于卫星钟差改正模型）
3. 卫星间同步观测值求差

### 信号内部时延 UPD

## 卫星星历误差

由卫星星历给出的卫星轨道与卫星的实际轨道之差（即卫星在空间的位置及运动速度与其实际位置及运动速度之差）称为卫星星历误差。

### 星历误差对定位的影响

1. 对单点定位的影响
2. 对相对定位的影响

### 削弱措施

1. 建立GPS卫星跟踪网独立定轨
2. 轨道松弛法

在平差模型中，把卫星星历给出的卫星轨道作为初始值，视其改正数为未知数，通过平差同时求得测站位置及轨道的改正数。有一定局限性，不宜作为基本方法。

1. 接收机间同步观测值求差

利用两个或多个测站对同一卫星的同步观测值求差，以减弱卫星星历误差的影响。

## 相对论效应

由于卫星钟和接收机钟所处的状态（运动速度和重力位）不同而引起卫星钟与接收机钟之间产生相对钟误差的现象。

广义相对论效应的影响比狭义相对论效应的影响大得多，因此总影响使得卫星钟频率相比地面时增加。

* 削弱措施

在制造卫星钟时预先把频率降低。

但由于卫星轨道是一个椭圆，卫星运行速度也随时间发生变化，相对论效应影响并非常数，经上述改正后仍有残差，它对GPS时的最大影响可达70ns，对精密定位不可完全忽略。

## 电离层延迟

### 电离层延迟及其对测距的影响

电离层是指地球上空距地面高度在60~1000km的大气层。当GPS信号通过电离层时：

1. 传播速度会发生变化，变化程度主要取决于电离层中的电子密度和信号频率。
2. 信号路径产生略微弯曲，弯曲程度与信号频率有关，但对测距结果影响不大，一般情况下可不予考虑。

以上两种变化使得信号传播时间乘以真空中的光速不等于卫星至接收机的几何距离，这种偏差称电离层延迟误差。

电离层延迟与卫星高度角有关，在天顶方向可达十几米，在高度角为5°时可超过50m。

### 电子密度与总电子含量

1. 电子密度

单位体积中所含的电子数称为电子密度，常用电子数/m3或电子数/cm3表示。

* ，即电子密度与高程和地方时有关。
* 电子密度与高程的关系

1. 随着高程的增加，大气将变得越来越稀薄，单位体积所含的可供电离的气体分子数越来越少，从而产生一种趋势：电子密度随高程的增加而减小。
2. 太阳光在穿越电离层过程中，其能量将不断地被大气层吸收而越来越弱，最终将不足以使气体分子电离，从而产生另一种趋势：电子密度随高程的增加而增大。

总影响缺个图。

1. 总电子含量（Total Electron Content）

总电子含量是沿卫星信号传播路径对电子密度进行积分的结果，即底面积为一个单位面积、沿信号传播路径贯穿整个电离层的一个柱体中所含的电子数，通常以电子数/m2或电子数/cm2表示。

* ，即总电子含量与地方时和卫星高度角有关。

1. 天顶方向总电子含量（Vertical Total Electron Content）

对同一电离层而言，从某一测站至各卫星方向上的值是不同的。卫星高度角（高度角用什么字母表示？）越小，信号在电离层中的传播路径就越长，值就越大。在该站所有的值中有一个最小值，即天顶方向总电子含量。与高程和卫星高度角均脱离了关系，可以反映测站上空电离层的总体特征。

* 与太阳活动程度的关系

### 电离层延迟改正

1. 利用测距码进行伪距测量时应加的电离层延迟改正

不用乘以c吧？

式中：为信号频率，为电子密度，即单位体积中所含的电子数，为信号传播路径，为卫星至接收机的几何距离与所有和频率无关的偏差改正项之和。

1. 利用载波相位测量确定卫地距时应加的电离层延迟改正
2. 两类电离层延迟改正之间的关系

在仅顾及项的情况下，测码伪距观测值与载波相位观测值的电离层延迟改正大小相同，符号相反。

### 电离层延迟的双频改正模型

1. 伪距观测的电离层延迟双频改正

令，L1、L2两种不同频率的GPS信号沿同一路径传播（实际上两种不同频率的信号通过电离层时的传播路径弯曲程度是不同的，因此传播路径也是不严格相同的，但这种差异十分微小，不予考虑），具有相同的值，于是有

两式求差得

所以有

1. 线性组合法
2. 载波相位测量的电离层延迟双频改正

* 削弱措施

1. 双频观测
2. 利用电离层改正模型加以修正
3. 接收机间同步观测值求差：适用于短基线（如<20km），当测站相距不太远时，信号传播路径大致相似，电离层延迟也大致相同。其精度随基线长度增加而明显降低。

## 对流层延迟

卫星导航定位中的对流层延迟通常泛指卫星信号在高度为50km以下的未被电离的中性大气时所产生的信号延迟。在研究信号延迟过程中不再将该大气层分为对流层和平流层，也不再估计两者性质上的差别。由于80%的延迟发生在对流层，所以将发生在该中性大气层中的延迟统称为对流层延迟。

GPS信号通过对流层时，传播路径发生弯曲，使量测距离产生偏差，称为对流层延迟误差。

对流层延迟与地面气候、大气压力、温度、湿度变化有关，其影响亦与卫星高度角有关，天顶方向的对流层延迟误差达2.3m，地面方向（高度角为10°）影响可达20m。

* 削弱措施

1. 模型改正
2. 引入描述对流层影响的附加参数进行平差解算
3. 接收机间同步观测值求差

适用于短基线（如<20km），当测站相距不太远时，信号传播路径大致相似，对流层延迟也大致相同。求差法精度随基线长度增加而明显降低。

1. 利用水汽辐射计直接测定信号传播的影响

## 多路径误差

在GPS测量中，测站周围反射物所反射的卫星信号（反射波）进入接收机天线，和直接来自卫星的信号（直接波）产生干涉，从而使观测值偏离真实值，这种由于多个路径的信号传播所引起的干涉时延效应称为多路径效应。

多路径误差的大小与反射物离测站的距离、卫星信号的传播方向以及反射物的反射系数等因素有关，难以模型化求出观测瞬间的多路径误差值。

推导多路径误差的表达式

对载波相位而言，多路径误差不超过波长的1/4，L1载波的多路径误差最大值为4.8cm， L2载波则为6.1cm；而多路径误差对伪距测量的影响要严重得多，最大值为近似码长的一半，P码的多路径误差最大可达15m（引用博士论文GNSS）。

* 削弱措施

1. 选择合适的站址

远离大面积平静的水面，远离高大建筑物，不宜选在山坡、山谷和盆地中，汽车不要停放得离测站过近。

1. 选择合适的GPS接收机
2. 适当延长观测时间
3. 数据预处理时设置截止高度角（低高度角更易产生多路径效应）

## 与接收机有关的其他误差

### 接收机的位置误差

接收机天线相位中心相对测站标石中心位置的误差称接收机位置误差，包括天线的置平和对中误差、量取天线高误差。变形监测中应采用有强制对中装置的观测墩。

### 天线相位中心的位置偏差（PCO、PCV？）

天线相位中心随信号输入的强度和方向不同而有所变化，观测时天线相位中心的瞬时位置与理论上的相位中心不一致而产生的偏差称为天线相位中心的位置偏差，可分为水平偏差和垂直偏差两部分。

* 削弱措施：同一类型天线同步观测值求差

### 信号在接收机内的时延

### 接收机的测量噪声

## 其他误差改正

### 地球自转改正

### 地球潮汐改正（固体潮和负荷潮）

地球并非刚体，在日月引力作用下，固体地球产生周期性的形变，称为固体潮。同样在日月引力作用下，地球上的负荷产生周期性变动，使地球产生周期性形变，称为负荷潮。固体潮和负荷潮引起的测站位移可达80cm，使不同时间的测量结果互不一致。

### 天线相位缠绕

GPS卫星信号采用右旋极化波，当卫星发射天线与接收机天线间存在相对旋转时，会使载波相位观测值产生误差，称为天线相位缠绕（Phase Wind Up）误差。

1. 对定位的影响

在静态定位中，接收机天线的指向是固定不变的；在动态定位中，接收机天线的指向虽然可能发生变化，但由此产生的天线相位缠绕误差可以自动地被吸收到接收机钟差中去，因而也无需另行考虑。所以这里说的天线相位缠绕误差主要指的是卫星发射天线旋转引起的相位误差。卫星上的太阳能帆板需要始终对准太阳方向，因而卫星在运动过程中发射天线的方向也会随之慢慢旋转。尤其是当卫星进入地影后（日蚀），为了将太阳能帆板对准太阳，卫星会加快旋转，从而引起载波相位观测值的误差。

卫星发射天线旋转引起的相位误差对于相距不太远的两个测站而言大体相同，所以不会对短基线向量的成果产生明显的影响。研究结果表明，当两站相距4300km时，相位缠绕误差对基线向量的影响最大可达4cm。在长距离高精度相对定位中应顾及此项误差。相位缠绕误差对单点定位的影响可达分米级，在高精度单点定位中必须顾及此项误差。

# GPS测量的设计与实施

# GNSS专业英语（PPP部分、双差解（基线向量等）部分）