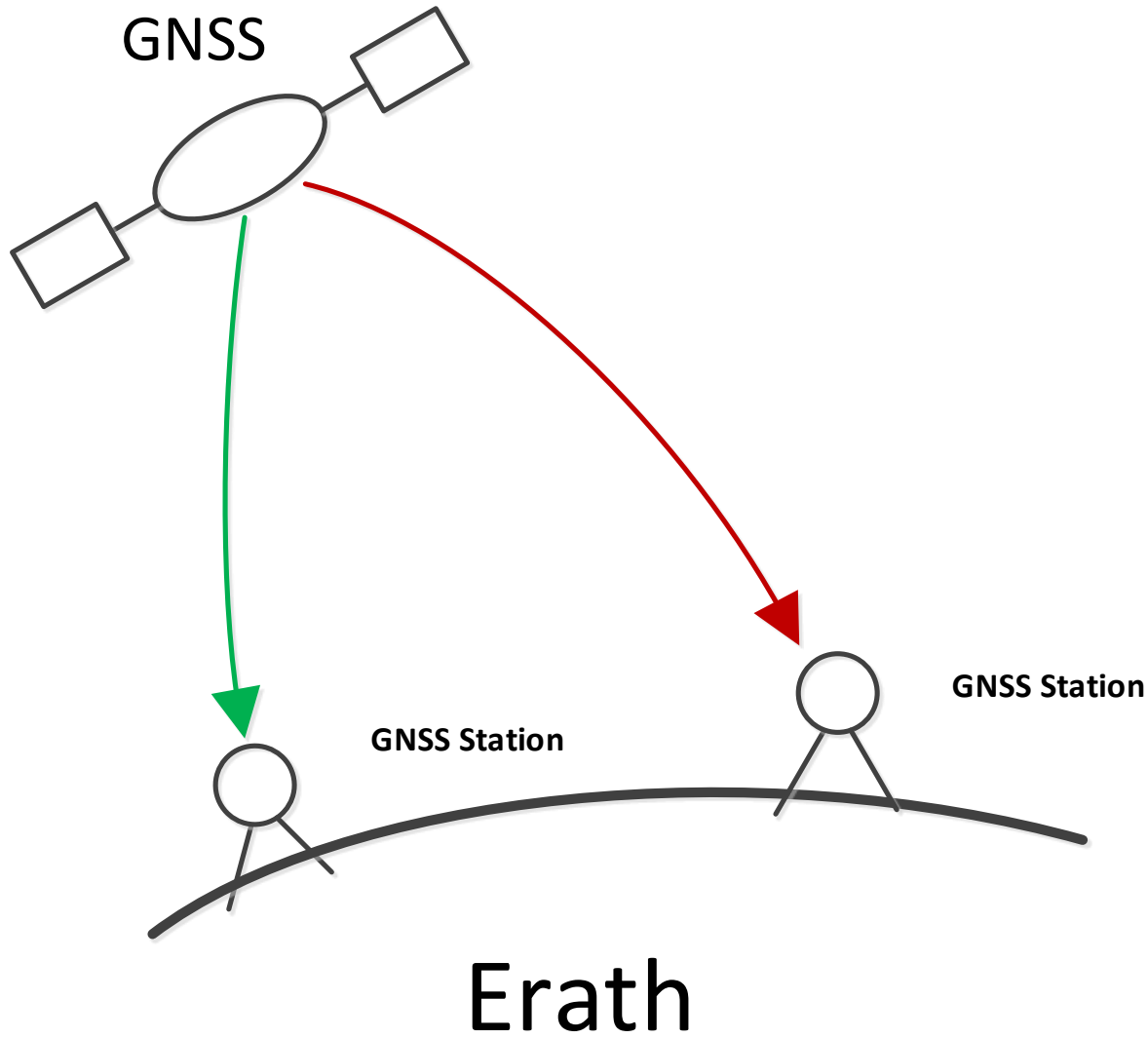


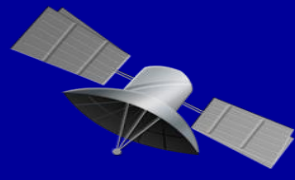
# 第三章第一节 GPS测量误差

长安大学地质工程与测绘学院

主讲教师：张双成



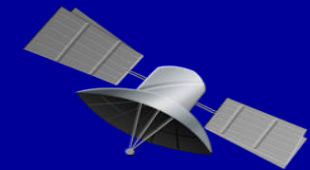
1. GNSS星座
2. 时空基准
3. 卫星位置
4. GNSS信号
5. GNSS接收机
6. GNSS误差源
7. .....



# 主要讲解内容

1. **GPS测量误差的分类**
2. 与卫星有关的误差
3. 与传播途径有关的误差
4. 与接收设备有关的误差
5. GPS测量误差处理方法

# 1. GPS测量误差的分类

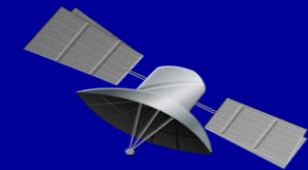


## GPS导航定位的基本观测量：

- ① 测距码测距观测量——“伪距”
- ② 载波相位测距观测量——“伪距”
- ③ 由积分多普勒计数得出的伪距差
- ④ 由干涉法测量得出的时间延迟

（GPS导航定位主要利用①和②观测量，③和④观测量不常用，仪器要求较高，价格昂贵，数据处理比较复杂。）

# 1. GPS测量误差的分类

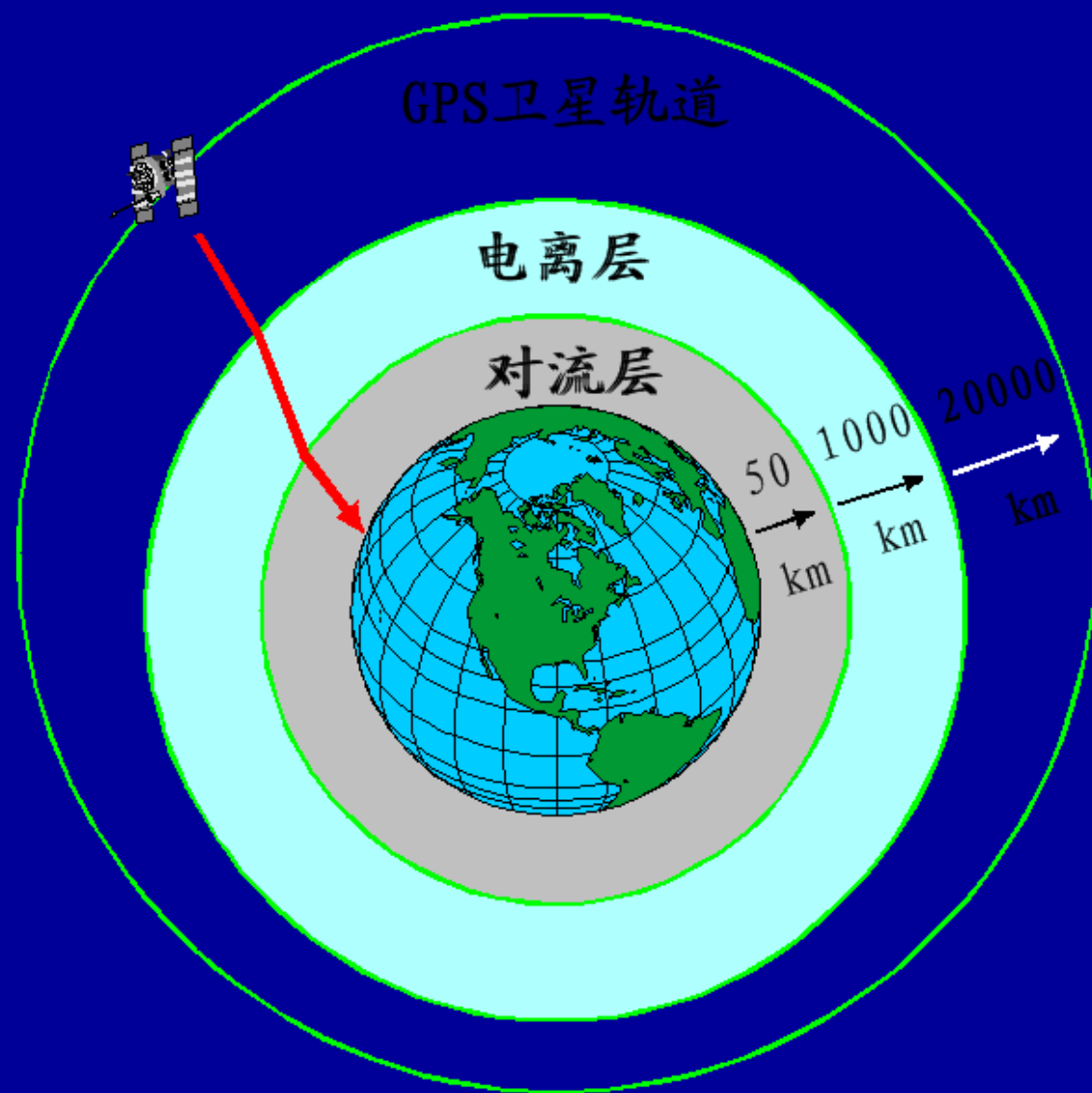


GPS信号的传播路径:

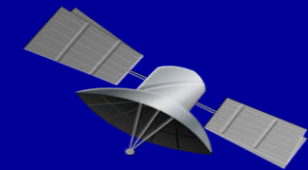
GPS观测值:

伪距

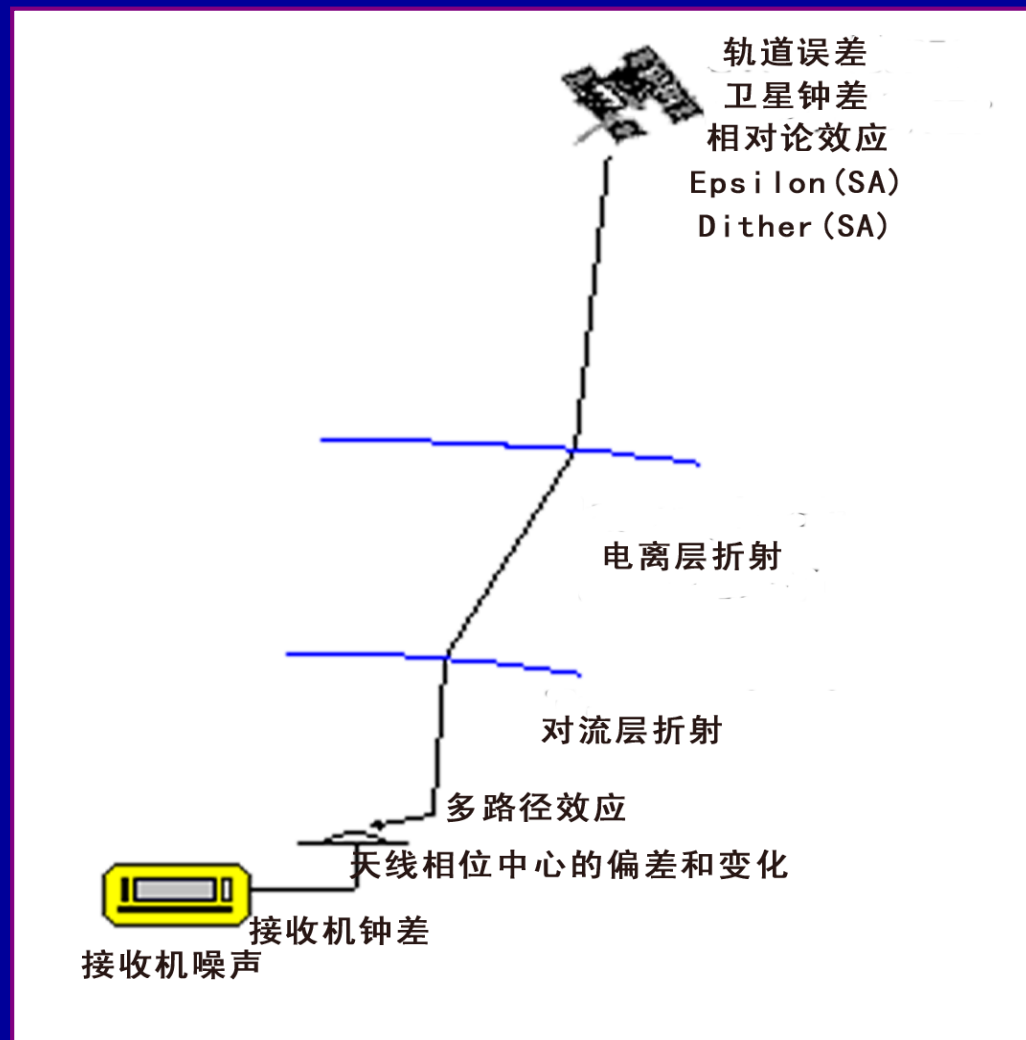
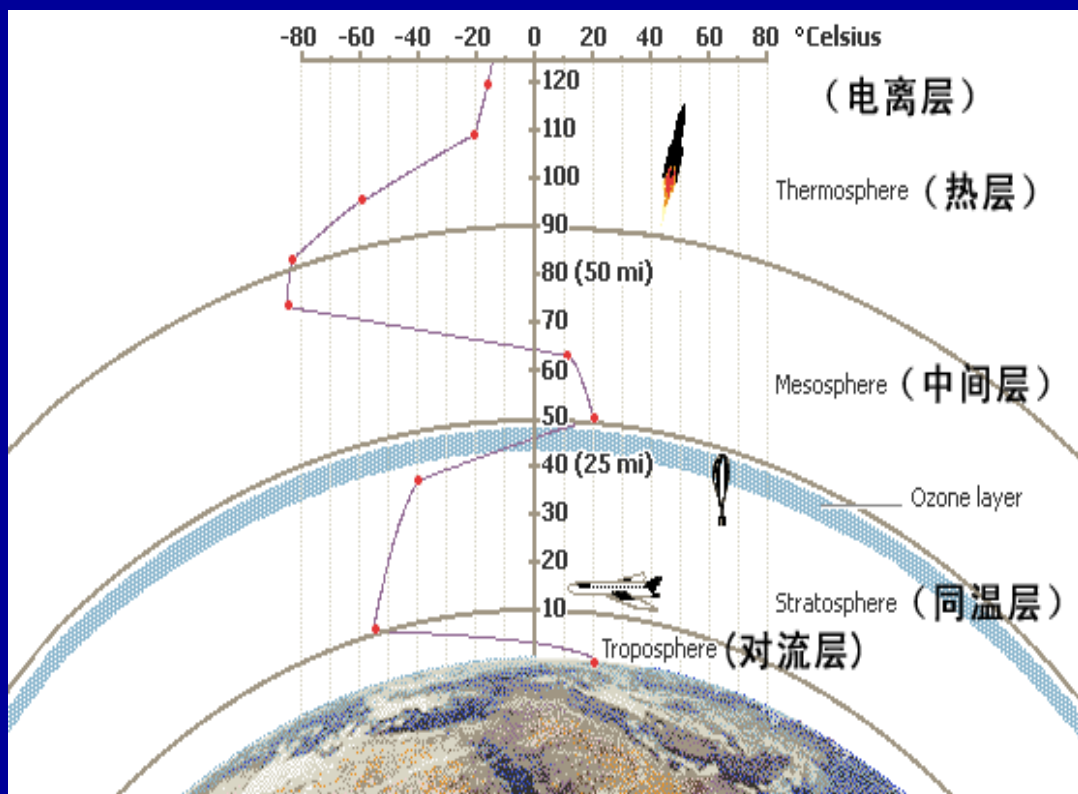
载波相位



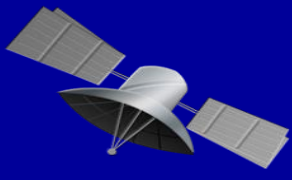
# 1. GPS测量误差的分类



## 地球大气结构:



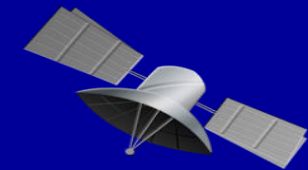
# 1. GPS测量误差的分类



## GPS信号测量误差分类：

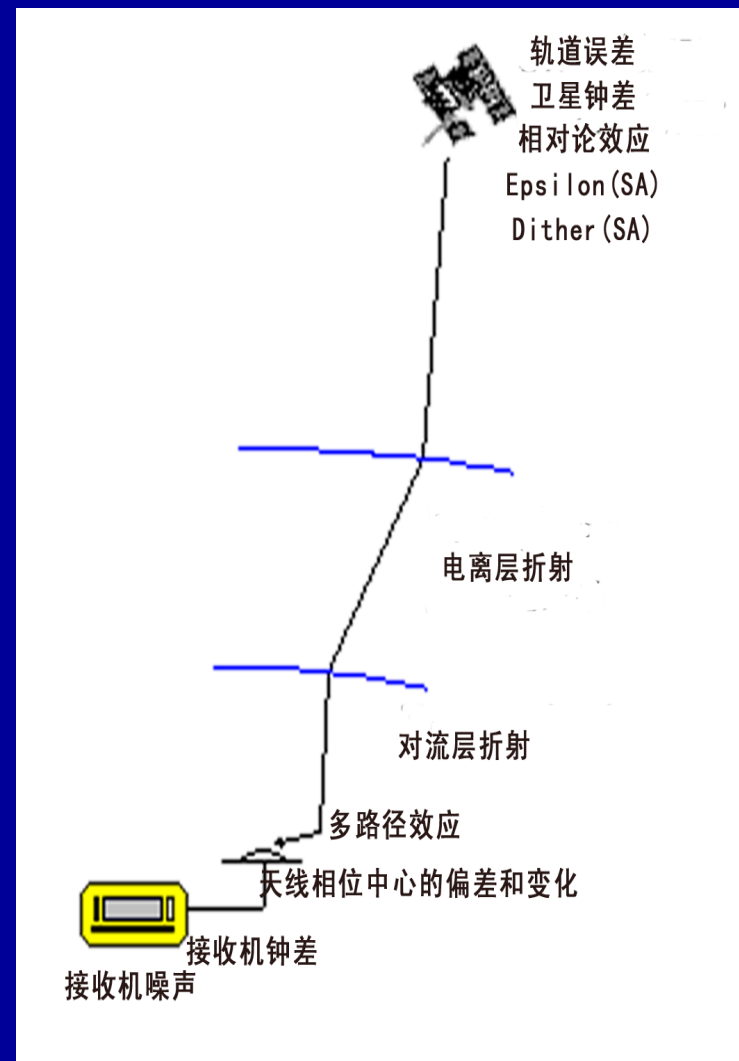
- 与卫星有关的误差
- 与传播途径有关的误差
- 与接收机有关的误差

# 1. GPS测量误差的分类



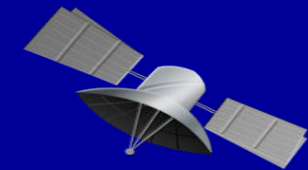
## GPS测量误差的组成:

- 系统误差（主要影响）
  - 与卫星有关的误差
    - 卫星轨道（星历）误差
    - 卫星钟差
    - 相对论效应
  - 与传播途径有关的误差
    - 对流层折射
    - 电离层折射
    - 多路径效应（随机特性）
  - 与接收机有关的误差
    - 接收机钟差
    - 天线相位中心的偏差及变化
    - 各通道间的信号延迟误差
  - 其它
- 偶然误差



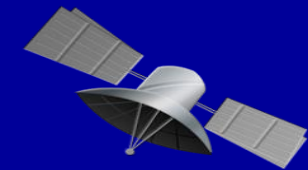


# 主要讲解内容



1. GPS测量误差的分类
2. 与卫星有关的误差
3. 与传播途径有关的误差
4. 与接收设备有关的误差
5. GPS测量误差处理方法

## 2. 与GPS卫星有关的误差



- 系统误差（影响）

- 与卫星有关的误差

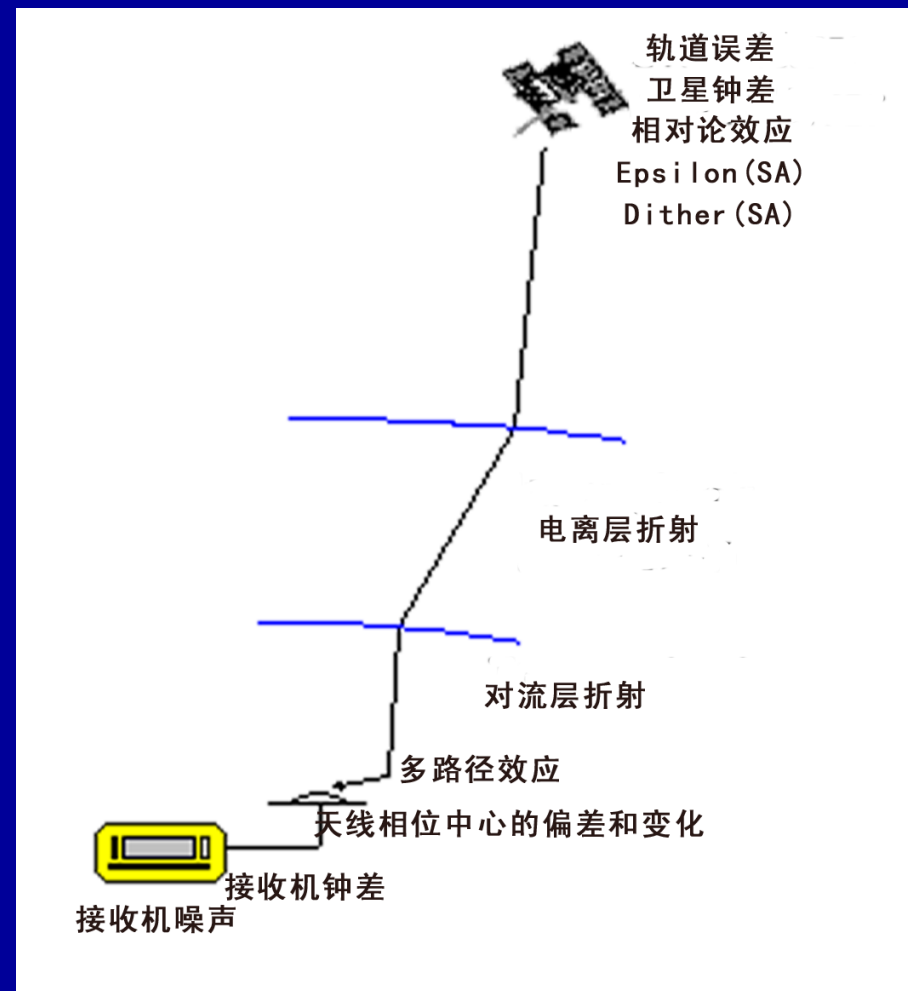
- 卫星轨道（星历）误差
    - 卫星钟差
    - 相对论效应

- 与传播途径有关的误差

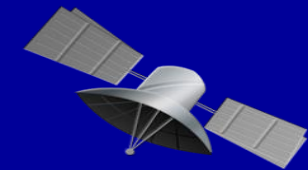
- 对流层折射
    - 电离层折射
    - 多路径效应（随机特性）

- 与接收机有关的误差

- 接收机钟差
    - 天线相位中心的偏差及变化
    - 各通道间的信号延迟误差

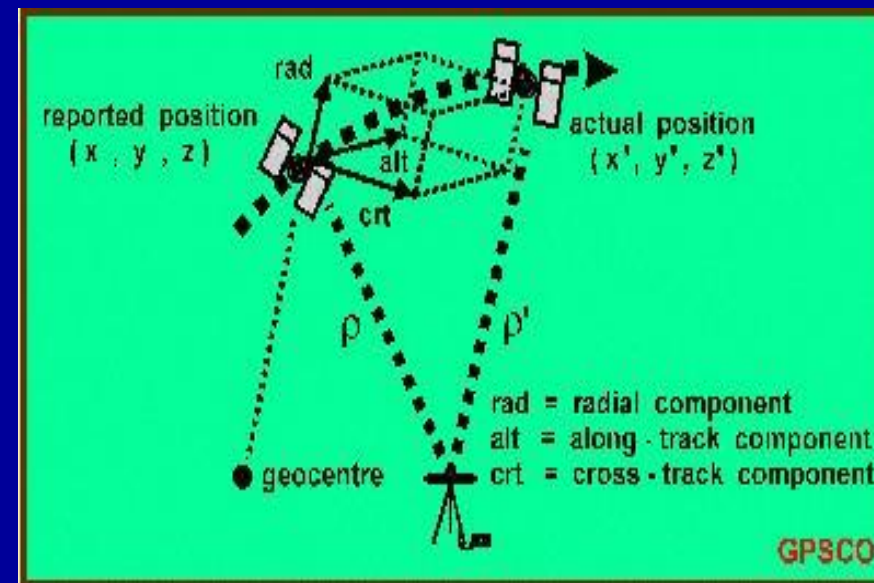
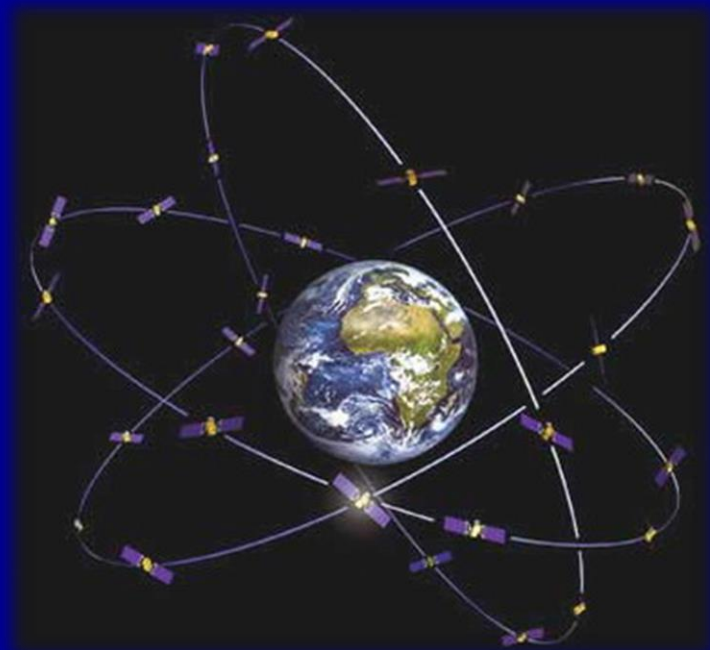


## 2. 与GPS卫星有关的误差

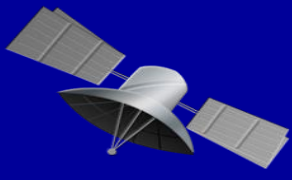


### GPS卫星星历误差：

- **定义：** 由卫星星历给出的卫星在空间的位置与卫星的实际位置之差称为卫星星历误差。



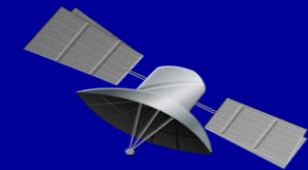
## 2. 与GPS卫星有关的误差



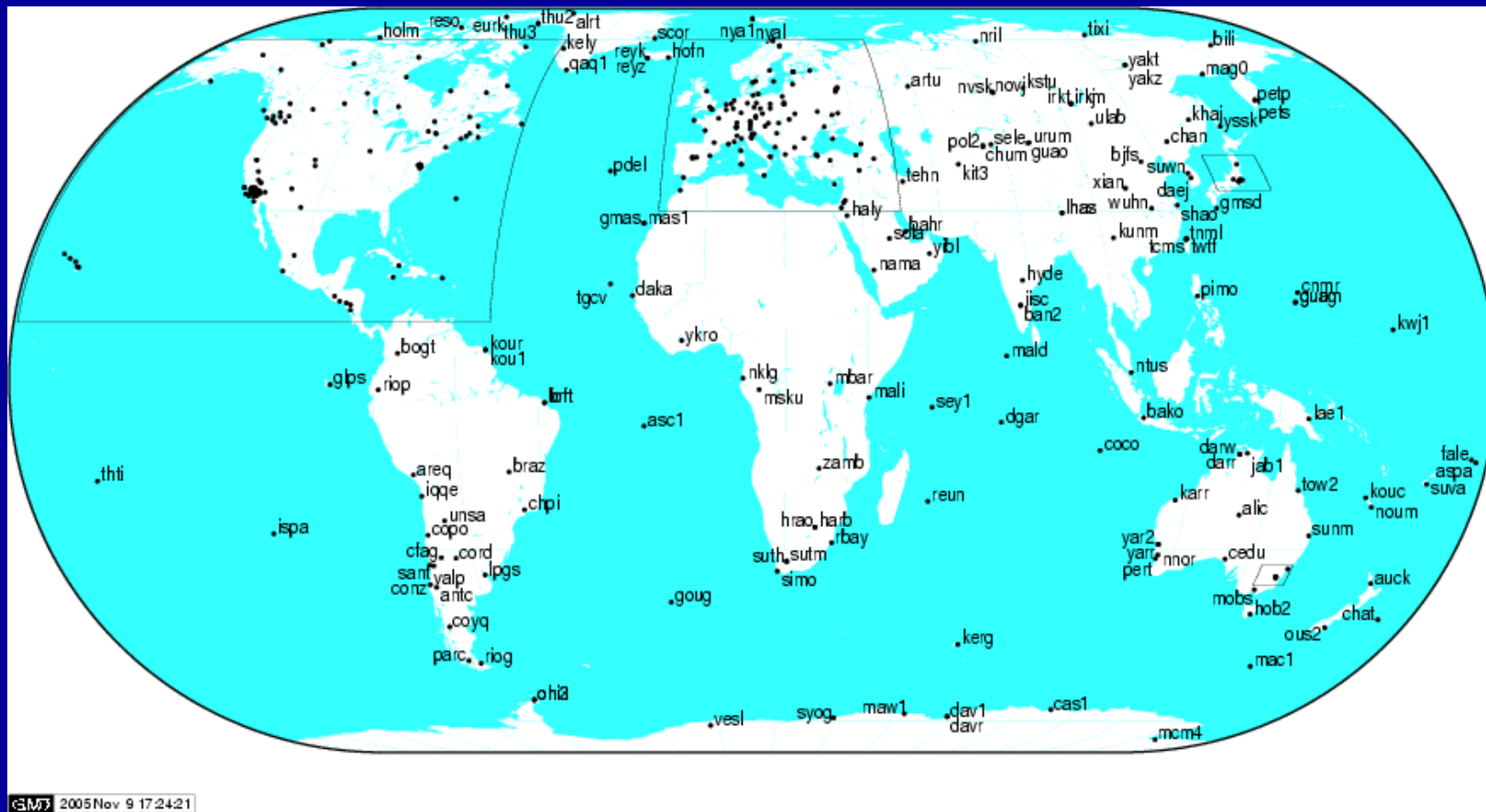
### 星历类型:

- 广播星历
  - 由GPS的地面控制部分所确定和提供的，经GPS卫星向全球所有用户公开播发的一种预报星历。
- 精密星历
  - 为满足大地测量、地球动力学研究等精密应用领域的需要而研制、生产的一种高精度的事后星历。

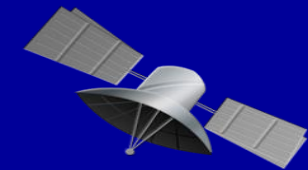
## 2. 与GPS卫星有关的误差



### 精密星历观测站：



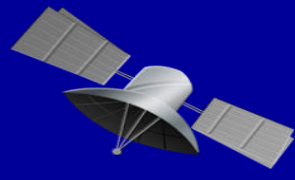
国际GNSS中心(IGS)的部分GPS台站在全球的分布



## 2. 与GPS卫星有关的误差

### GPS卫星星历精度：

星历类型	精度	延迟时间	更新率	采样间隔
广播星历	~200cm / ~7ns	实时	— —	— —
预报星历(P)	~10cm / ~5ns	实时	一天四次	15min
预报星历(O)	5cm / ~0.2ns	3小时	一天四次	15min
快速星历	5cm / 0.1ns	17小时	每天一次	15min/5min
事后星历	<5cm / 0.1ns	~13天	每周发布	15min/5min



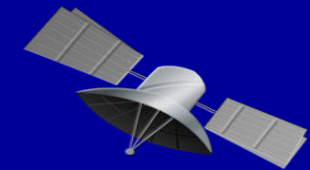
## 2. 与GPS卫星有关的误差

### GPS卫星星历误差对定位的影响：

- 星历误差对**单点定位**的影响
  - 星历误差对单点定位的影响主要取决于卫星到接收机的距离以及用于定位或导航的GPS卫星与接收机构成的几何图形，星历起算误差传递给测站坐标，估计为**几十到上百米**。
- 星历误差对**相对定位**的影响

$$\frac{db}{b} = \frac{ds}{\rho}$$

## 2. 与GPS卫星有关的误差



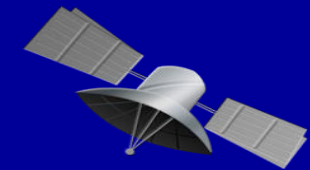
### GPS星历误差对**相对定位**的影响：

$$\frac{|\Delta r|}{10|r|} < \frac{|\Delta b|}{|b|} < \frac{|\Delta r|}{4|r|}$$

其中 $|\Delta r|$ 为卫星轨道的误差， $r$ 为卫星至测站的相对位置矢量， $|\Delta b|$ 为基线矢量的误差， $b$ 为两站之间基线矢量。如令GPS点位之间最大距离为10km左右，取 $r=22000\text{km}$ ，轨道的误差为50米，根据上其对基线的最大影响为5mm。可见，用广播星历解算对较长基线结果有显著影响。因而在有条件的情况下，最好还是采用精密星历（精度在0.05米左右）或预报精密星历（精度在0.5米左右），从而可以保证星历误差对于基线解算没有影响。



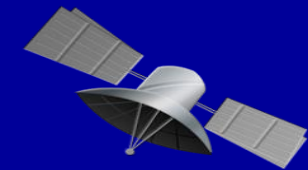
## 2. 与GPS卫星有关的误差



### 星历误差处理方法:

- 精密定轨
- 轨道改进
- 相对定位

## 2. 与GPS卫星有关的误差

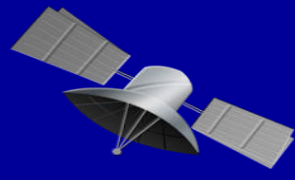


### GPS时钟误差：

钟读数与真实系统时间之间的差异，在GPS中有卫星钟差和接收机钟差两类。

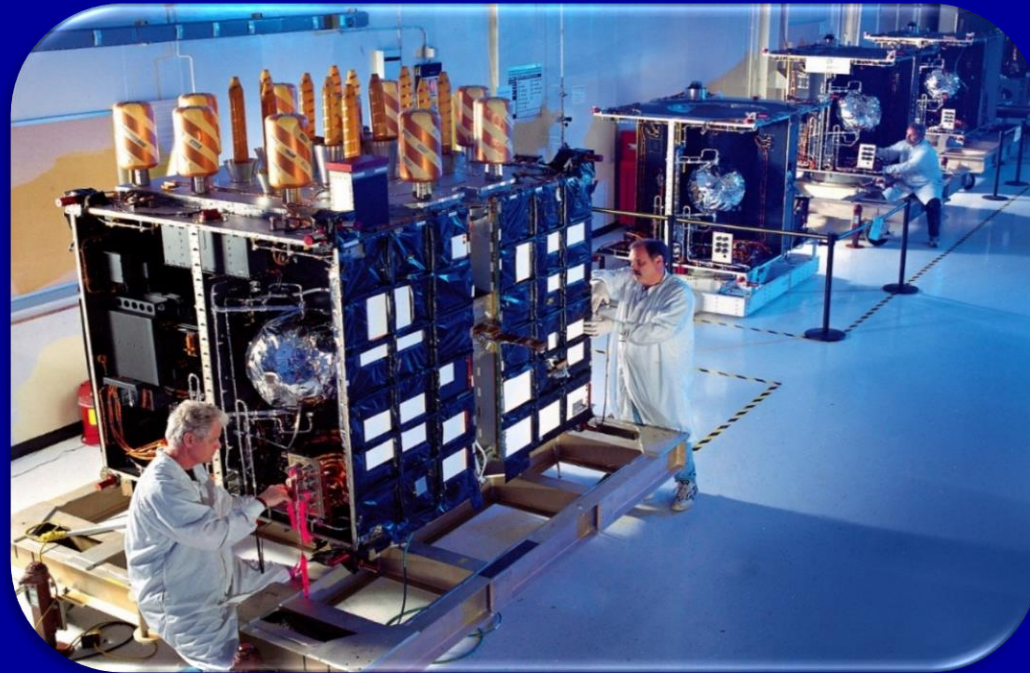


## 2. 与GPS卫星有关的误差

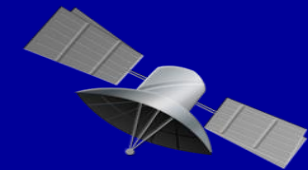


### GPS卫星时钟误差：

GPS测量精度与时钟误差密切相关。高精度原子钟（铷钟和铯钟）由地面主控站控制，其钟面时与GPS时偏差仍在1ms以内（300km）。



## 2. 与GPS卫星有关的误差



### GPS卫星时钟误差：

- 定义

卫星钟时间同步误差

- 应对方法

- 模型改正（钟差改正多项式）

$$\Delta t = a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2$$

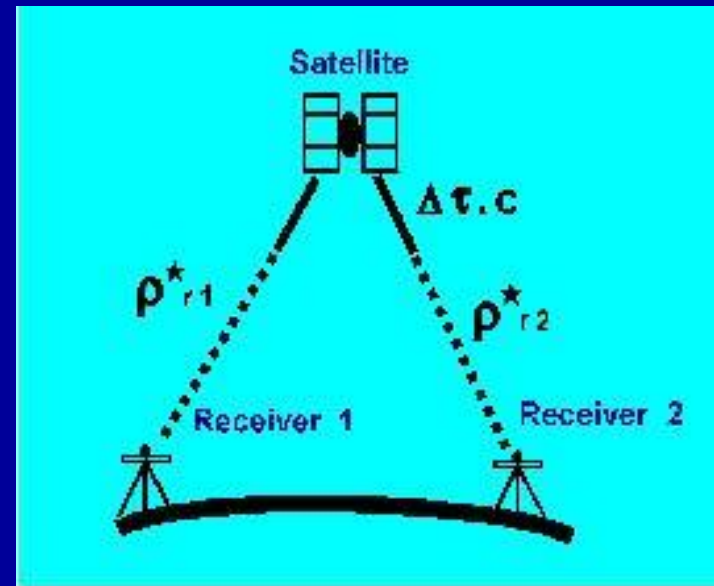
钟差

钟偏

钟速/钟漂

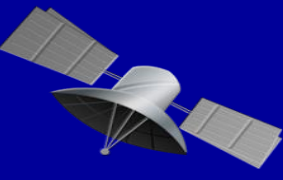
钟的老化率/频漂率

- 相对定位或差分定位



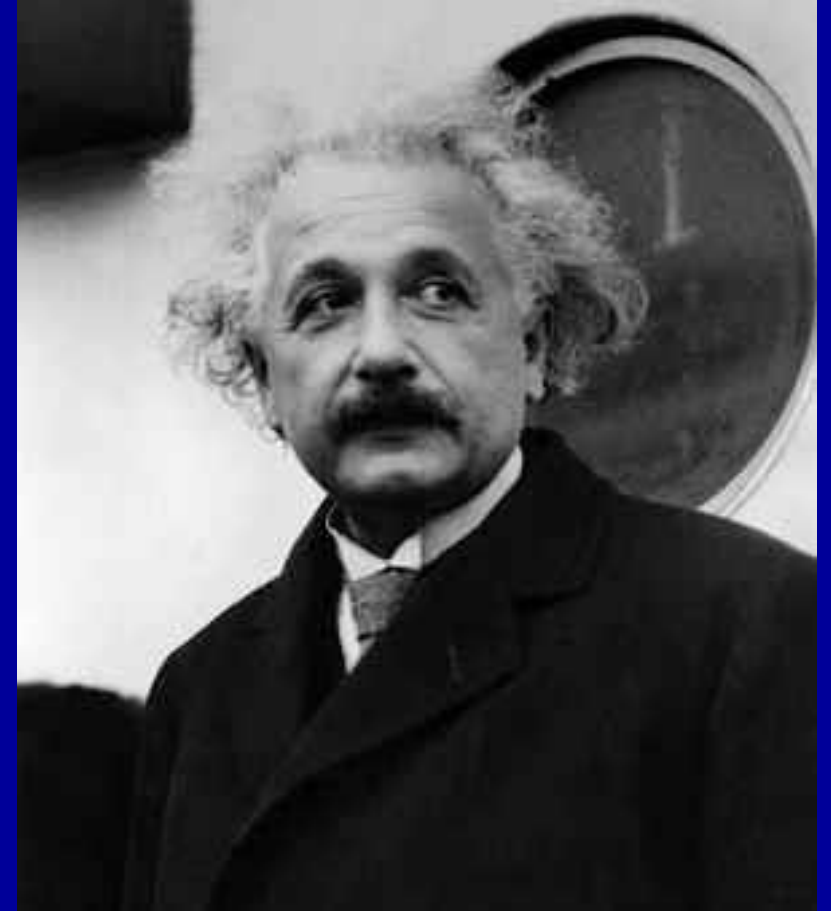
卫星钟差经二阶多项式改正后约为20ns（1ns=0.3m），约6m，但可满足导航用户的精度需求

## 2. 与GPS卫星有关的误差

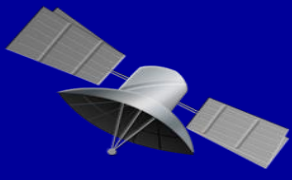


### 相对论效应：

- 狭义相对论效应
- 广义相对论效应



## 2. 与GPS卫星有关的误差



### 相对论效应：

- 狭义相对论

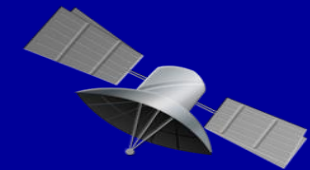
- 1905年提出，运动将使时间、空间 and 物质的质量发生变化。

- 广义相对论

- 1915年提出，将相对论与引力论进行了统一。

相对论效应是由于卫星钟和接收机钟所处的状态不同而引起的卫星钟和接收机钟之间产生相对钟差的现象。

## 2. 与GPS卫星有关的误差

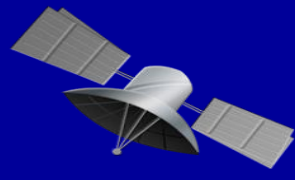


### 相对论效应：

**狭义相对论观点：** 一个频率为 $f_0$ 的振荡器安装飞行速度为 $v$ 的载体上，由于载体的运动，对地面观测者来说将产生频率变化。

**广义相对论观点：** 处于不同等位面的振荡器，其频率将由于引力位不同而发生变化。

**相对论效应的影响并非常数，经改正后仍有残差，它对GPS时的影响最大可达70ns，对精密定位不可忽略。**

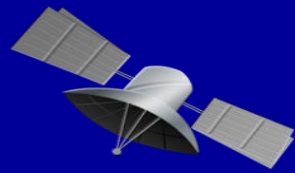


# 主要讲解内容

1. GPS测量误差的分类
2. 与卫星有关的误差
3. 与传播途径有关的误差
4. 与接收设备有关的误差
5. GPS测量误差处理方法



### 3. 与传播途径有关的误差



- 系统误差（影响）

- 与卫星有关的误差

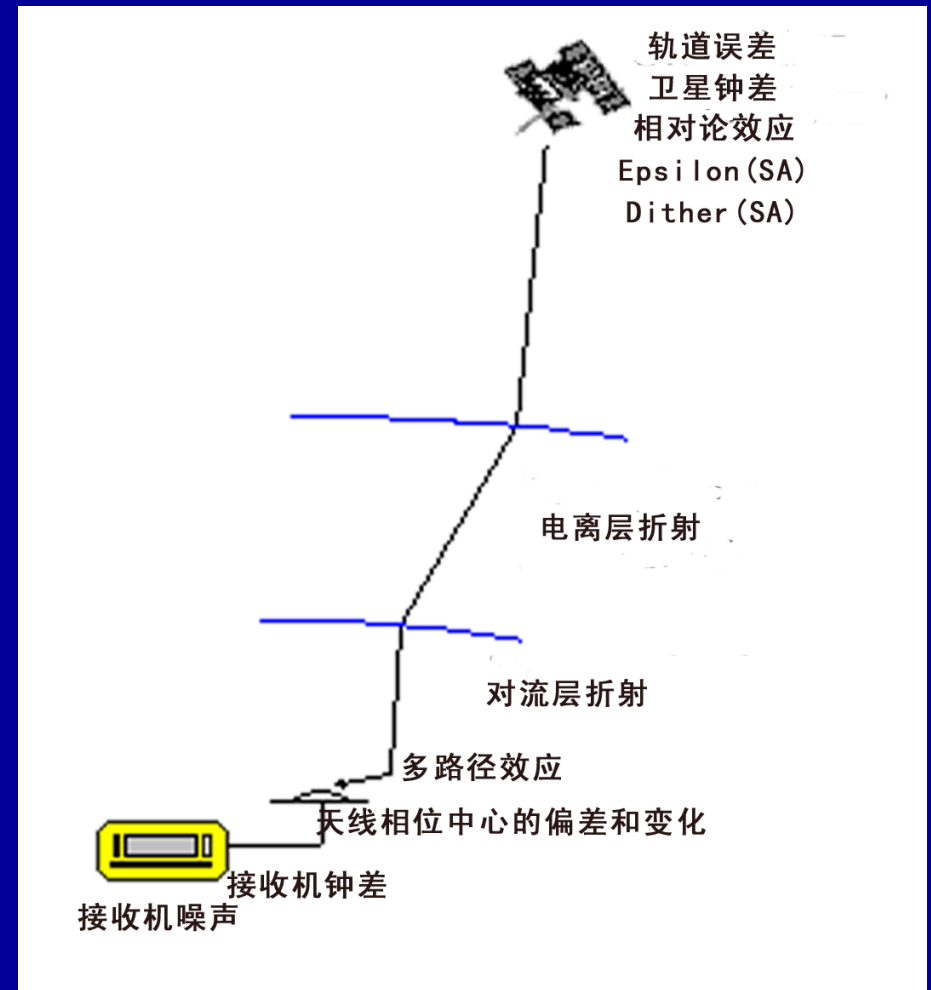
- 卫星轨道（星历）误差
    - 卫星钟差
    - 相对论效应

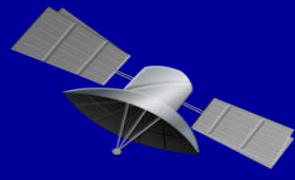
- 与传播途径有关的误差

- 对流层折射
    - 电离层折射
    - 多路径效应（随机特性）

- 与接收机有关的误差

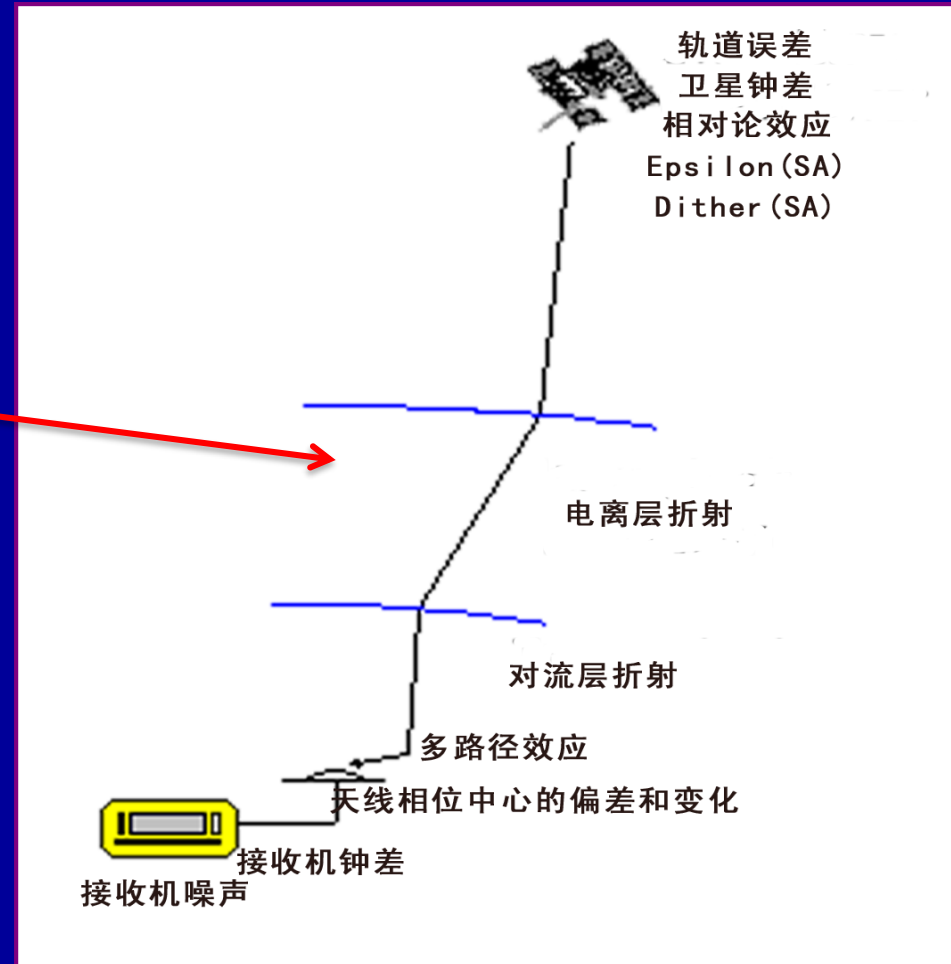
- 接收机钟差
    - 天线相位中心的偏差及变化
    - 各通道间的信号延迟误差



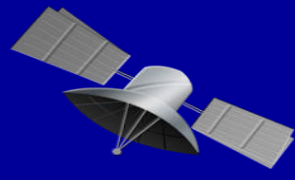


### 3. 与传播途径有关的误差

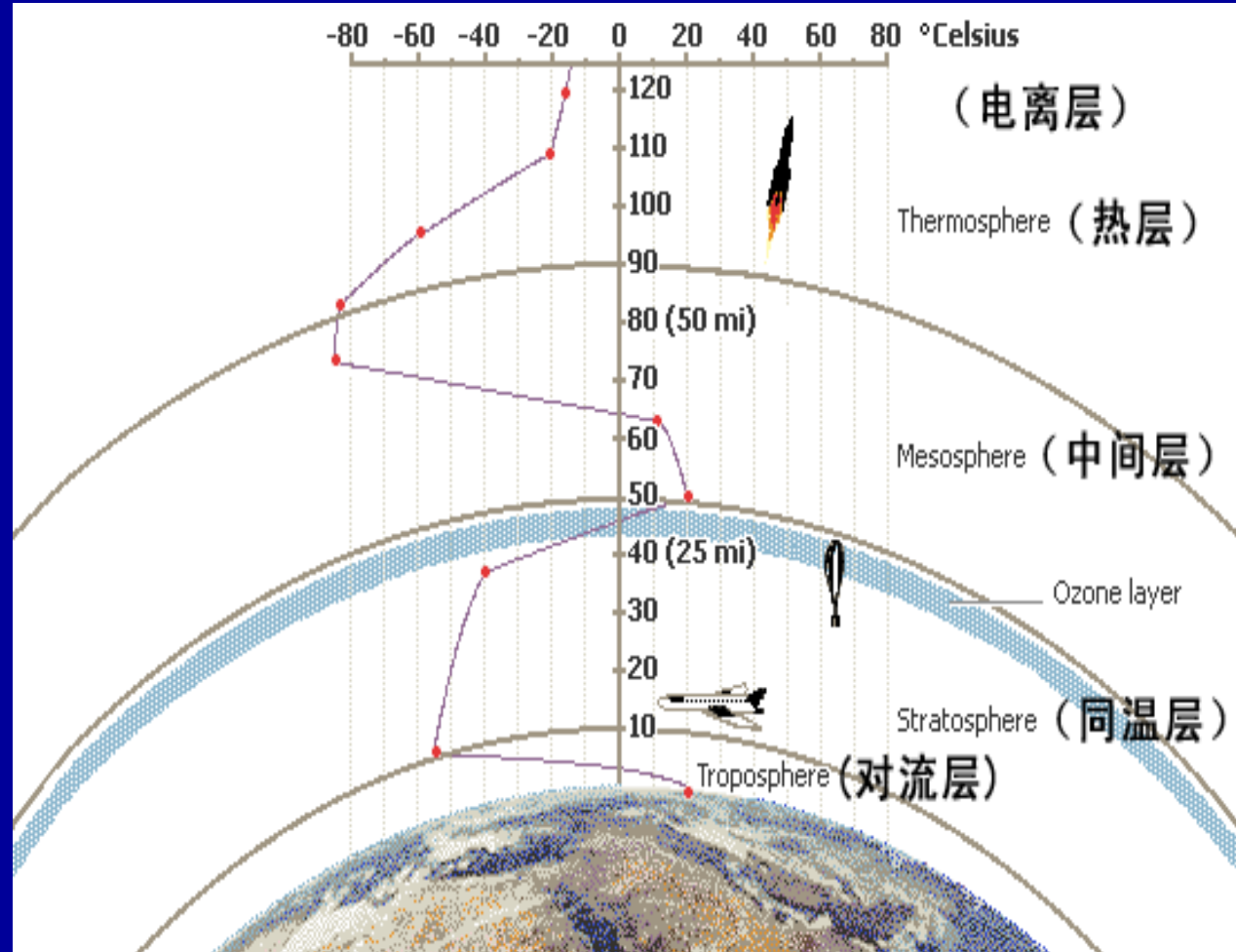
- 电离层延迟
- 对流层延迟
- 多路径效应

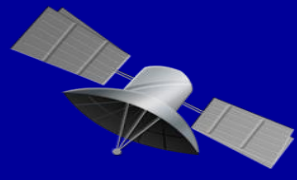


### 3. 与传播途径有关的误差



## 大气结构分布：





### 3. 与传播途径有关的误差

#### 大气结构分布：

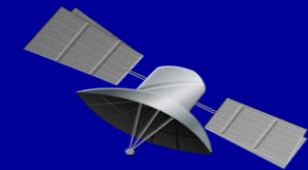
- 对流层

- 0km~50km
- 各种气体元素、水蒸气和尘埃等
- 非色（弥）散型介质

- 电离层

- 50km~1000km
- 带电粒子
- 色（弥）散型介质

### 3. 与传播途径有关的误差



#### 大气折射效应：

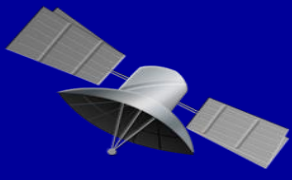
- 大气折射

- 信号在穿过大气时，速度将发生变化，传播路径也将发生弯曲，也称大气延迟。在GPS测量定位中，通常仅考虑信号**传播速度**的变化。

- 色散介质与非色散介质

- 色散介质：对不同频率的信号，所产生的折射效应也不同
- 非色散介质：对不同频率的信号，所产生的折射效应相同
- 对GPS信号来说，**电离层是色散介质，对流层是非色散介质。**

### 3. 与传播途径有关的误差



#### 电磁波的基本特性:

$$\omega = 2\pi \cdot f$$

$$f = \frac{1}{T}$$

$$\varphi = \frac{2\pi \cdot t}{T} + \varphi_0$$

$$v = \lambda \cdot f = \frac{\lambda}{T}$$

$\omega$ : 为角频率

$f$ : 为频率

$T$ : 为周期

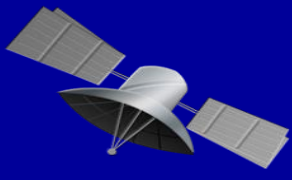
$\varphi$ : 为相位

$t$ : 为时间

$\varphi_0$ : 为初相

$v$ : 为波速

### 3. 与传播途径有关的误差



#### 大气折射与传播速度：

- 光速：

$$c = \lambda_{vac} \cdot f = \frac{\lambda_{vac}}{T}$$

- 折射率 $n$ 与折射系（指）数 $N$ ：

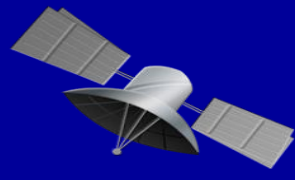
$$n = \frac{\lambda_{vac}}{\lambda} = \frac{c}{v}$$

$$N = (n - 1) \cdot 10^6$$

- 相速（载波）与群速（测距码）：

$$v_g = v_p - \lambda \frac{\partial v_p}{\partial \lambda}$$

$$n_g = n_p + f \frac{\partial n_p}{\partial f}$$



### 3. 与传播途径有关的误差

## 相速与群速：

- 相速

假设有一电磁波在空间传播，其波长为 $\lambda$ ，频率为 $f$ 。该电磁波相位的速度 $v_{ph}$ ，有 $v_{ph} = \lambda \cdot f$ 。其中相位的速度又简称为相速。

- 群速

对于频率略微不同的一群波来说，其最终能量的传播可以用“群速”表示，群速 $v_{gr} = -\frac{df}{d\lambda} \cdot \lambda^2$ 。

- 相速与群速的关系

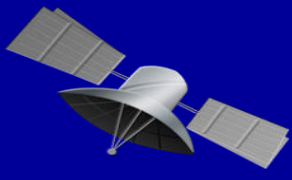
$$v_{gr} = v_{ph} - \lambda \cdot \frac{dv_{ph}}{d\lambda}$$

- 相折射率与群折射率的关系

$$n_{gr} = n_{ph} - \lambda \cdot \frac{dn_{ph}}{d\lambda} = n_{ph} + f \cdot \frac{dn_{ph}}{df}$$



### 3. 与传播途径有关的误差



#### 电离层折射影响：

##### – 对载波的影响：

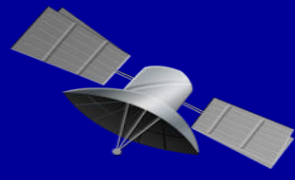
$$n_p = 1 - 40.3N_e f^{-2}$$
$$v_p = \frac{c}{n_p} = c(1 + 40.3N_e f^{-2})$$

##### – 对伪距的影响：

$$n_g = 1 + 40.3N_e f^{-2}$$
$$v_g = \frac{c}{n_g} = c(1 - 40.3N_e f^{-2})$$

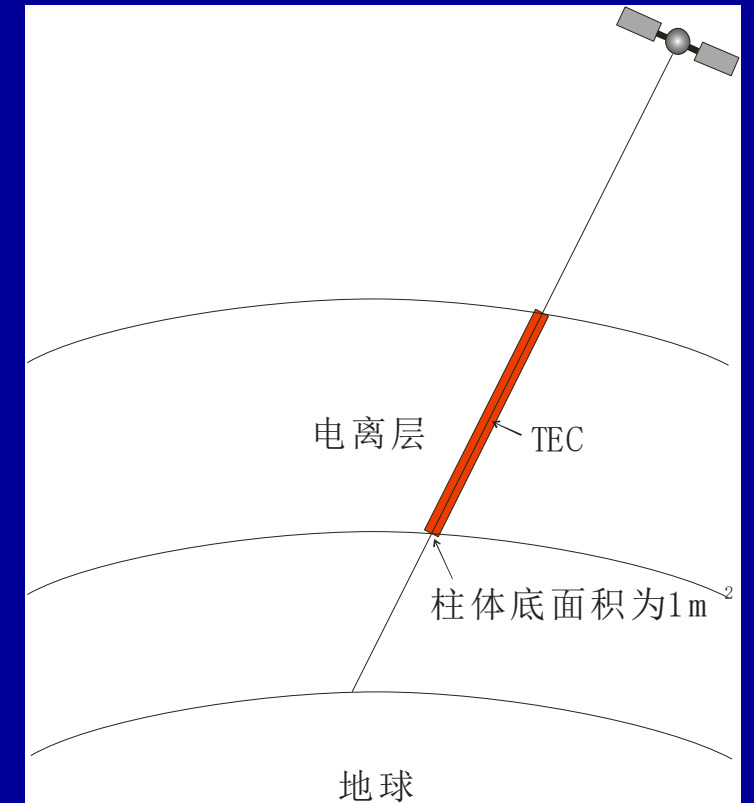
$$S = \int_{\Delta t} v_g dt = c \cdot \Delta t - c \frac{40.3}{f^2} \int_{s'} N_e ds$$

### 3. 与传播途径有关的误差



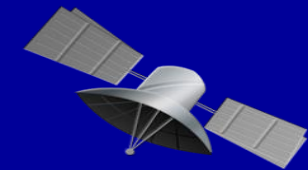
#### 电子密度与总电子含量：

- **电子密度**：单位体积中所包含的电子数。
- **总电子含量 (TEC - Total Electron Content)**：底面积为一个单位面积时沿信号传播路径贯穿整个电离层的一个柱体内所含的电子总数。



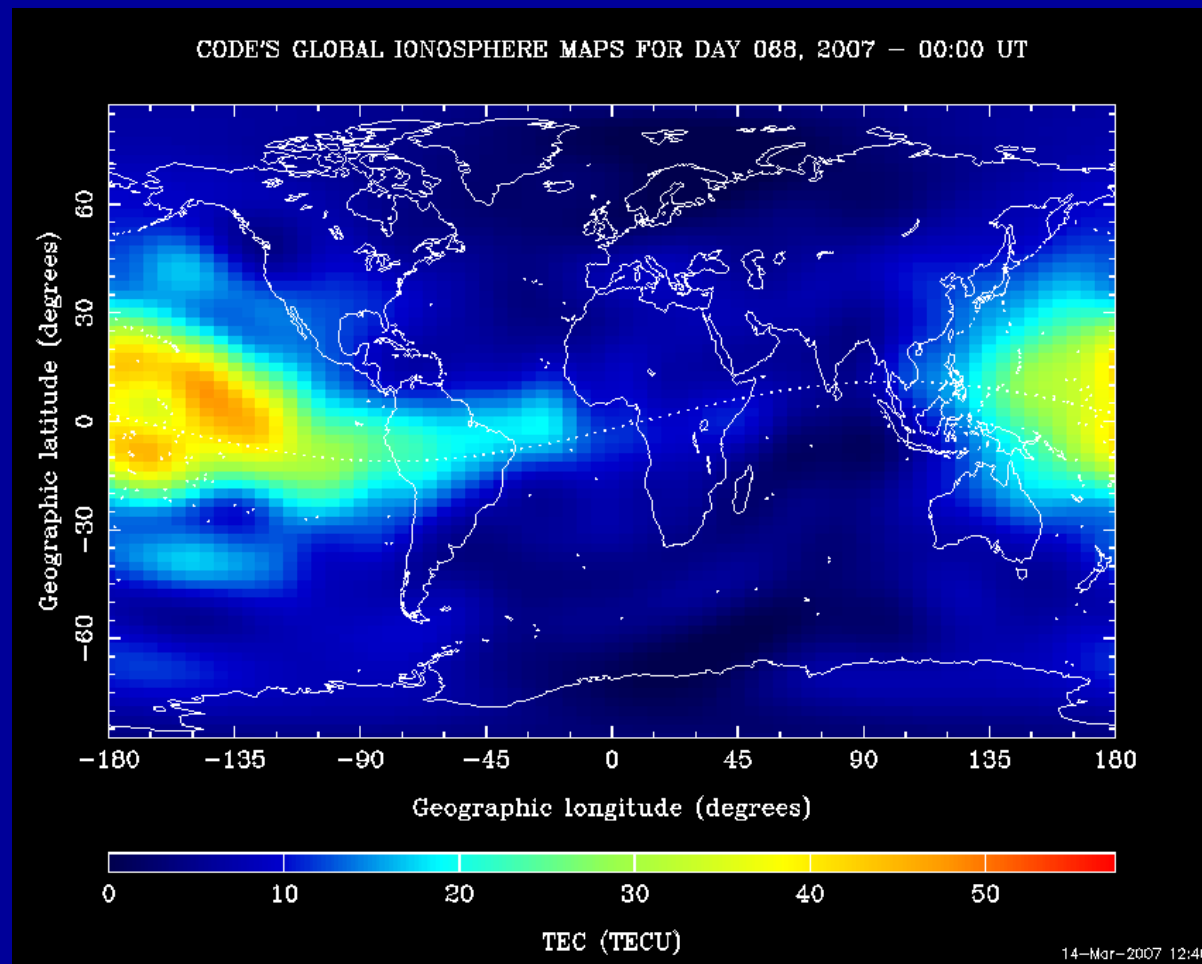
电离层对GPS信号影响在天顶方向可达50m，在接近地面则可达150m。

### 3. 与传播途径有关的误差

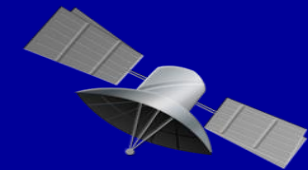


#### 影响电子密度因素：

- 与高度有关
- 与地方时有关
- 与太阳活动有关
- 与季节有关
- 与位置有关

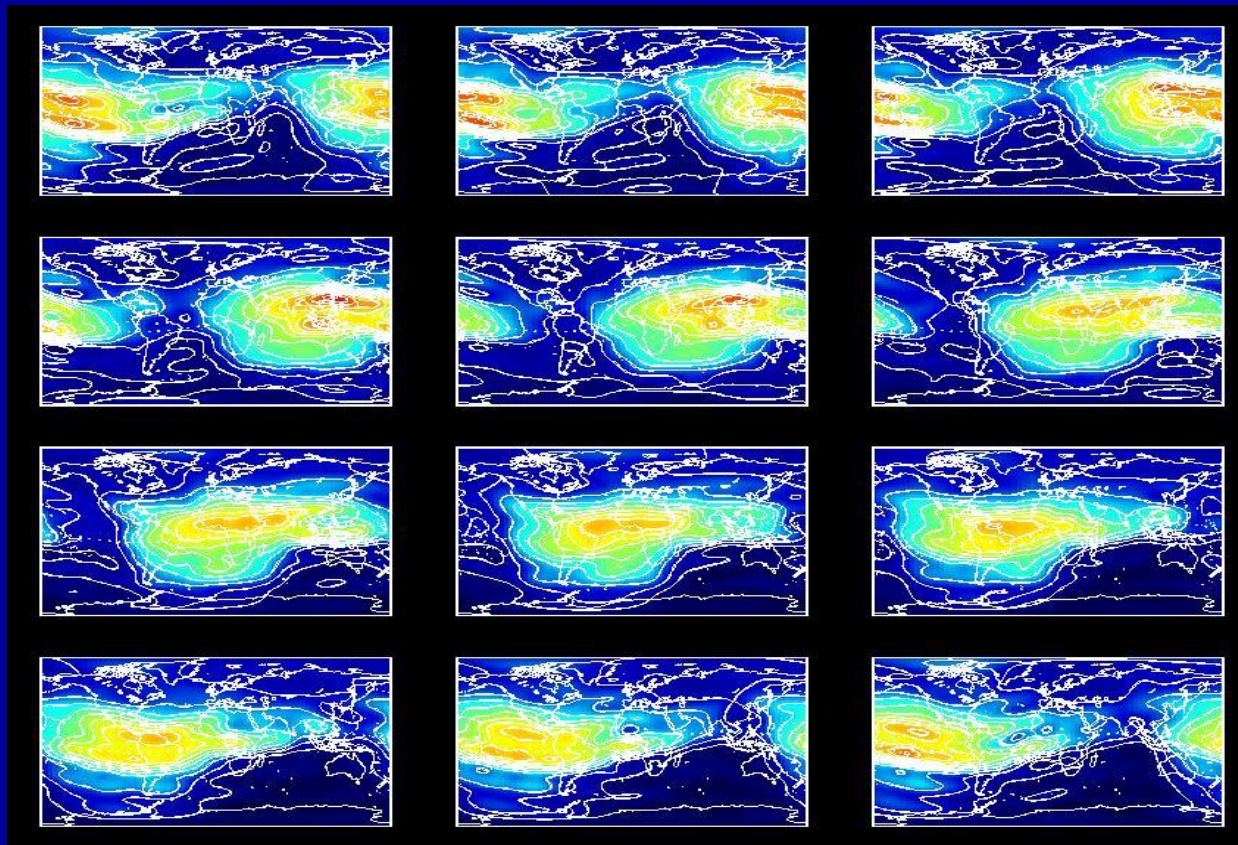


### 3. 与传播途径有关的误差

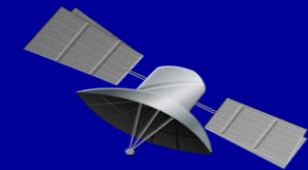


#### 电子密度时空分布：

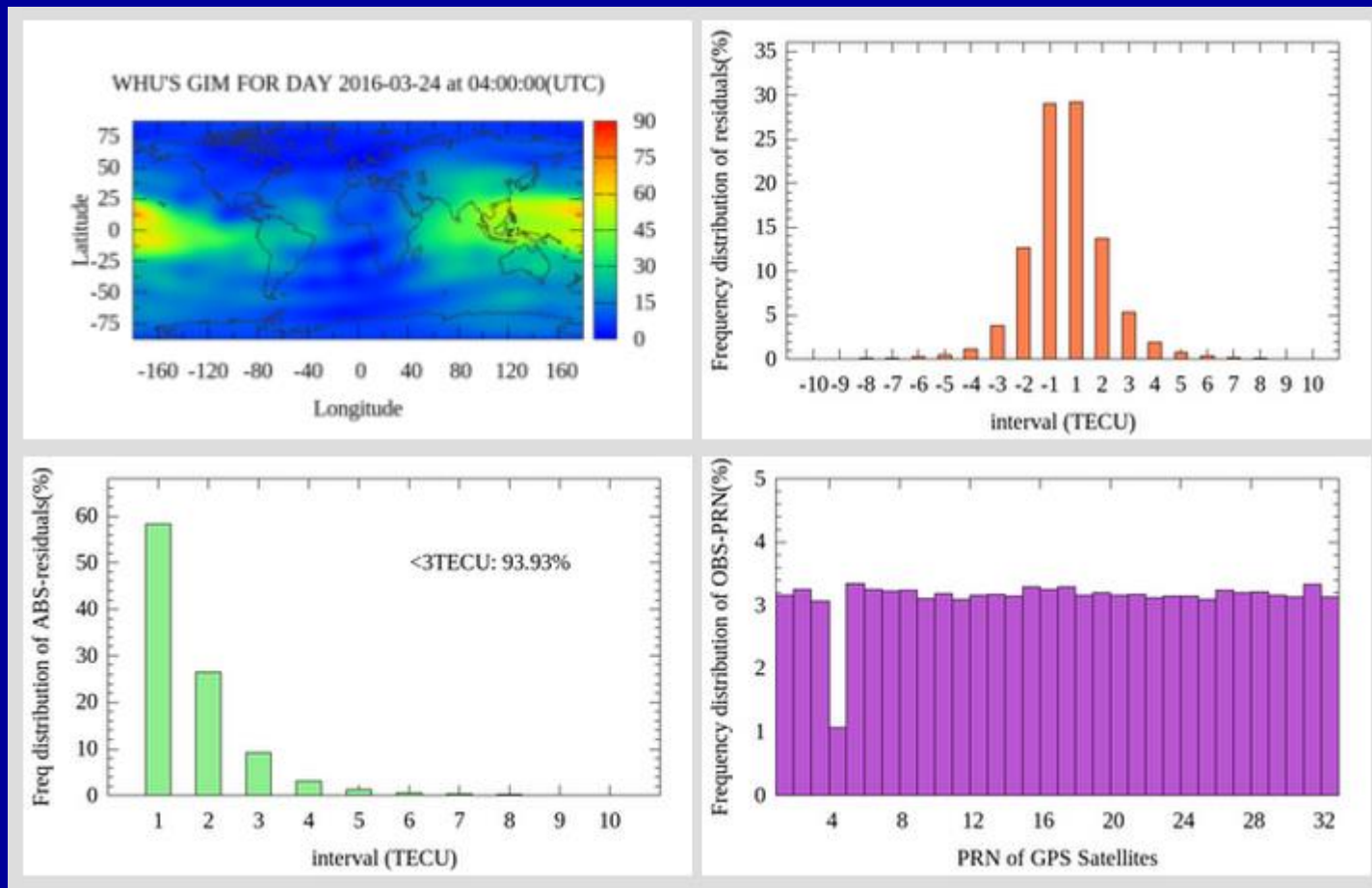
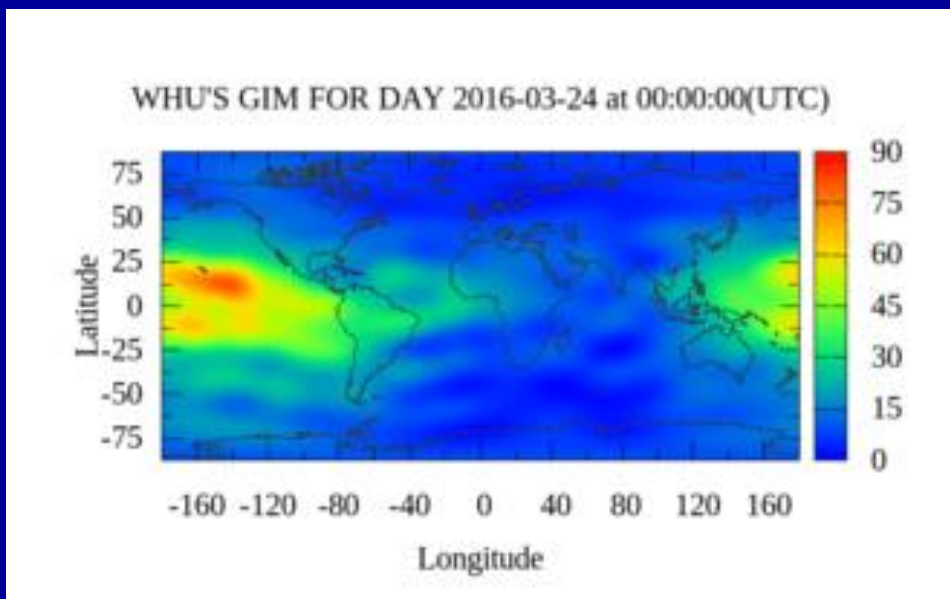
电离层影响与地理位置、  
温度和卫星高度角等有关。  
白天为晚间的5倍，夏季为冬  
季的4倍。天顶方向最大可达  
50m，地平方向可达150m。因  
此仪器要设置卫星高度角。



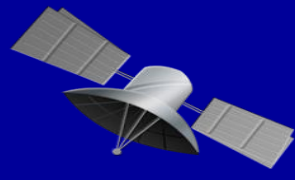
# 3. 与传播途径有关的误差



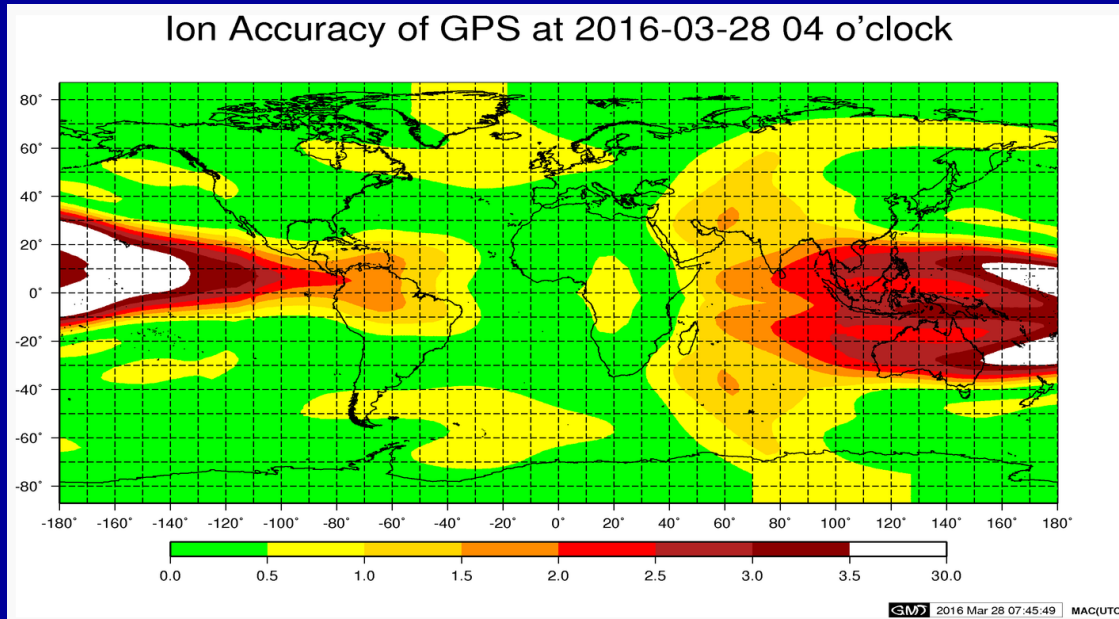
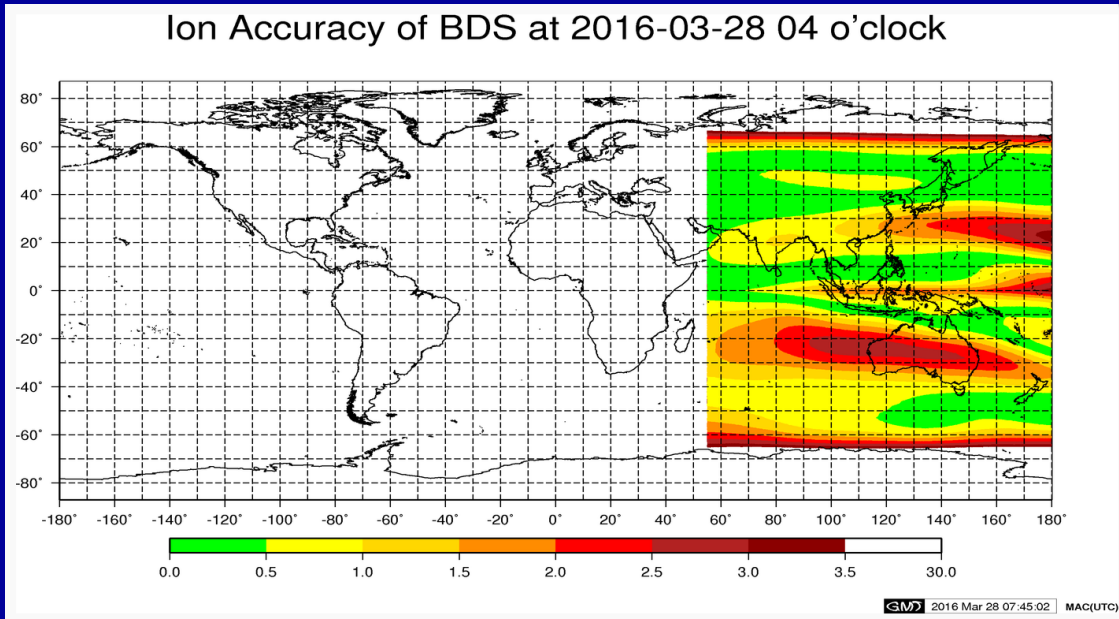
武汉大学于2016年成为  
IGS电离层分析中心



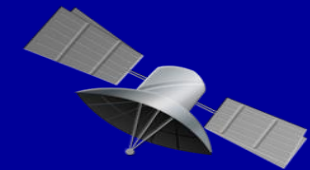
### 3. 与传播途径有关的误差



BDS与GPS电离层改正精度：



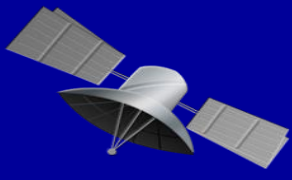
### 3. 与传播途径有关的误差



#### 电离层延迟改正方法：

- 经验模型改正
  - 方法：根据以往观测结果所建立的模型
  - 改正效果：差
- 双频改正
  - 方法：利用双频观测值直接计算出延迟改正或组成无电离层延迟的组合观测量
  - 效果：改正效果最好
- 实测模型改正
  - 方法：利用实际观测所得到的离散的电离层延迟建立模型
  - 效果：改正效果较好

### 3. 与传播途径有关的误差

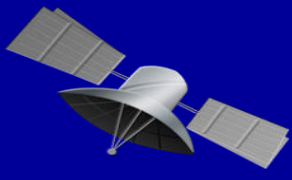


#### 电离层改正的经验模型：

- **Bent模型**
  - 由美国的R. B. Bent提出
  - 描述电子密度
  - 是经纬度、时间、季节和太阳辐射流量的函数
- **国际参考电离层模型 (IRI - International Reference Ionosphere)**
  - 由国际无线电科学联盟URSI和空间研究委员会提出
  - 描述高度为50km-2000km的区间内电子密度、电子温度、电离层温度、电离层的成分等
  - 以地点、时间、日期等为参数



### 3. 与传播途径有关的误差

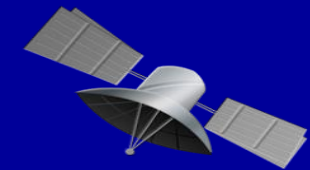


#### 电离层改正的经验模型:

- **Klobuchar 模型**

- 由美国的J. A. Klobuchar提出
- 描述电离层的时延
- 广泛地用于GPS导航定位中
- GPS卫星的导航电文中播发其模型参数供用户使用

### 3. 与传播途径有关的误差



#### 电离层改正的**实测模型**：

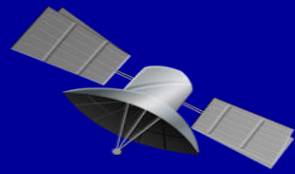
- **基本思想**

- 利用基准站的双频观测数据计算电离层延迟
- 利用所得到的电离层延迟量建立局部或全球的TEC实测模型

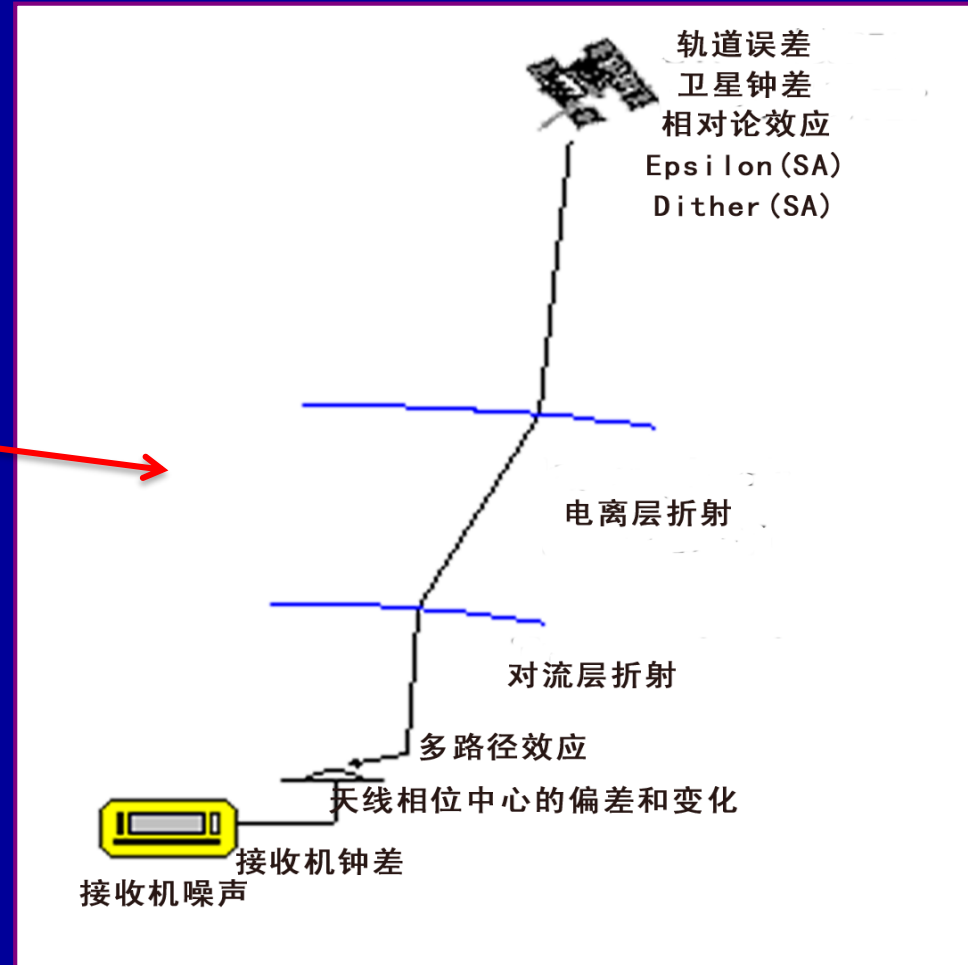
- **类型**

- 局部模型  
适用于局部区域
- 全球模型  
适用于全球区域

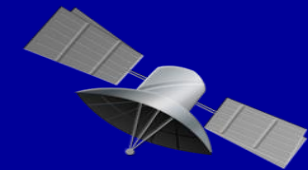
### 3. 与传播途径有关的误差



- 电离层延迟
- 对流层延迟
- 多路径效应

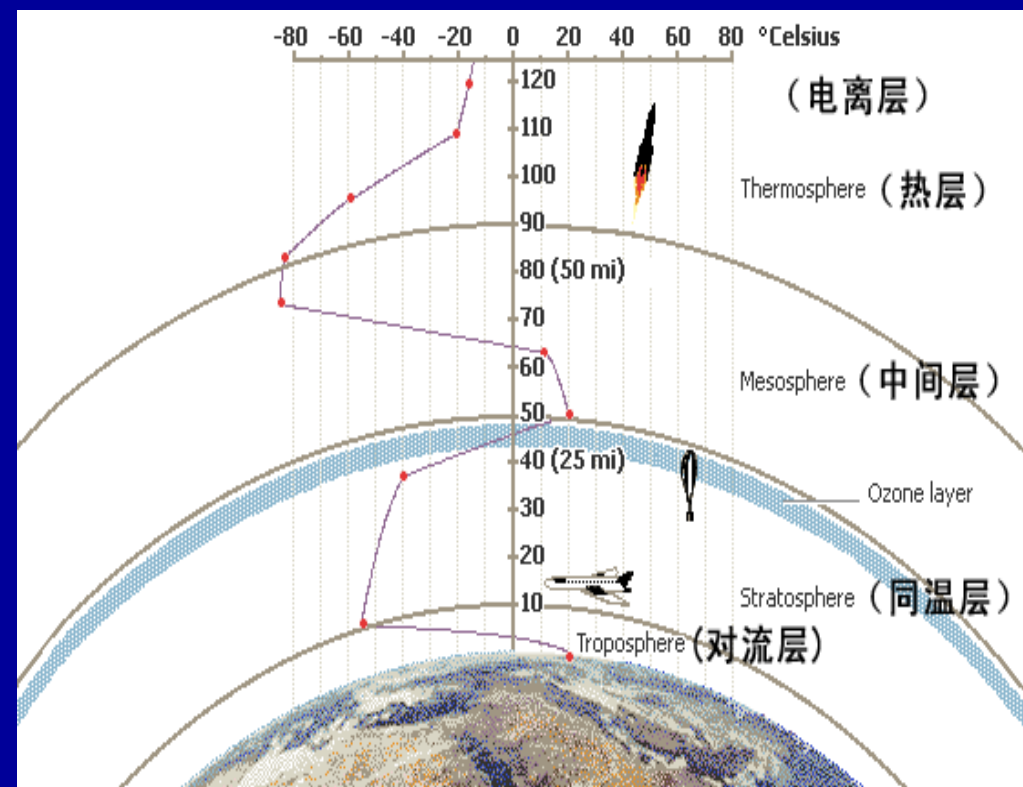


### 3. 与传播途径有关的误差

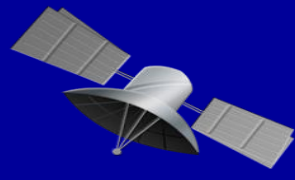


#### 大气结构分布：

对流层对GPS信号影响在天顶方向可达2.5m，在高度角为 $10^\circ$ 时约为20m（中纬度地区）。



### 3. 与传播途径有关的误差



#### 对流层的非色散效应：

– 折射率与信号波长的关系

$$N \times 10^6 = 287.604 + 1.6288 \cdot \lambda^{-2} + 0.0136 \cdot \lambda^{-4}$$

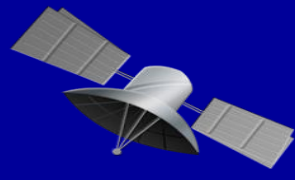
– 对流层对不同波长的波的折射效应

	波长 $\lambda$	$N \cdot 10^6$
红光	0.72	290.7966
紫光	0.40	298.3153
L1	1902936.728	287.6040
L2	2442102.134	287.6040

– 结论

- 对于GPS卫星所发送的电磁波信号，对流层不具有色散效应

### 3. 与传播途径有关的误差



#### 大气折射率与气象元素的关系：

- 大气折射率N与温度、气压和湿度的关系

$$N = N_d + N_w = 77.6 \frac{P}{T} + 77.6 \times 4810 \frac{e}{T^2}$$

其中：

$N_d$ 称为干气分量；

$N_w$ 称为湿气分量；

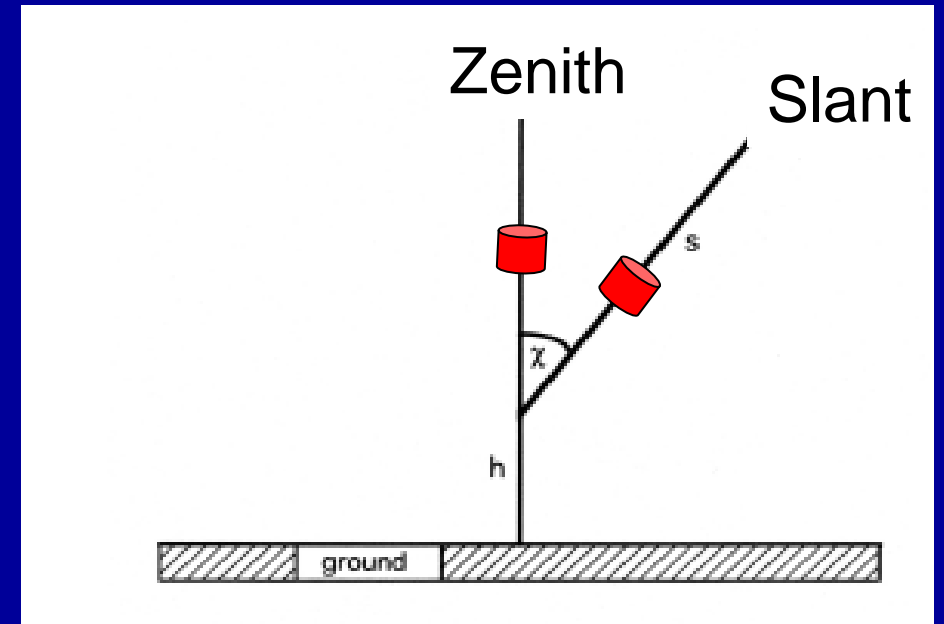
$P$ 为大气压，单位 $mbar$ ；

$T$ 为气温，为绝对温度，单位 $K$ ；

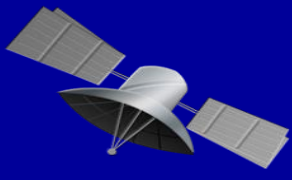
$e$ 为水气压，单位 $mbar$ 。

- 对流层延迟与大气折射率N

$$\Delta s = 10^{-16} \cdot \int_s N ds = 10^{-16} \cdot \int_s N_d ds + 10^{-16} \cdot \int_s N_w ds$$



### 3. 与传播途径有关的误差



Hopfield对流层改正模型:

$$\Delta s = \Delta s_d + \Delta s_w = \frac{K_d}{\sin(E^2 + 6.25)^{1/2}} + \frac{K_w}{\sin(E^2 + 2.25)^{1/2}}$$

$$K_d = 155.2 \times 10^{-7} \times \frac{P_s}{T_s} \times (h_d - h_s)$$

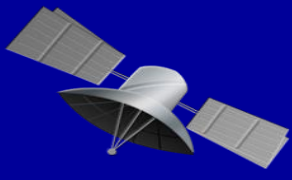
$$K_w = 155.2 \times 10^{-7} \times \frac{4810}{T_s^2} \times e_s \times (h_w - h_s)$$

$$h_d = 40136 + 148.72 \times (T_s - 273.16)$$

$$h_w = 11000$$

$e_s$ 为水气压

### 3. 与传播途径有关的误差



Saastamoinen 对流层改正模型:

$$\Delta s = \frac{0.002277}{\sin E'} \left[ P_s + \left( \frac{1255}{T_s} + 0.05 \right) e_s - \frac{a}{\text{tg}^2 E} \right]$$

其中:

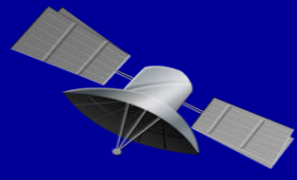
$$E' = E + \Delta E$$

$$\Delta E = \frac{16''}{T_s} \left( P_s + \frac{4810}{T_s} e \right) \text{ctg} E$$

$$a = 1.16 - 0.15 \times 10^{-3} \times h_s + 0.716 \times 10^{-8} h_s^2$$



### 3. 与传播途径有关的误差



#### Black对流层改正模型:

$$\Delta s = K_d \left[ \sqrt{1 - \left( \frac{\cos E}{1 + (1 - l_0) \frac{h_d}{h_s}} \right)^2} - b(E) \right] + K_w \left[ \sqrt{1 - \left( \frac{\cos E}{1 + (1 - l_0) \frac{h_w}{h_s}} \right)^2} - b(E) \right]$$

其中:

$$l_0 = 0.833 + [0.076 + 0.00015 \times (T - 273)]^{-0.3 \cdot E}$$

$$b = 1.92(E^2 + 0.6)^{-1}$$

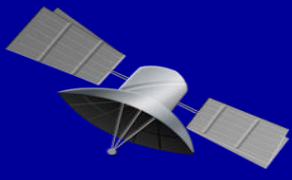
$$h_d = 148.98(T_s - 3.96)$$

$$h_w = 13000$$

$$K_d = 0.002312 \times (T_s - 3.69) \times \frac{P_s}{T_s}$$

$$K_w = 0.20$$

### 3. 与传播途径有关的误差



#### 气象元素的测定：

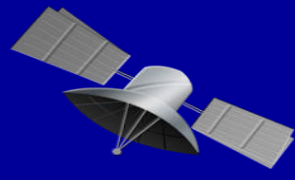
- 气象元素

- 干温、湿温、气压
- 干温、相对湿度、气压

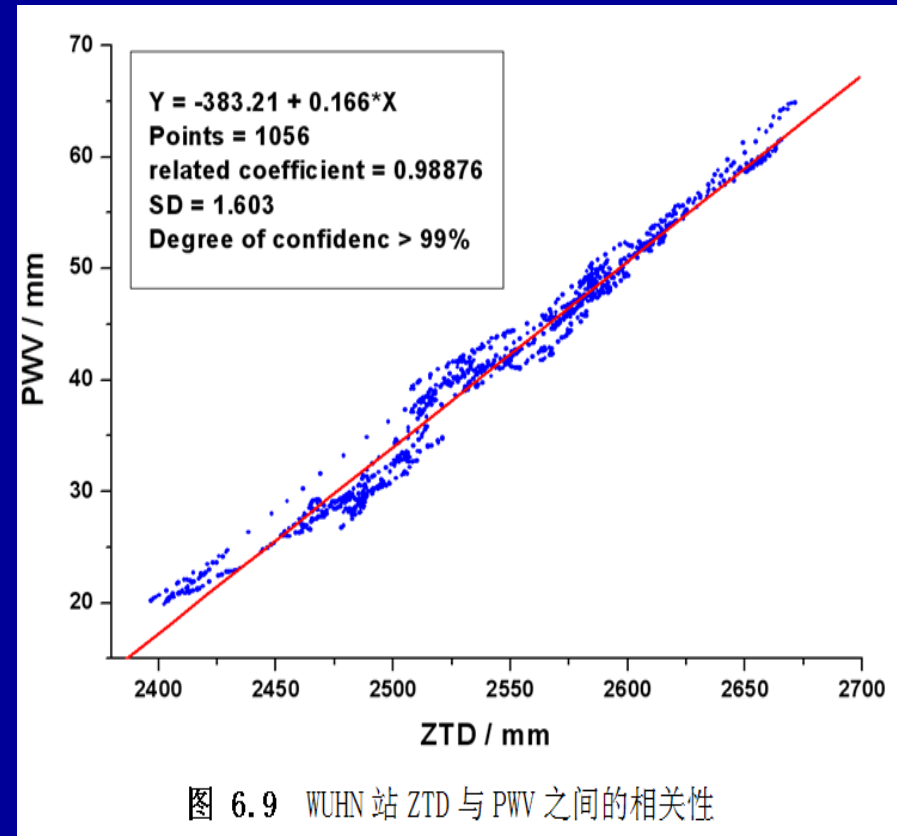
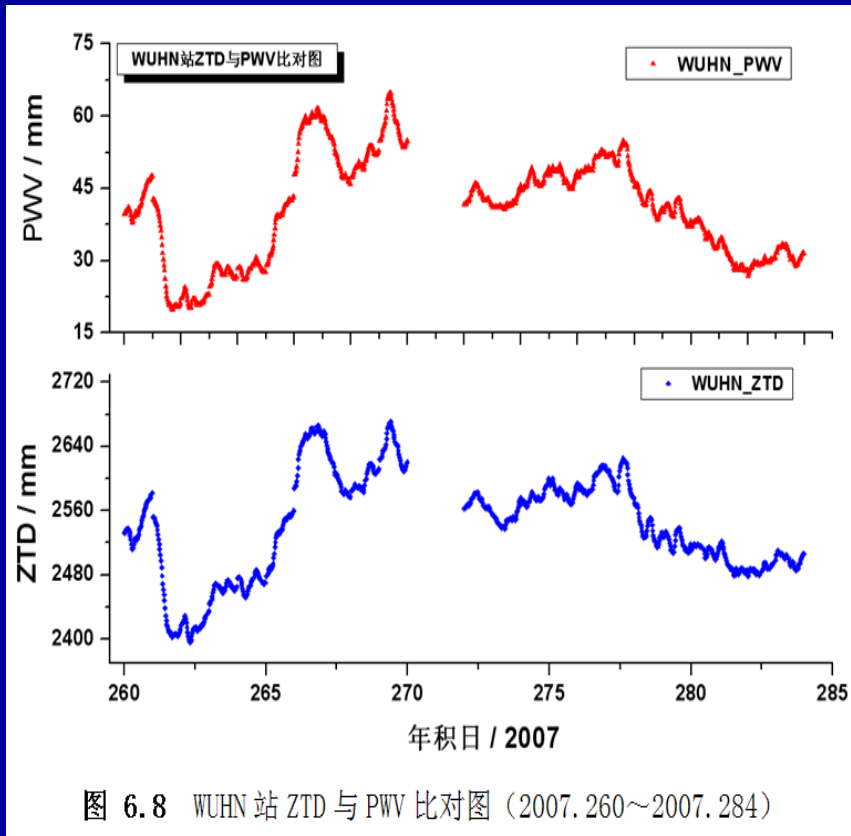
- 测定方法

- 普通仪器：通风干湿温度表、空盒气压计
- 自动化的电子仪器

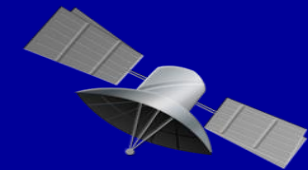
### 3. 与传播途径有关的误差



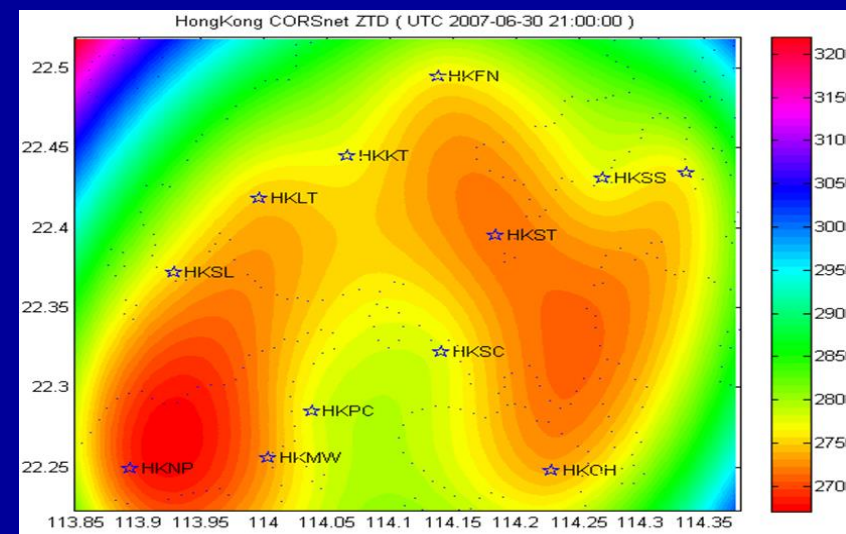
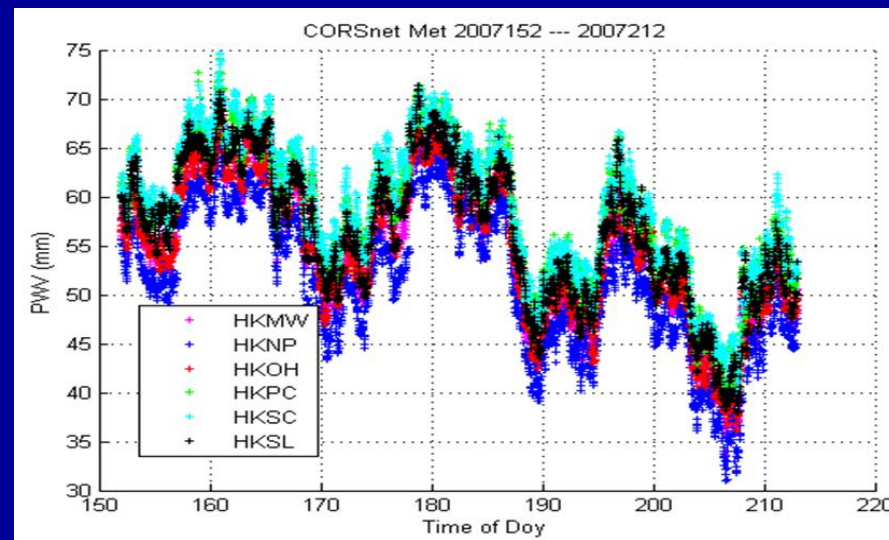
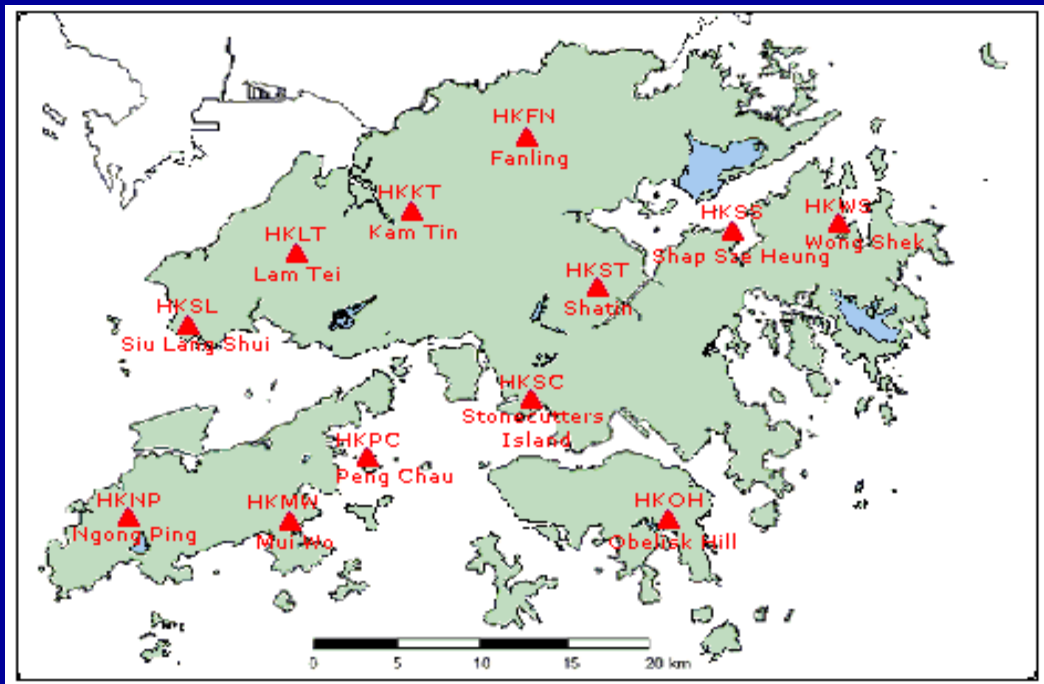
## 对流层误差的有效利用（GNSS气象学）：



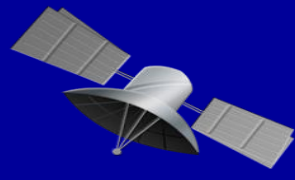
# 3. 与传播途径有关的误差



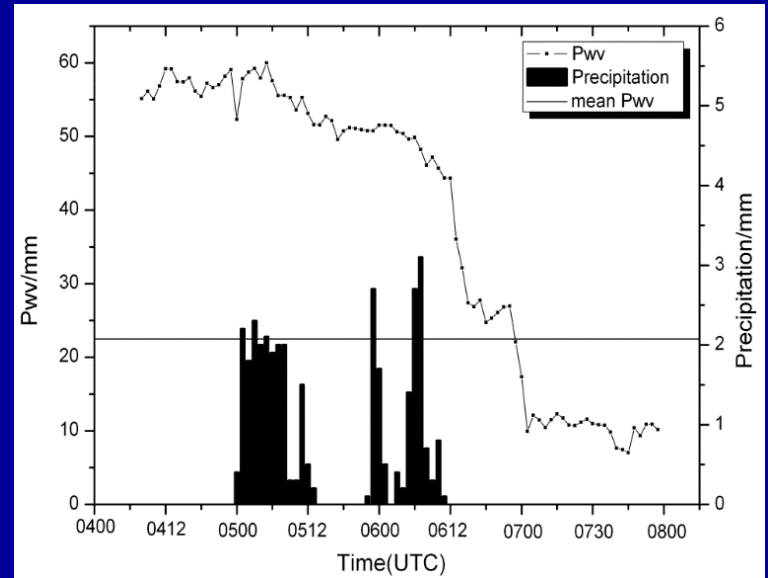
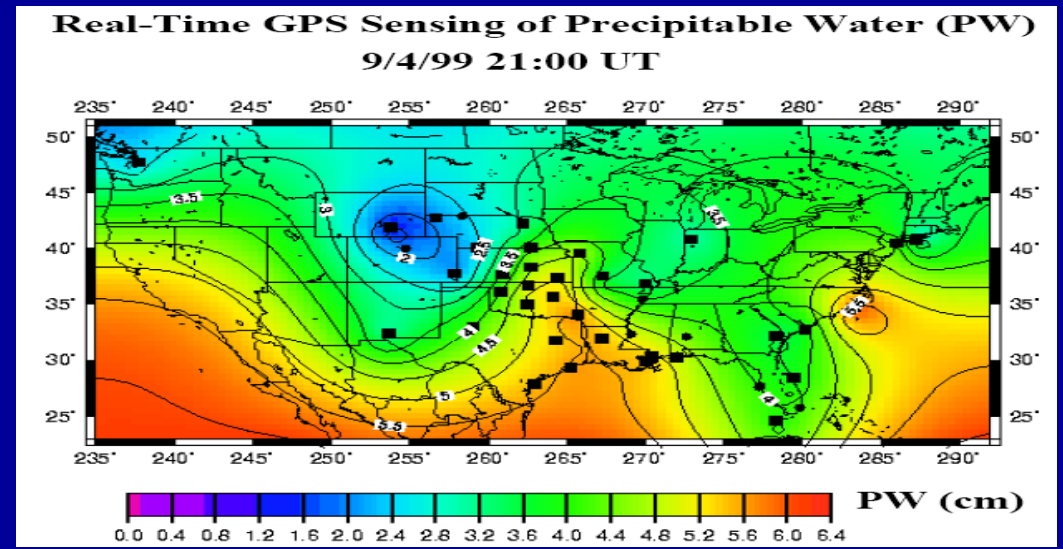
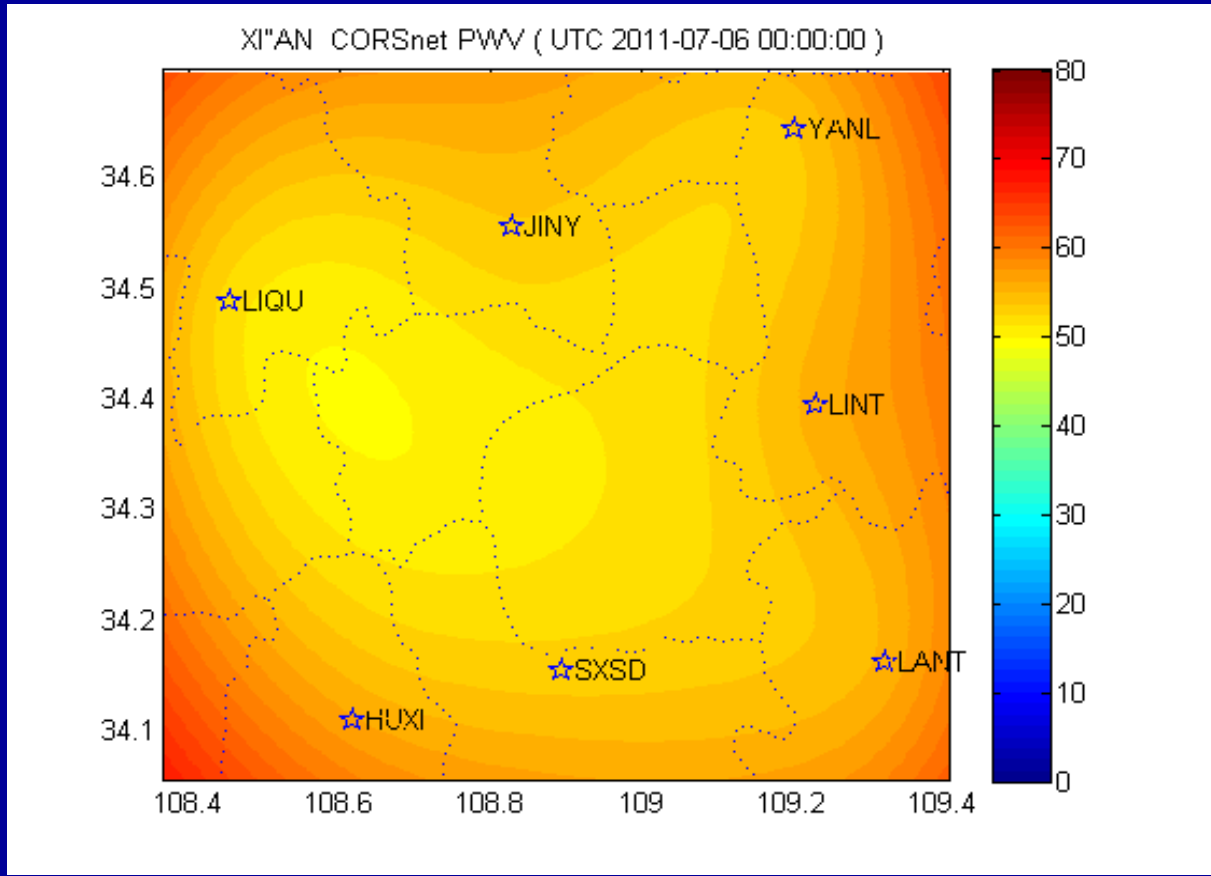
对流层误差的有效利用:



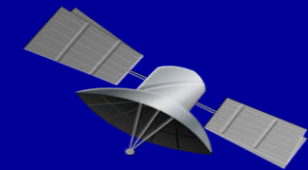
# 3. 与传播途径有关的误差



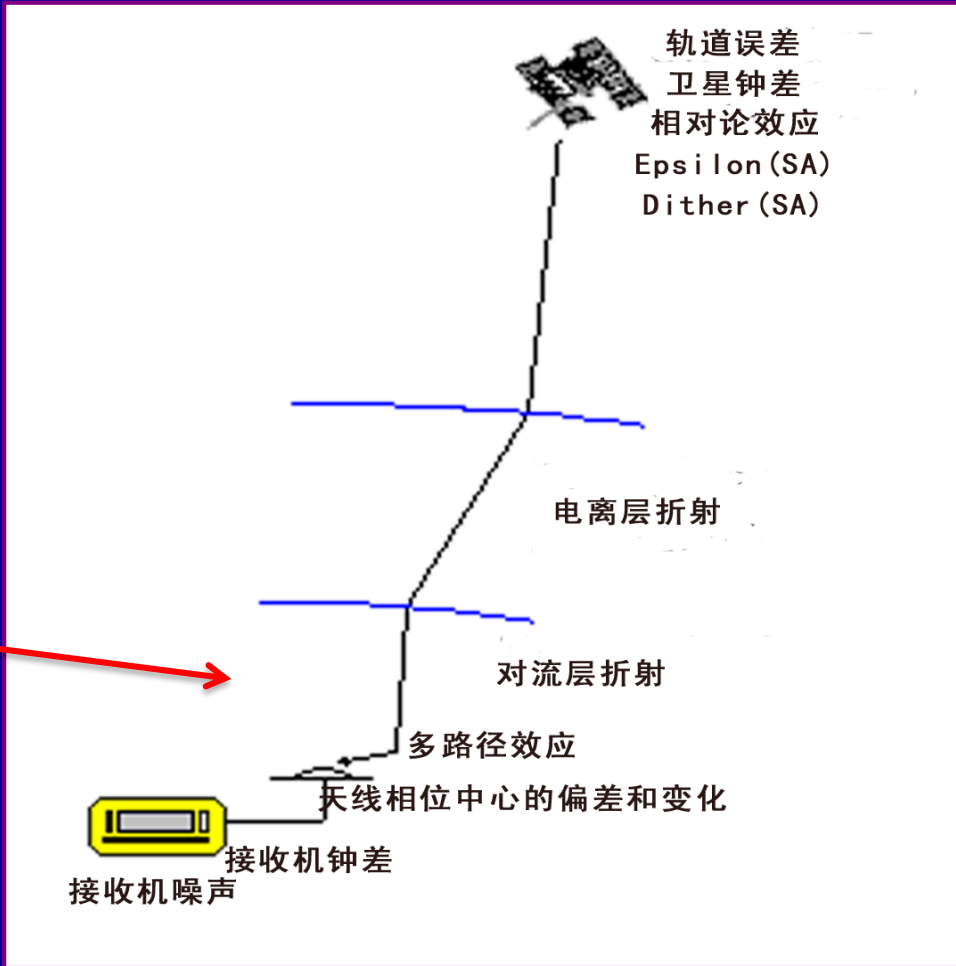
## 对流层误差的有效利用：



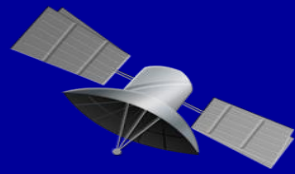
### 3. 与传播途径有关的误差



- 电离层延迟
- 对流层延迟
- 多路径效应

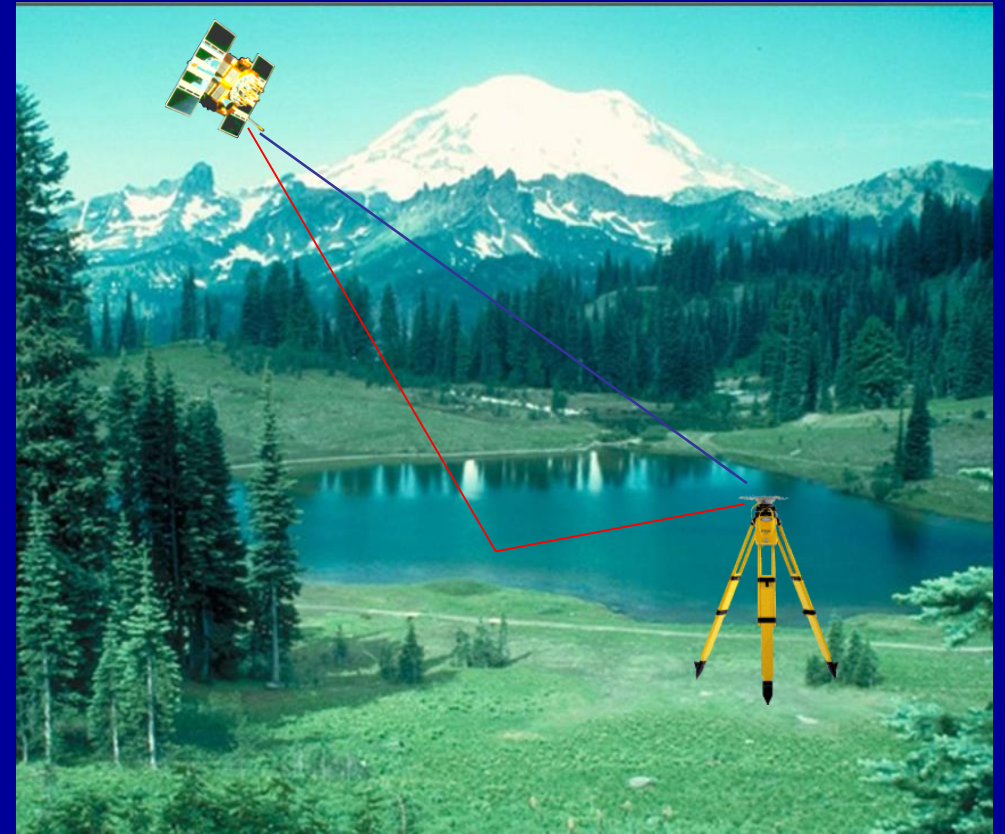


### 3. 与传播途径有关的误差

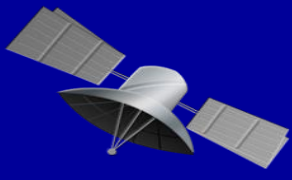


#### 多路径误差与多路径效应：

- 在GPS测量中，被测站附近的物体所反射的卫星信号（反射波）被接收机天线所接收，与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值产生所谓的“多路径误差”。
- 由于多路径的信号传播所引起的干涉时延效应称为多路径效应。



### 3. 与传播途径有关的误差

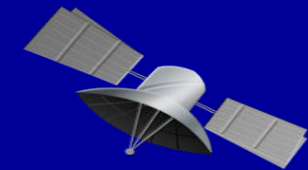


引起多路径效应的因素：

- 测站周围环境
- 周围反射体性质
- GNSS接收机天线性能

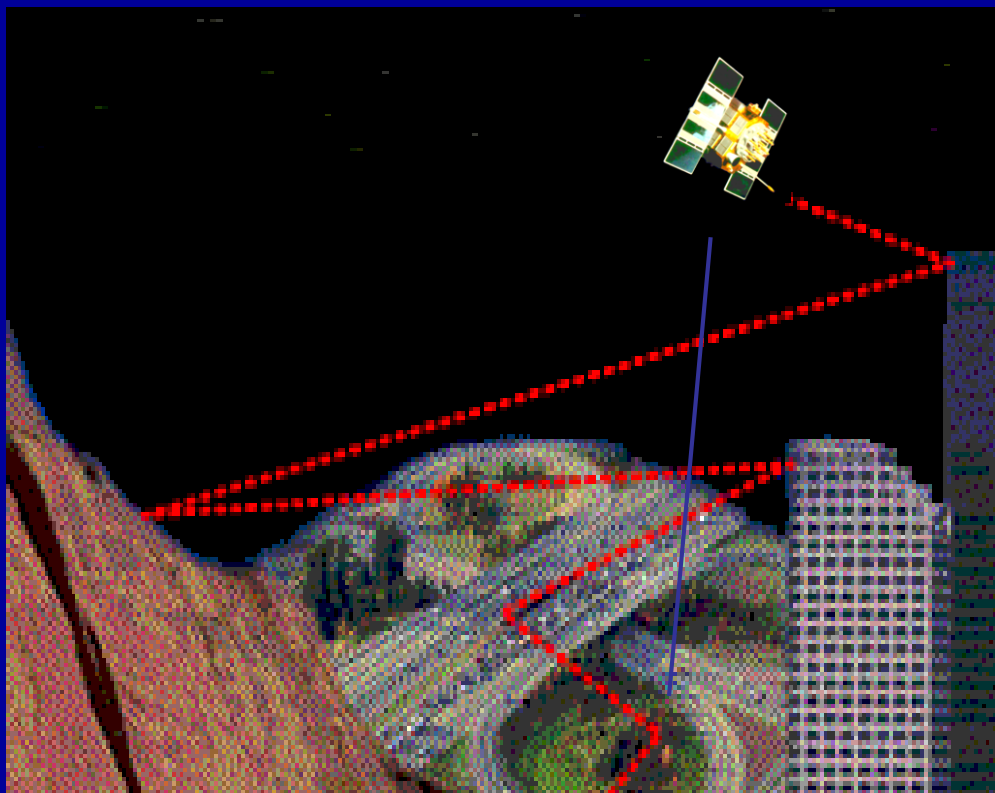


### 3. 与传播途径有关的误差

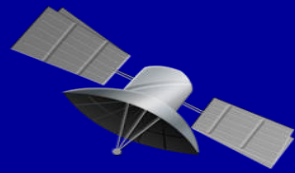


消弱多路径效应的方法：**外业观测**

- 选择合适的测站，避开易产生多路径的环境

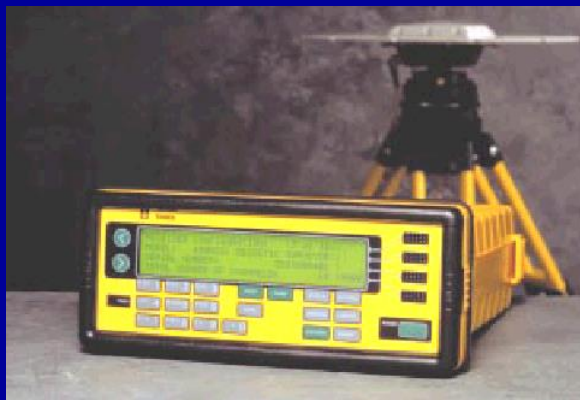


### 3. 与传播途径有关的误差

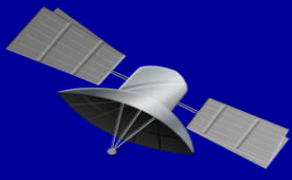


#### 消弱多路径效应的方法：观测仪器

- 采用抗多路径误差的仪器设备
  - 抗多路径的天线：带抑径板或抑径圈的天线、极化天线。
  - 抗多路径的接收机：窄相关技术等。



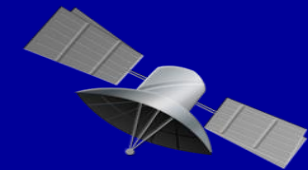
### 3. 与传播途径有关的误差



消弱多路径效应的方法：**内业处理**

- 加权
- 参数法
- 滤波法
- 信号分析法

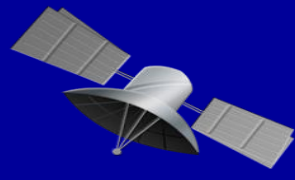
### 3. 与传播途径有关的误差



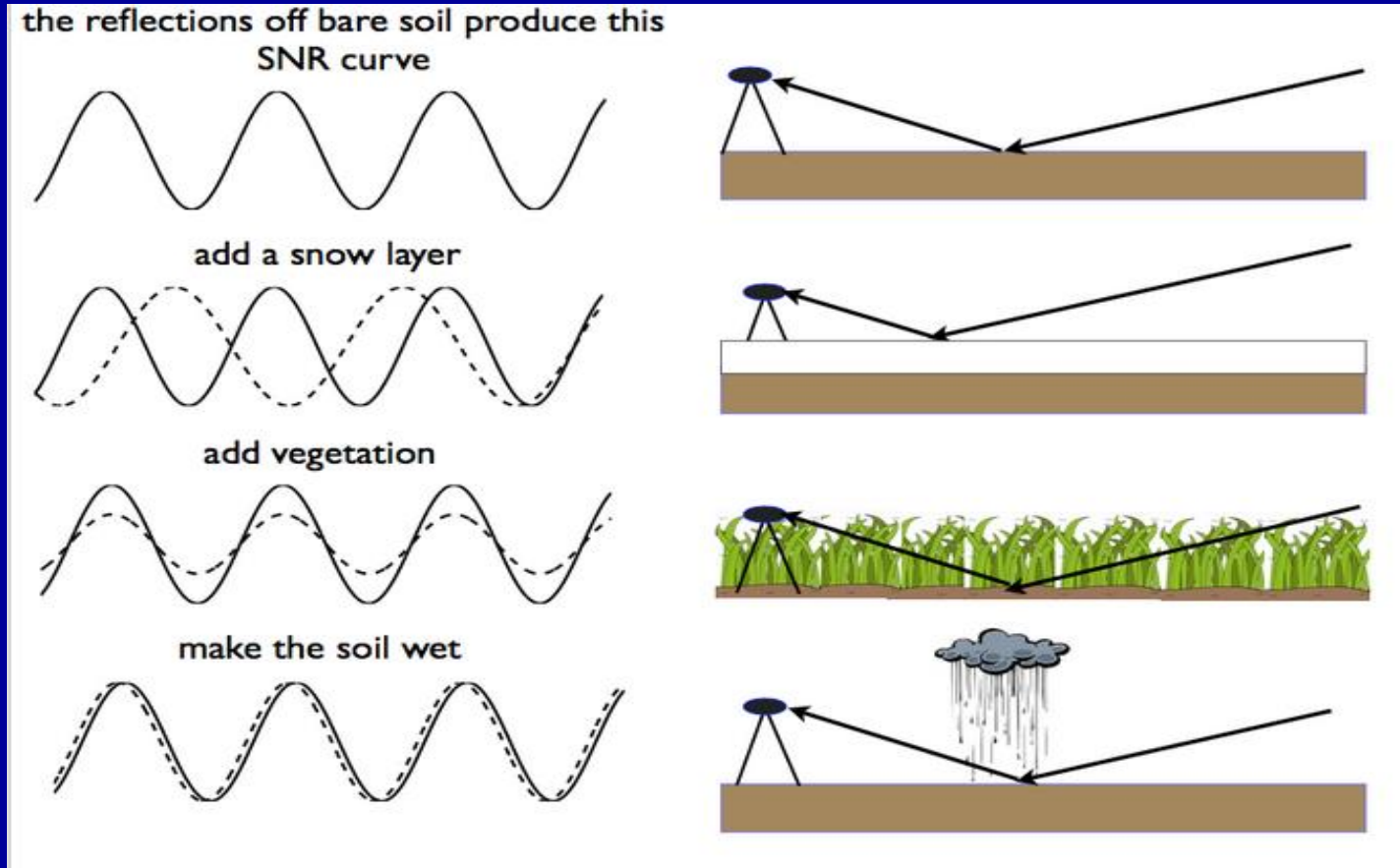
多路径效应的有效利用：GNSS-R、GNSS-MR



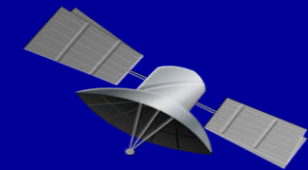
### 3. 与传播途径有关的误差



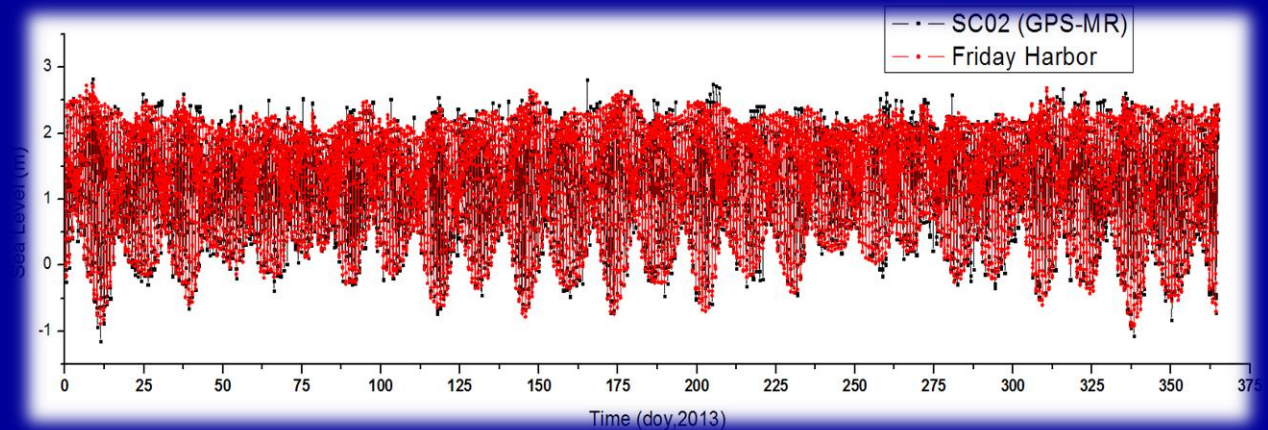
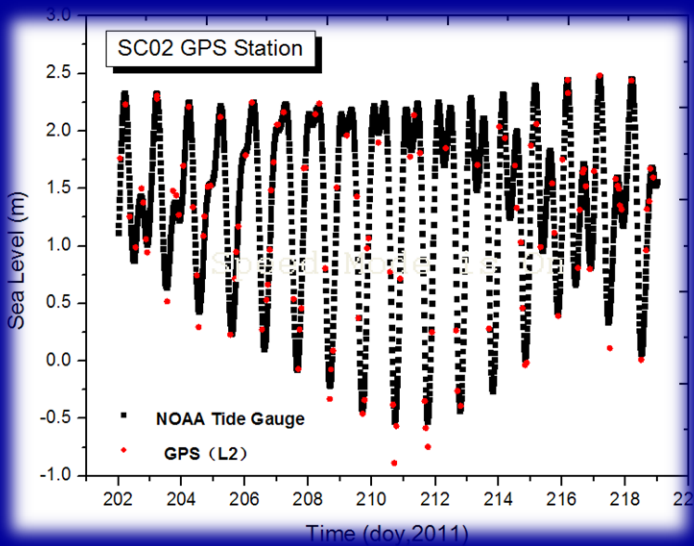
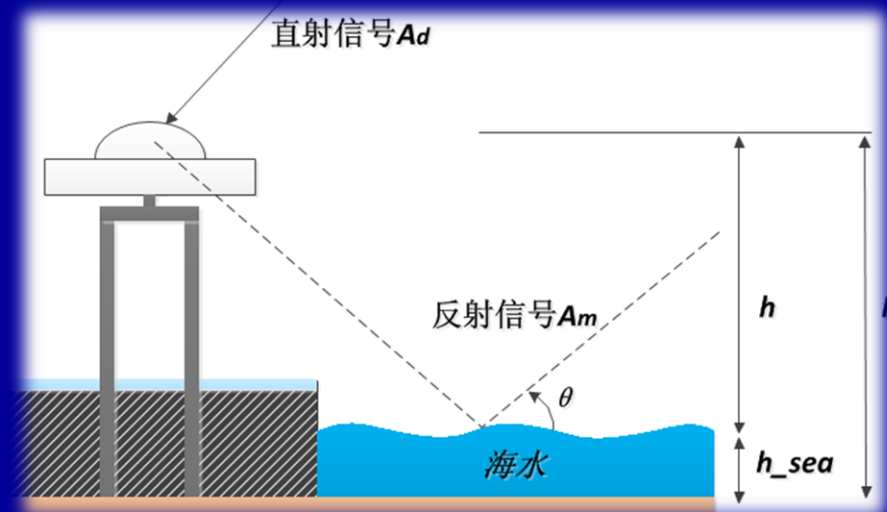
## 多路径效应的有效利用：GNSS-MR技术



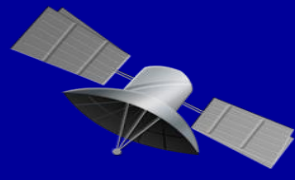
### 3. 与传播途径有关的误差



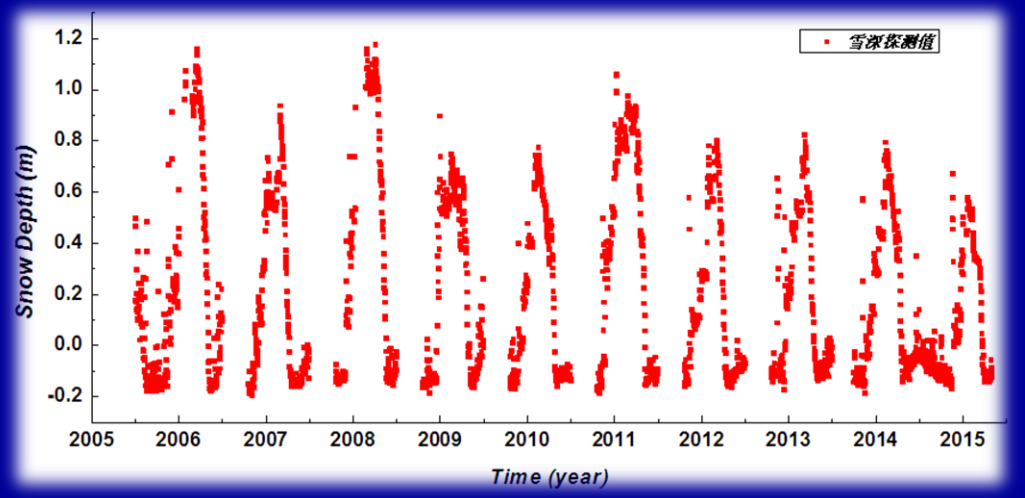
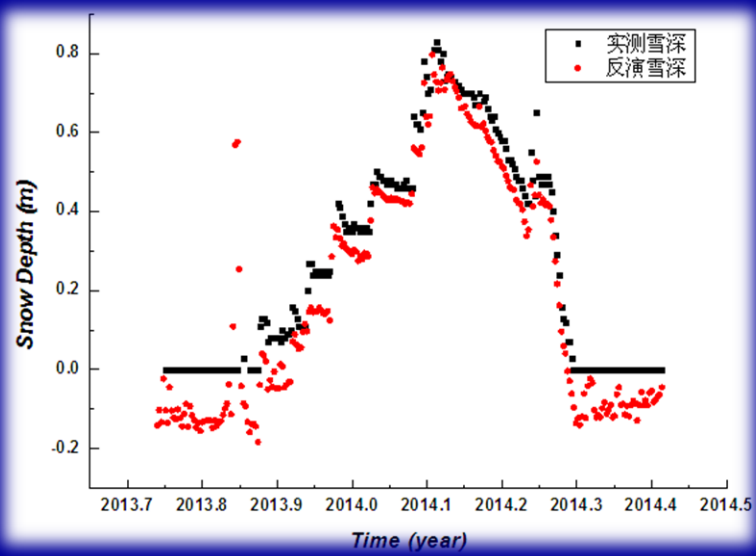
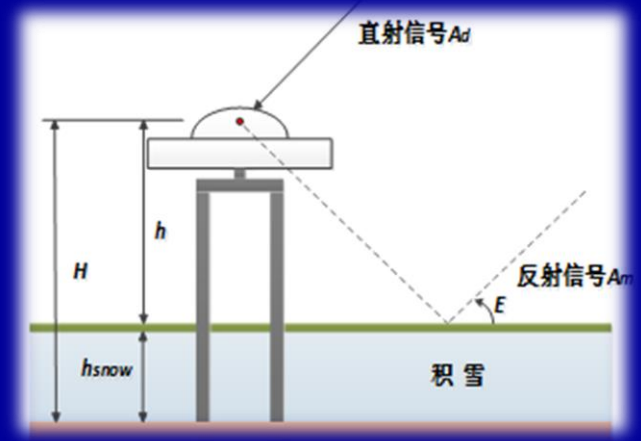
GNSS-MR实时监测潮位变化



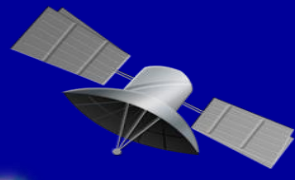
# 3. 与传播途径有关的误差



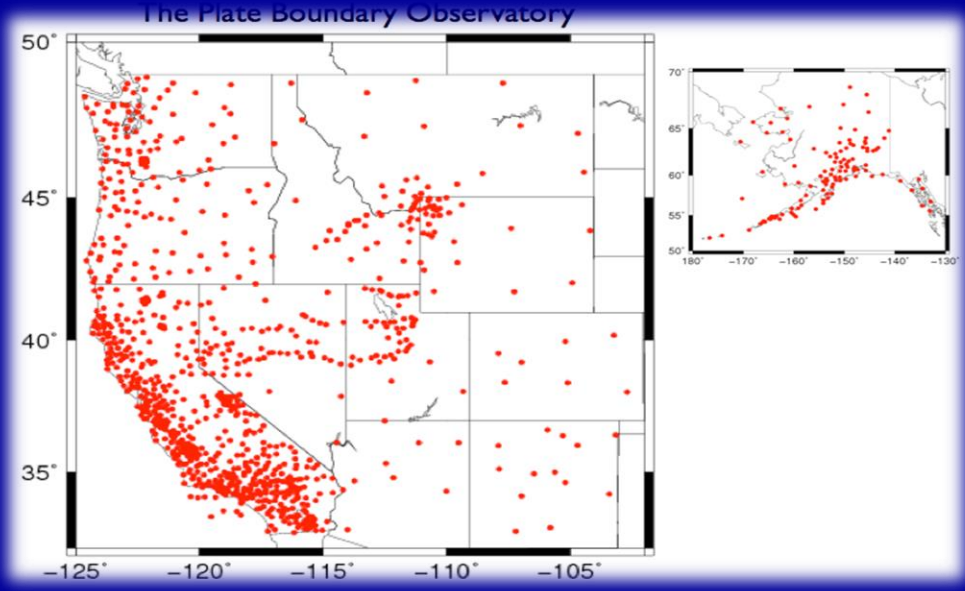
GNSS-MR 雪深探测厚度



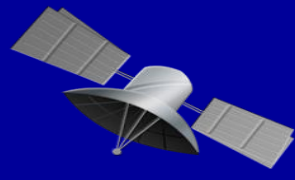
### 3. 与传播途径有关的误差



GNSS-MR 监测地表环境网络



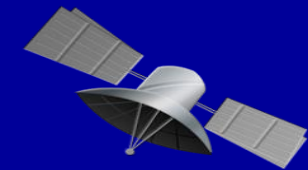




# 主要讲解内容

1. GPS测量误差的分类
2. 与卫星有关的误差
3. 与传播途径有关的误差
4. 与接收设备有关的误差
5. GPS测量误差处理方法

## 4. 与接收机有关的误差



- 系统误差（影响）

- 与卫星有关的误差

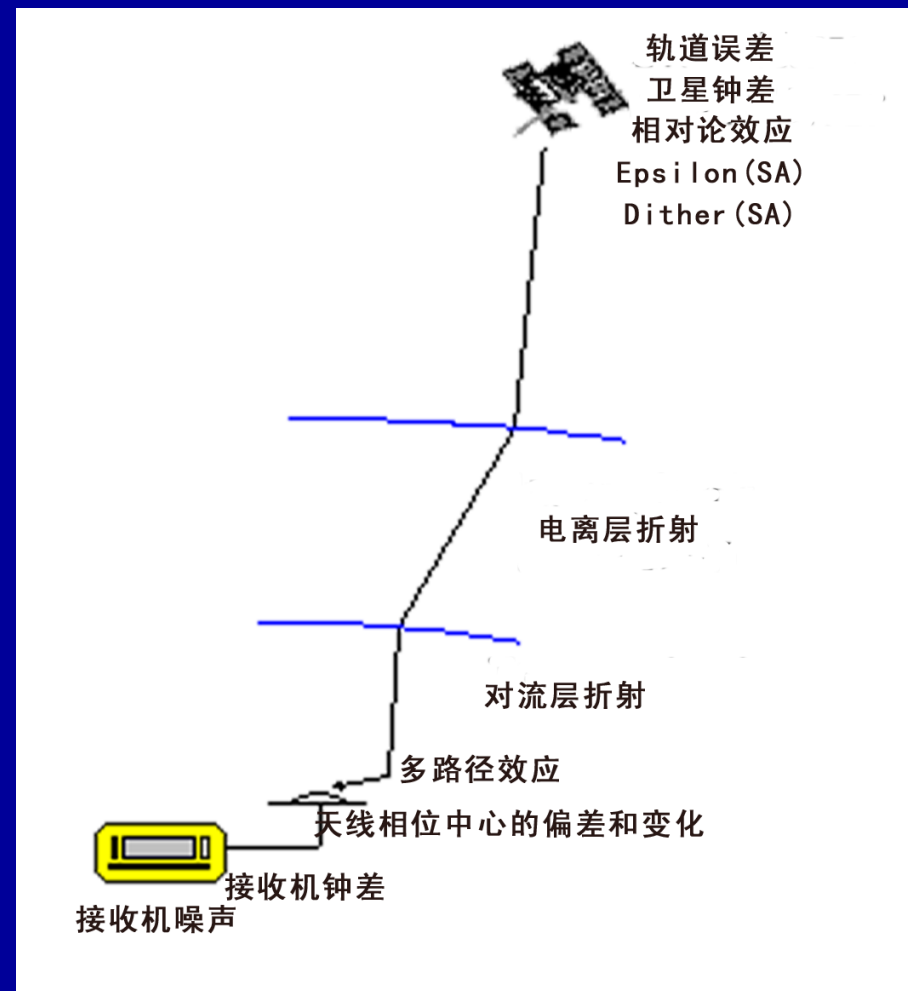
- 卫星轨道（星历）误差
    - 卫星钟差
    - 相对论效应

- 与传播途径有关的误差

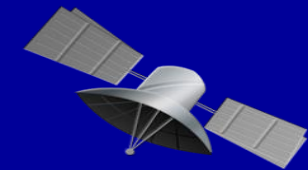
- 对流层折射
    - 电离层折射
    - 多路径效应（随机特性）

- 与接收机有关的误差

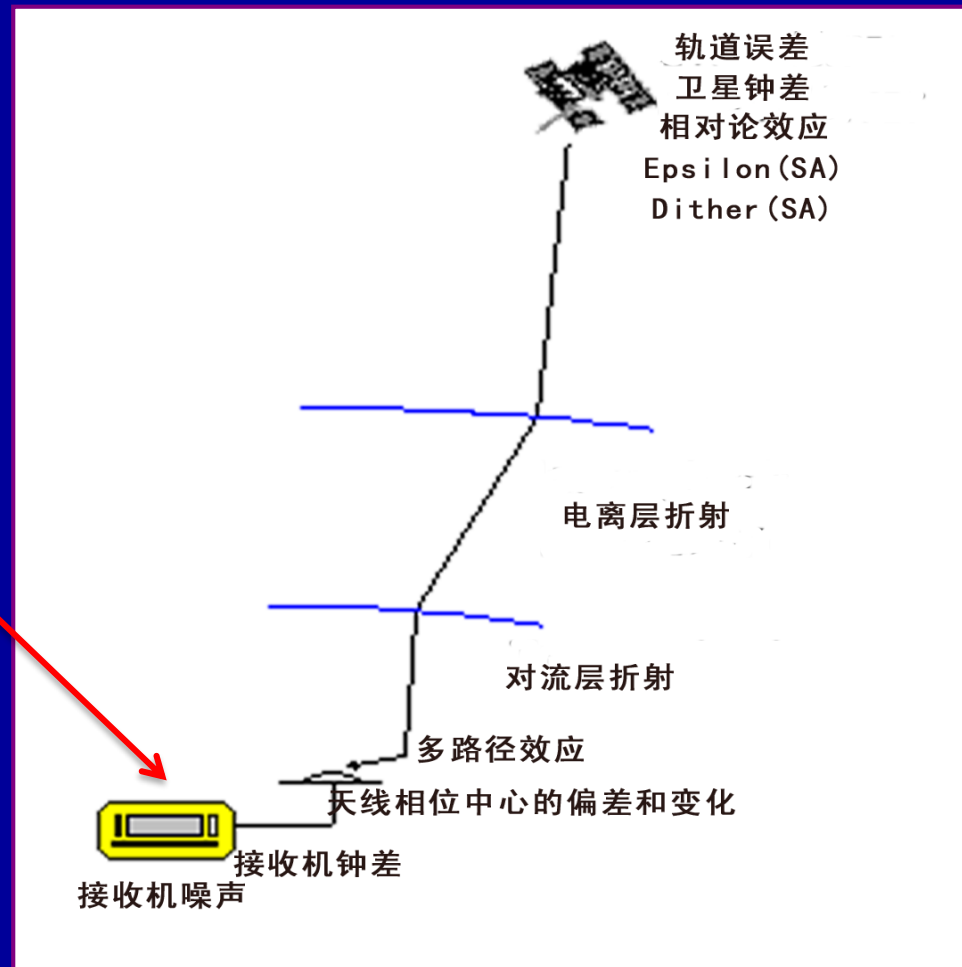
- 接收机分辨率误差
    - 接收机钟差
    - 接收机位置误差



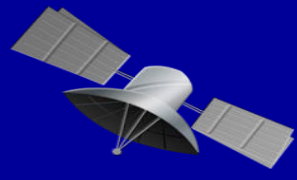
# 4. 与接收机有关的误差



- 观测误差（接收机分辨率误差）
- 接收机钟差
- 天线相位偏差



## 4. 与接收机有关的误差



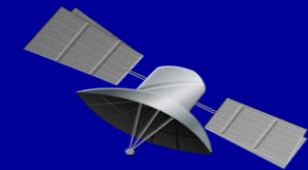
### GPS接收机分辨率误差：

GPS接收机分辨率误差主要是指仪器硬、软件对GPS信号的分辨率误差。

依据经验，一般认为接收机分辨率误差约为信号波长的1%。

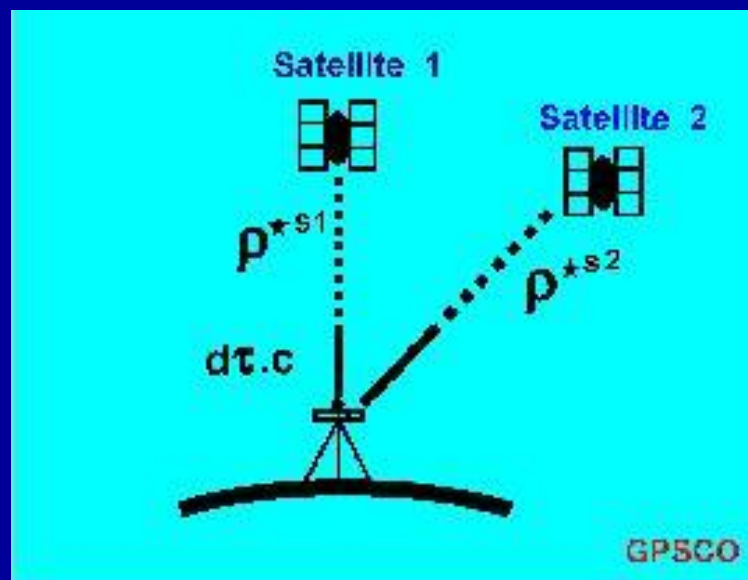
信号	波长	观测误差
P码	29.3m	0.3m
C/A码	293m	2.9m
载波L1	19.05cm	2.0mm
载波L2	24.45cm	2.5mm

## 4. 与接收机有关的误差

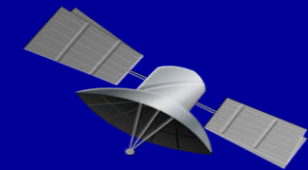


### GPS接收机钟差:

GPS接收机一般采用**石英钟**，接收机钟与理想的GPS时之间存在的偏差和漂移。



## 4. 与接收机有关的误差

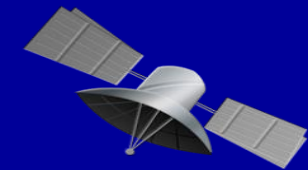


### GPS接收机钟差：

GPS接收机一般设有内置高精度的**石英钟**，其日频率稳定度约为 $10^{-11}$ 。如果接收机与卫星钟之前有 $1\ \mu\text{s}$ 相对钟差，则引起的等效距离误差为300m。

消除接收机钟差的方法，可采用**多项式改正**、**参数估计**、**观测量求差**等。在定位精度要求极高的情况下，还可以采用高精度的外接频标（铷或铯钟），提高接收机的测时精度。

## 4. 与接收机有关的误差



### 接收机的位置误差：

- 定义

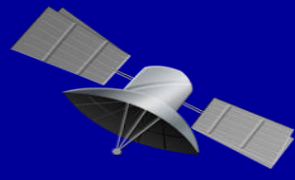
接收机天线的**相位中心**相对测站标石中心位置的偏差。

- 应对方法

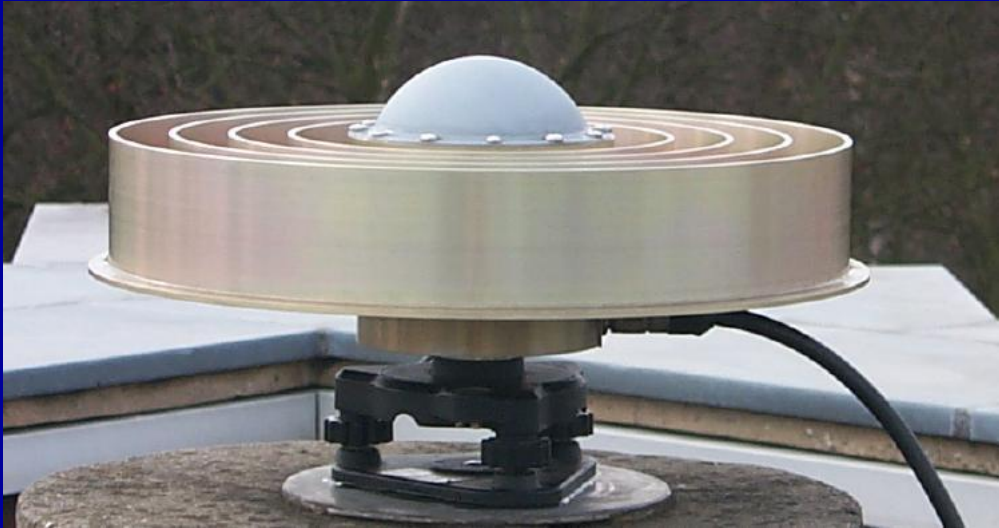
- 对中整平
- 采用强制对中装置（高精度GNSS测量）



## 4. 与接收机有关的误差

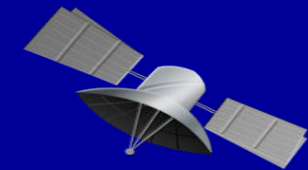


天线相位中心PCV改正:





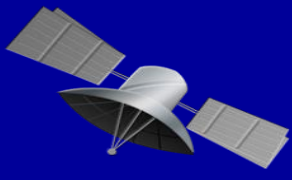
## 4. 与接收机有关的误差



### 天线相位中心PCV改正:

- 使用相同类型的天线并进行天线定向（相对定位）
- 模型改正

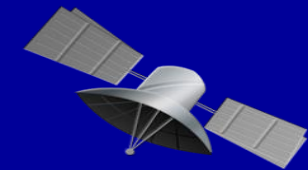




# 主要讲解内容

1. GPS测量误差的分类
2. 与卫星有关的误差
3. 与传播途径有关的误差
4. 与接收设备有关的误差
5. GPS测量误差处理方法

# 5. GPS测量误差处理方法



- 系统误差（影响）

- 与卫星有关的误差

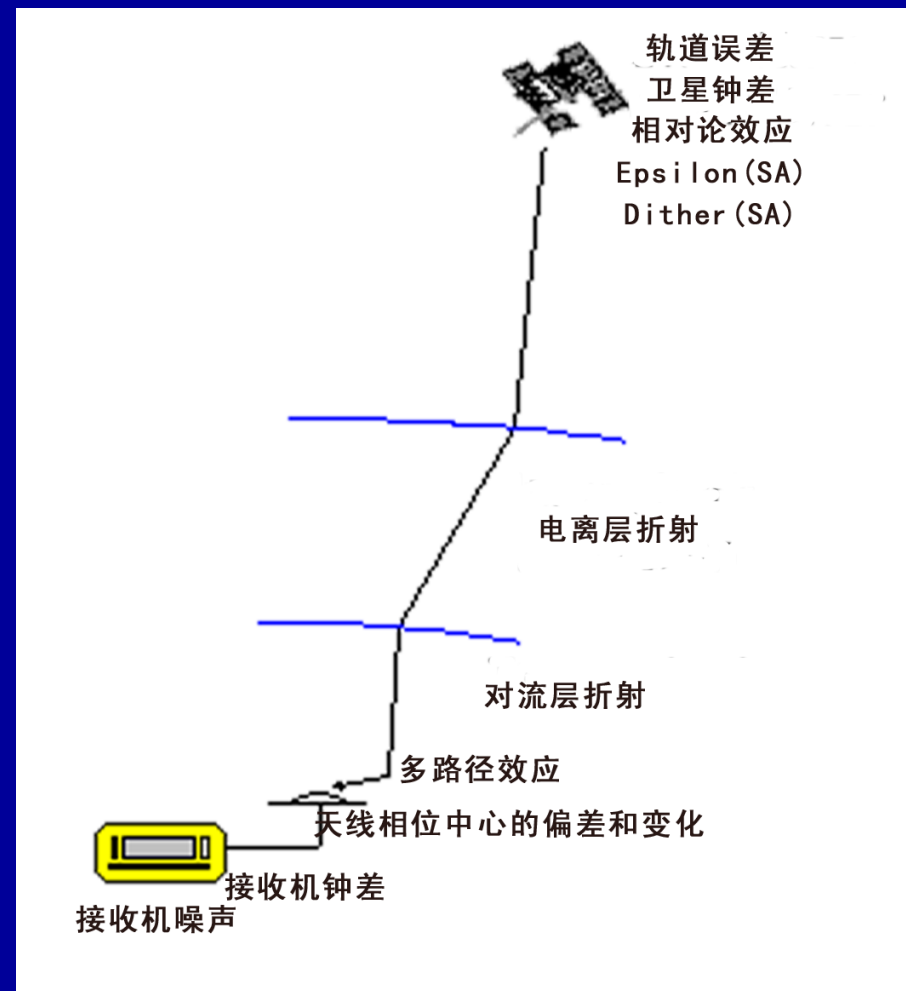
- 卫星轨道（星历）误差
    - 卫星钟差
    - 相对论效应

- 与传播途径有关的误差

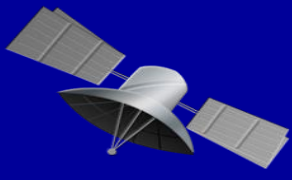
- 对流层折射
    - 电离层折射
    - 多路径效应（随机特性）

- 与接收机有关的误差

- 接收机钟差
    - 天线相位中心的偏差及变化
    - 各通道间的信号延迟误差



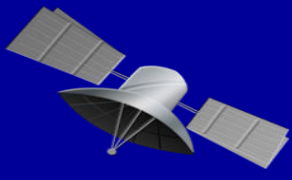
## 5. GPS测量误差处理方法



### GPS其余测量误差：

- 卫星硬件延迟偏差
- 接收机硬件延迟偏差
- 地球自转
- 固体潮
- 海洋潮汐
- 大气负荷
- 磁场
- .....

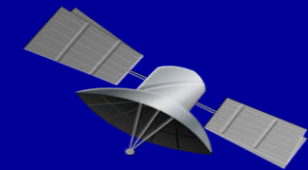
# 5. GPS测量误差处理方法



## GPS测量误差的影响量级：

误差来源	误差分类	对距离测量的影响 /m
GPS卫星	①卫星星历误差；②卫星钟误差； ③相对论效应	1.5 ~ 15
信号传播	①电离层折射误差；②对流层折射误差； ③多路径效应	1.5 ~ 15
接收设备	①接收机钟误差；②接收机位置误差； ③天线相位中心变化	1.5 ~ 15
其他影响	①地球潮汐；②负荷潮	1.0

# 5. GPS测量误差处理方法



## GPS测量偶然误差及特点:

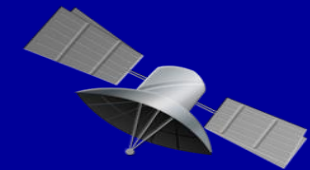
### - 内容

- 卫星信号发生部分的随机噪声
- 接收机信号接收处理部分的随机噪声
- 其它外部某些具有随机特征的影响

### - 特点

- 随机
- 量级小 - 毫米级

# 5. GPS测量误差处理方法



## GPS测量系统误差及特点:

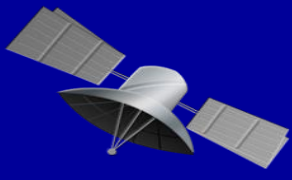
### - 内容

- 其它具有某种系统性特征的误差

### - 特点

- 具有某种系统性特征
- 量级大，最大可达数百米

# 5. GPS测量误差处理方法

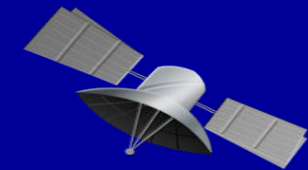


消弱GPS测量系统误差的方法：

- ◆ 模型法
- ◆ 求差法
- ◆ 参数法
- ◆ 回避法



## 5. GPS测量误差处理方法

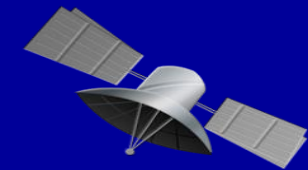


IGS服务中心:

<http://igs.org/>

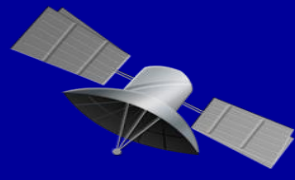
国际GNSS服务组织（IGS）成立于1993年，是一个得到多国政府机构支持的国际学术性合作与信息服务机构，其**数据和分析中心**成员均为全球卫星导航领域一流研究机构，包括**美国喷气动力实验室JPL**、**欧洲定轨中心CODE**、**德国地学研究中心GFZ**、**欧洲空间局ESA**等。20多年来，为卫星导航科技进步发挥了巨大的推动作用。

# 5. GPS测量误差处理方法



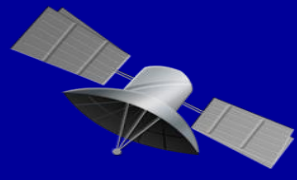
IGSH工作组

<b>Active Working Groups</b>		
<a href="#">Antenna</a>	Ralf Schmid, Chair	[Est. 2008]
<a href="#">Bias and Calibration</a>	Stefan Schaer, Chair	[Est. 2008]
<a href="#">Clock Products</a>	Michael Coleman, Chair	[Est. 2003]
<a href="#">Data Center</a>	Carey Noll, Chair	[Est. 2002]
<a href="#">Ionosphere</a>	Andrzej Krankowski, Chair	[Est. 1998]
<a href="#">Multi-GNSS</a>	Oliver Montenbruck, Chair	[Est. 2003]
<a href="#">Reference Frame</a>	Bruno Garayt, Chair	[Est. 1999]
<a href="#">Real-time</a>	Axel Rülke, Chair	[Est. 2001]
<a href="#">RINEX</a>	Ken MacLeod, Chair	[Est. 2011]
<a href="#">Space Vehicle Orbit Dynamics</a>	Marek Ziebart, Chair	[Est. 2011]
<a href="#">Tide Gauge (TIGA)</a>	Tilo Schöne, Chair	[Est. 2011]
<a href="#">Troposphere</a>	Sharyl Byram, Chair	[Est. 1998]
<b>Active Pilot Projects</b>		
<a href="#">Multi-GNSS Extension (MGEX)</a>		[Est. 2016]
<a href="#">Real-time (RTS)</a>		[Est. 2001]
<b>Former Working Groups</b>		
<a href="#">Low Earth Orbiters (LEO)</a>		[2002-2010]
<b>Former Pilot Projects</b>		
<a href="#">International GLONASS Service (IGLOS-PP)</a>		[2000-2005]
<a href="#">Tide Gauge (TIGA)</a>		[2001-2010]



# 思考题

1. GPS误差源主要由哪些？哪些是系统误差？其量级分别是多少？
2. 何为GPS多路径效应？如何减弱多路径效应？
3. 如何计算GPS卫星钟差？
4. GPS误差源有哪些好处？



第三章第一讲结束

谢谢!