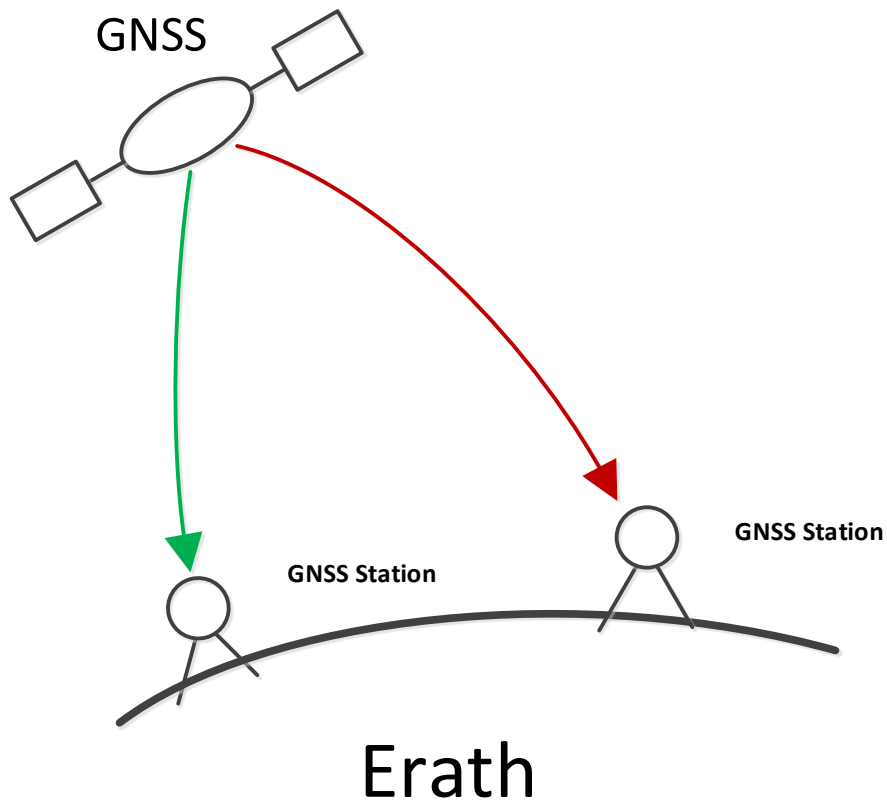


《GPS原理及应用》

第二章 GPS卫星信号及其测量原理

长安大学地质工程与测绘学院

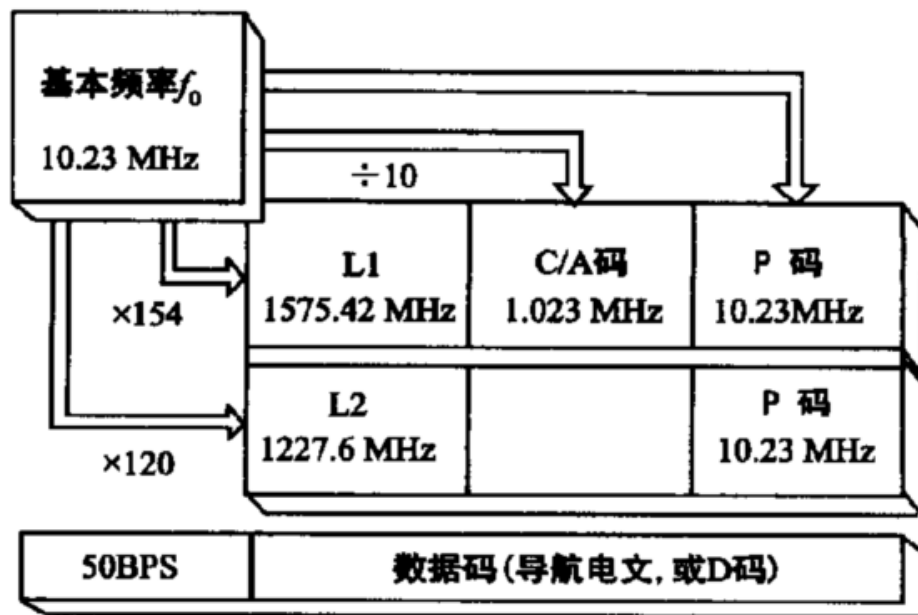
张双成



1. GNSS星座
2. 时空基准
3. 卫星位置
4. GNSS信号（相位）
5.

三、载波信号与载波相位测量原理

- 测距码 (C/A码和P码)
- 载波 (L1、L2和L5)
- 导航电文 (数据码)



GPS卫星信号构成示意图

1、GPS卫星的载波信号

- 三种频率的正弦波

- L1: $f_1 = 1575.42 \text{ MHz}$, $\lambda_1 = 19.03 \text{ cm}$
- L2: $f_2 = 1227.60 \text{ MHz}$, $\lambda_2 = 24.42 \text{ cm}$
- L5: $f_5 = 1176.45 \text{ MHz}$, $\lambda_5 = 25.48 \text{ cm}$

◆2010年5月28 日发射的首颗BlockIIF卫星（PRN25/SVN62）开始利用第三个民用载波频率L5发送导航信号。L5C民用信号是为了满足生命安全方面应用的需要而专门设计的。

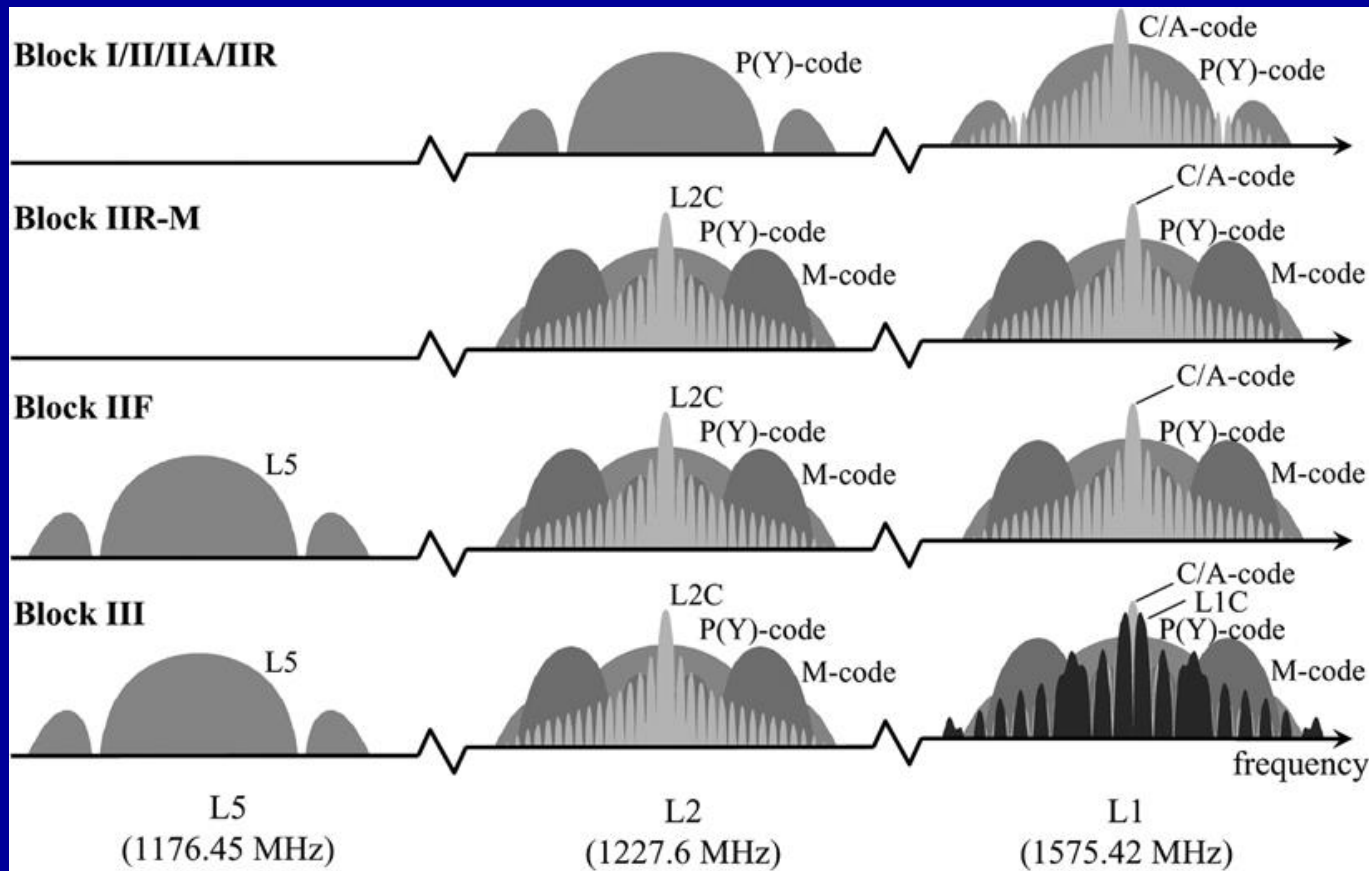
L5C民用信号的特点

- L5C测距码比C/A码长10倍，因此，这类码具有更高的自相关和互相关特性。
- 由于具有比其他信号更高的功率，L5C测距码可以提供更好的抗干扰能力。
- L5载波频率分配在ARNS（航空无线电导航服务）频段，并与该频段的其他频率互质，因此，该信号对生命安全服务特别有用。

GPS 信号频率

| 链路 | 因子 ($\bullet f_0$) | 频率 /MHz | 波长 /cm | 国际电信联盟分配的 带宽/MHz | 频段 |
|----|-------------------------|------------|-----------|---------------------|-----------|
| L1 | 154 | 1575.42 | 19.0 | 24.0 | ARNS/RNSS |
| L2 | 120 | 1227.60 | 24.4 | 24.0 | RNSS |
| L5 | 115 | 1176.45 | 25.5 | 24.0 | ARNS/RNSS |

◆值得说明的是：不同载波相位的**线性组合**对构成无电离层组合特别有用，**较大的频率差别**对计算电离层改正非常有利。其中，L2和L5之间的频率差可以得到波长为5.9 m的载波相位组合，其**对模糊度求解特别有效**，详细原理将在第三章的观测值线性组合中介绍。



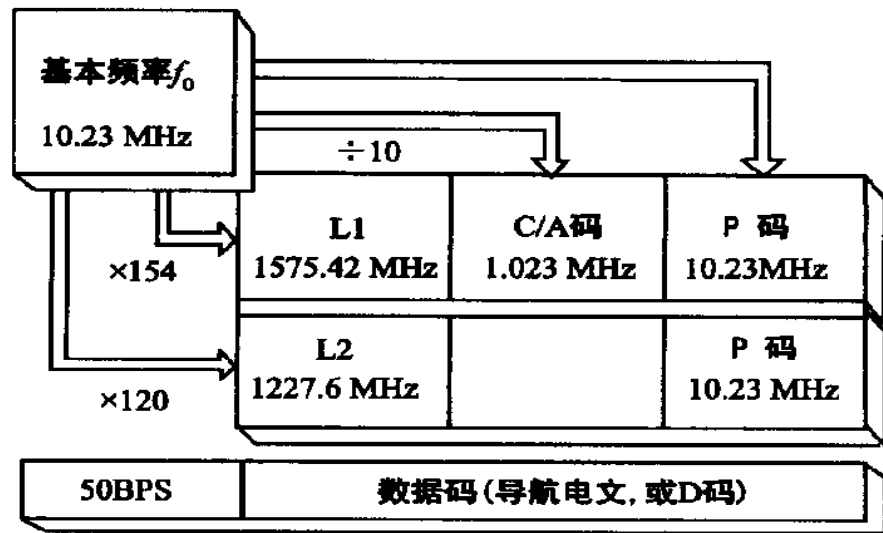
GPS信号的功率谱(Christopher J. Hegarty and Eric Chatre, 2008)

GPS卫星的测距码信号和导航电文信号都属于**低频信号**，其中C/A码和P码的数码率分别为1.023Mbit/s与10.23Mbit/s，而D码(导航电文，又称为数据码)的数码率仅为50bit/s。GPS卫星离地面远达20000km，其电能又非常紧张，因此很难将上述数码率很低的信号传输到地面。

解决这一难题的办法，就是另外发射一种**高频信号**，并将低频的测距码信号和导航电文信号**加载**到这一高频信号上，构成一**高频的已调波**发射到地面。

GPS卫星采用L频带的三种不同频率的电磁波作为高频信号，分别称为 L_1 载波、 L_2 载波与 L_5 载波。

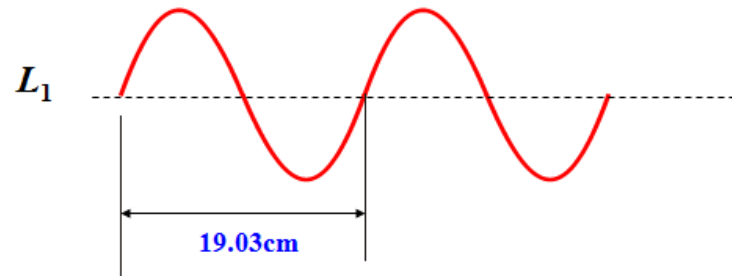
GPS卫星发射信号的频率，都要受卫星上原子钟基准频率的控制。GPS卫星原子钟基准频率 $f_0=10.23\text{MHz}$ ，P码采用基准频率，C/A码仅取基准频率的 $1/10$ ，而 L_1 载波的频率 f_1 为基准频率倍频154倍后获得， L_2 载波的频率 f_2 则取基准频率 f_0 的120倍， L_5 载波的频率 f_5 则取基准频率 f_0 的115倍。



GPS卫星信号构成示意图

• 三种频率的正弦波

- **L1:** $f_1=1575.42\text{MHz}$, $\lambda_1=19.03\text{cm}$
- **L2:** $f_1=1227.60\text{MHz}$, $\lambda_1=24.42\text{cm}$
- **L5:** $f_1=1176.45\text{MHz}$, $\lambda_1=25.48\text{cm}$



采用L波段的优点

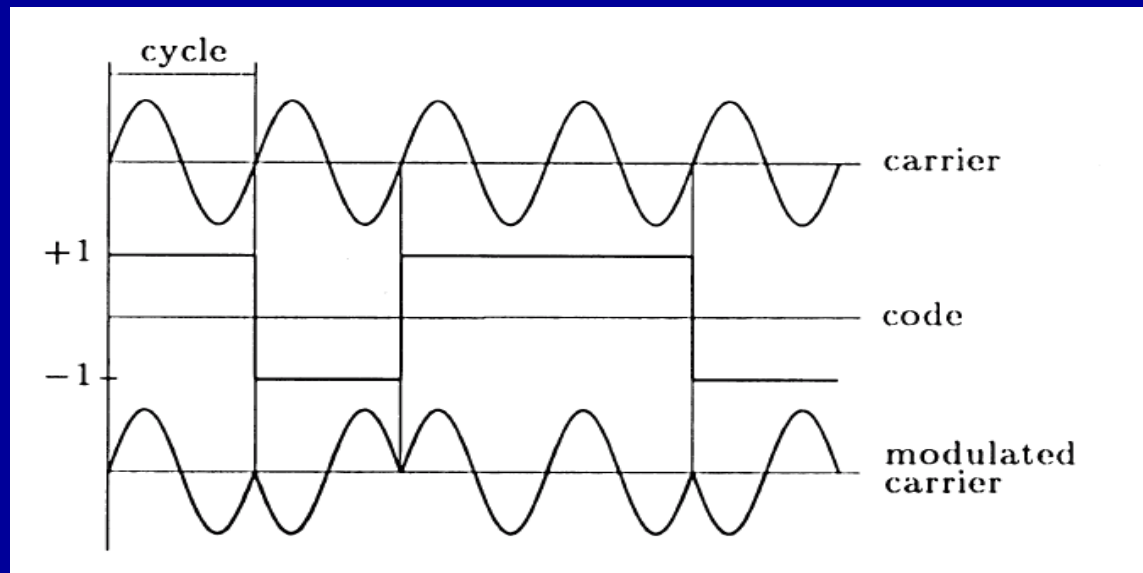
- 频率占用率低，减少拥挤，避免“撞车”
- 适应扩频（频带高达20MHz左右），便于传送宽带信号
- 频率高，卫星高轨运行能获得较大的多普勒频移，有利于测量接收机的运动速度
- 避开谐振吸收，大气衰减小，有益于研制用户设备

测距码信号的调制与解调

在数字通讯技术中，为了有效地传播信息，一般均将低频信号加载到高频的载波上，这时原低频信号称为调制信号，而加载信号后的载波就称为已调波。

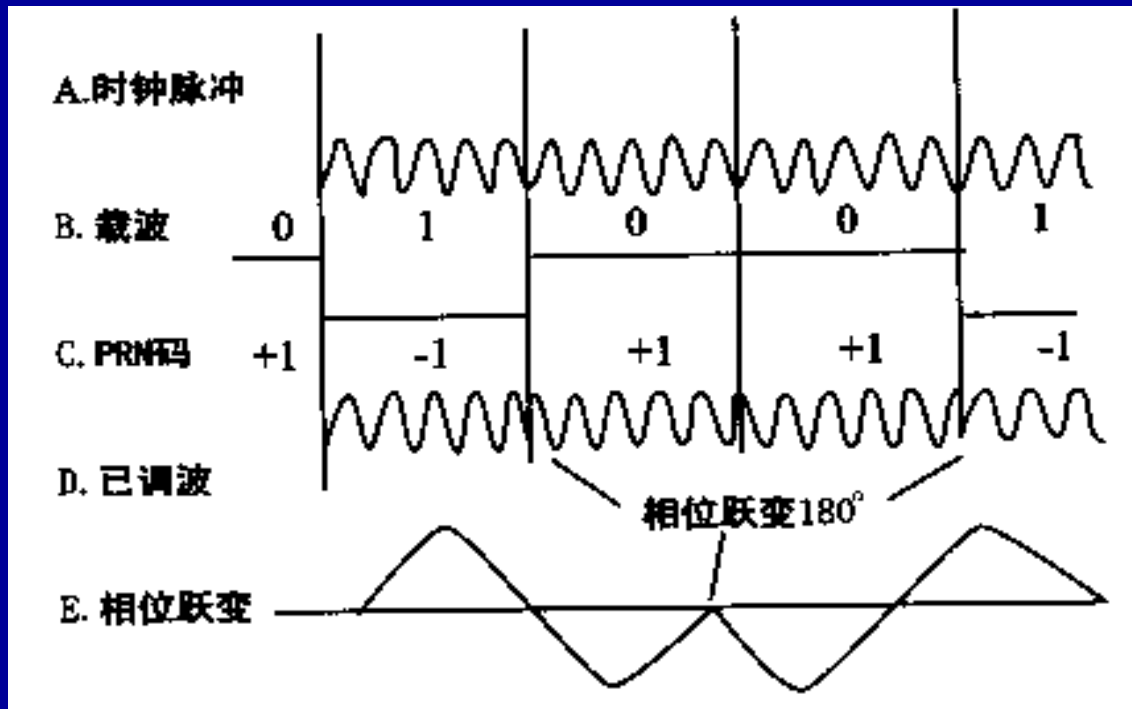
GPS信号调制，是采用调相技术实现的。

- 测距码的调制



实现码信号与载波信号的调制，是通过码状态与载波相乘实现的。

载波信号的调制过程



➤纯净的载波为一正弦波，在加载测距码信号或数据码信号后，在码值由0变为1或由1变为0的交替处，调制后的载波出现相位跃迁。

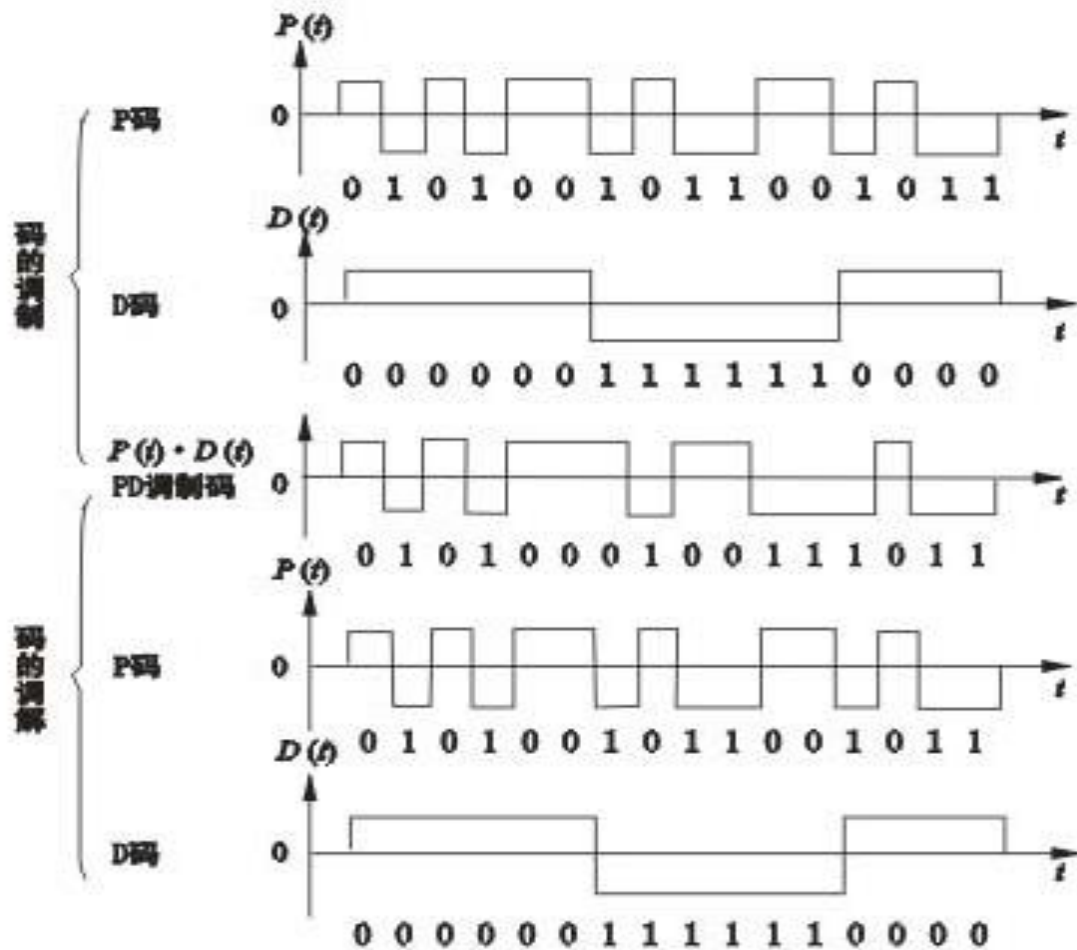
- 测距码的解调

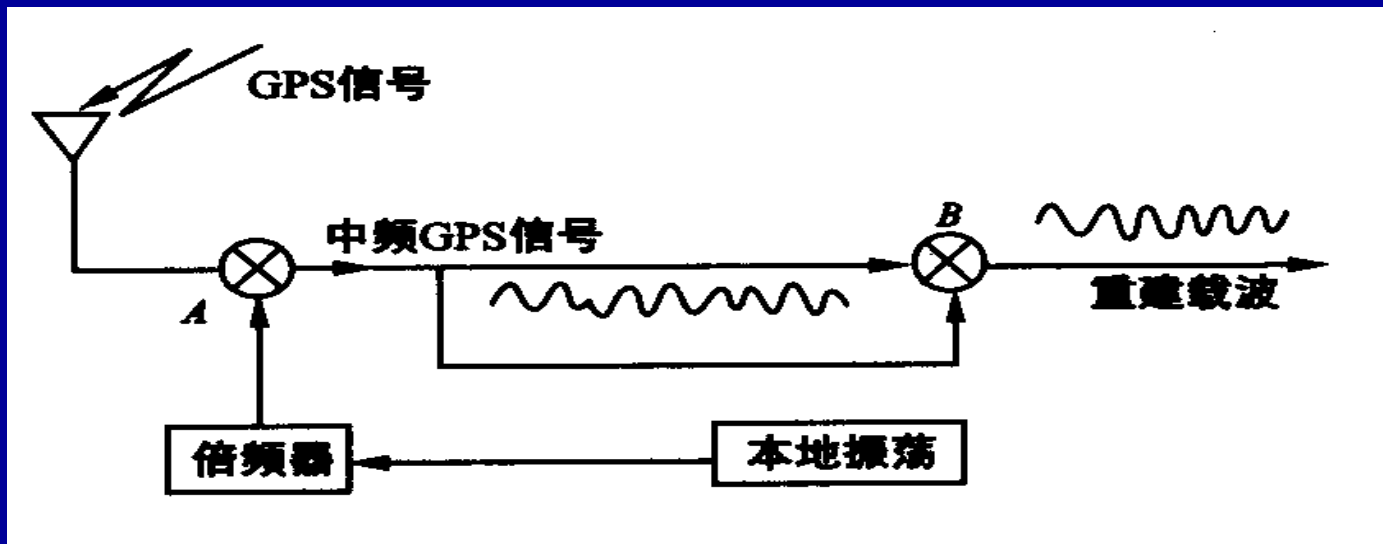
在进行GPS卫星定位测量时，既然用户接收机收到的GPS卫星信号是一种已调波，那么，随之产生的一个技术问题，就是怎样从接收到的已调波中分离出测距码信号、导航电文信号以及纯净的载波信号，这项技术称为信号的解调。当用户接收机收到GPS卫星信号后，通常可采用以下两种方法进行信号的解调：

(1) 码相关解调技术

(2) 平方解调技术

码信号的 调制与解调过程





平方解调技术电路示意图

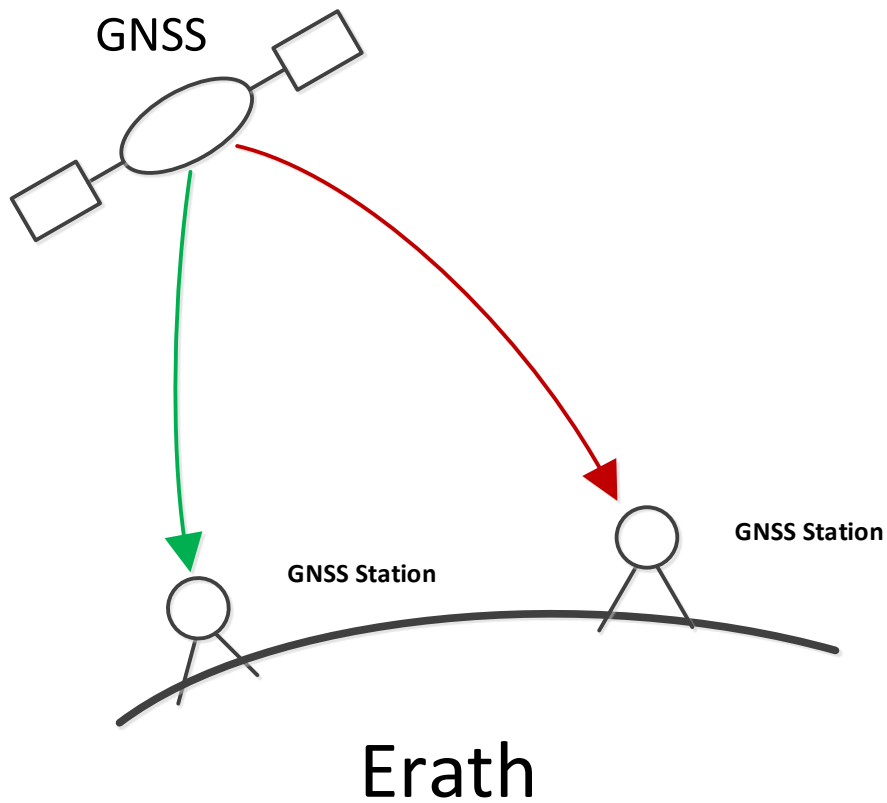
2、载波相位伪距测量原理

■ 载波相位观测值

- 理想的观测方法：信号接收时刻，卫星端卫星载波信号的相位(φ_S)与接收机端卫星载波信号的相位(φ_R)之差。从而测定出站星距离(ρ)，即：

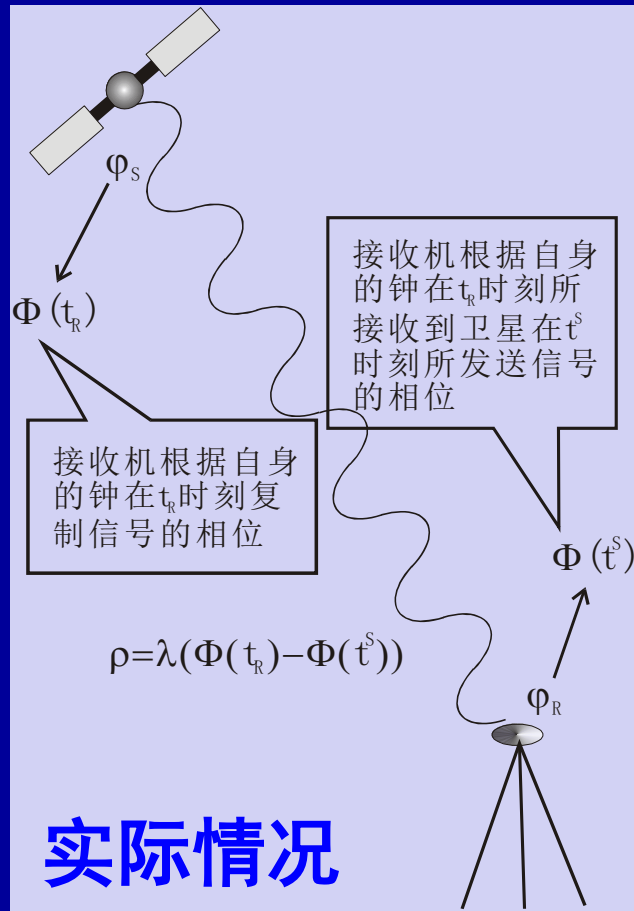
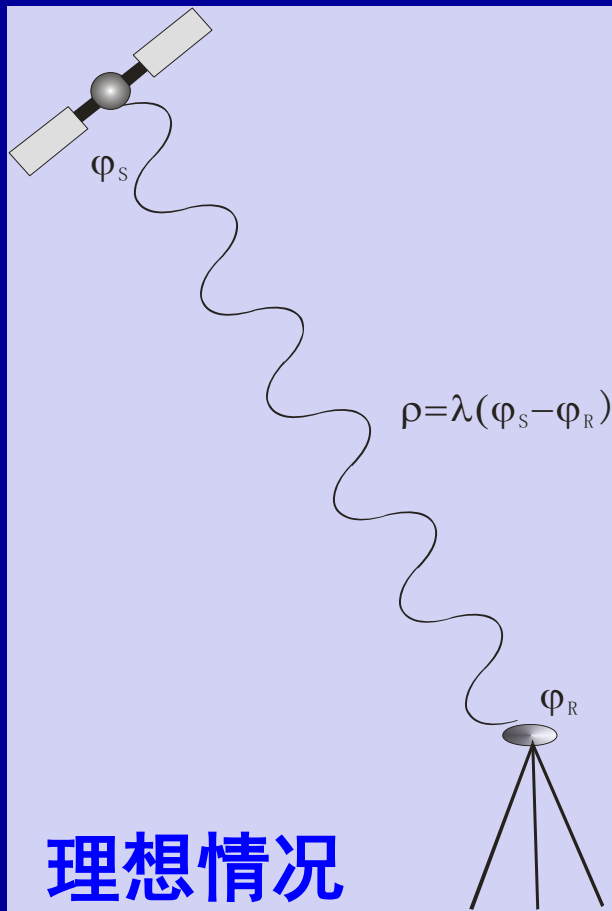
$$\varphi = \varphi_S - \varphi_R$$
$$\rho = \lambda \cdot \varphi = \lambda \cdot (\varphi_S - \varphi_R)$$

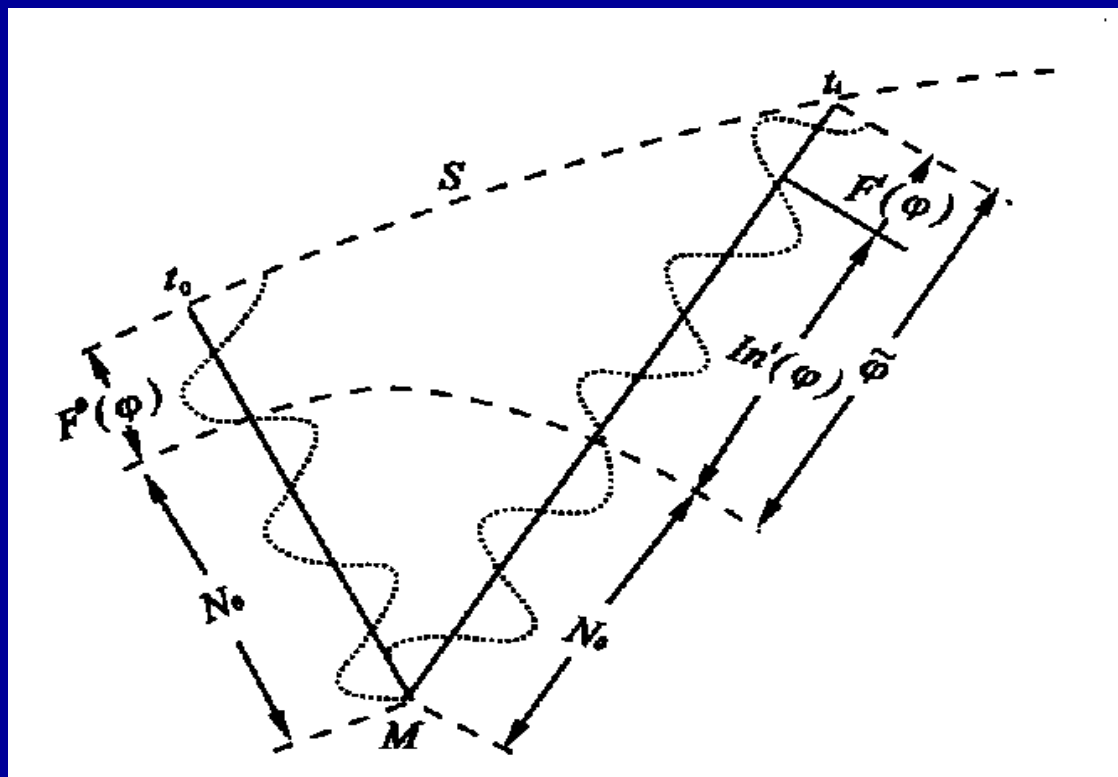
- 问题：卫星端卫星载波信号的相位(φ_S)不能直接测定。



1. GNSS星座
2. 时空基准
3. 卫星位置
4. GNSS信号（相位观测值？）
5.

载波相位 观测量





载波相位观测量

■ 载波相位观测值

- 实际观测方法：信号接收时刻，接收机模拟（复制）的卫星端卫星载波信号的相位(φ_S)与接收机端卫星载波信号的相位(φ_R)之差，即

$$\begin{aligned}\varphi' &= \varphi_S - \varphi_R \\ \rho' &= \lambda \cdot \varphi' = \lambda \cdot (\varphi_S - \varphi_R)\end{aligned}$$

- 实际观测值：

$$\tilde{\varphi} = \text{int}^i(\phi) + Fr^i(\phi)$$

其中：

$\text{int}^i(\phi)$ ： 整周计数；

$Fr^i(\phi)$ ： 不足一整周的部分。

因此，在任意时刻 t_i ，一个完整的载波相位
观测量可以表示成：

$$\varphi = \tilde{\varphi} + N_0 = \text{int}^i(\phi) + Fr^i(\phi) + N_0$$

其中：

$\text{int}^i(\phi)$ ： 整周计数；

$Fr^i(\phi)$ ： 不足一整周的部分；

N_0 ：整周未知数（整周模糊度）。

载波相位伪距观测方程:

$$\begin{aligned}\lambda \left(int^i(\varphi) + Fr^i(\varphi) + N_i^j(t_0) \right) &= \tilde{D}_i^j(t) + \lambda N_i^j(t_0) \\ &= D_i^j(t) + C * \delta t_i - C * \delta t^j + \delta I_i^j(t) + \delta T_i^j(t)\end{aligned}$$

$$\tilde{D}_i^j(t) = D_i^j(t) + C * \delta t_i - C * \delta t^j + \delta I_i^j(t) + \delta T_i^j(t) - \lambda N_i^j(t_0)$$

$$\tilde{D}_i^j(t) = D_i^j(t) + C * \delta t_i^j - \lambda N_i^j(t_0)$$

载波相位伪距观测方程与测距码伪距观测方程的异同：

载波相位伪距观测方程：

$$\tilde{D}_i^j(t) = D_i^j(t) + C * \delta t_i^j - \lambda N_i^j(t_0)$$

测距码伪距观测方程：

$$\tilde{D}_i^j(t) = D_i^j(t) + C * \delta t_i^j$$

载波相位伪距测量的特点:

- 优点

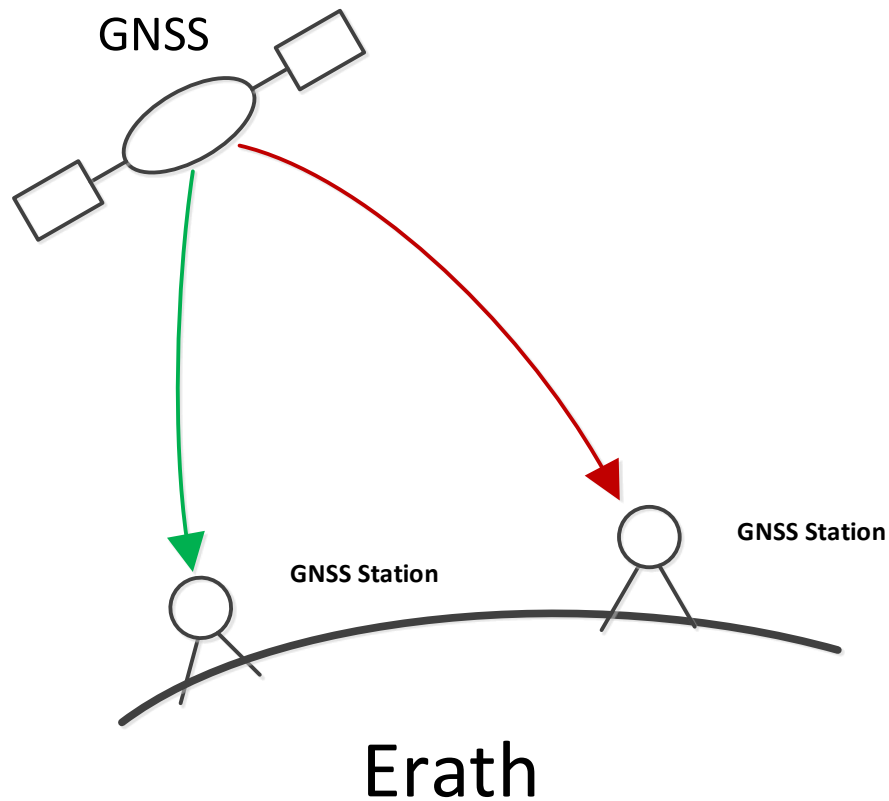
- 精度高，测距精度可达0.2mm量级

- 难点

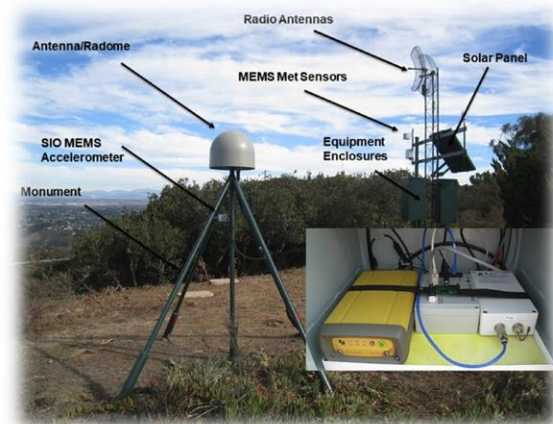
- 整周未知数问题

- 整周跳变问题

- 利用载波相位观测值来进行导航定位，不仅要处理载波相位观测值中存在的各种误差，而且还要解决整周模糊度和整周跳变问题，数据处理复杂程度要远大于测码伪距观测值。
- 但由于载波相位观测值的精度要高于测码伪距观测值，载波相位观测值仍是高精度定位中主要采用的观测值。

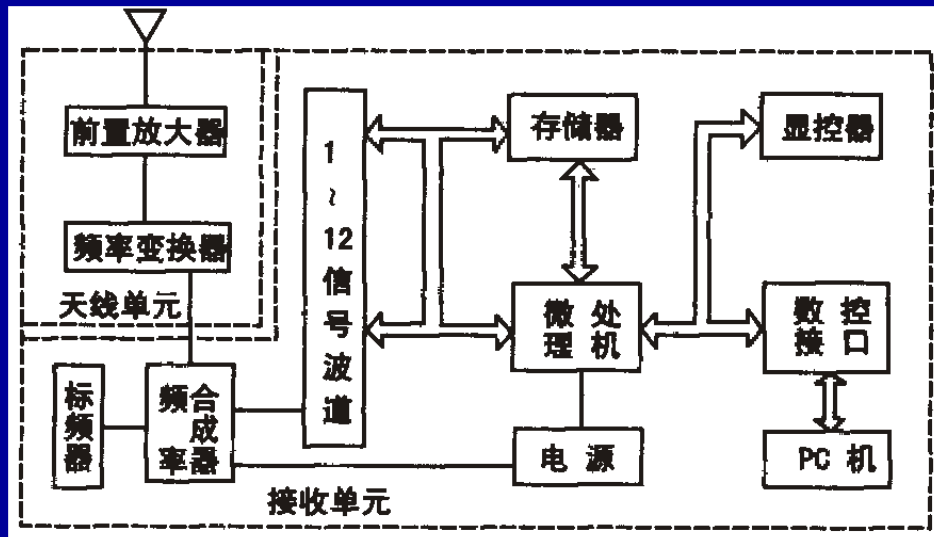


1. GNSS星座
2. 时空基准
3. 卫星位置
4. GNSS信号
5. GNSS接收机
6.



四、GPS信号接收机

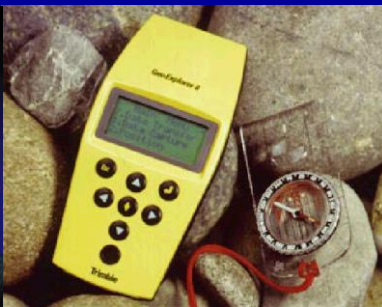
- 定义
- 结构
- 类型
- 接收通道
- 天线



GPS信号接收机的基本构成

(一) GPS信号接收机的定义

- 能够接收、跟踪、变换和测量GPS信号的卫星信号接收设备。





JPL于1982年生产的GPS接收机，接收机重73 kg，天线重 18 kg



**1982年，TI4100
GPS接收机，25kg，
110W**



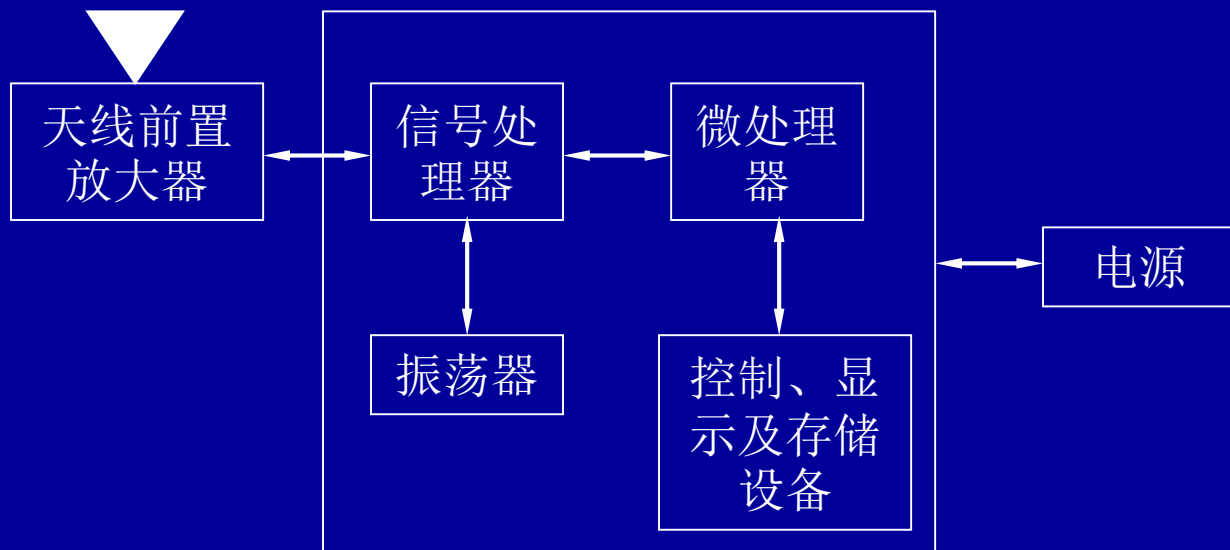
μ Z—CGRS连续跟踪站系统



Z-Xtreme 快速 RTK测量系统



(二) GPS信号接收机的结构



GPS信号接收机

- 组成

- 天线单元

- 带前置放大器
- 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

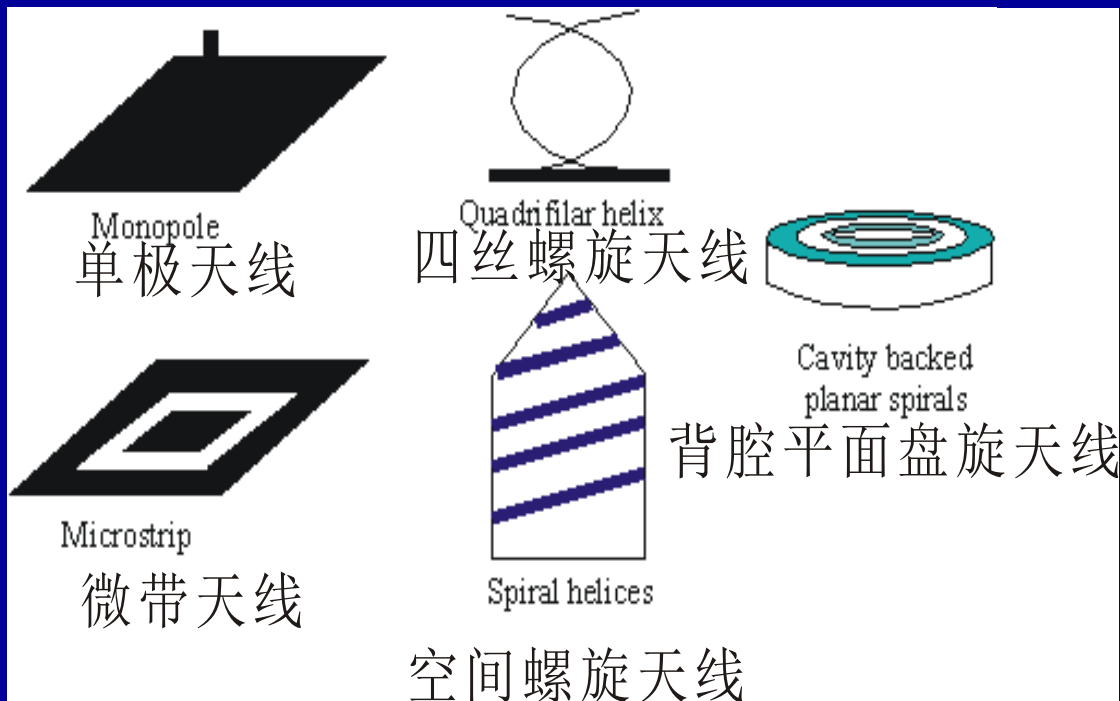
接收单元



GPS天线单元

- 类型

- 单极天线
- 微带天线
- 锥形（螺旋）天线
 - 四丝螺旋天线
 - 空间螺旋天线
- 背腔平面盘旋天线



- 特点

- 单极天线

- 单频或双频（双极结构）、需要较大的底板、相位中心稳定、结构简单

- 微带天线

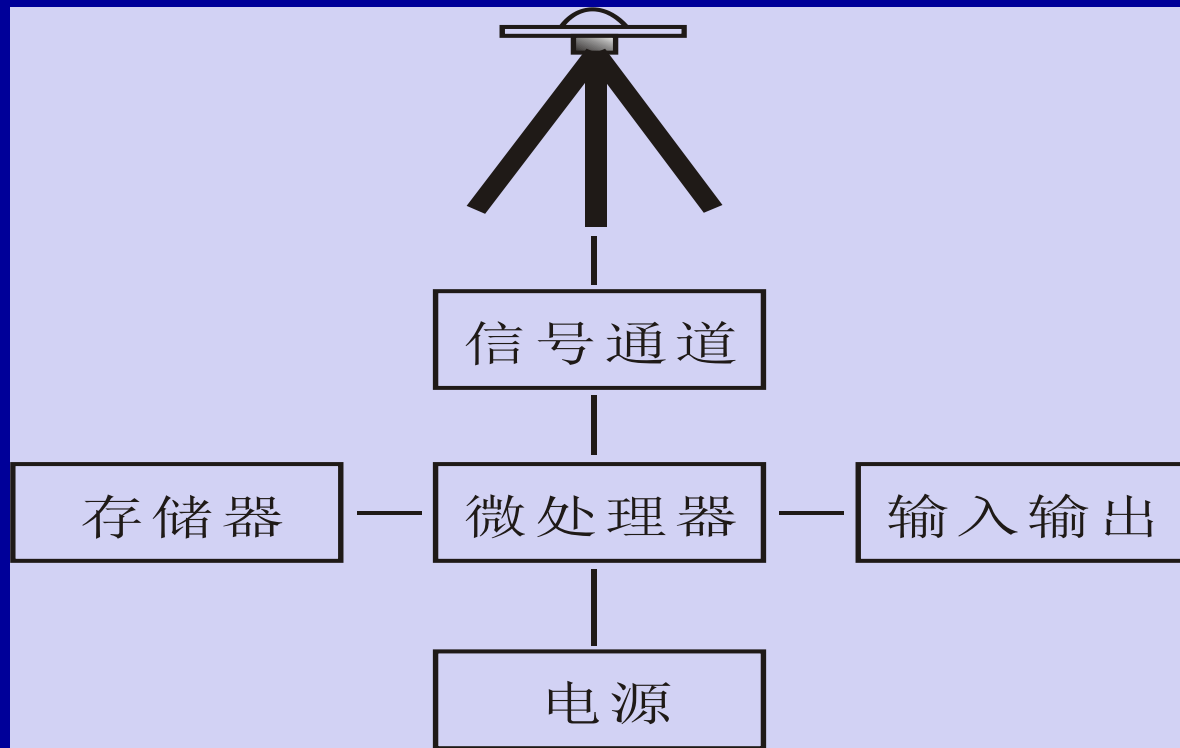
- 结构简单、单频或双频、侧视角低（适合于机载应用）、低增益、应用最为广泛

- 锥形（螺旋）天线

- 四丝螺旋天线 - 单频、难以调整相位和极化方式、非方位对称、增益特性好、不需要底板
- 空间螺旋天线 - 双频、增益特性好、侧视角高、非方位对称

- 背腔平面盘旋天线

GPS信号接收单元



(三) GPS接收机的类型

根据工作原理:

码相关型

平方型

混合型

根据信号通道类型:

多通道

序贯通道

多路复用通道

根据接收信号的频率:

单频

双频

三频

多模多频

根据测定测距码的类型:

C/A码

P (Y) 码

根据能否从信号中提取导航电文:

有码

无码

根据用途:

导航型

测量型

授时型

➤导航型接收机

此类型接收机主要用于运动载体的导航，它可以实时给出载体的位置和速度。这类接收机一般采用C/A码伪距测量，单点实时定位精度较低。这类接收机价格便宜，应用广泛。

➤测量型接收机

测量型接收机主要用于精密大地测量和精密工程测量。这类仪器主要采用载波相位观测值进行相对定位，定位精度高。仪器结构复杂，价格较贵。

➤授时型接收机

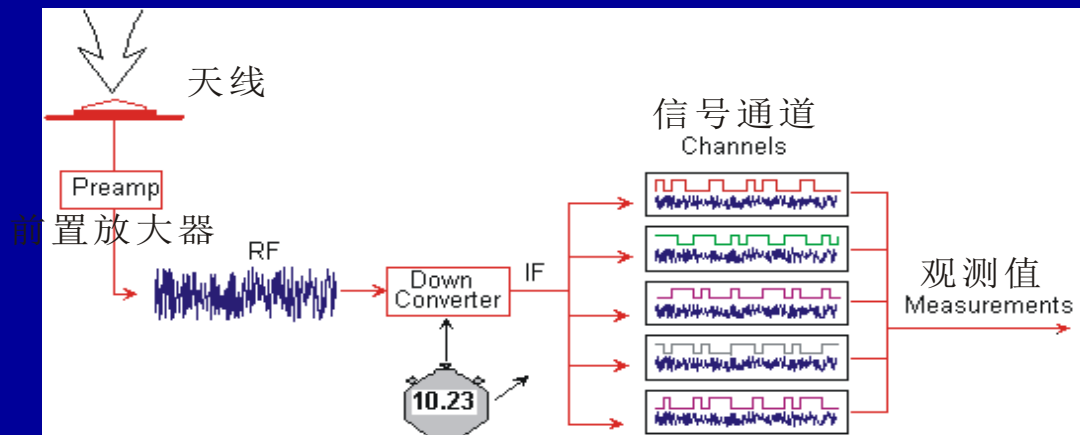
这类接收机主要利用GPS卫星提供的高精度时间标准进行授时，常用于天文台及无线电通讯中时间同步。

（四）GPS接收机的信号通道

- 什么是GPS接收机的信号通道？
- 信号通道的类型
- 序贯通道、多路复用通道和多通道
- 码相关型通道、平方型通道和码相位型通道

1、什么是GPS的信号通道？

- 是GPS卫星信号经由天线进入接收机的路径
- 是软硬件的结合体
- 作用是跟踪、处理和量测卫星信号，获取工作所需的数据和信息



2、信号通道的类型

- 根据跟踪方式
 - 序贯通道
 - 多路复用通道
 - 多通道
- 根据工作原理
 - 码相关型通道
 - 平方型通道
 - 码相位型通道

3、序贯通道、多路复用通道和多通道

- 序贯通道

- 1个通道跟踪多颗卫星/频率的信号
- 1个跟踪周期大于20ms
- 成本低，无通道间的延迟误差，无法提取导航电文，无法保持对载波的连续跟踪，控制软件复杂

- 多路复用通道

- 1个通道跟踪多颗卫星/频率的信号
- 一个跟踪周期小于20ms
- 成本低，无通道间的延迟误差，可提取导航电文，可保持对载波的连续跟踪，控制软件复杂

- 多通道

- 1个通道跟踪1颗卫星/频率的信号
- 性能好
- 成本高、有通道间的延迟误差

4、码相关型通道、平方型通道和码相位型通道

- 码相关型通道

- 优点：可以进行伪距和载波相位测量，信号质量好，可获取导航电文
- 缺点：要了解码的结构

- 平方型通道

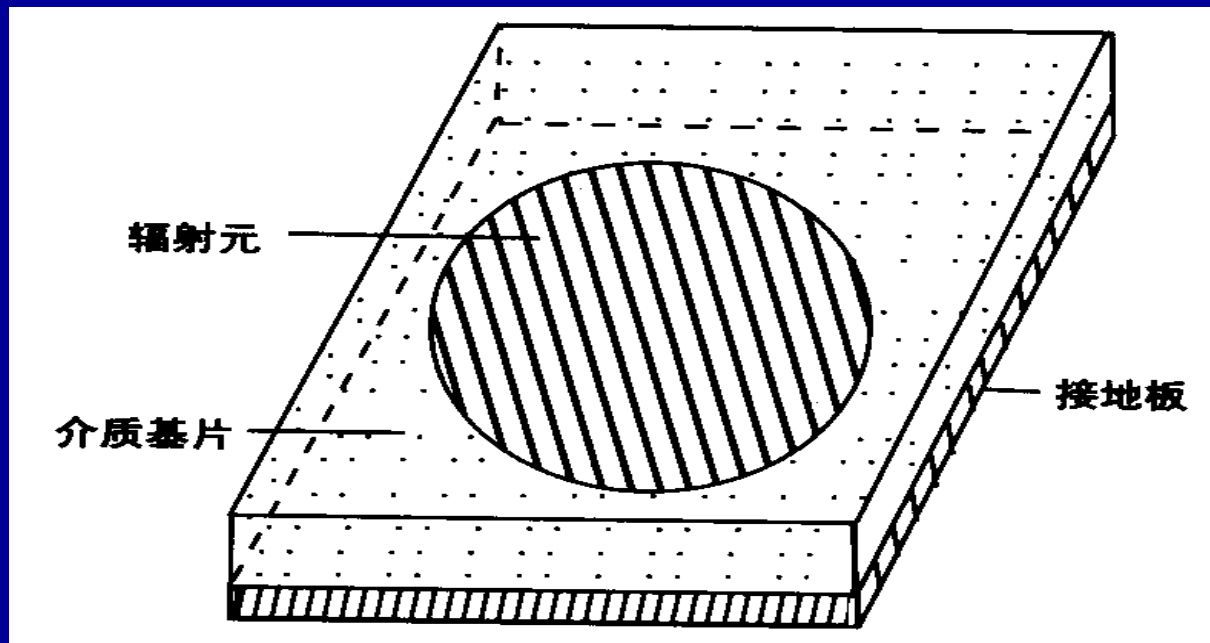
- 优点：不需要了解码的结构
- 缺点：信号质量差，无法测定伪距，无法提取导航电文

- 码相位型通道

- 优点：不需要了解码的结构
- 缺点：精度低

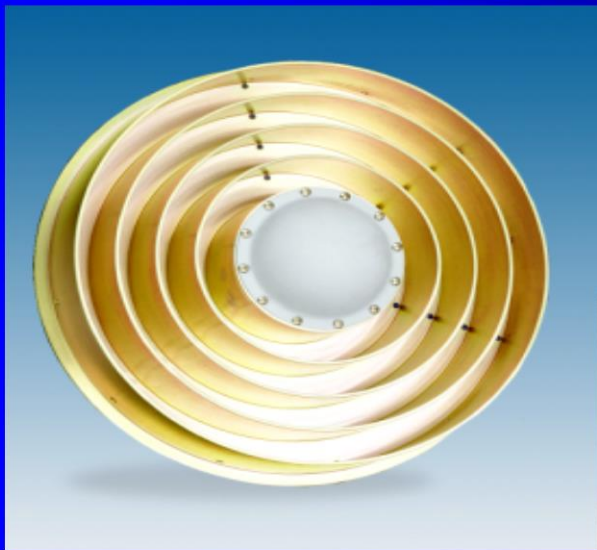
（五）GPS接收机的天线

- 作用
- 天线的相位中心



微带天线示意图

扼流圈天线



1、天线的作用

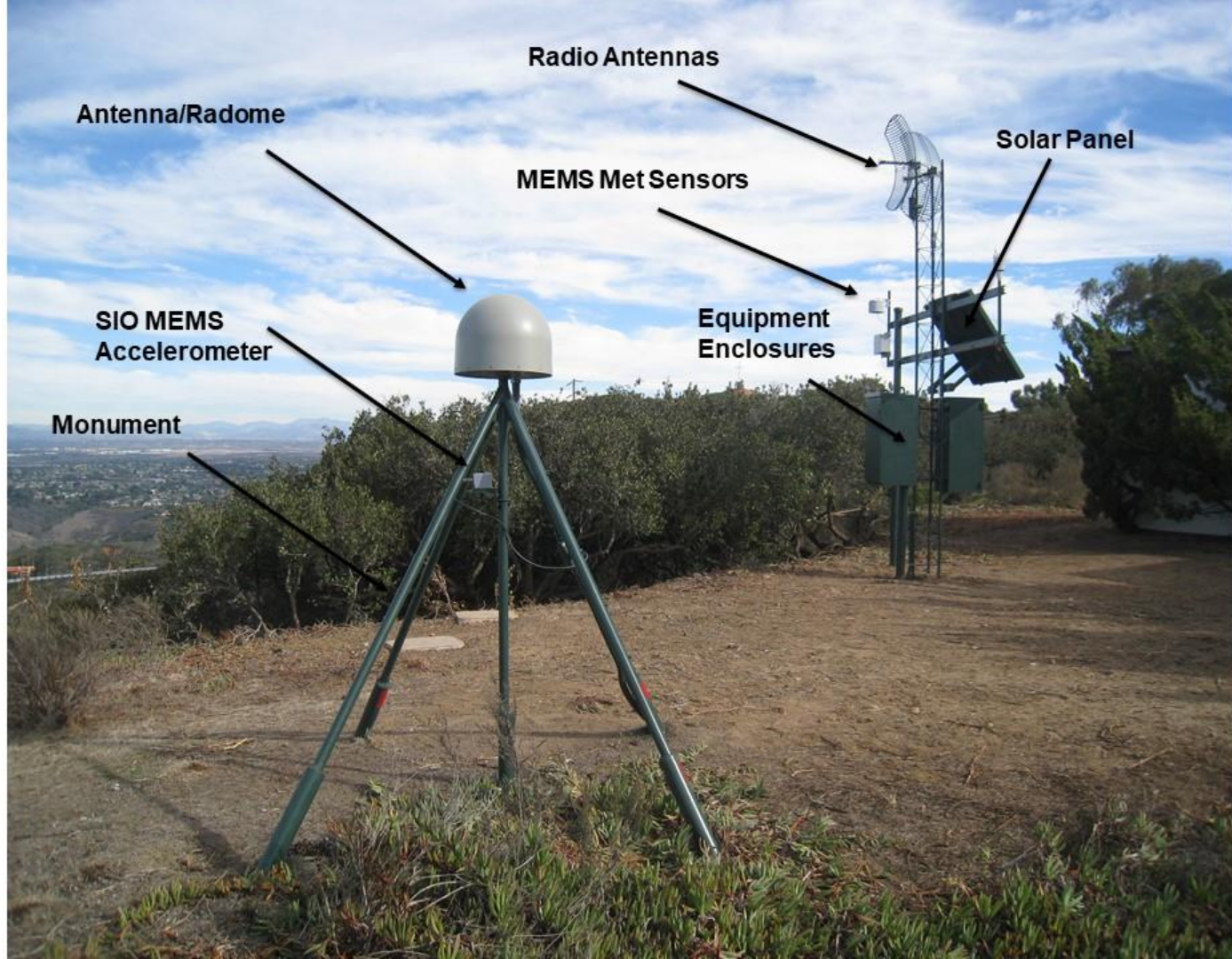
- 接收来自卫星的信号
- 放大
- 进行频率变换（变频处理）
- 用于对信号进行跟踪、处理、量测

- GPS天线接收到的来自20000km高空的卫星信号强度很弱，信号源淹没在噪声中；
- 为了提高信号强度，一般在天线后端设有前置放大器，对于双频接收机设有两路前置放大器以控制外来信号干扰；
- 大部分GPS天线都与前置放大器结合在一起，但也有些导航型接收机为减少天线重量、便于安置、避免雷电事故，而将天线和前置放大器分开；

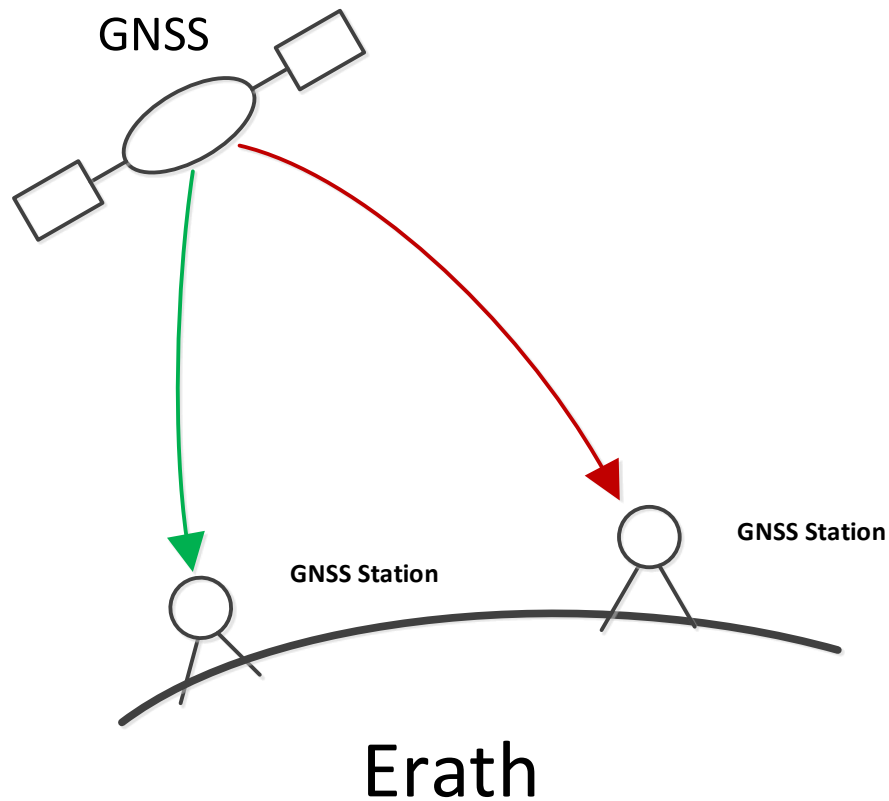
- 经过GPS前置放大器的信号仍然很微弱，为了使接收机通道得到稳定的高增益，并且使L频段的射频信号变成低频信号，必须采用变频器进行频率变换处理；
- 从卫星接收到的信号是扩频的调制信号，所以要经过解扩、解调才能得到导航电文；为了达到此目的，在相关通道电路中设有伪码相位跟踪环和载波相位跟踪环。

天线的基本要求

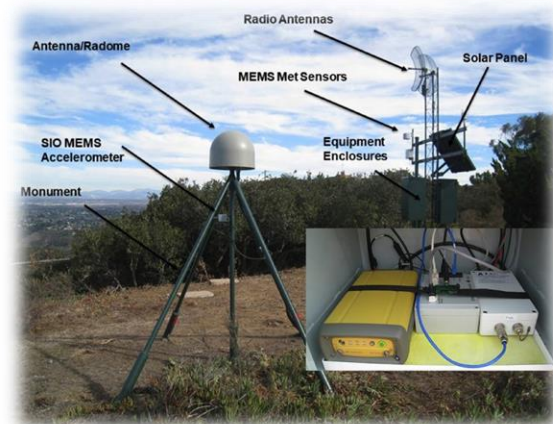
- 天线与前置放大器应**密封为一体**，保障在恶劣气象环境下正常工作；
- 天线应**呈全圆极化**，要求天线的作用范围为整个上半天空，天顶处不产生死角，保障能接收来自天空任何方向的卫星信号；
- 天线必须**采取适当的防护与屏蔽措施**，尽可能地减弱信号的多路径效应，防止信号干扰；
- 天线的**相位中心与其几何中心的偏差应尽量小**，且保持稳定。



(六) 部分GPS信号接收机展示



1. GNSS星座
2. 时空基准
3. 卫星位置
4. GNSS信号
5. GNSS接收机
6.





Trimble R8 GNSS



Trimble R7 GNSS



Trimble R6 GNSS



Trimble 5700



Trimble 5800



北斗RTKS86C



北斗RTKS862C



北斗NetS86+C



Net S86



北斗手持
GIS760C



北斗手持GIS
S740C



南方S760手
持GIS



S720智能一
体化手持GIS



iRTK智能RTK系统



H32全能型GNSSRTK系统



新V30 GNSSRTK系统



华星A8 RTK测量系统



F61 (北斗版) GNSS RTK系统



F66 GNSS RTK系统

天线



手簿



主机



Trimble5700接收机主要部件

后面板

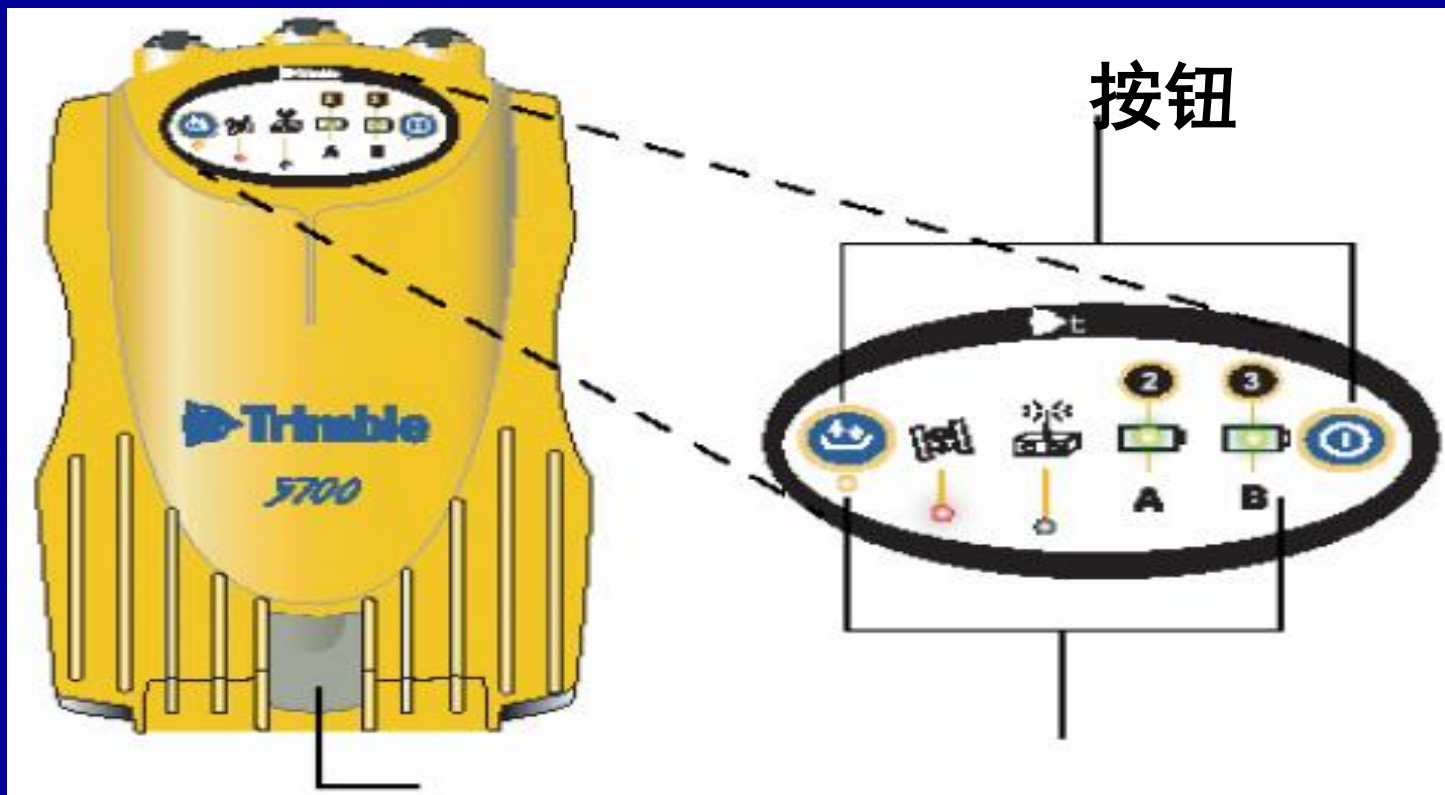


顶面板

前面板

底面板

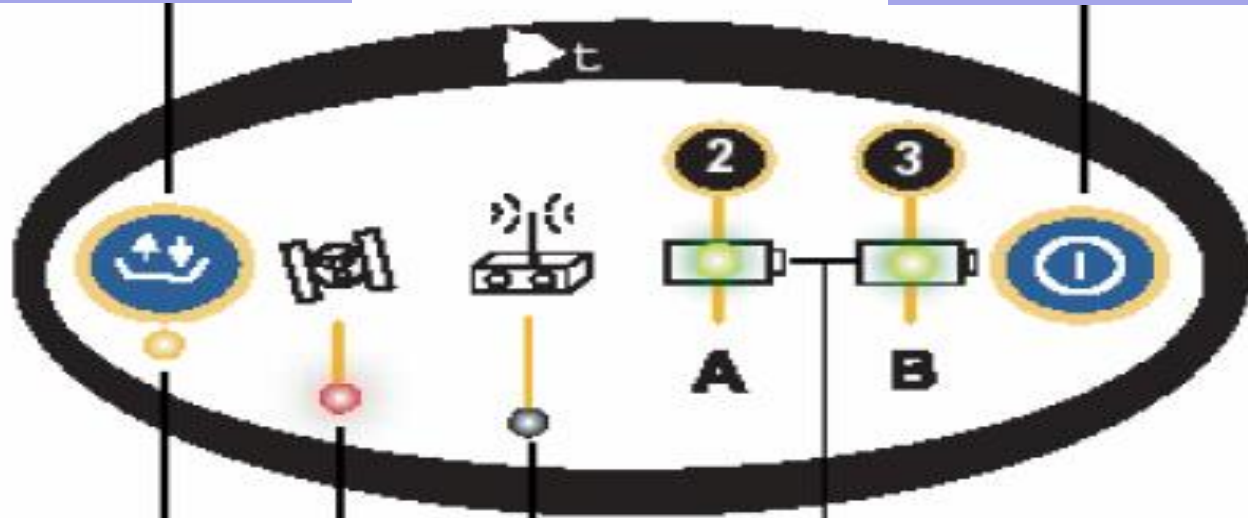
主机组成



闪存卡/USB门扣 指示灯

数据按钮

电源按钮



卫星跟踪
LED

电池LED

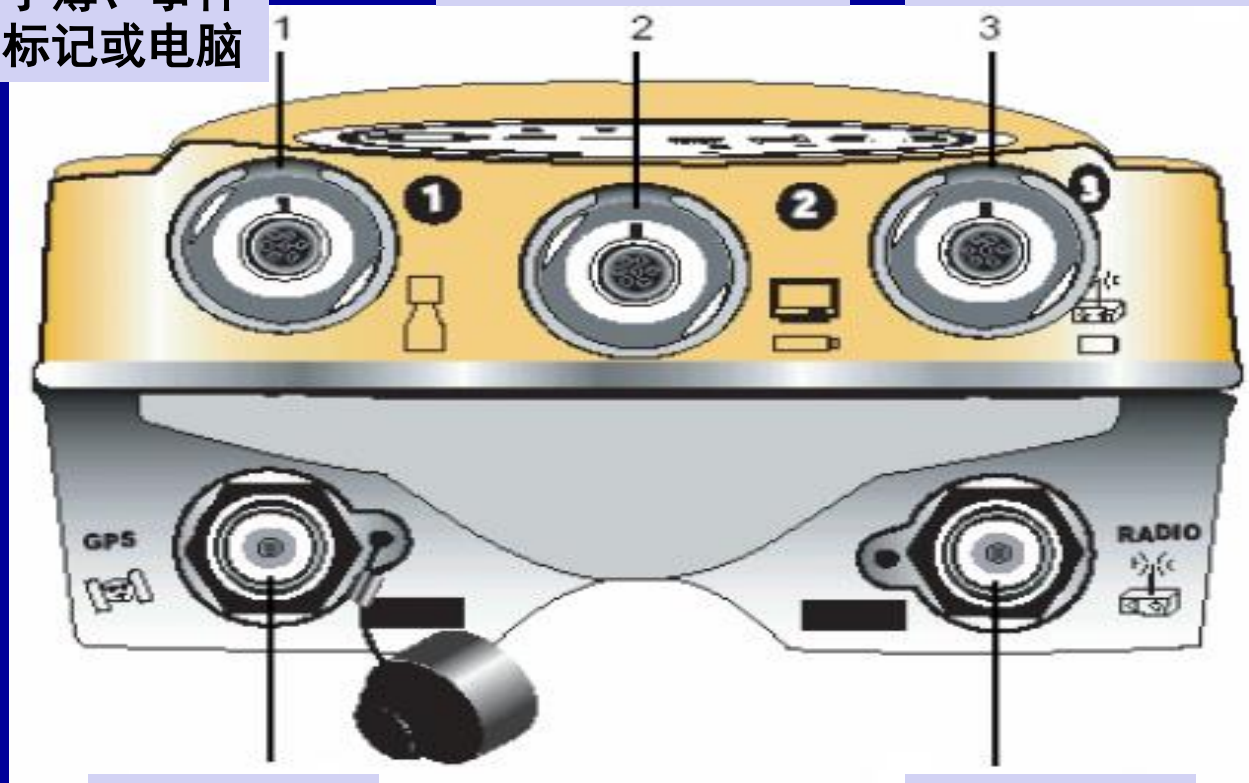
记录/记忆
LED

无线电台
LED

手簿、事件
标记或电脑

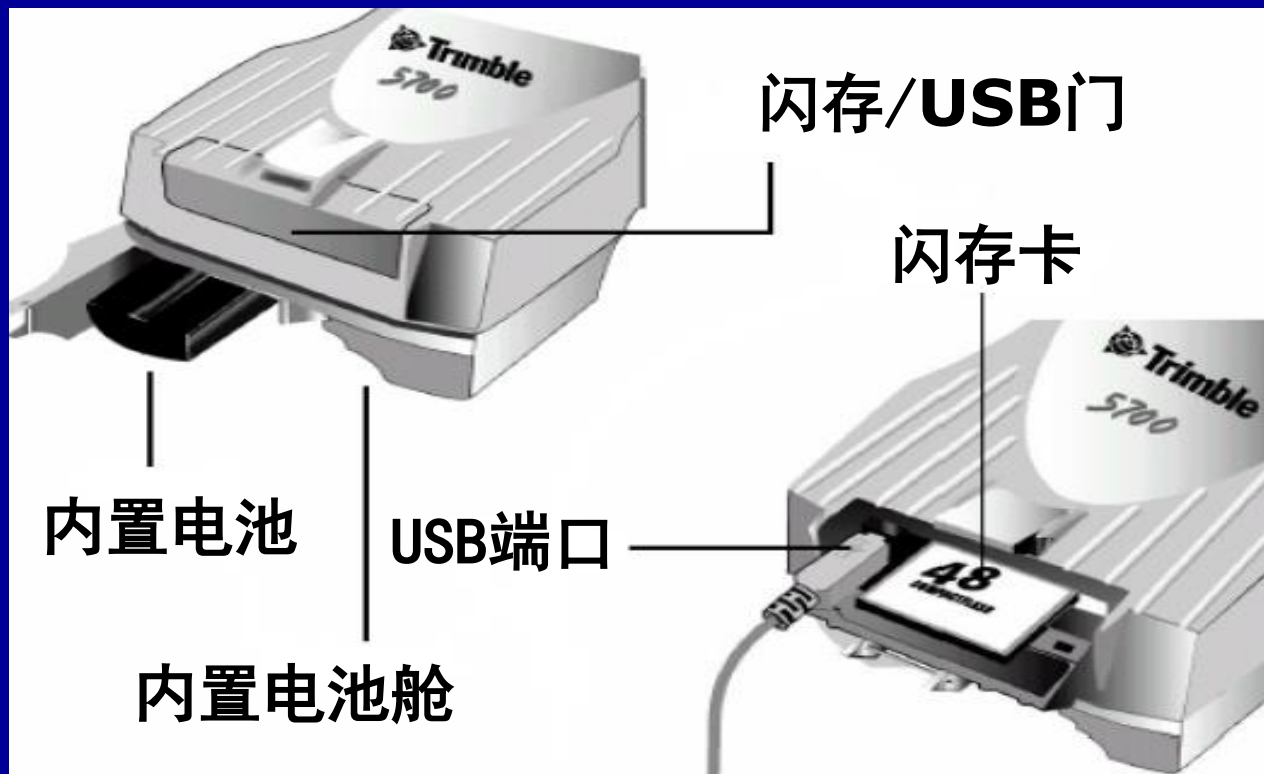
外接电源、电脑、
1PPS或事件

外接无线电、电源、
基准站电台



GPS天线

无线电台

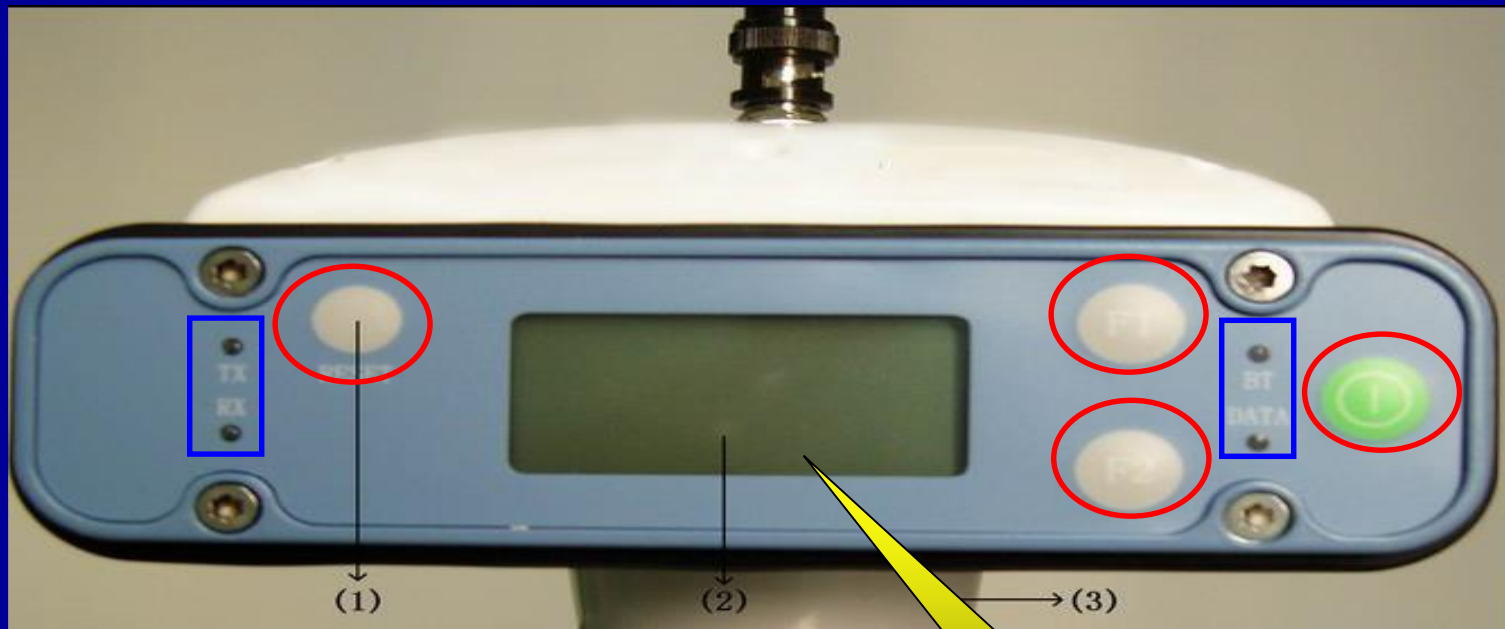








南方S86



按钮：

- 重置按钮
- F1按钮
- F2按钮
- 电源按钮

指示灯：

- TX 发射信号灯
- RX 接收信号灯
- BT 蓝牙灯
- DATA 数据传输灯

液晶显示屏



(4) 插卡处

(5) 通讯电缆接口，5针孔

(6) 外接电源接口，7针孔

(7) 充电器接口，4针孔



手簿电池充电器



手簿电池

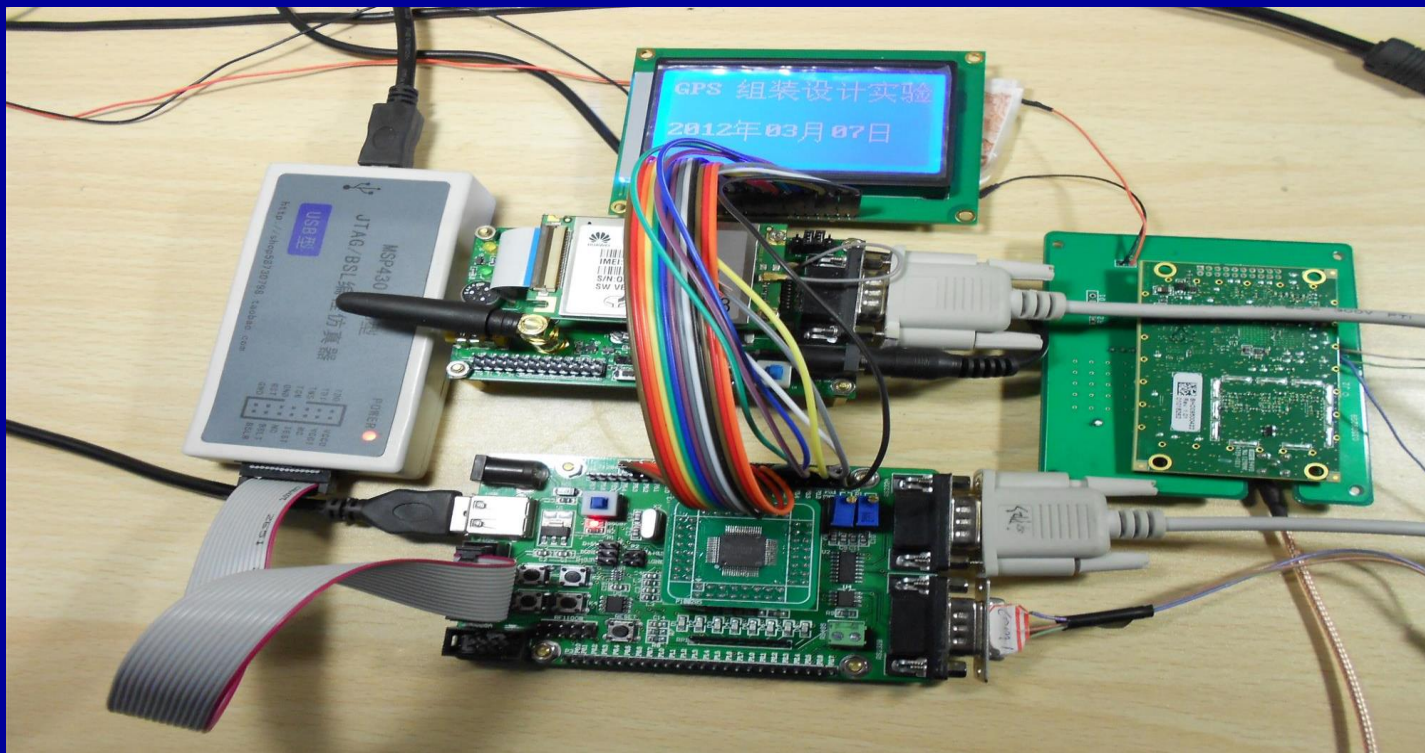


数据采集电缆



发射天线和接收天线

(七) GPS信号接收机硬件组装与软件开发

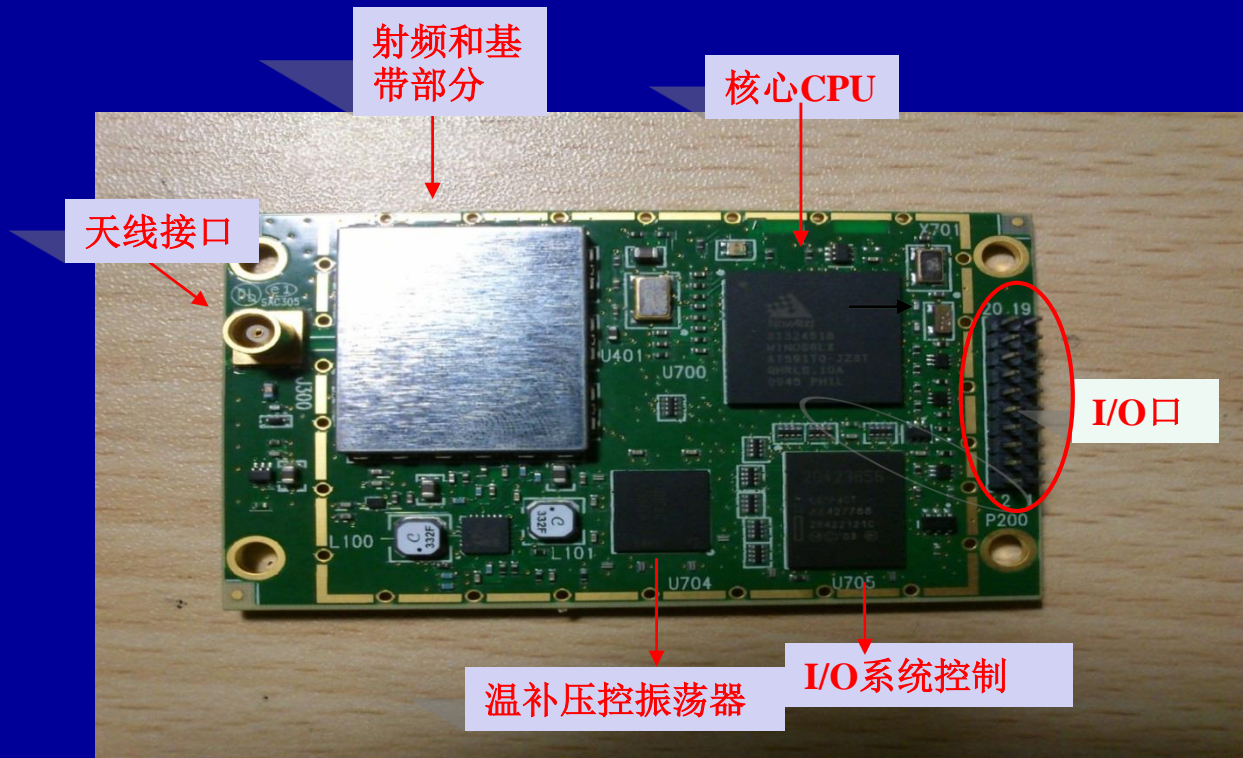


NovAtel的OEM-star型号GPS主板

➤GPS主板包括芯片+匹配电路，如天线信号放大电路、输出信号处理电路等等。

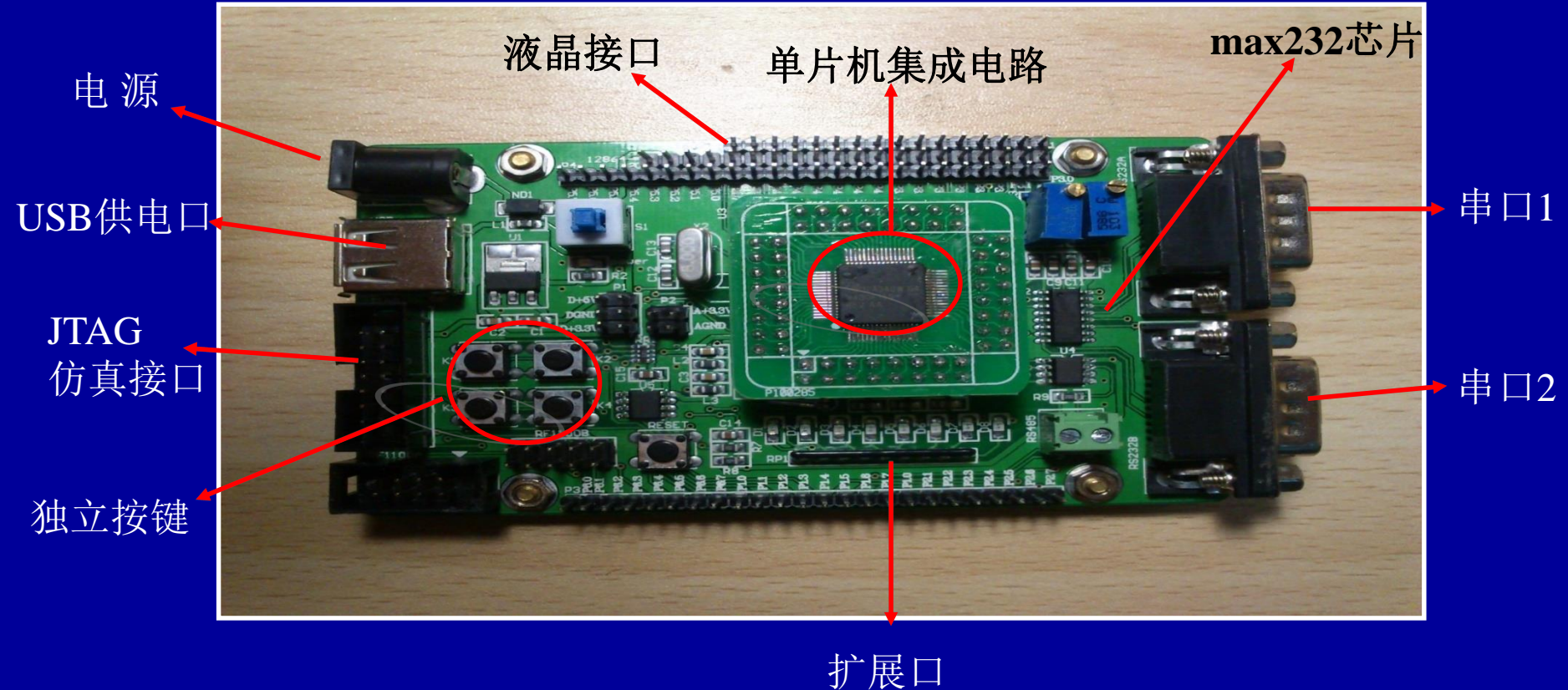
➤GPS芯片就是集成了**RF射频芯片**、**基带芯片**和**核心CPU**，并加上相关外围电路而组成的一个集成电路。

➤右图为NovAtel 生产OEM-star主板，支持最高1HZ的采样率。



NovAtel OEM-star主板

MSP430单片机开发板



五、GPS信号的限制使用政策

GPS定位技术的全球性、全天候、实时与高精度等特性，使其在现代化战争中占有非常重要的作用。美国国防部制定了限制使用GPS卫星信号的政策，即SA技术，使非特许用户的实时定位精度降低，以保护美国国家利益不受损害。

GPS用户双用途服务：

标准定位业务SPS（专供各类民间用户使用）

精密定位业务PPS（专供军方和特许用户使用）

SA与AS技术

SA (Selective availability) 技术: 包括对信号基准频率的 δ 技术, 对导航电文的 ε 技术, 对P码的译密技术。

δ 技术: 在GPS工作卫星信号基准频率中, 引入一个人工高频抖动信号, 使GPS卫星频率发生快速变化 (钟频抖动)。

ε 技术: 导航电文经 ε 技术处理后, 广播星历的精度由 ± 20 降低到 $\pm 100\text{m}$ 左右, 且偏差不固定, 为不规则变化的随机量。

为了有效实行双用途服务, 对钟频抖动和星历偏差等人工误差用密码加密。

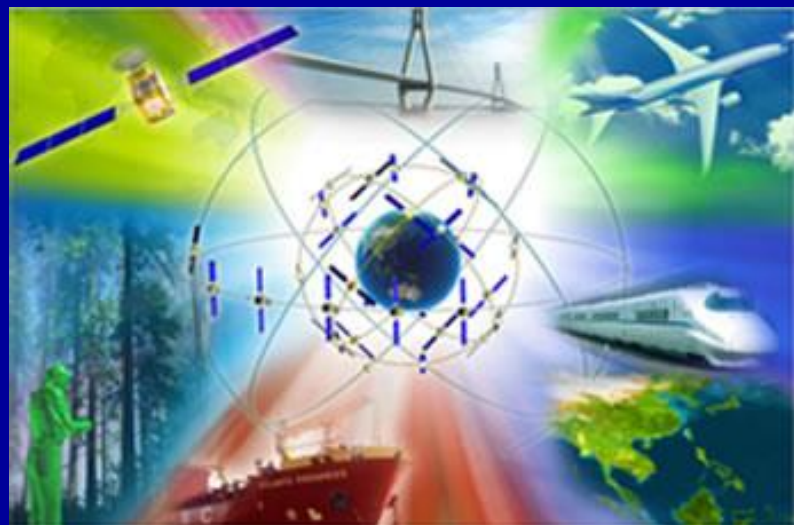
此外，美国还采用反电子诱骗（AS, anti-spooting）技术，即对P码采用译密技术，使P码与机密W码模二和生成Y码。

2000年5月1日，美国宣布取消SA技术，但仍实施AS技术，P码保密。

中国北斗卫星导航系统建设进程

- ◆ 2012年10月25日，我国成功发射第16颗试验卫星G06。截止目前共发射22颗北斗导航卫星（ME0-8、GE0-6、IGS0-8）。
- ◆ 北斗卫星导航系统于2012年12月27日开始正式提供区域服务，并公布了北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件ICD(1.0版)，标志北斗卫星导航系统建设三步走的第二步顺利完成。
- ◆ 目前，北斗卫星导航系统可向亚太大部分地区正式提供连续无源定位、导航、授时等服务，其位置精度为平面10米、高程10米；测速精度0.2米/秒；授时精度为10纳秒。

中国的北斗 世界的北斗



(北斗卫星导航系统政府网站,
<http://www.beidou.gov.cn/index.html>)

| 卫星 | 发射日期 | 运载火箭 | 轨道 |
|-----------------|-------------|--------|-------|
| 第 1 颗北斗导航试验卫星 | 2000.10.31. | CZ-3A. | GEO. |
| 第 2 颗北斗导航试验卫星 | 2000.12.21. | CZ-3A. | GEO. |
| 第 3 颗北斗导航试验卫星 | 2003.5.25. | CZ-3A. | GEO. |
| 第 4 颗北斗导航试验卫星 | 2007.2.3. | CZ-3A. | GEO. |
| 第 1 颗北斗导航卫星 | 2007.4.14. | CZ-3A. | MEO. |
| 第 2 颗北斗导航卫星 | 2009.4.15. | CZ-3C. | GEO. |
| 第 3 颗北斗导航卫星 | 2010.1.17. | CZ-3C. | GEO. |
| 第 4 颗北斗导航卫星 | 2010.6.2. | CZ-3C. | GEO. |
| 第 5 颗北斗导航卫星 | 2010.8.1. | CZ-3A. | IGSO. |
| 第 6 颗北斗导航卫星 | 2010.11.1. | CZ-3C. | GEO. |
| 第 7 颗北斗导航卫星 | 2010.12.18. | CZ-3A. | IGSO. |
| 第 8 颗北斗导航卫星 | 2011.4.10. | CZ-3A. | IGSO. |
| 第 9 颗北斗导航卫星 | 2011.7.27. | CZ-3A. | IGSO. |
| 第 10 颗北斗导航卫星 | 2011.12.2. | CZ-3A. | IGSO. |
| 第 11 颗北斗导航卫星 | 2012.2.25. | CZ-3C. | GEO. |
| 第 12、13 颗北斗导航卫星 | 2012.4.30. | CZ-3B. | MEO. |
| 第 14、15 颗北斗导航卫星 | 2012.9.19. | CZ-3B. | MEO. |
| 第 16 颗北斗导航卫星 | 2012.10.25. | CZ-3C. | GEO. |
| 第 17 颗北斗导航卫星 | 2015.3.30. | CZ-3C. | IGSO. |
| 第 18、19 颗北斗导航卫星 | 2015.7.25. | CZ-3B. | MEO. |
| 第 20 颗北斗导航卫星 | 2015.9.30. | CZ-3B. | IGSO. |
| 第 21 颗北斗导航卫星 | 2016.2.1. | CZ-3C. | MEO. |
| 第 22 颗北斗导航卫星 | 2016.3.30. | CZ-3A. | IGSO. |



美国GPS



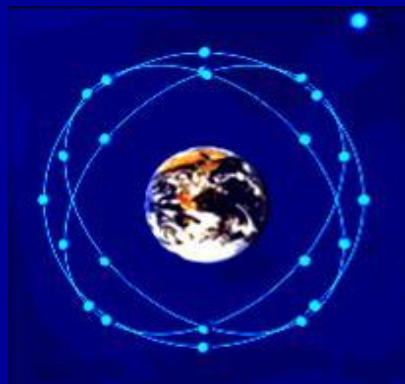
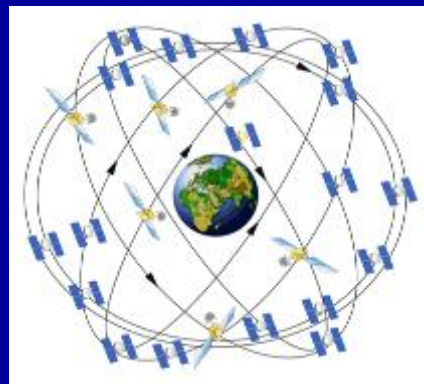
俄罗斯GLONASS



中国北斗



欧盟伽利略



促进全球竞争合作，推动系统共同发展！

本章结束，谢谢！