

卫星导航定位原理与应用

第三章：全球定位系统的组成及信号结构

主讲： 王 华



内容提要

1. 全球定位系统的组成
2. 载波与测距码
3. 导航电文
4. 卫星信号调制
5. GPS卫星位置的计算



1. 全球定位系统的组成



GPS的系统组成

□ 空间部分

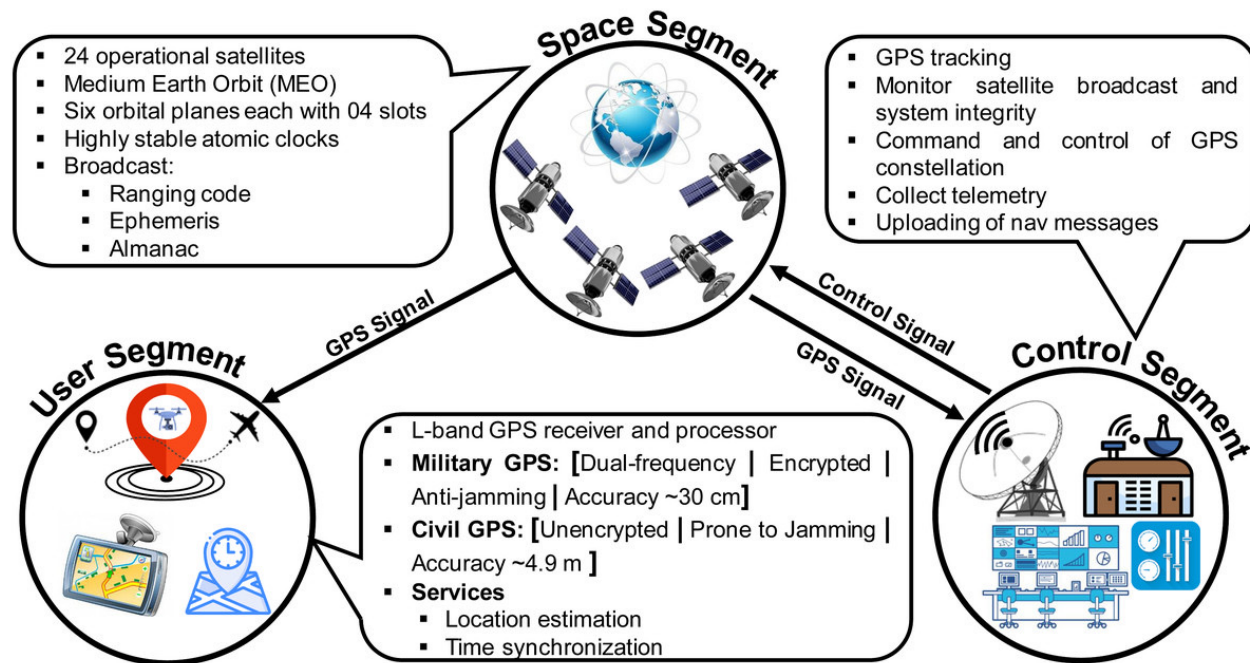
Space Segment

□ 地面监控部分

Control Segment

□ 用户部分

User Segment



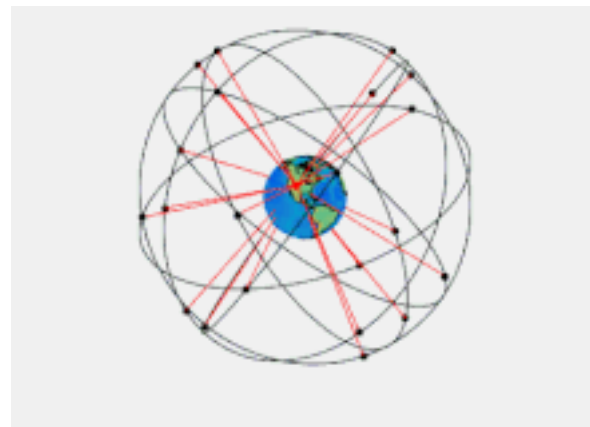
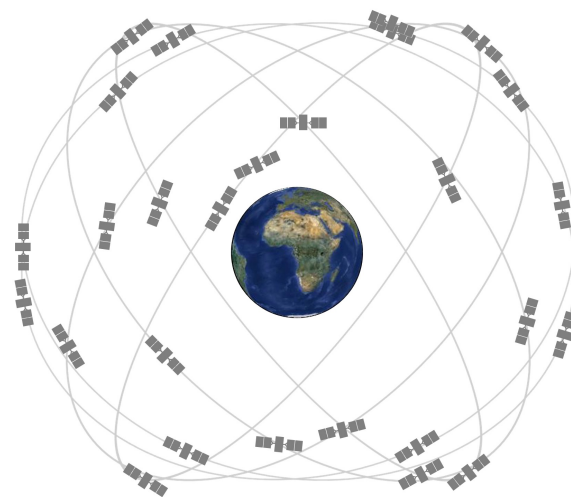
GPS的系统组成：空间部分

GPS卫星星座

► 设计星座：21+3

- 21颗正式工作卫星+3颗活动的备用卫星
- 6个轨道面，平均轨道高度20200km，轨道倾角 55° ，周期 $11^h58^{\min}$ （顾及地球自转，地球-卫星的几何关系每天提前 $4^{\min}$ 重复一次）
- 保证在每天24小时的任何时刻，在高度角 15° 以上，能够同时观测到4颗以上卫星

► 当前星座：31（截止2023.7.3）



GPS的系统组成：空间部分

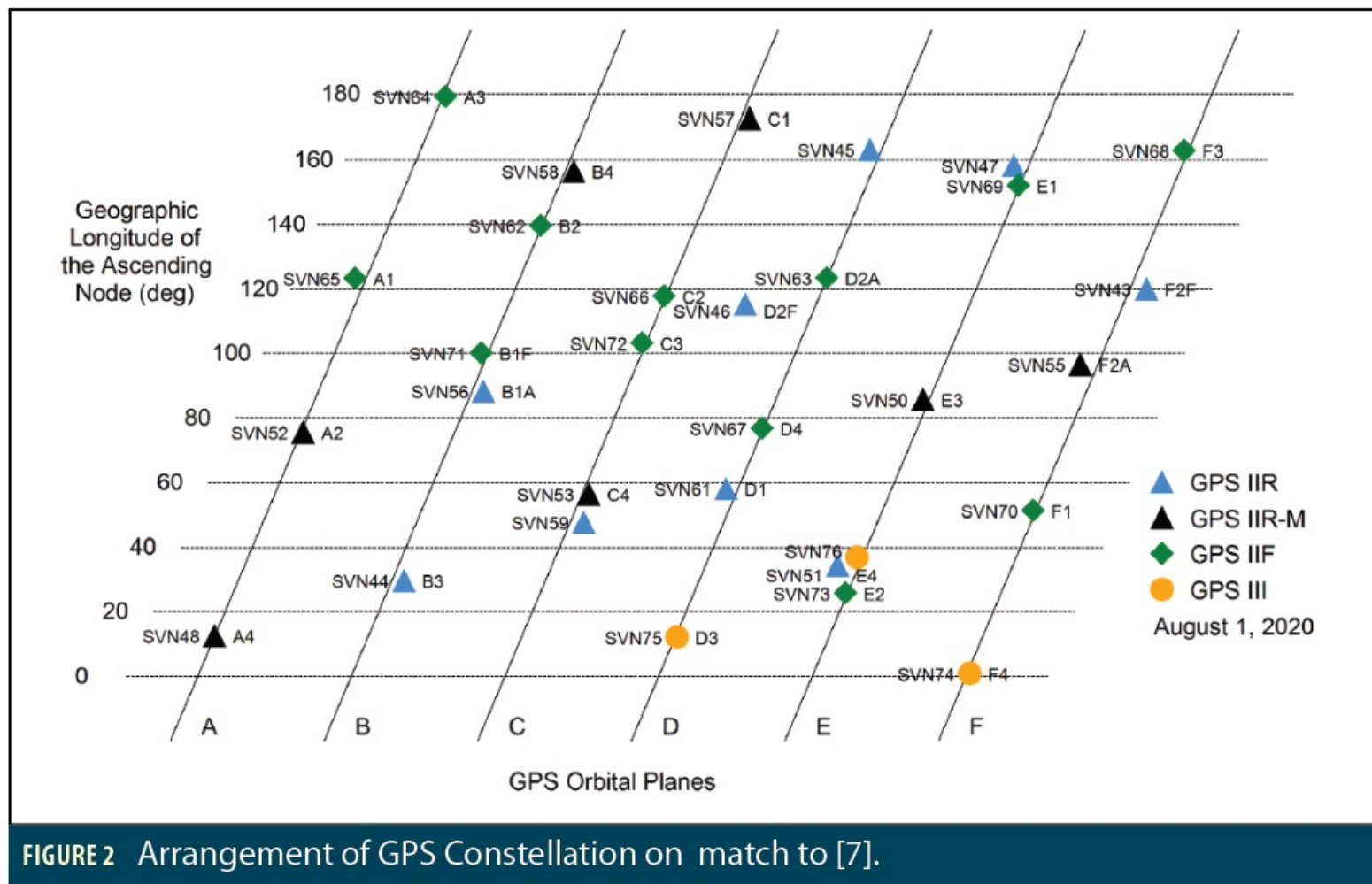
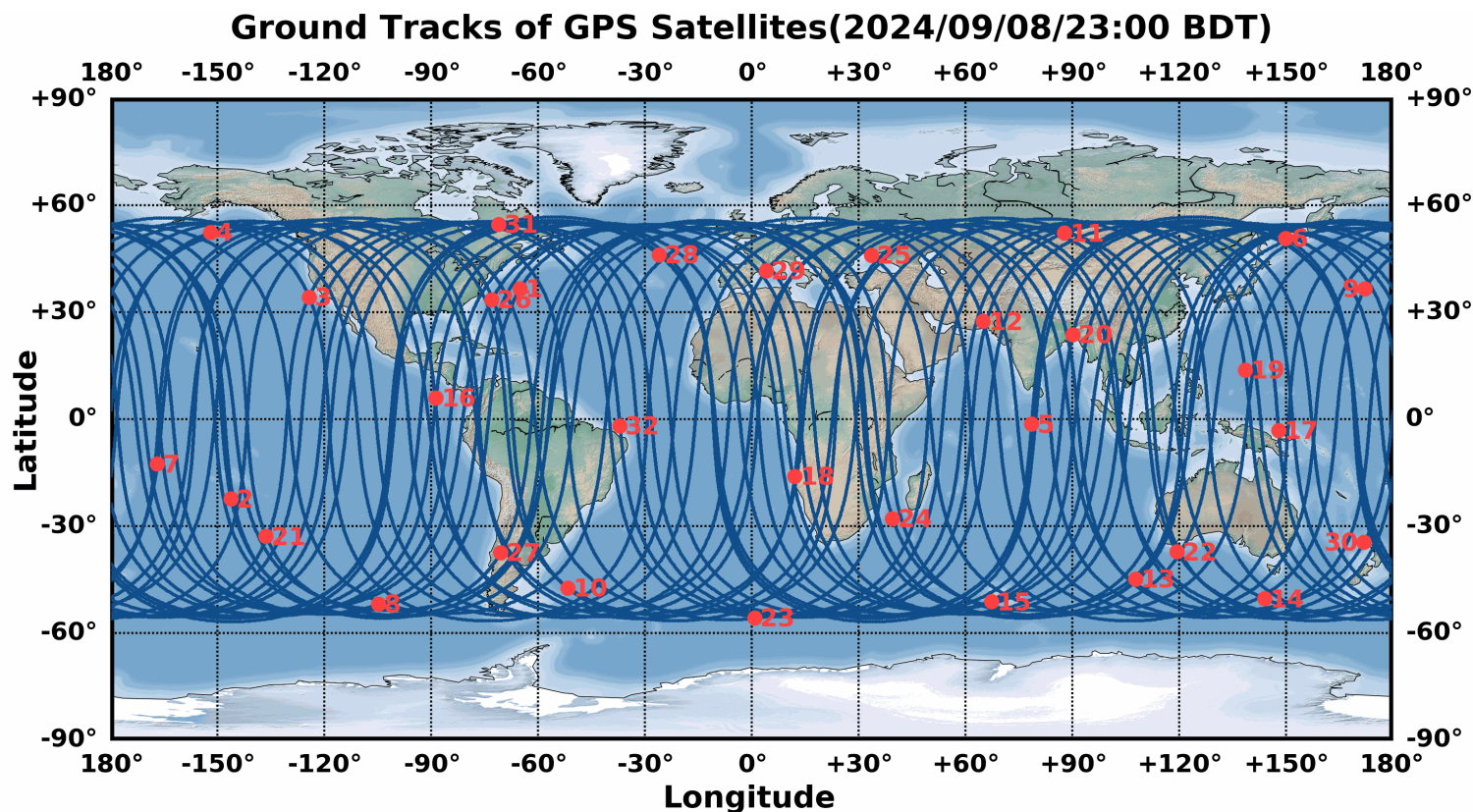


FIGURE 2 Arrangement of GPS Constellation on match to [7].

GPS的系统组成：空间部分

► GPS卫星的地面轨迹



GPS的系统组成：空间部分

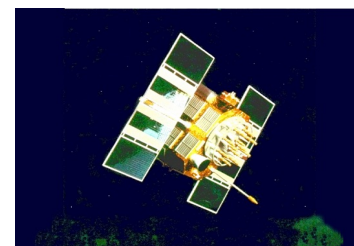
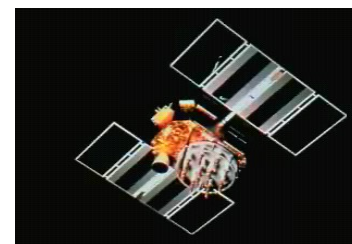
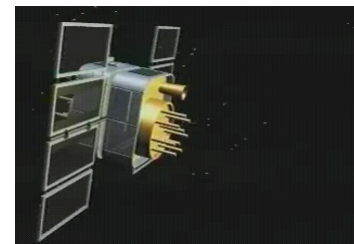
► GPS卫星

□ 作用：

- ◆ 接收、存储来自地面控制系统的导航电文
- ◆ 在原子钟的控制下生成用于导航定位的信号（测距码、载波）
- ◆ 采用二进制相位调制法将测距码和导航电文调制在载波上发送给用户
- ◆ 按照地面控制系统的命令调整轨道、调整卫星钟等。
- ◆ 其他特殊用途，如通讯、监测核暴等。

□ 主要设备

- ◆ 太阳能电池板
- ◆ 原子钟（2台铯钟、2台铷钟）
- ◆ 信号生成与发射装置



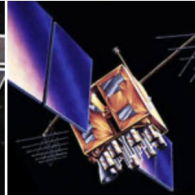
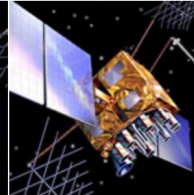
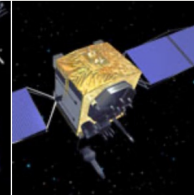
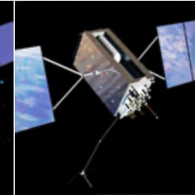
GPS的系统组成：空间部分

► GPS卫星

□ 试验卫星：Block I

- ◆ 也称原型卫星，重774kg（包括310kg燃料），设计寿命5年。
- ◆ 1978-1985年共发射了11颗试验卫星（第七颗失败）
- ◆ 1995年最后一颗试验卫星停止工作

□ 工作卫星：Block II/III

LEGACY SATELLITES			MODERNIZED SATELLITES	
				
BLOCK IIA	BLOCK IIR	BLOCK IIR-M	BLOCK IIF	GPS III/IIF
0 operational	6 operational	7 operational	12 operational	6 operational
▪ Coarse Acquisition (C/A) code on L1 frequency for civil users ▪ Precise P(Y) code on L1 & L2 frequencies for military users ▪ 7.5-year design lifespan ▪ Launched in 1990-1997 ▪ Last one decommissioned in 2019	▪ C/A code on L1 ▪ P(Y) code on L1 & L2 ▪ On-board clock monitoring ▪ 7.5-year design lifespan ▪ Launched in 1997-2004	▪ All legacy signals ▪ 2nd civil signal on L2 (L2C) LEARN MORE ➔ ▪ New military M code signals for enhanced jam resistance ▪ Flexible power levels for military signals ▪ 7.5-year design lifespan ▪ Launched in 2005-2009	▪ All Block IIR-M signals ▪ 3rd civil signal on L5 frequency (L5) LEARN MORE ➔ ▪ Advanced atomic clocks ▪ Improved accuracy, signal strength, and quality ▪ 12-year design lifespan ▪ Launched in 2010-2016	▪ All Block IIF signals ▪ 4th civil signal on L1 (L1C) LEARN MORE ➔ ▪ Enhanced signal reliability, accuracy, and integrity ▪ No Selective Availability LEARN MORE ➔ ▪ 15-year design lifespan ▪ IIF: laser reflectors; search & rescue payload ▪ First launch in 2018



GPS的系统组成：地面监控部分

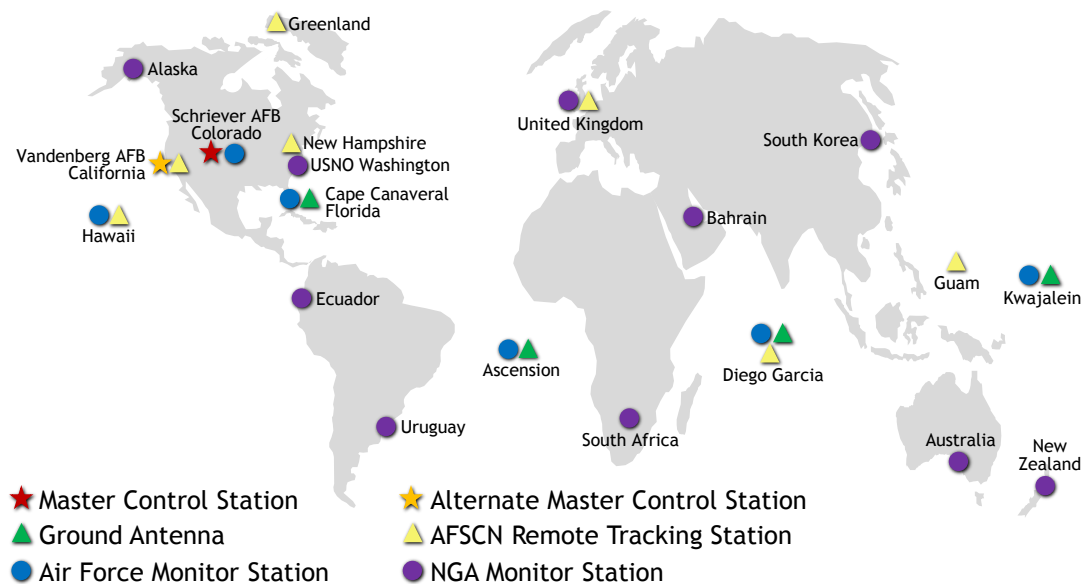
▶ 地面监控部分

Control Segment

□ 组成

- ◆ 主控站：1+1（备份）
- ◆ 监测站：6+10
- ◆ 注入站：4+7
- ◆ 通讯与辅助系统

GPS Control Segment



Updated May 2017



GPS的系统组成：地面监控部分

► 主控站（1+1）

□ 作用：

- ◆ 管理、协调地面监控系统各部分的工作
- ◆ 收集各监测站的数据，编制导航电文，送往注入站将卫星星历注入卫星
- ◆ 卫星维护与异常情况的处理。

□ 地点：美国科罗拉多州法尔孔空军基地



GPS的系统组成：地面监控部分

► 监测站（6+10）

□ 作用：

- ◆ 对视场中的GPS进行伪距测量
- ◆ 采集气象信息
- ◆ 对伪距观测值进行改正后再进行编辑、平滑和压缩，然后传给主控站



GPS的系统组成：地面监控部分

► 注入站（4+7）

□ 作用：

将导航电文注入GPS卫星

□ 地点：

阿松森群岛（大西洋）、
迪戈加西亚（印度洋）和
卡瓦加兰（太平洋）等



GPS的系统组成：用户部分

► 组成

- 用户
- 接收设备

► 接收设备

- GPS信号接收机
- 其它仪器设备



GPS的系统组成：用户部分

► 组成

- 用户
- 接收设备

► 接收设备

- GPS信号接收机
- 其它仪器设备



GPS的系统组成：用户部分

► GPS信号接收机

□ 组成

- ◆ 天线单元
 - 前置放大器
 - 接收天线
- ◆ 接收单元
 - 信号通道
 - 存储器
 - 微处理器
 - 输入输出设备
 - 电源

天线单元

接收单元



天线相位中心

► 定义

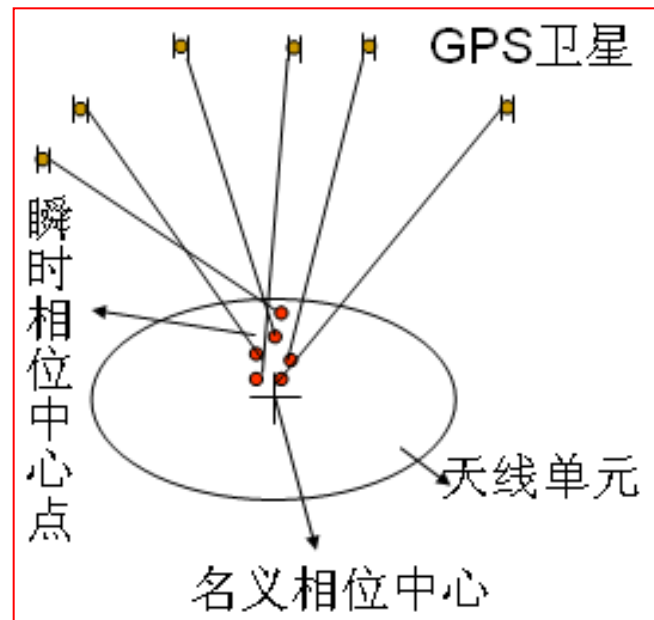
- 无线电天线发射或接收信号的点

► 特性

- L1和L2的相位中心不同
- 天线相位中心的变化
 - ◆ 随信号方向（高度角、方位角）、信号强度变化

► 表示方法

- 采用平均相位中心及由相位中心的变化所引起的相位观测值的改正两部分来表示



消除天线平均相位中心偏差的影响

► 归心改正法

$$X_{\text{标石中心}} = X_{\text{平均相位中心}} - r^* \cos(\theta)$$

$$Y_{\text{标石中心}} = Y_{\text{平均相位中心}} - r^* \sin(\theta)$$

► 消去法

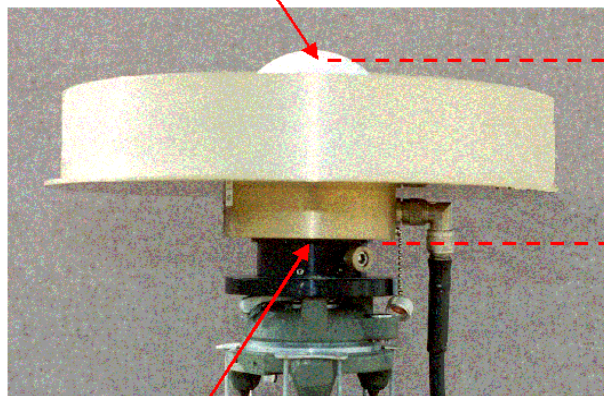
天线指北，并采用同类型天线



天线高

天线的相位中心至观测点标志中心顶端的垂直距离。一般分上下两段：上段是相位中心至天线底面的距离，作为常数由厂家给出；下段是从天线底面至观测点标志中心顶端的距离，由用户测定。

The antenna phase centers are located somewhere around here



The Antenna Reference Point (ARP) is almost always located in the center of the bottom-most, permanently attached, surface of the antenna.

The user does not need to know these offsets. They are passed to the processing software through the antenna type

The antenna offsets are the distance between the phase centers and the ARP

If the user selects NONE as the antenna type, the offsets are set to 0.000 and the antenna phase center becomes the reference point



ARP

The height is measured vertically (NOT the slant height) from the mark to the ARP of the antenna.

The height is measured in meters.

The ARP is almost always the center of the bottom-most, permanently attached, surface of the antenna.

See [GPS Antenna Calibration](#) for photo's and diagrams that show where the ARP is on most antennas.

If 0.0000 is entered for the height, OPUS will return the position of the ARP.

MARK



2. 载波与测距码



概述

GPS定位的两个基本量

- ❑ 卫星的位置
- ❑ 卫星与地面的距离

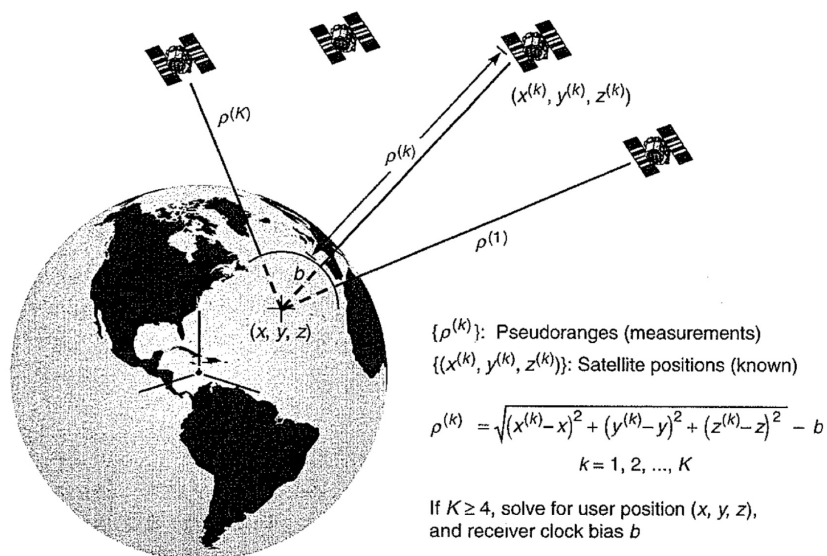
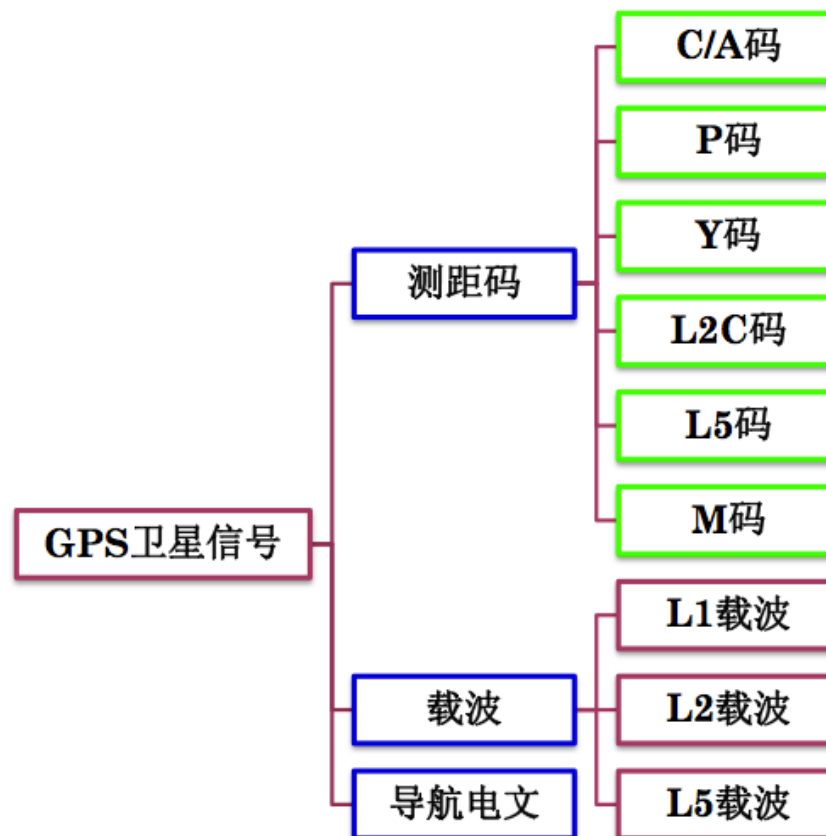


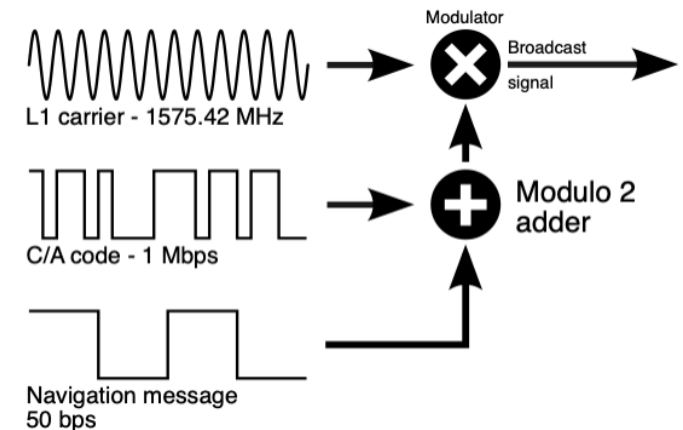
Figure 1.9 The principle of satellite navigation. The user-satellite range measurements based on the times of transmission and receipt of signals are biased by a common amount and are called pseudoranges. Pseudorange measurements are needed from at least four satellites to estimate the user position and receiver clock bias.



GPS卫星的基准频率 f_0

- ▶ 由卫星上的原子钟直接产生
- ▶ 频率为10.23MHz
- ▶ 卫星信号的所有成分均是该基准频率的倍频或分频

- carrier L1 $f_1 = 154 \times f_0 \quad \lambda_1 \approx 19 \text{ cm}$
- carrier L2 (L2C) $f_2 = 120 \times f_0 \quad \lambda_2 \approx 24 \text{ cm}$
- carrier L5 $f_5 = 115 \times f_0 \quad \lambda_5 \approx 24.5 \text{ cm}$
- C/A (Civilian Acquisition) $f_{C/A} = f_0/10 = 1.023\text{MHz}$
- P codes $f_P = f_0 = 10.23\text{MHz}$
- Message: $f_D = f_0/204600 = 50\text{Hz}$



载波 (Carrier)

► 作用

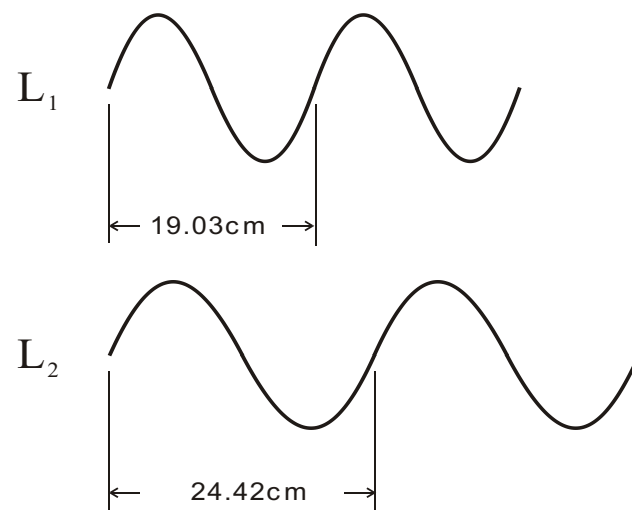
- ▣ 搭载其它调制信号
- ▣ 测距
- ▣ 测定多普勒频移

► 类型

- ▣ L1 – 频率: $154 \times f_0 = 1575.43\text{MHz}$; 波长: 19.03cm
- ▣ L2 – 频率: $120 \times f_0 = 1227.60\text{MHz}$; 波长: 24.42cm
- ▣ L5 – 频率: $115 \times f_0 = 1176.45\text{MHz}$; 波长: 25.48cm

► 特点

- ▣ 所选择的频率有利于测定多普勒频移、减弱信号所受的电离层折射影响
- ▣ 选择两个频率可以较好地消除信号的电离层折射延迟



测距码 (Code)

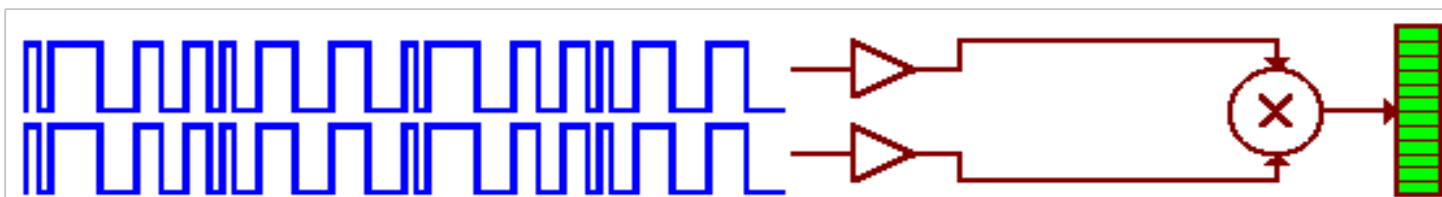
► **码:** 表达信息的二进制数及其组合。

如:控制测量一、二、三、四等: 01、10、11、100

- 比特:二进制组合中的每一位二进制数,又叫码元。
- 码长:一个码中二进制数的个数。
- 数码率:每秒钟传播的码长的个数(bit/s或BPS)。
- 码周期:传播一个二进制数所需要的时间。码周期=1/数码率

► **自相关性:** 两个结构相同的码序列的相关程度。

$$R(t) = \frac{S_u - Du}{S_u + Du} = \frac{\text{码值相同的个数} - \text{码值相异的个数}}{\text{码元总数}}$$



测距码

► 随机噪声码

每一时刻，码元是0或是1完全是随机的一组码序列，这种码元幅值是完全**无规律**的码序列，称为随机噪声码序列。它是一种非周期序列，**无法复制**。但是，随机噪声码序列却有**良好的自相关性**，GPS码信号测距就是利用了GPS测距码的良好的自相关性才获得成功。

► 伪随机噪声码（Pseudo Random Noise-PRN）

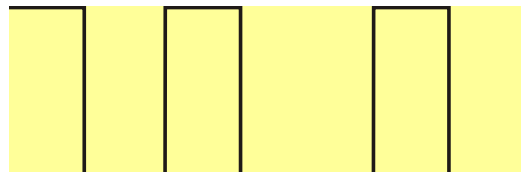
虽然随机码具有良好的自相关特性，但由于它是一种非周期性的码序列，没有确定的编码规则，所以实际上无法复制和利用。因此，为了能够实际应用GPS采用了一种伪随机噪声码，简称伪随机码或伪码。这种码序列的主要特点是：不仅具有类似随机码的**良好自相关特性**，而且具有某种确定的编码规则。它是**周期性的、可人工复制**的码序列。



测距码

► 作用

- 测距



► 性质

- 为伪随机噪声码（PRN — Pseudo Random Noise）
- 不同的码（包括未对齐的同一组码）间的相关系数为0或 $1/n$ （ n 为码元数）
- 对齐的同一组码间的相关系数为1



C/A码

- ▶ 码率：1.023MHz;
- ▶ 周期：1ms;
- ▶ 1周期含码元数：1023;
- ▶ 码元宽度：293.05m;
- ▶ 仅被调制在L1上
- ▶ 特点：

- 由于C/A码的码长较短,易于捕获,而通过捕获C/A码所得到的信息,又可以方便的捕获到P码,所以,通常称C/A码为捕获码。
- C/A码的码元宽度较大,假设两个序列的码元对齐误差为码元宽度的1/10~1/100,则这时相应的测距误差可达29.3~2.9 m。由于其精度较低, C/A码也称为粗码 (Coarse Acquisition Code)。

- ▶ 其他民用码：L2C、L5、L1C

作用

- 捕获卫星
- 粗略测距



P码

- ▶ 码率：10.23MHz;
- ▶ 周期：7天;
- ▶ 1周期含码元数：6187104000000;
- ▶ 码元宽度：29.30m;
- ▶ 被调制在L1和L2上
- ▶ **P码的码速率为C/A码的10倍，码元宽度为C/A码的1/10，可以较精确地测定从接收机至卫星的距离，也被称为精码。**
- ▶ **Y码：**将P码与W码进行模二相加，以代替P码，防止敌对方对美国军方用户进行电子欺骗和电子干扰



M码

- ▶ 供美国军方使用的保密码，其生成方法及码的结构不对外公开
- ▶ 优点：
 - 信号捕获更加快捷、稳定
 - 抗干扰力更强
 - 有利于使用基于信息的通信协议



3. 导航电文

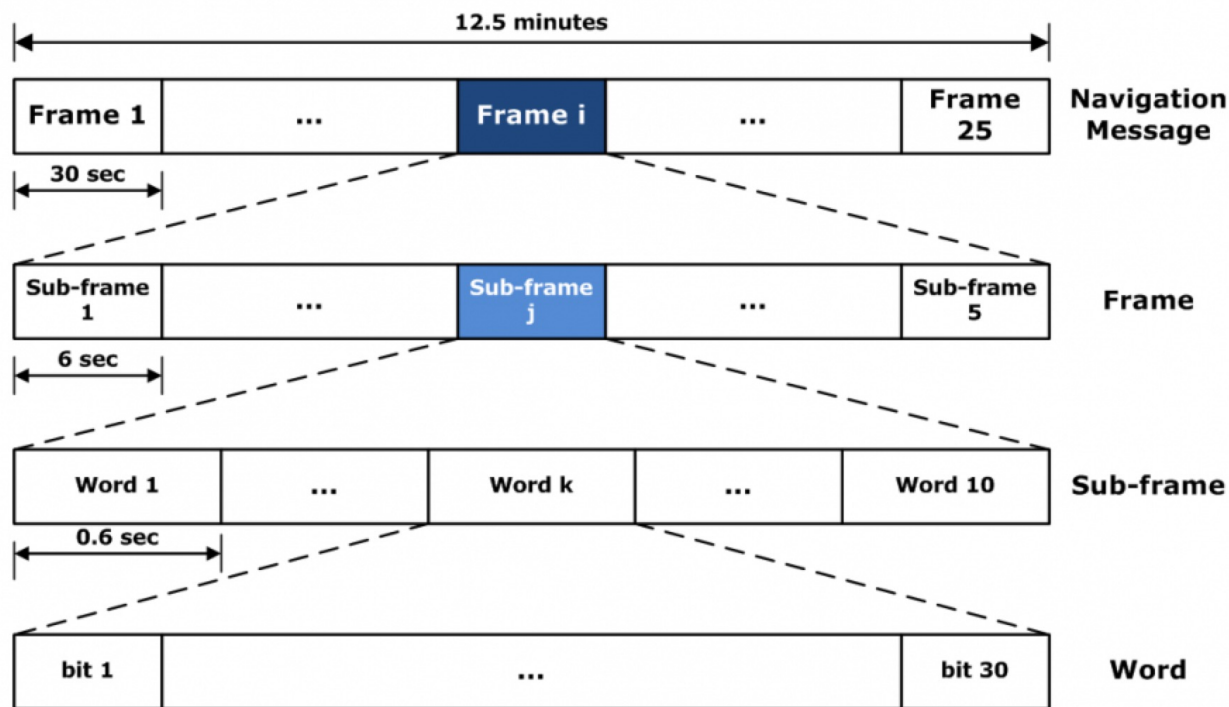


卫星（导航）电文（Message）

- ▶ **作用：** 向用户提供卫星轨道参数、卫星钟参数、卫星状态信息及其它信息

- ▶ **基本结构：**

- 导航电文(25个主帧)
- 主帧(5个子帧)
- 子帧(10个字)
- 字(30bit)



卫星（导航）电文

▶ 遥测字

TLM-Telemetry Word

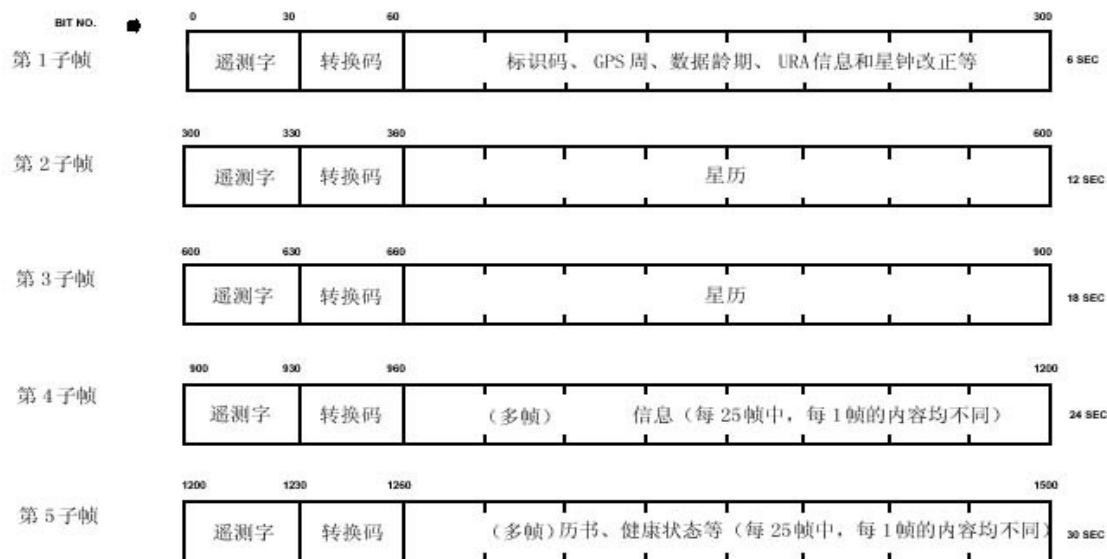
- 每一子帧的第1个字
- 用作捕获导航电文的前导

▶ 交接字

HOW-Hand Over Word

- 每一子帧的第2个字
- 主要内容：Z计数

▶ 第1-3数据块



整个导航电文的内容 12.5 分钟重复一次



卫星（导航）电文

► 第一数据块

- 第1子帧的第3~10个字
- 内容：
 - ◆ WN – GPS周
 - ◆ L2所调制测距码标识符 – “10”表示C/A码，“01”表示P(Y)码
 - ◆ 传输参数N – URA：表明使用该卫星进行定位可能达到的精度
 - ◆ TGD – 信号在卫星内部的时延
 - ◆ 星钟数据龄期AODC：代表了卫星钟改正数的置信度;时间越长,可信度越低。
 - ◆ 星钟改正参数： a_0 （钟偏）， a_1 （钟速）， a_2 （钟漂）



卫星（导航）电文

▶ 第二数据块

- ❑ 第2、3子帧的第3~10个字
- ❑ 内容：该发送信号卫星的星历 — 广播星历

▶ 第三数据块

- ❑ 第4、5子帧的第3~10个字
- ❑ 内容：所有卫星历书（概略星历）
- ❑ 第三数据块的内容每12.5分钟重复一次

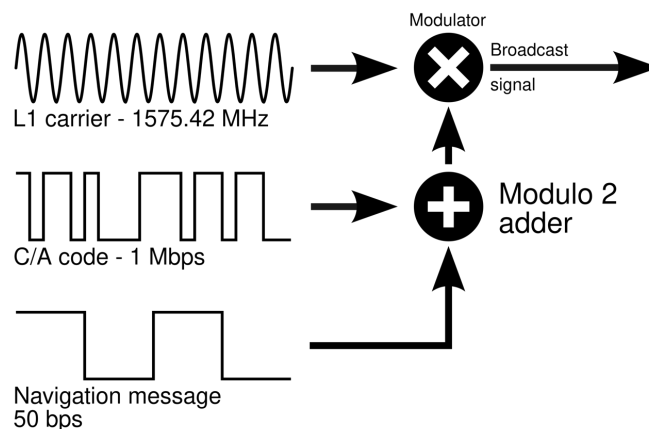


4. 卫星信号调制



GPS卫星信号的调制

- ▶ 载波信号的表达方式: $A\cos(\omega t + \varphi_0)$
- ▶ 信号调制的方式: 调幅、调频、调相
- ▶ GPS信号调制方法:
 - 导航电文和测距码进行模二相加, 生成组合码
 - 将组合码与载波进行二进制相位调制 (当信号为0, 载波不变, 当信号为1, 载波倒相), 即: 码状态与载波相乘。



GPS卫星信号的调制

$$L_1(t) = a_p P(t) D(t) \cos(2\pi f_1 t) + a_c C(t) D(t) \sin(2\pi f_1 t)$$

$$L_2(t) = b_p P(t) D(t) \cos(2\pi f_2 t)$$

a_p : amplitude of P-code

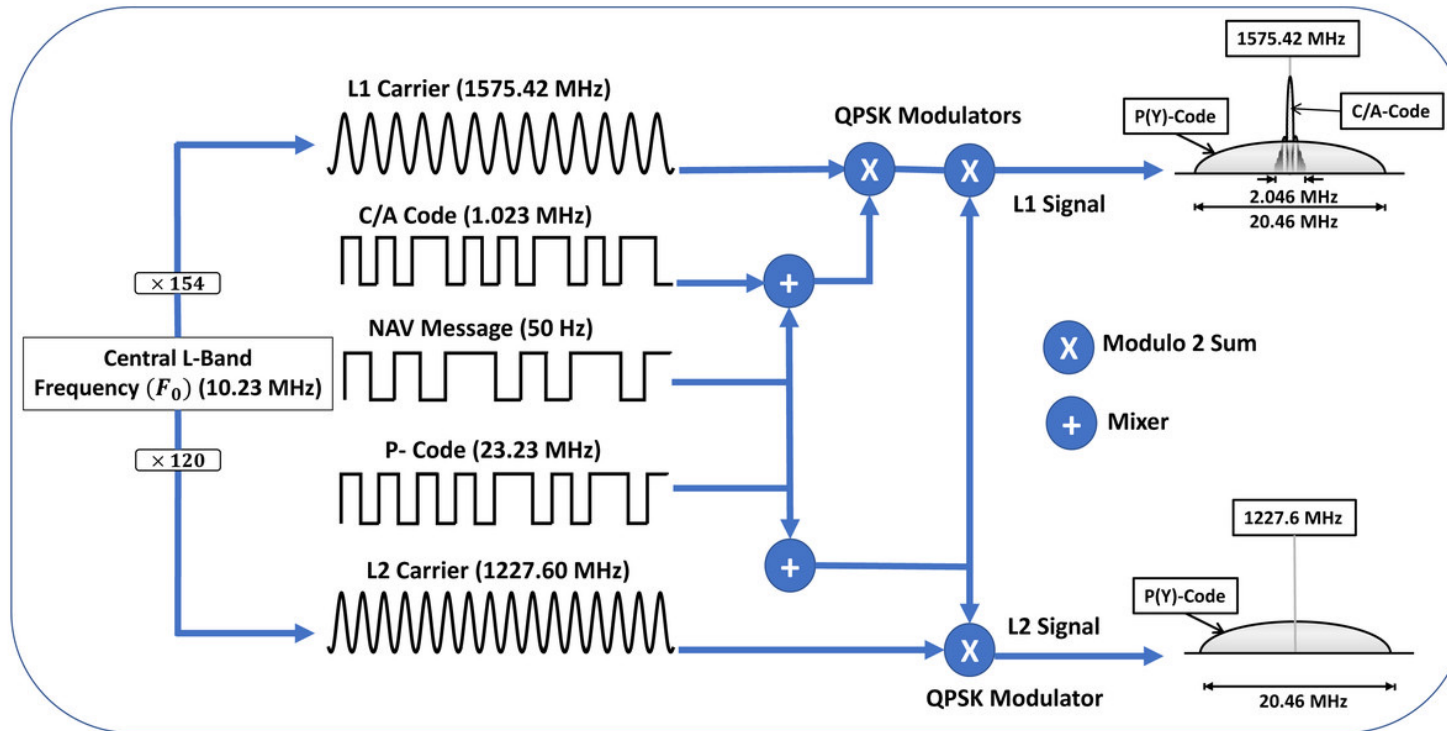
$P(t)$: P-code sequence (± 1)

$D(t)$: D-message (± 1)

a_c : amplitude of C/A-code

$C(t)$: C/A-code sequence (± 1)

$\sin(2\pi f_{1,2} t)$: L1/L2 carrier (± 1)



5. GPS卫星位置的计算



卫星星历与卫星位置

► 广播星历

- 包括相对某一参考历元的开普勒轨道参数和必要的轨道摄动改正项参数
- GPS广播星历参数共有16个，其中包括1个参考时刻，6个对应参考时刻的开普勒轨道参数和9个反映摄动力影响的参数
- 广播（预报）星历是事前获得，精度较低
- 计算卫星位置的方法：轨道根数及摄动改正

► 精密星历

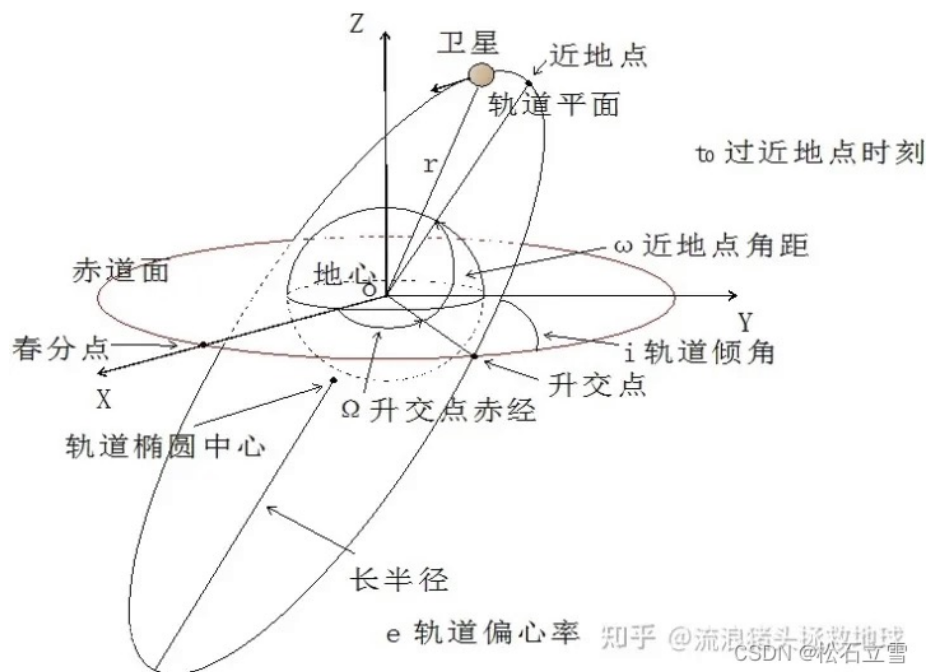
- 包括时间（一般间隔15分钟）、位置、速度、卫星钟改正数等参数
- 由专门机构（例如IGS、JPL等）事后获得，精度较高
- 计算方法：时间域插值



轨道根数

人卫轨道理论中，通常用**6个开普勒轨道根数**描述卫星椭圆轨道的形状、大小及其在空间的指向，来确定任一时刻卫星在轨道上的位置

- ▶ 升交点赤经 Ω
- ▶ 轨道倾角 i
- ▶ 长半径（或长半轴） a
- ▶ 偏心率 e
- ▶ 近地点角距 ω
- ▶ 卫星过近地点的时刻 t_0



由轨道根数计算卫星位置

1. 计算卫星的平近点角速度

$$n_0 = \frac{\sqrt{GM}}{(\sqrt{A})^3}$$

$$n = n_0 + \Delta n$$

2. 计算观测瞬间卫星的平近点角

$$M = M_0 + n(t - t_{oe})$$

3. 计算偏近点角

$$E = M + e \sin(E)$$

4. 计算真近点角

$$f = \operatorname{atan}\left(\frac{\sqrt{1-e^2} \sin E}{\cos E - e}\right)$$

5. 计算升交角距

$$u' = \omega + f$$

6. 计算摄动改正项 δ_u δ_r δ_i

$$\delta_u = C_{uc} \cos 2u' + C_{us} \sin 2u'$$

7. 改正 u', r', i_0

$$u = u' + \delta_u$$

8. 计算卫星在轨道面的坐标

$$\begin{cases} x = r \cos u \\ y = r \sin u \end{cases}$$

9. 计算观测瞬间升交点的经度

$$L = \Omega_0 + (\dot{\Omega} - \omega_e)t - \dot{\Omega}t_{oe}$$

10. 计算卫星在瞬时地球坐标系的位置

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \cos L - y \cos i \sin L \\ x \sin L + y \cos i \cos L \\ y \sin i \end{pmatrix}$$

11. 计算卫星在协议地球坐标系的位置

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{\text{CTS}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & x_p \\ 0 & 1 & -y_p \\ -x_p & y_p & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$



Thanks for Your Attention!

