



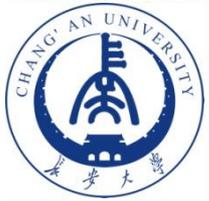
---

# 第二章 大地测量数据采集技术

讲授：张双成

测绘科学与工程系





---

# 大地测量数据采集的补充知识





# 传统大地测量数据处理流程

## 确定水平坐标的流程

水平方向  
垂直角  
地面距离  
天文经纬度  
天文方位角

角度观测

距离观测

天文观测

布设水平  
控制网

观测

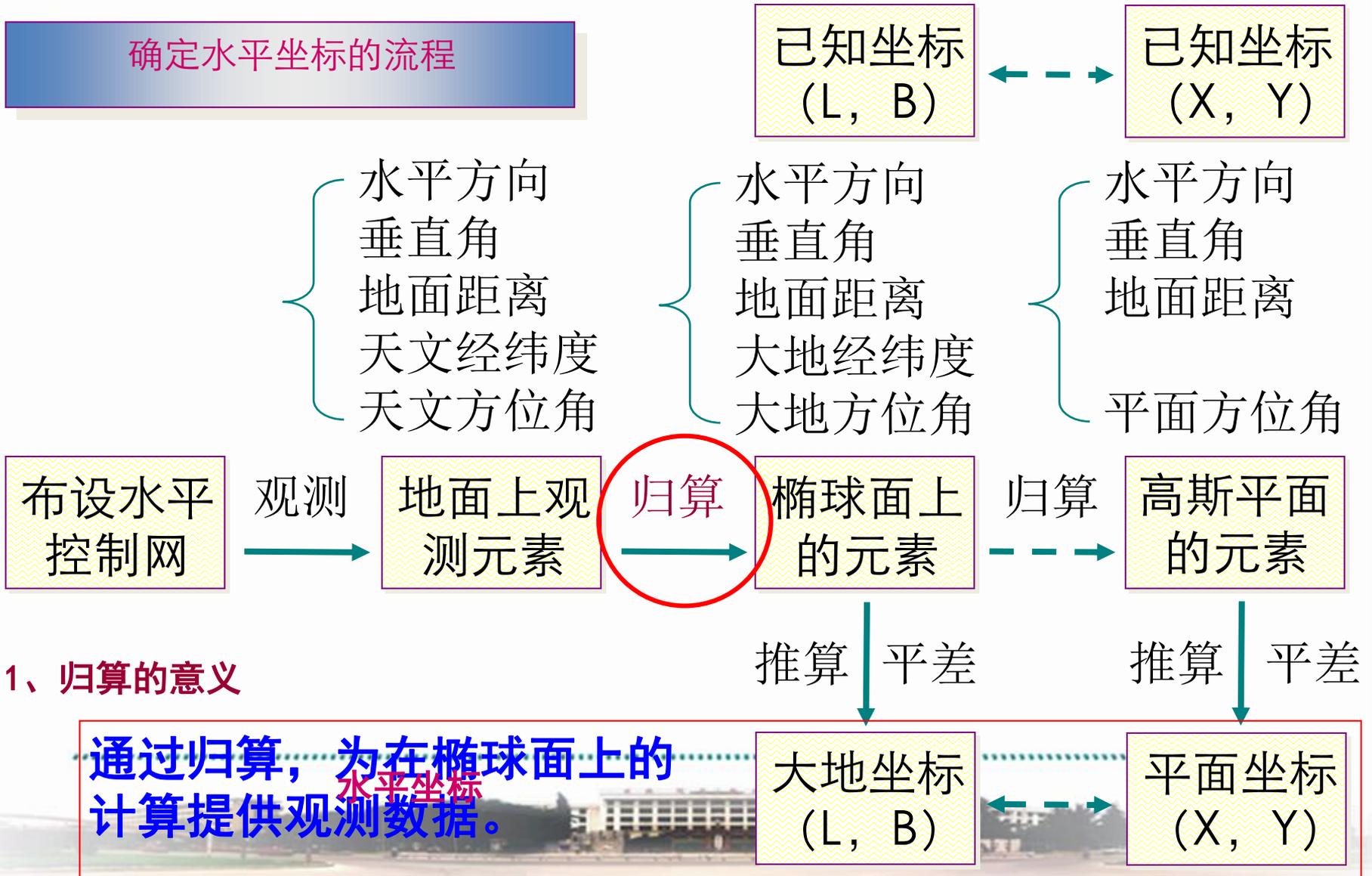
地面上观  
测元素





# 传统大地测量数据处理流程

确定水平坐标的流程

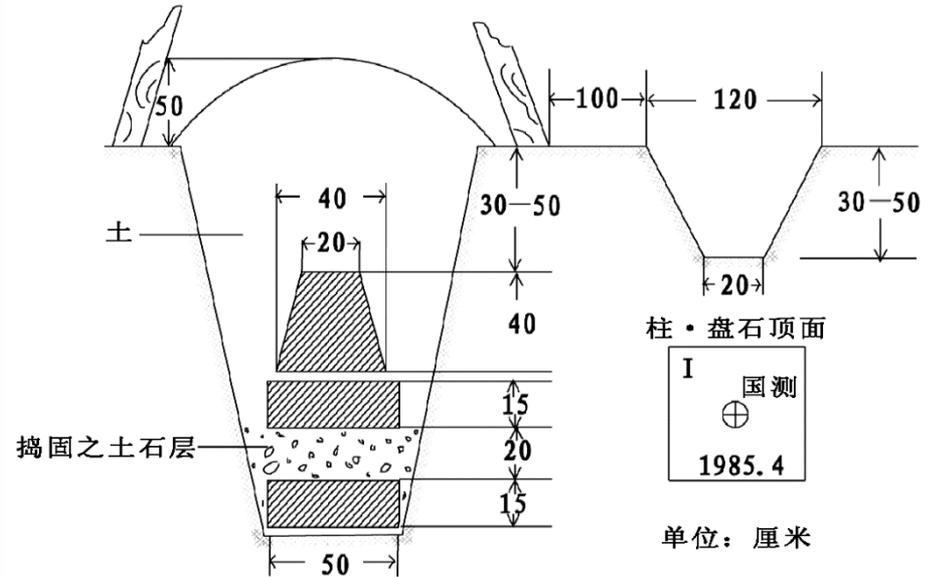




# 补充知识

## 地面水平点位如何标志？

**中心标石**是水平控制点位的永久性标志。野外观测是以标石的**标志中心**为准，最后算得点的平面坐标，就是标志中心的位置。如果标石被破坏或发生位移，测量成果就失去作用，点的坐标就毫无意义。



### 一、二等三角点中心标石埋设图

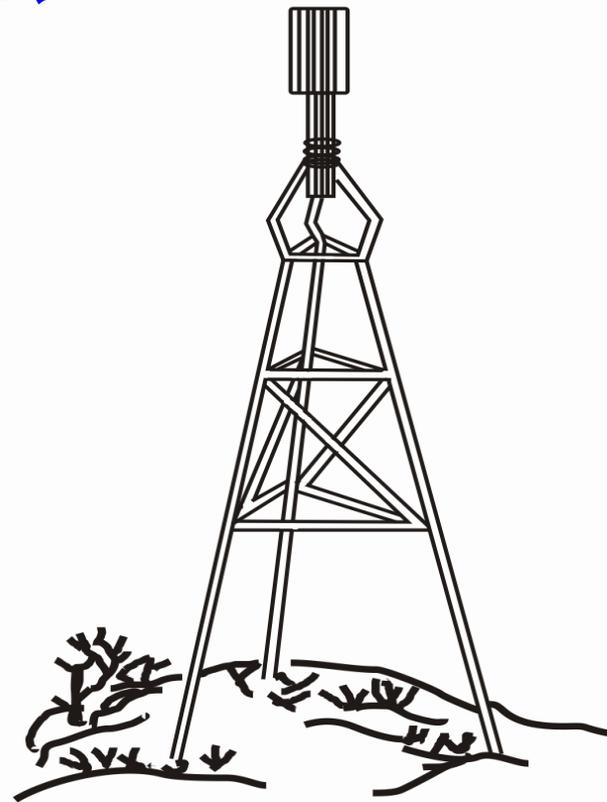




# 补充知识

## 照准标志是什么？

**大地水准**是三角点或导线点的地面标志。水准顶端装有圆筒，以供照准。根据其所用材料又分为**钢寻常标**、**木质寻常标**和**混凝土寻常标**等。需要升高仪器的三角点或导线点就要建造**高标**，高标由内架和外架组成。



**钢寻常标**

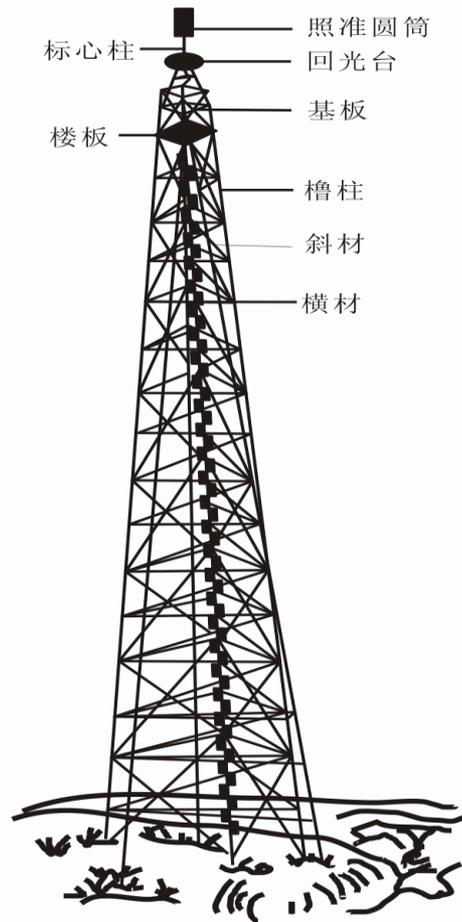




# 补充知识

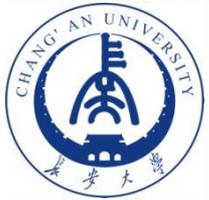
## 照准标志是什么？

圆筒中心、基板中心、标石中心基本位于**同一铅垂线上**，以**标石中心**为准，最大偏离不应超过**0.1米**。



高 标

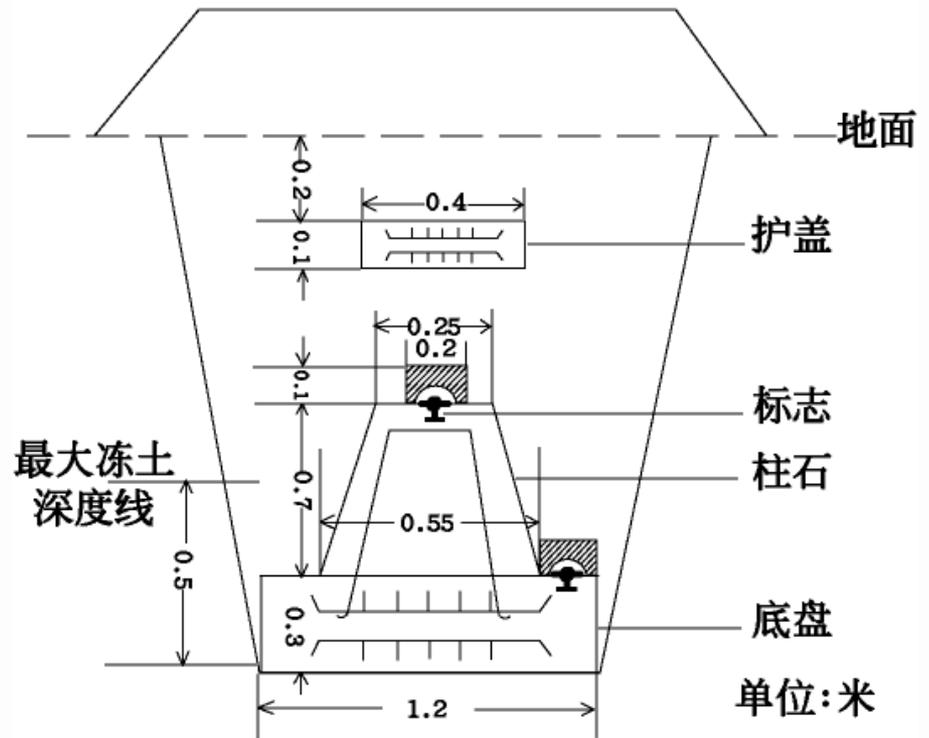




# 补充知识

## 地面高程点位如何标志?

**水准标石**是高程控制点位的永久性标志。野外观测是以标石的**标志中心**为准，最后算得点的高程，就是标志中心的位置。如果标石被破坏或发生位移，测量成果就失去作用，点的高程就毫无意义。



**基本水准标石埋设图**

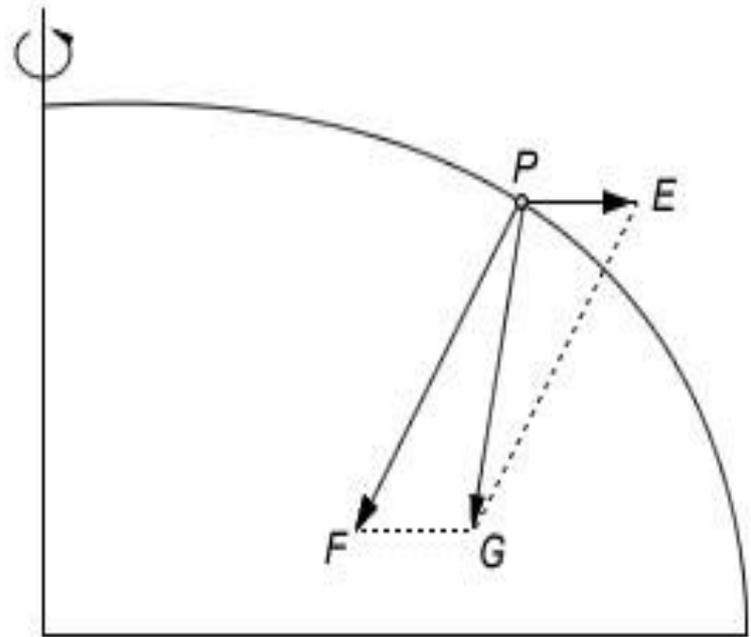




# 补充知识

## 野外观测的基准线是什么？

测量是在地球重力场中进行的。地球上任一点都会受到地球引力和惯性离心力的作用，它们的合力称为**重力**，重力的方向线称为**铅垂线**，简称垂线。铅垂线是**野外观测的基准线**。



重力方向线G — 铅垂线

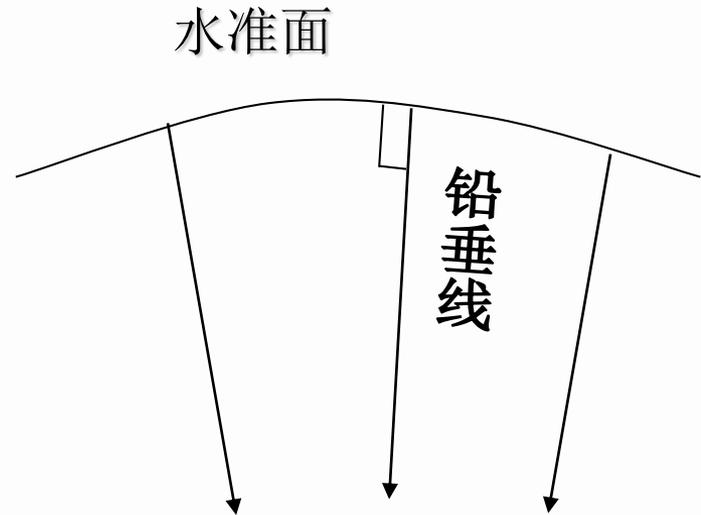




# 补充知识

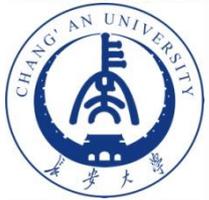
## 野外测量的基准面是什么？

液体的静止表面称为**水准面**。水准面是物理表面，同一水准面上的重力位相等。因此，水准面也叫**重力等位面**，水准面上任一点的铅垂线都同这个面正交。水准面是**野外观测的基准面**。



水准面和铅垂线的关系

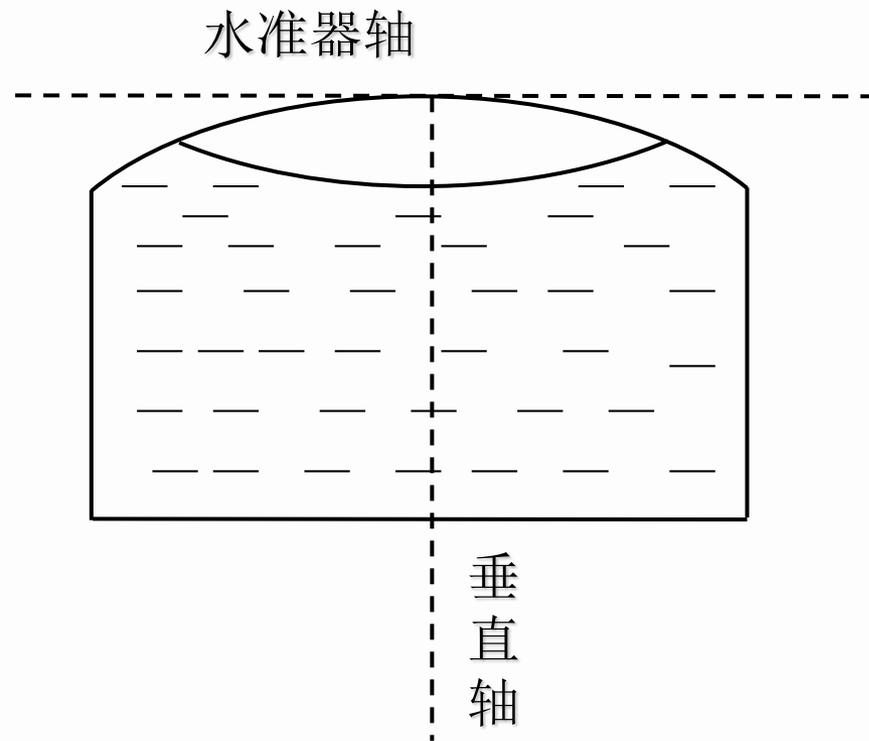




## 补充知识

### 如何获得野外测量的基准面、基准线？

**水准器**用于整置仪器。野外测量工作时，首先应调整水准器泡聚中，此时气泡中央的切线水平，也即水准器轴水平，它就是**水准面的切线**。因为垂直轴与水准器轴垂直，此时**垂直轴代表测站的铅垂线**。



水准器



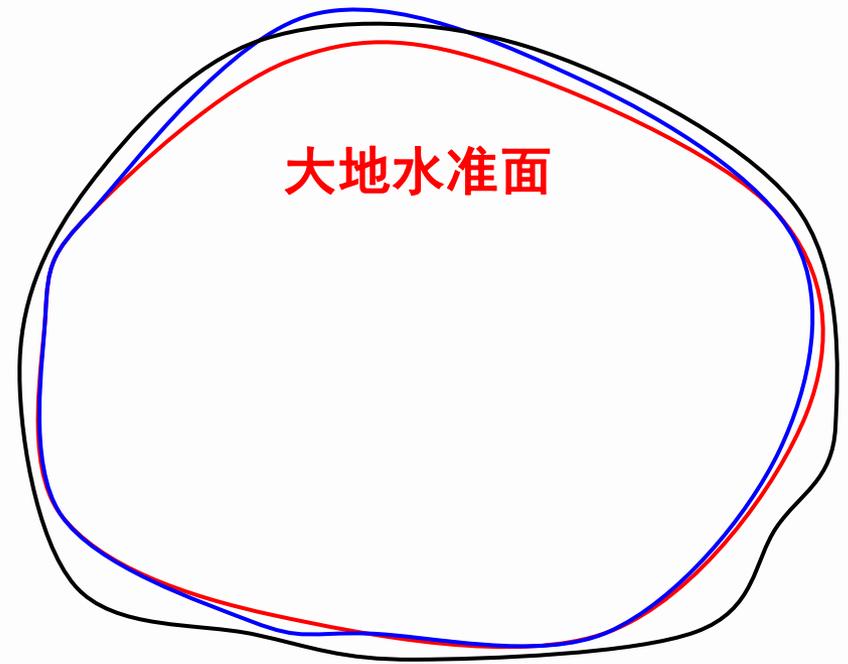


# 补充知识

## 什么是大地水准面？

通过不同高度的测站点均  
有自己的水准面。这些水  
准面既不相交也不平行，  
但都可以形成一个**封闭的  
曲面**。在所有的水准面中，  
有一个和**地球自然表面**最  
为接近的水准面，称为**大  
地水准面**。

地球自然表面



水准面

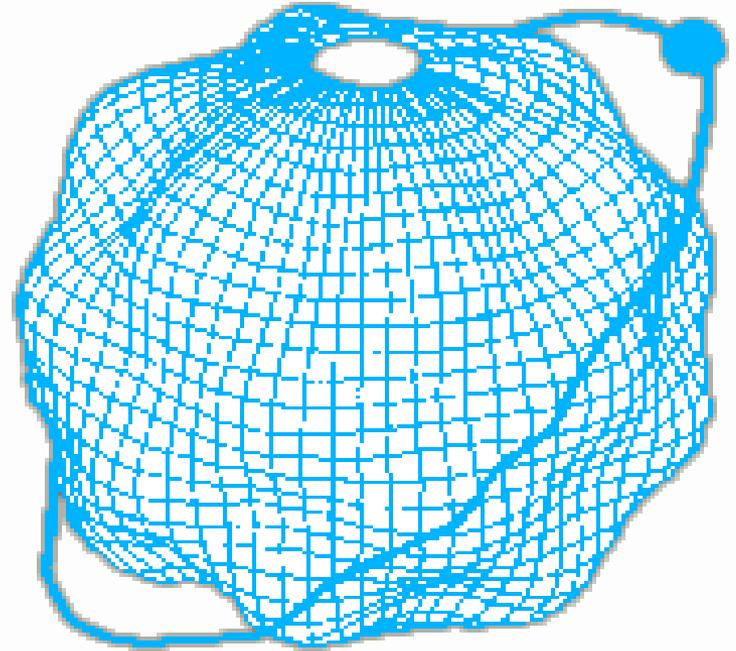




# 补充知识

## 什么是地球形状？

**大地水准面**是平均海水面及其在全球大陆内部的延伸。大地水准面包围的形体称为**大地体**，与地球的自然表面最为接近，在大地测量学中，用来代表地球的形状，最接近一个**旋状椭球**。



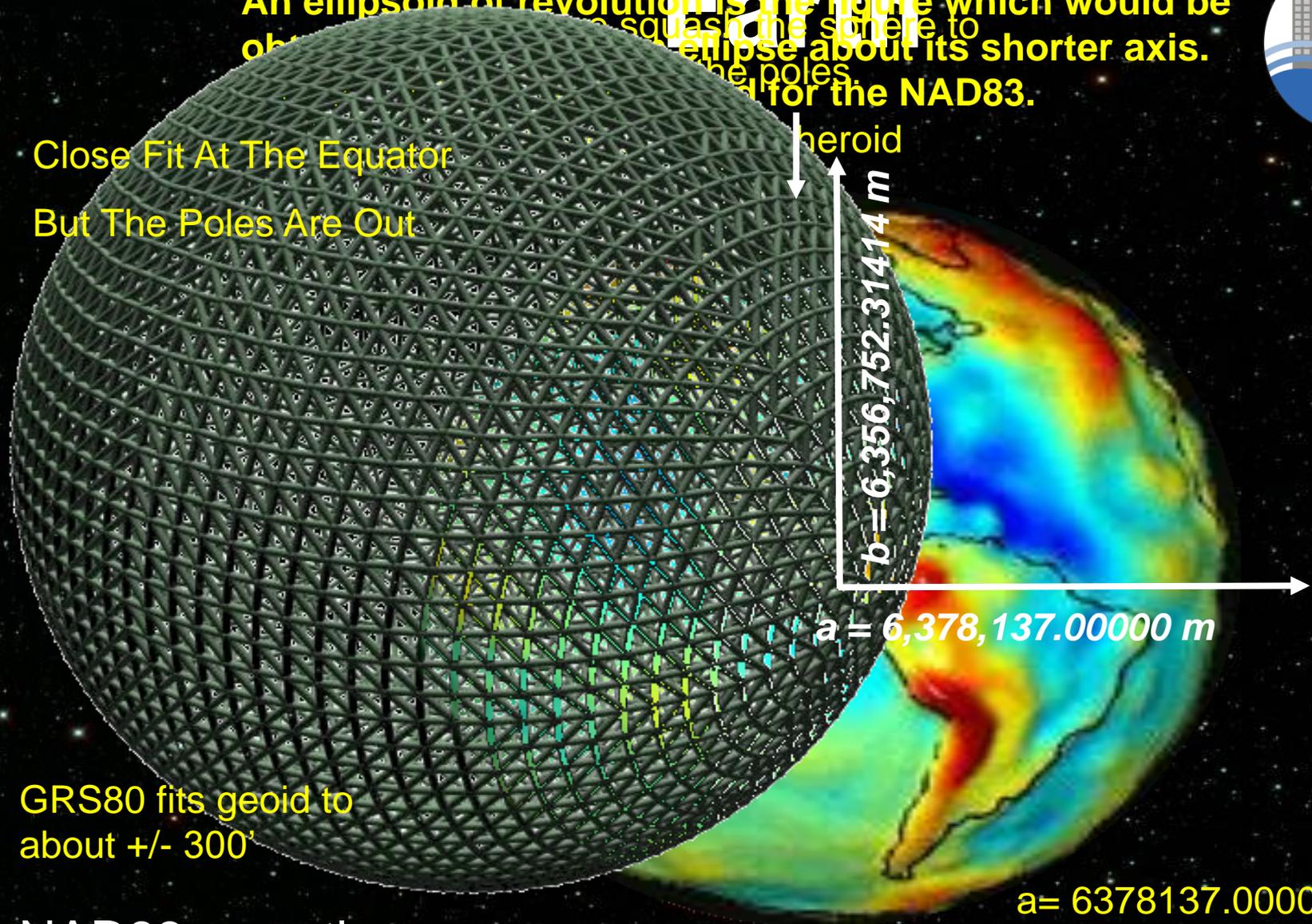
**全球大地水准面**





**Earth**  
 An ellipsoid of revolution is the figure which would be obtained by squashing the sphere to an ellipse about its shorter axis. The ellipsoid is used for the NAD83.

Close Fit At The Equator  
 But The Poles Are Out



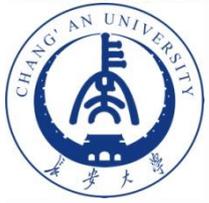
$b = 6,356,752.31414 \text{ m}$

$a = 6,378,137.00000 \text{ m}$

GRS80 fits geoid to about +/- 300'

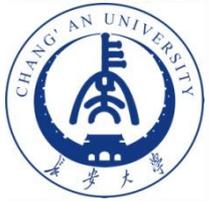
NAD83 uses the GRS80 Ellipsoid

$a = 6378137.00000 \text{ meters}$   
 $b = 6356752.31414 \text{ meters}$   
 $f = 1/(a-b)/a = 298.2572220972$

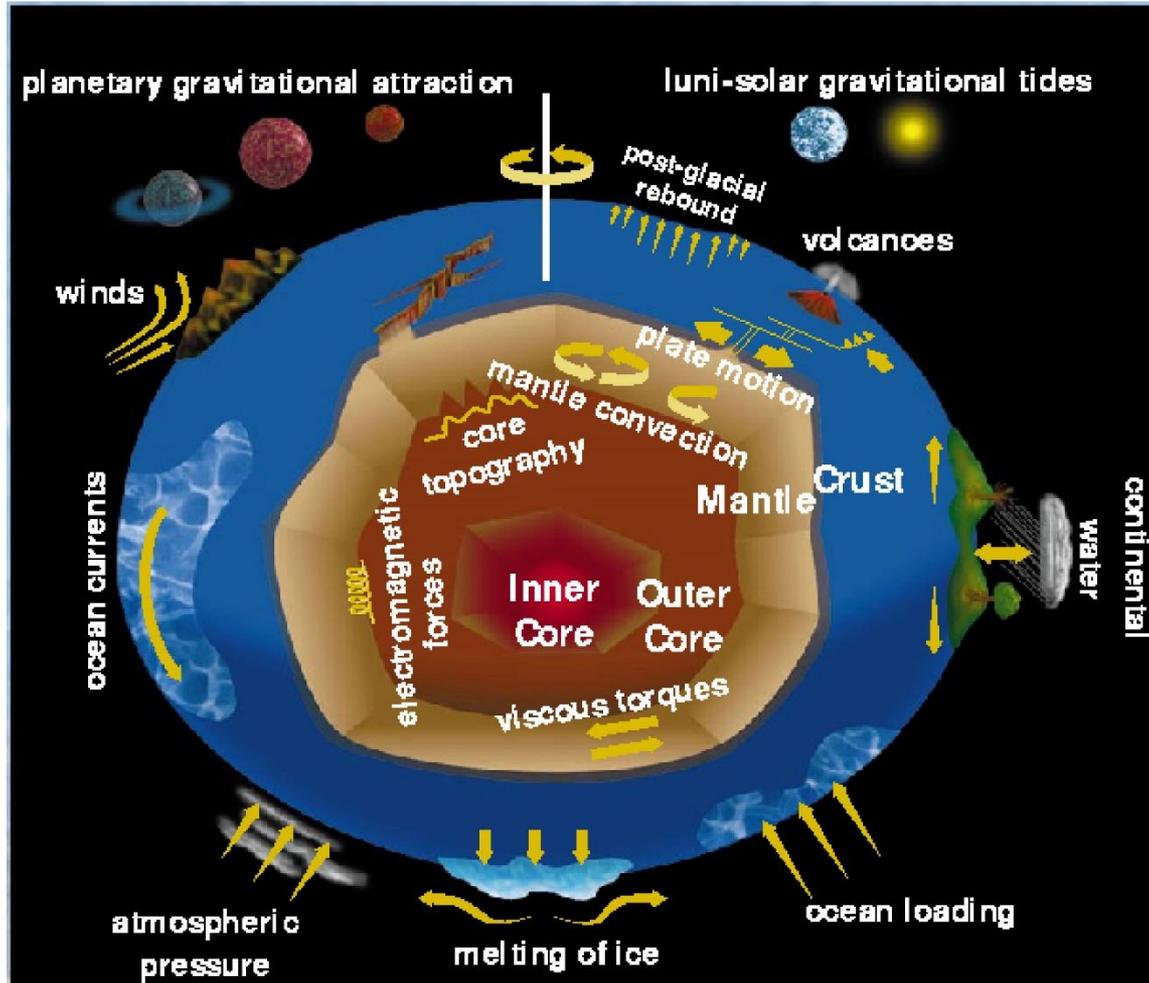


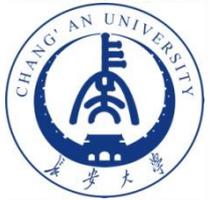
Some people think the Earth looks like this:





# But really - it looks like this!





---

# 大地测量数据采集技术

---



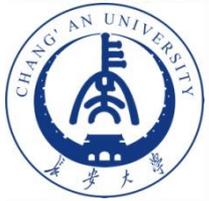


# 大地测量数据采集的基本技术

为完成大地测量学的各类任务，需要在广大的范围内开展各类大地测量数据采集活动。

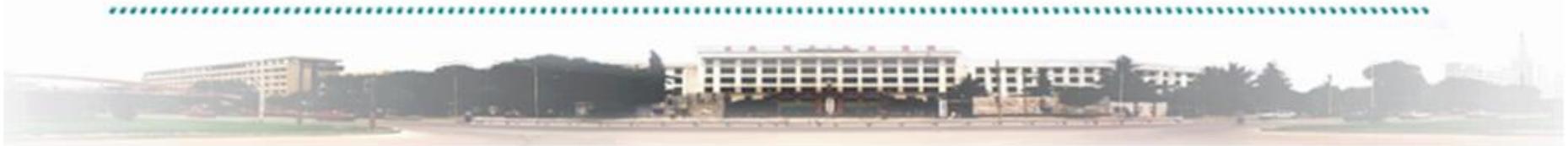
- ◆ 角度测量
- ◆ 距离测量
- ◆ 高程测量
- ◆ 天文测量
- ◆ 卫星测量
- ◆ 重力测量
- ◆ 人造卫星激光测距-SLR
- ◆ 甚长基线干涉测量-VLBI
- ◆ 卫星雷达测高-SA





---

# 1、角度测量





# 1. 角度测量

## 1.1 原理 (method)

**水平角:** 两条视准线在水平面投影的夹角  
 $\beta$

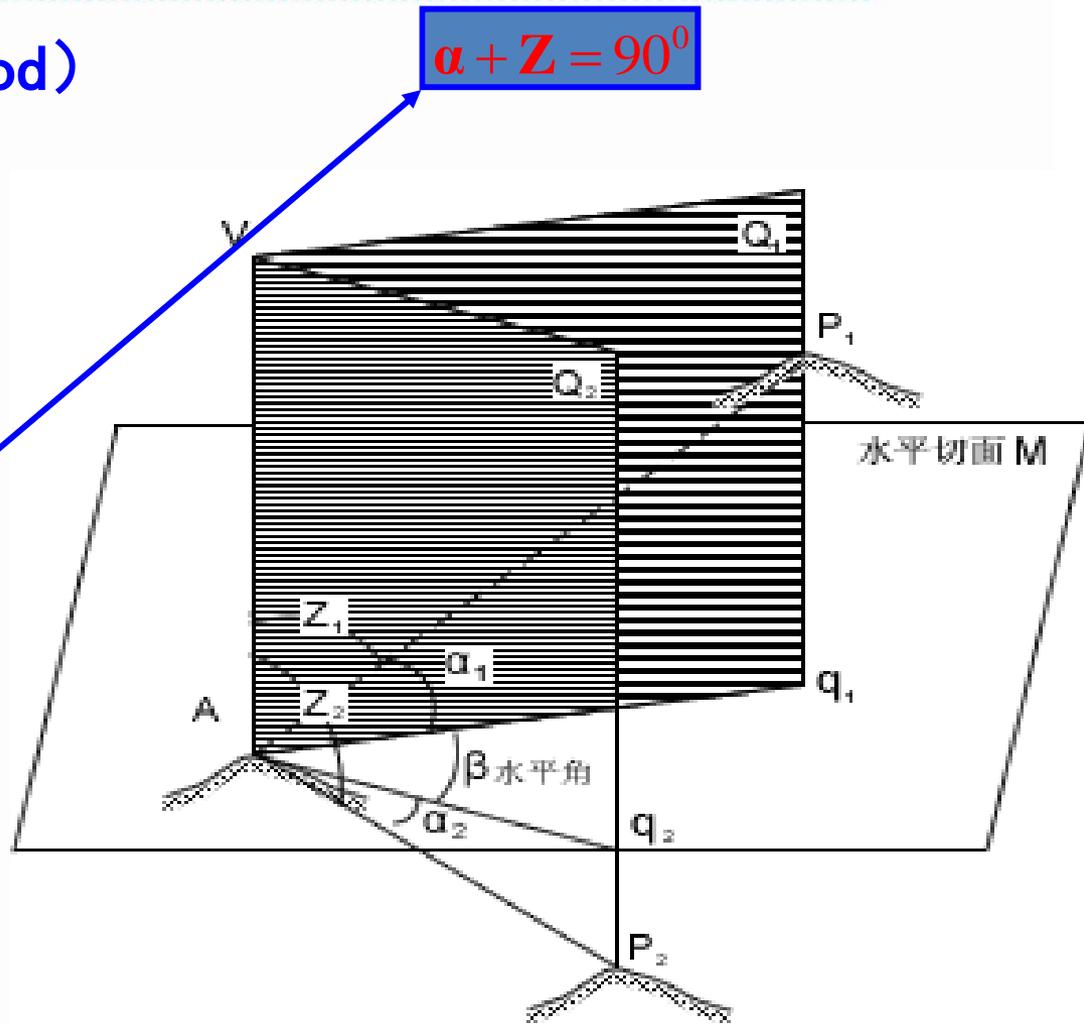
$0^{\circ} \sim 360^{\circ}$  : 顺时针量取

**垂直角:** 视准线与其水平平线的夹角  
 $\alpha$

$0^{\circ} \sim \pm 90^{\circ}$  : 水平视线量取

**天顶距:** 视准线与铅垂线的夹角  
 $Z$

$0^{\circ} \sim 180^{\circ}$  : 铅垂线量取



注意: 垂直角和水平角要分开观测, 以确保观测精度。



# 1. 角度测量

## 1.2 仪器 (instrument)

### 经纬仪的主要部件

垂直轴、水平轴、视准轴

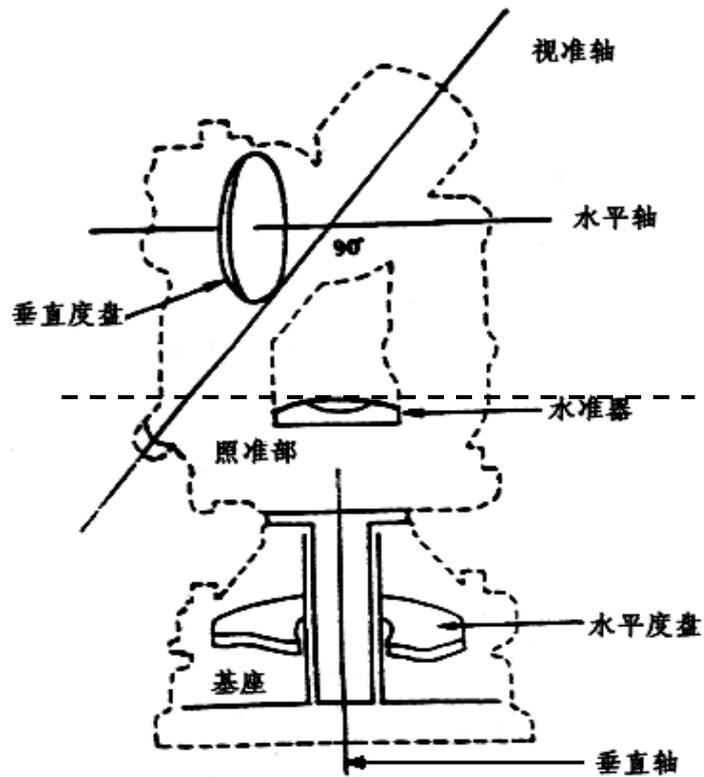
水准器

水平度盘、垂直度盘

### 主要部件之间的关系

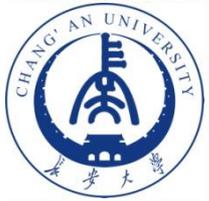
三轴关系正确

两盘与三轴关系正确



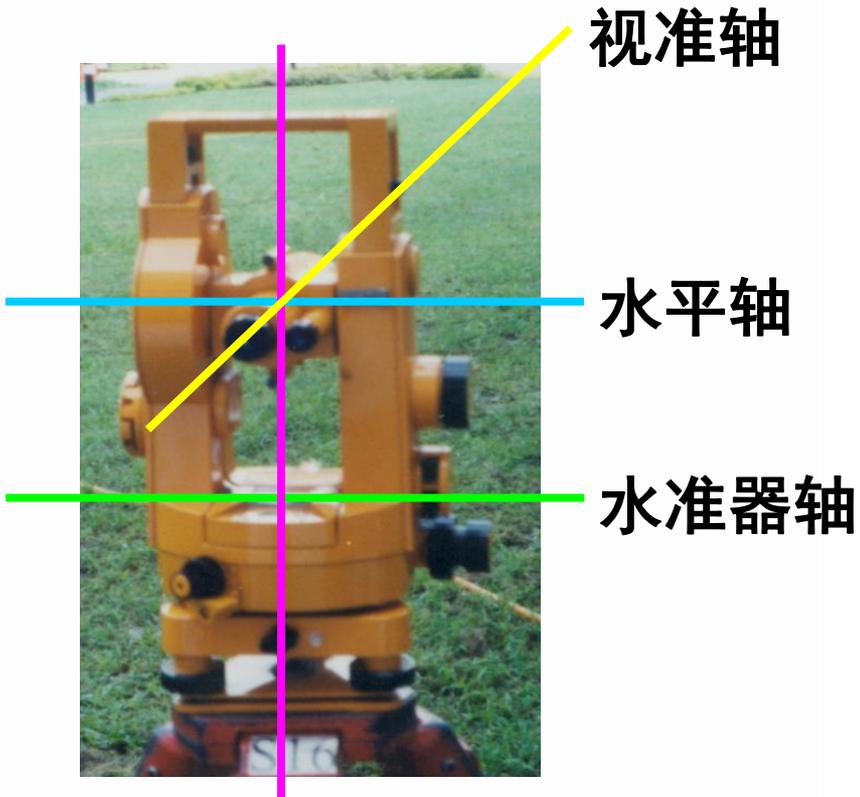
经纬仪基本结构



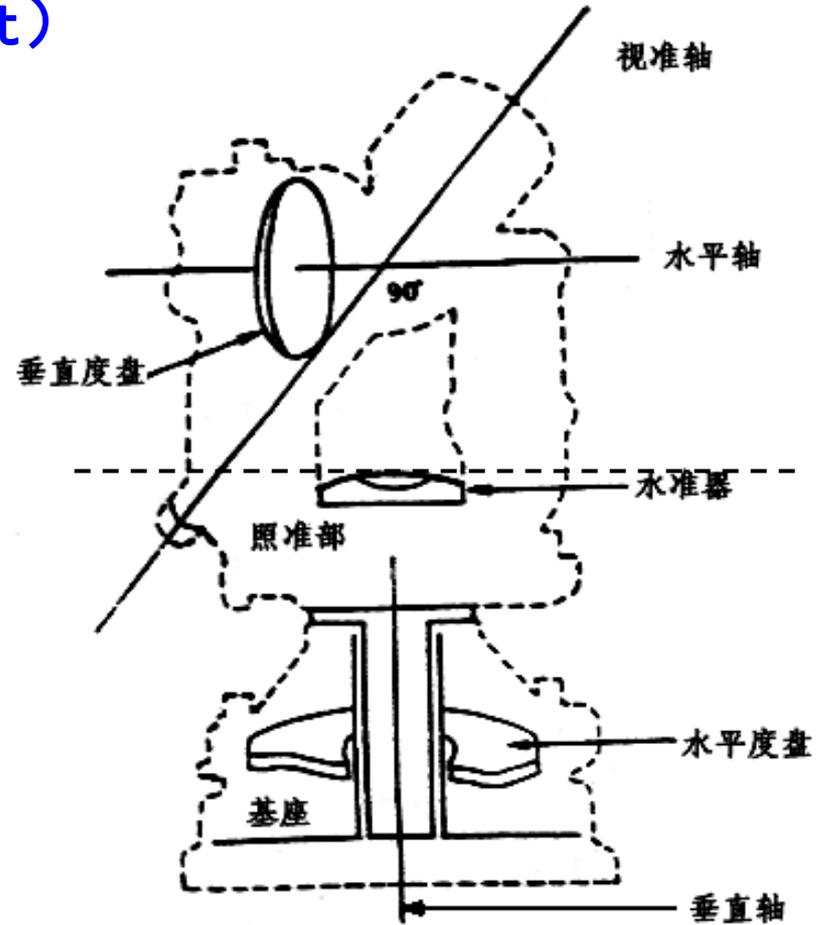


# 1. 角度测量

## 1.2 仪器 (instrument)



垂直轴



经纬仪基本结构





# 1. 角度测量

---



光学经纬仪



电子经纬仪

---





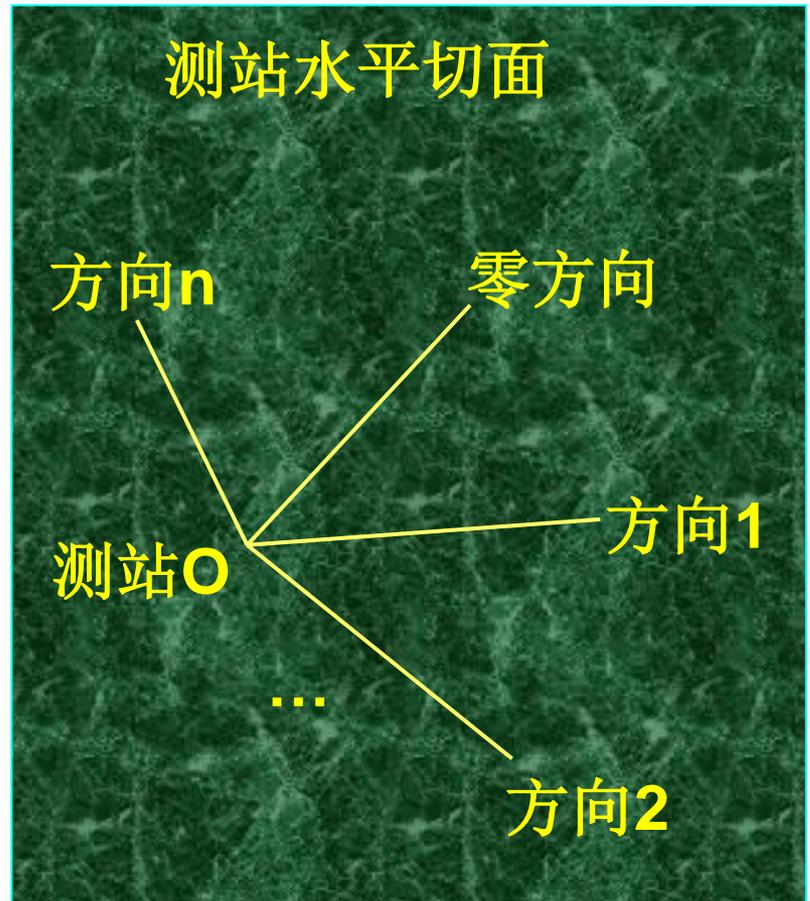
# 1. 角度测量

## 1.3 水平角观测方法

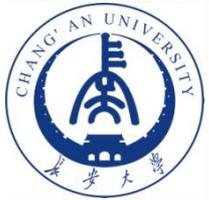
**方向法：**在每一测回中，把测站上所有待测方向逐一观测，以测得各方向的方向值。

**上半测回：**盘左，顺时针读取零方向、方向1、...、方向n的方向值

**下半测回：**盘右，逆时针读取方向n、...、方向1、零方向的方向值



一测回



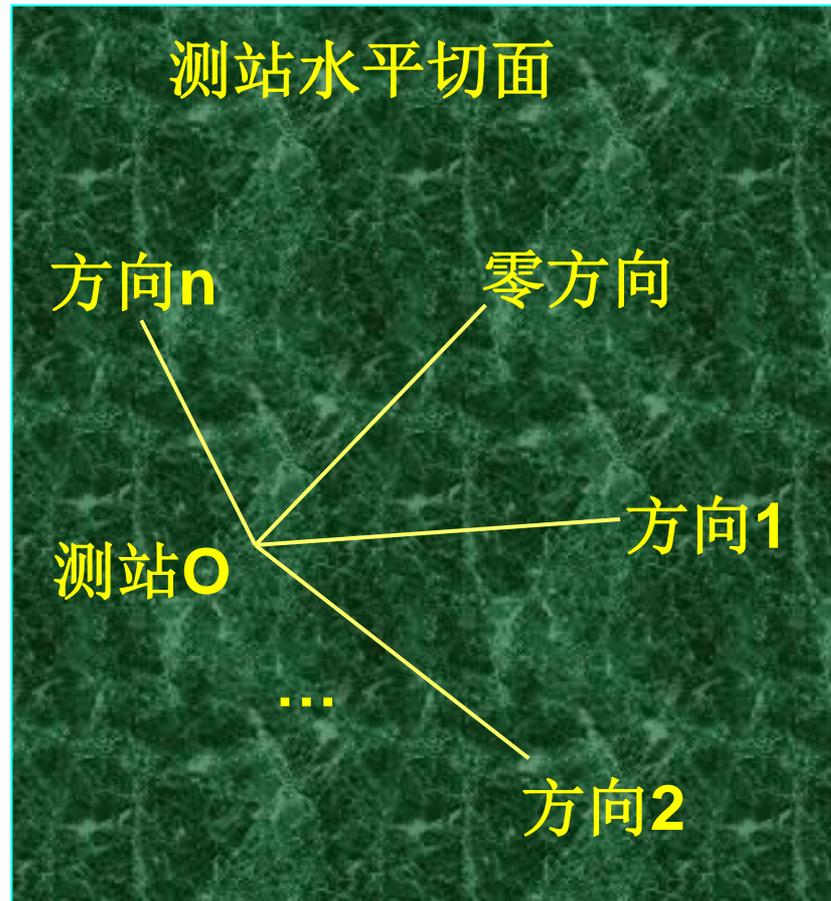
# 1. 角度测量

## 1.3 水平角观测方法

**全圆方向法**：基于方向法在每半测回的末尾还再测一次零方向（称为归零）。

**上半测回**：盘左，顺时针读取零方向、方向1、...、方向n、零方向的方向值、

**下半测回**：盘右，逆时针读取零方向、方向n、...、方向1、零方向的方向值



第 I 测回

仪器:  $T_3$  No. 53020

点名: 凤凰山

等级: 三

日期: 7月20日

天气: 晴, 东南风一级

开始: 7时02分

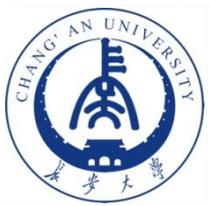
成像: 清晰

结束: 7时11分

方向号数 名称及照 准目标	读 数						左-右 (2C)	$\frac{\text{左}+\text{右}}{2}$	方 向 值	附注	
	盘 左			盘 右							
	°	'	"	°	'	"	"	"	°	'	"
1 杜鹃山 T	0	00	03.4 03.2	06.6	180	00	06.4 06.4	12.8	-6.2	09.7	0 00 00.0
2 摩天岭 T	45	10	22.1 22.0	44.1	225	10	25.7 26.0	51.7	-7.6	47.9	45 10 37.3
3 泰山 T	87	42	17.3 17.6	34.9	267	42	20.5 20.5	41.0	-6.1	38.0	87 42 27.4
4 玉泉峰 T	124	44	53.2 53.3	106.5	304	44	57.0 56.9	113.9	-7.4	110.2	124 45 39.6
1 杜鹃山 T	0	00	04.1 04.0	08.1	180	00	07.6 07.5	15.1	-7.0	11.6	

归零差:

 $\Delta_{\text{左}}=1.5''$  $\Delta_{\text{右}}=2.3''$



# 1. 角度测量

## 1.3 水平角观测方法

方向法的测回数由控制网的等级确定，可见下表：

方向观测的测回数

等级 测回数 仪器	二 等	三 等	四 等
	$J_{07}$ 型	12	6
$J_1$ 型	15	9	6
$J_2$ 型		12	9

**方向法、全圆方向法**可统称为**方向法**，主要用于较低精度的三角测量、导线测量，所得测站各方向的观测值是n测回的平均值，两方向之间的夹角可由两方向值之差获得。





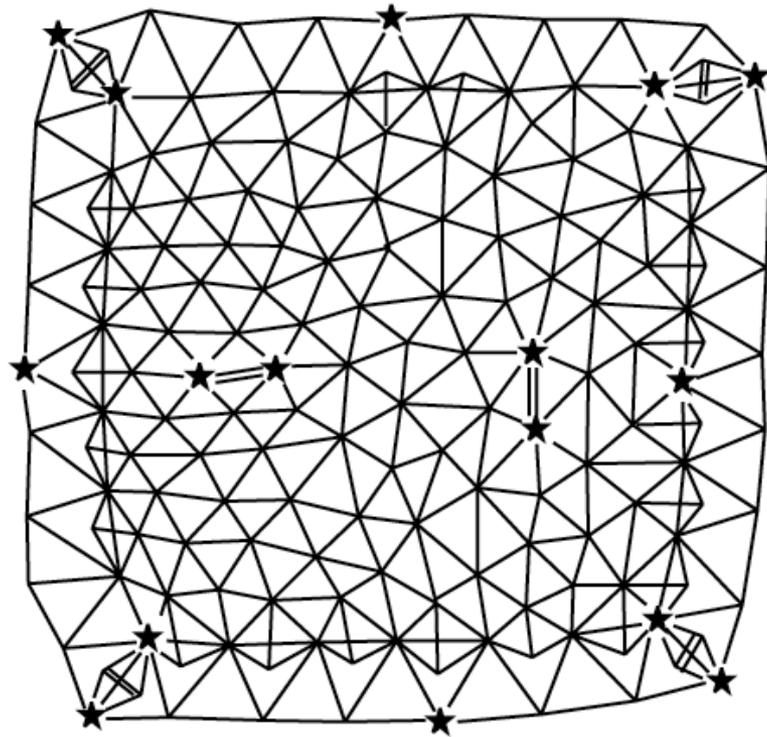
# 1. 角度测量

## 1.4 垂直角观测方法

**观测方法**和水平角类似，一般也取 $n$ 测回中数作为垂直角观测值。

**天顶距**可以由垂直角得到，其值也常称为天顶距观测值。

**垂直角**和天顶距用于计算高程，在水平控制网中，还用于进行水平方向值的归算。



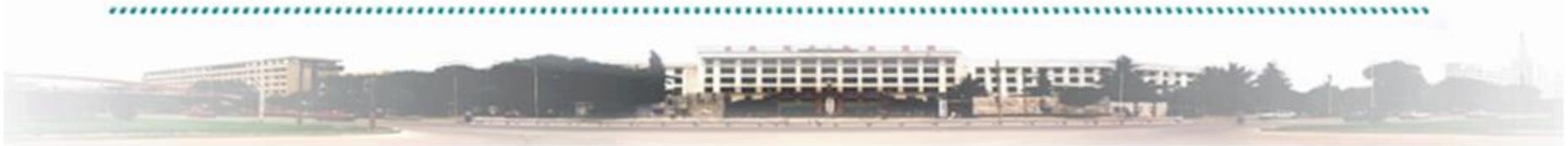
水平控制网





---

## 2、距离测量





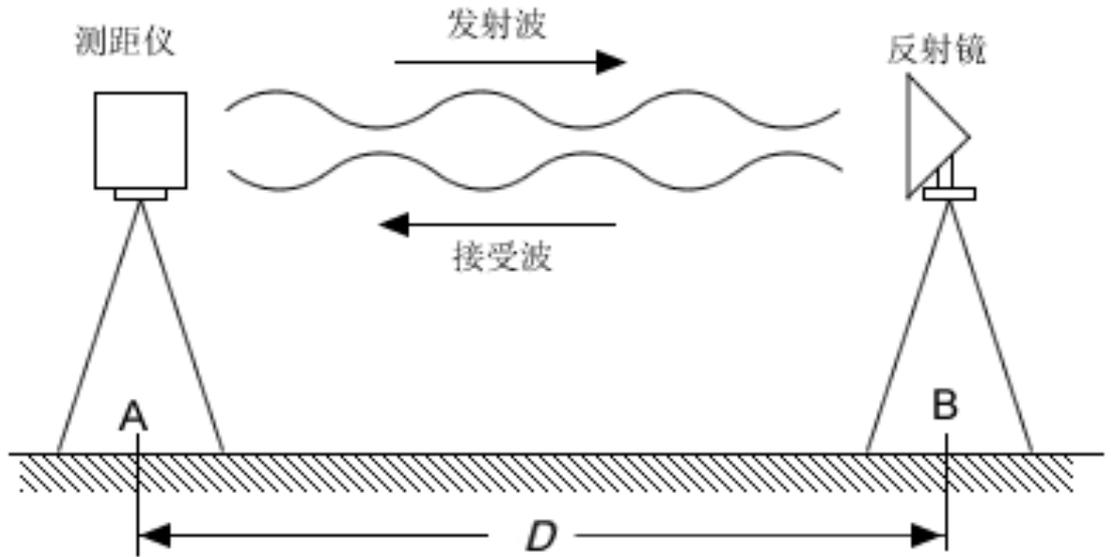
## 2. 距离测量

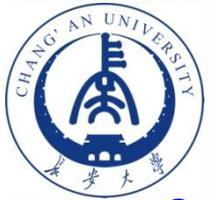
### 2.1 原理 (method)

$$D = \frac{1}{2} V \cdot t_{2D}$$

$$V = \frac{c}{n}$$

$$n = f(\lambda, t, p, e)$$





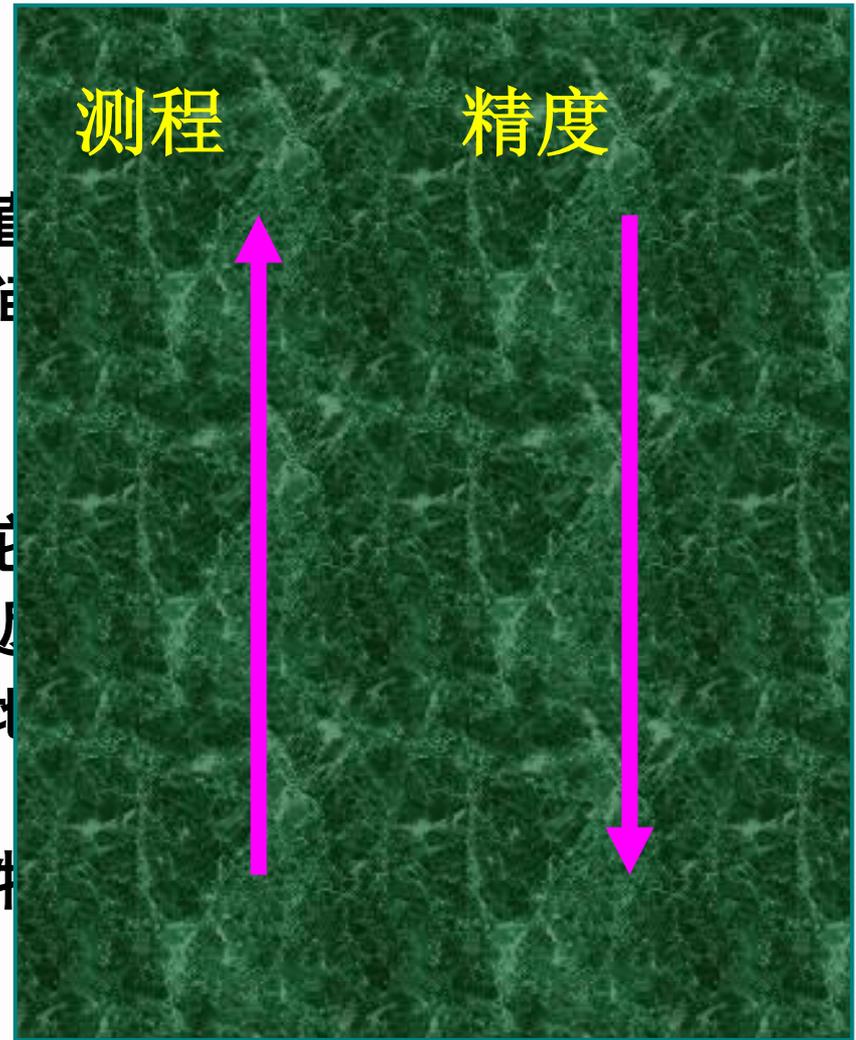
## 2. 距离测量

### 2.2 几种测距方法的优缺点

**脉冲法测距：**又叫直接法测距，其原理是利用脉冲信号在被测距离上往返传播时间的长短来测距的方法。

**相位法测距：**又叫间接法测距，它利用正弦电磁波信号在被测距离上往返传播的相位差（或相位差），根据相位差可以间接地测出距离。

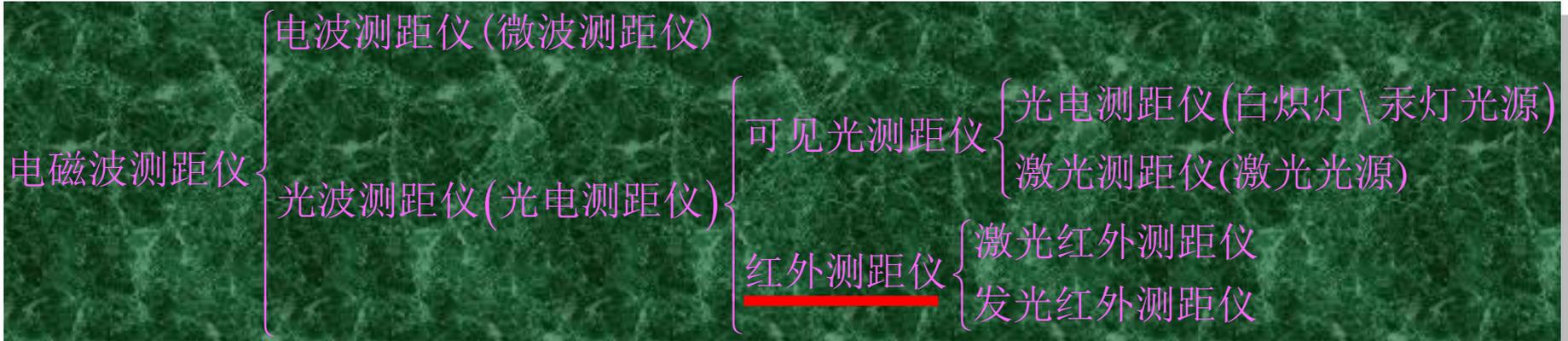
**干涉法测距：**是利用光学干涉的特性，通过干涉条纹的间距来精确测定长度。

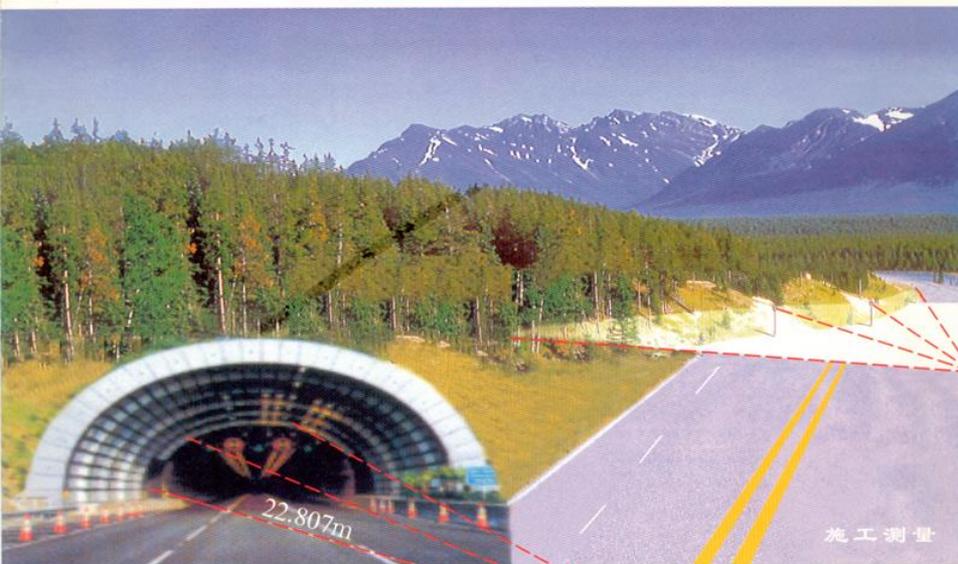




## 2. 距离测量

### 2.3 仪器 (instruments)





断面测量

施工测量



工程测量



Leica

PRECISION THROUGH INNOVATION

ETD系列速测全站仪



南方测绘仪器公司制造



---

# 3、高程测量





# 3. 高程测量—水准测量

## Altitude Control Survey—Leveling

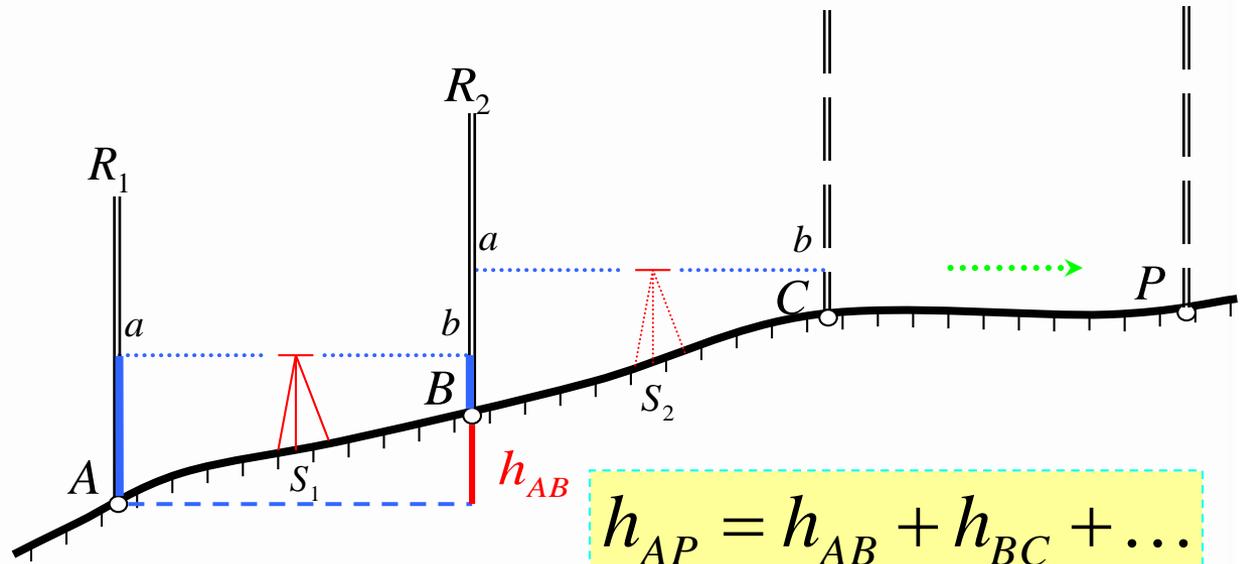
### 3.1 原理 (method)

$$h_{AB} = a - b$$

$a$ : 后视读数

$b$ : 前视读数

$$H_B = H_A + h_{AB}$$



$$h_{AP} = h_{AB} + h_{BC} + \dots$$

$$H_P = H_A + h_{AP}$$





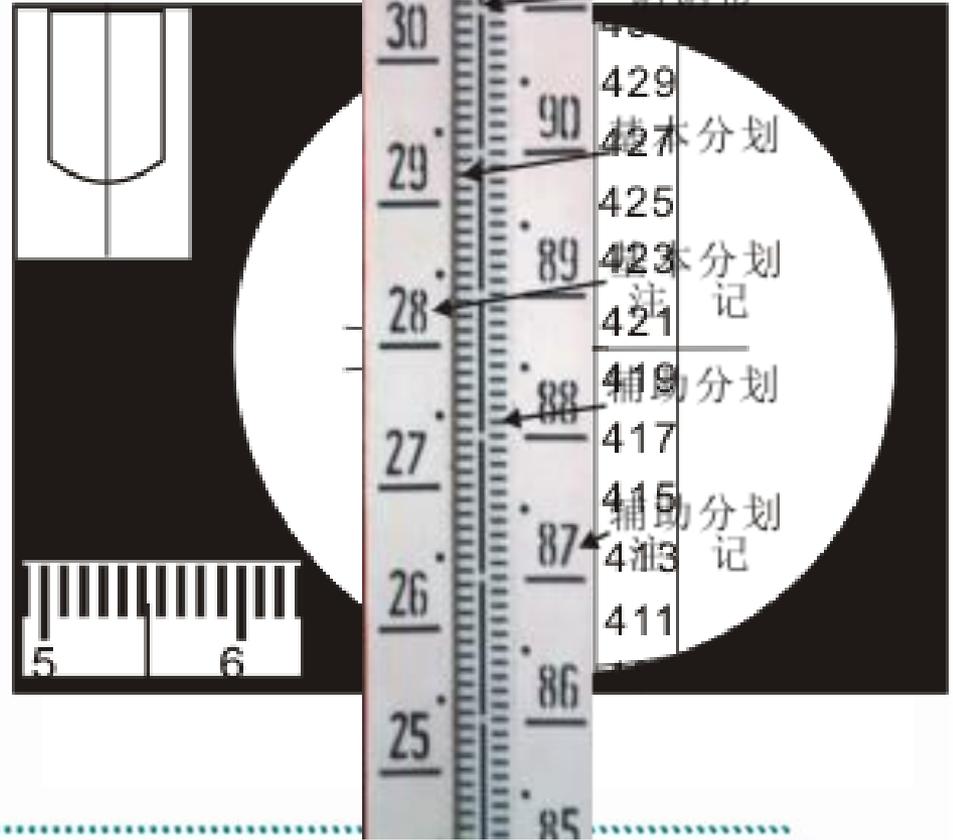
# 3. 高程测量—水准测量

## 3.2 仪器 (instrument)

精密水准仪

普通水准仪

电子水准仪



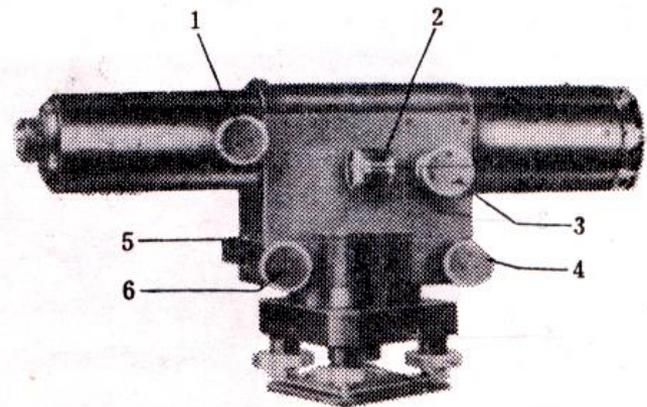


图 (9-14) Ni004精密水准仪

1. 调焦螺旋
2. 测微鼓读数放大镜
3. 测微鼓
4. 测微螺旋
5. T形安置的概略水准器
6. 倾斜螺旋

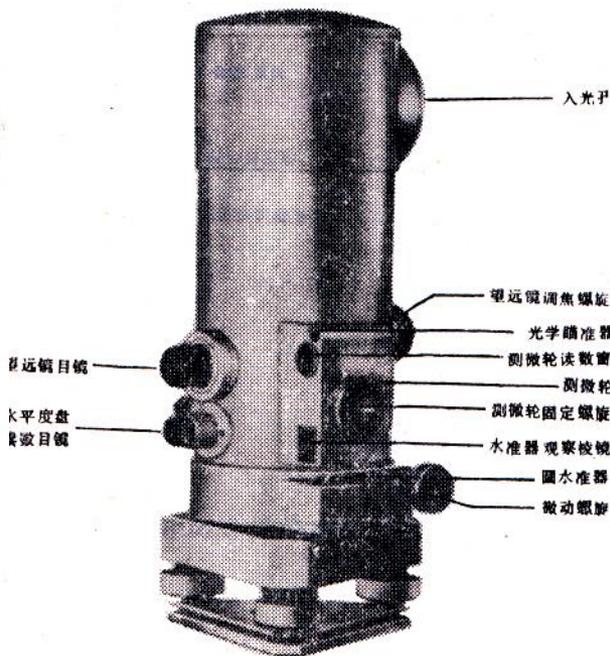
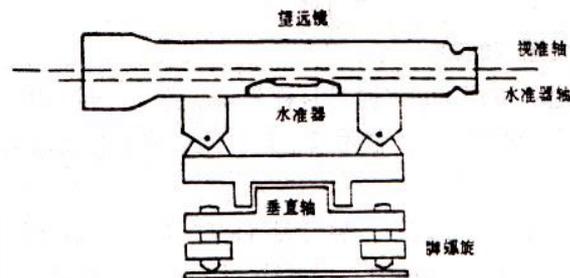
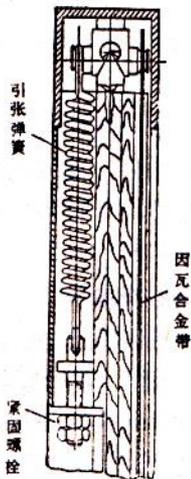


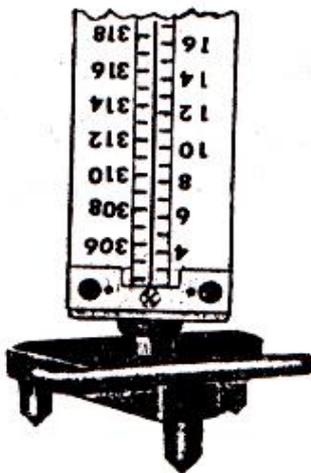
图 (9-19) Koni007水准仪



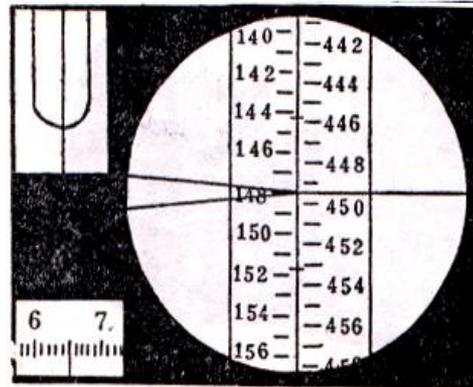
水准仪基本结构



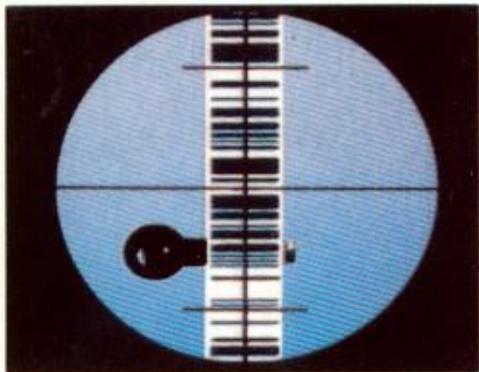
精密水准标尺



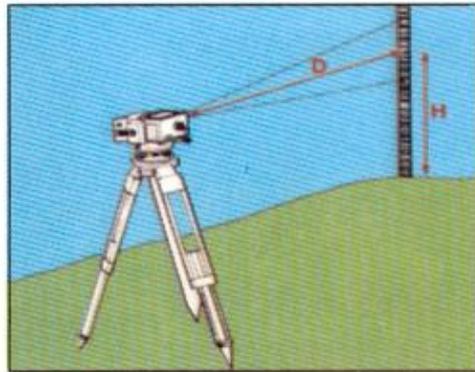
水准尺台与尺桩



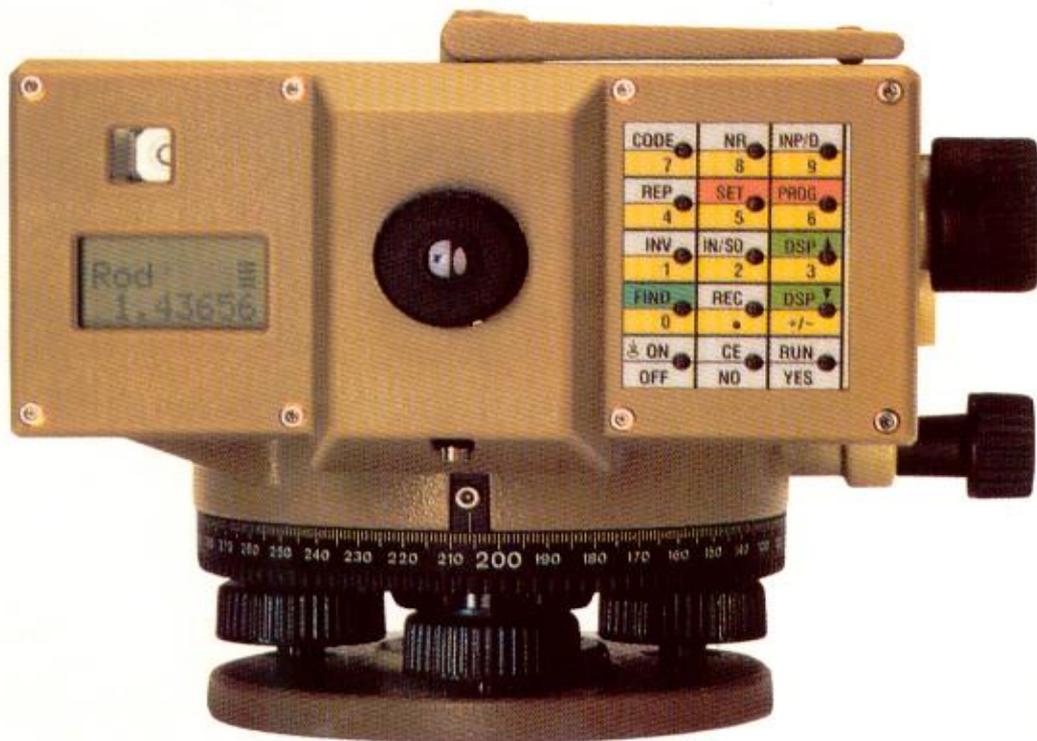
读数视场



只须照准目标，按键，  
立即显示量测结果

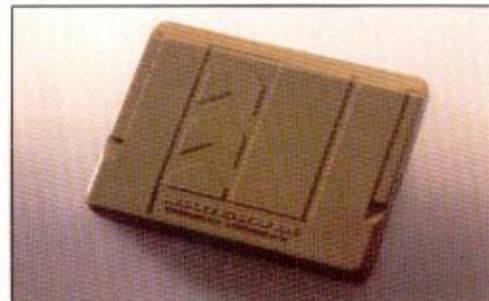


既能量测点位高，  
同时测得水平距离

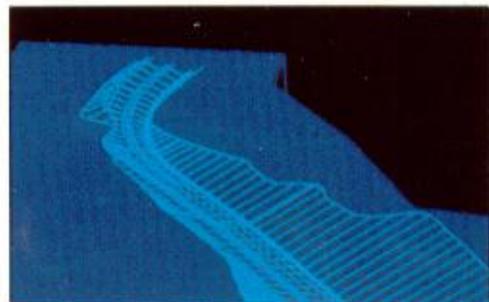
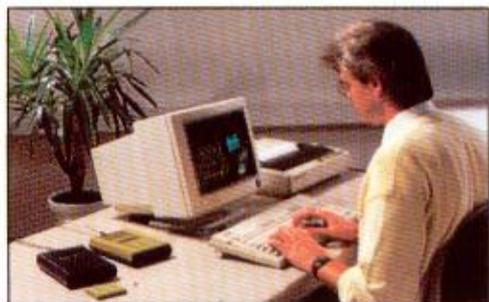


测、桥梁横河与面、沉  
降监测

- 地质和地面结构—地面  
蠕动监测、板块运动及  
大面积沉降监测、地震  
后果分析



自动记录数据，输入计算机，  
即可进行后处理

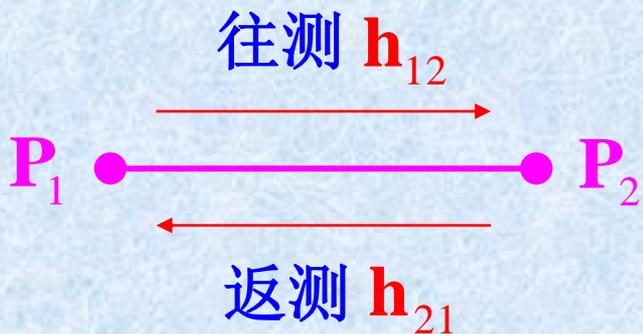




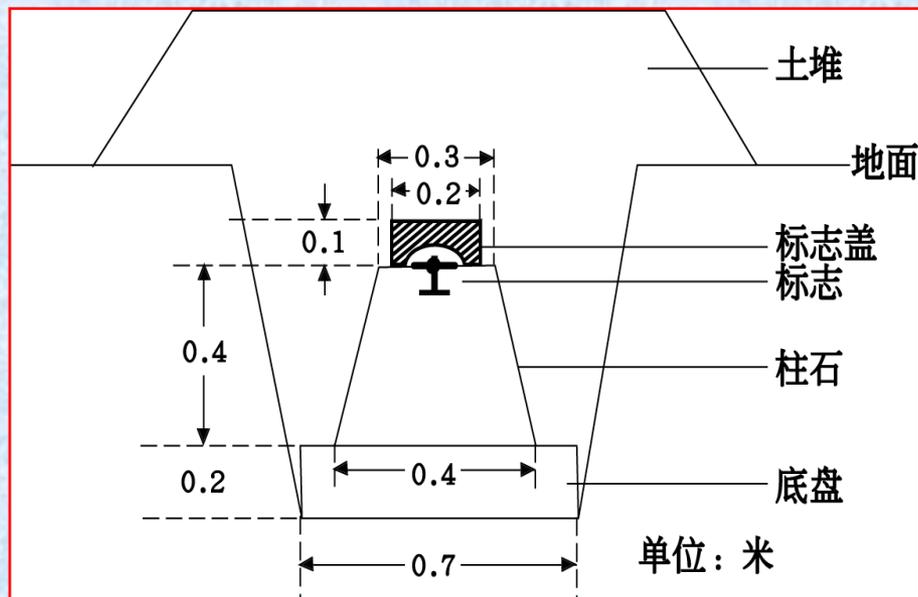
### 3. 高程测量—水准测量

3.3 水准测量观测值 (observations): 加各项改正后的两水准点间的正常高差, 一般取往返高差中数作为测量平差的观测值。

一个测段:  $P_1—P_2$



$$\Delta_{12} = h_{12} + h_{21}$$



普通水准点标石埋设图





# 3. 高程测量—三角高程测量

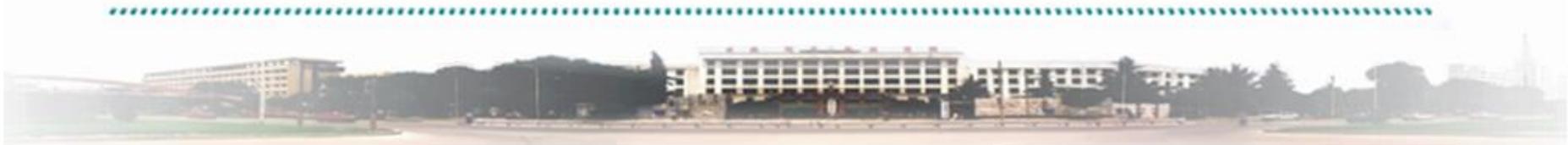
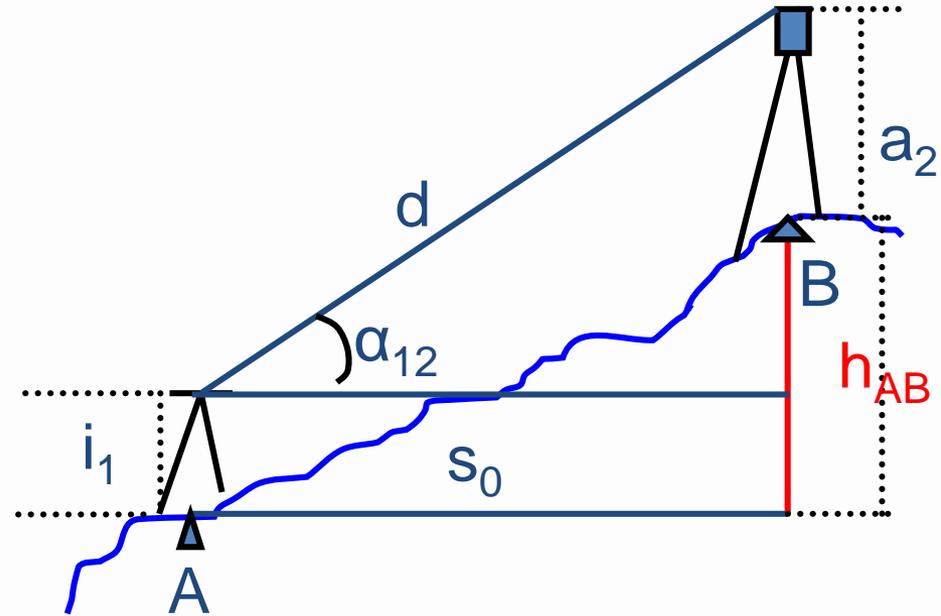
## Altitude Control Survey—Trigonometric Leveling

### 3.4 原理 (method)

$$h_{AB} = d \sin \alpha_{12} + i_1 - a_2$$

或

$$h_{AB} = S_0 \tan \alpha_{12} + i_1 - a_2$$





## 3. 高程测量—三角高程测量

### 3.5 数据 (data )

经各项改正后，可得到**两点间正常高差或大地高差**，一般也进行往返侧，取中数作为测量平差的观测值。

$$\bar{h}_{AB} = \frac{h_{\text{往}} + h_{\text{返}}}{2}$$

### 3.6 仪器 (instrument)

电子全站仪





---

# 4、天文测量





## 4. 天文测量— 基本概念

### Astronomic Observation— basic conceptions

**天文测量：**研究运用天文方法观测天体的位置来确定地面点在地球上的位置和某一方向线的方向，即研究用天文方法测定地面点的天文经纬度和某一方向的天文方位角，以供大地测量和其它有关科学技术方面使用。



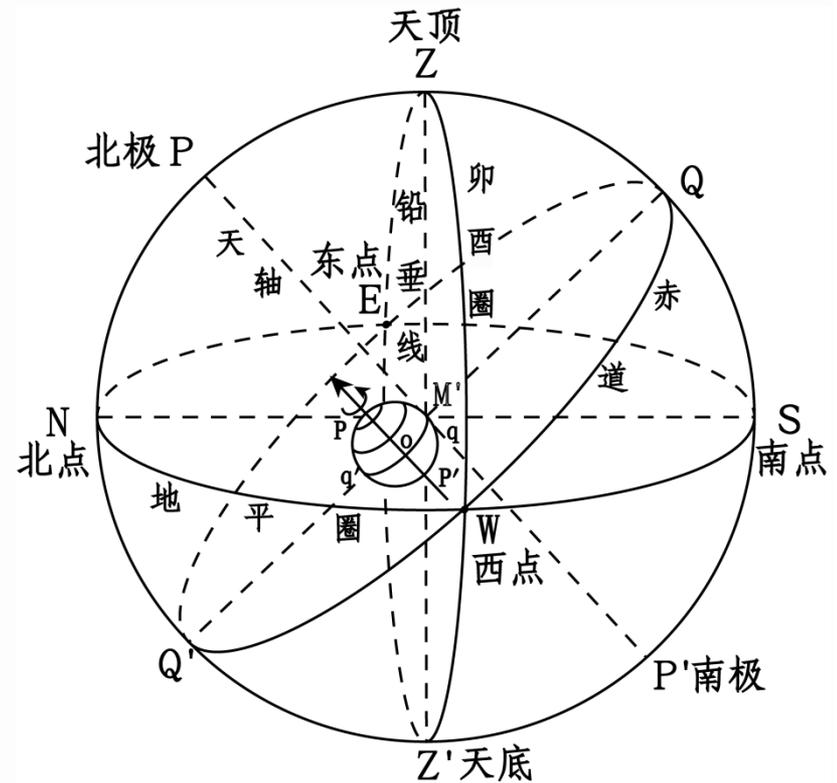




## 4. 天文测量— 基本概念

### 天球与地球自转有关的基本圈、线、点

- 天轴和天极
- 天球赤道面和天球赤道
- 天顶和天底
- 天球地平面和天球地平圈
- 天球子午面和天球子午圈
- 子午线和四方点
- 垂直圈和卯酉圈





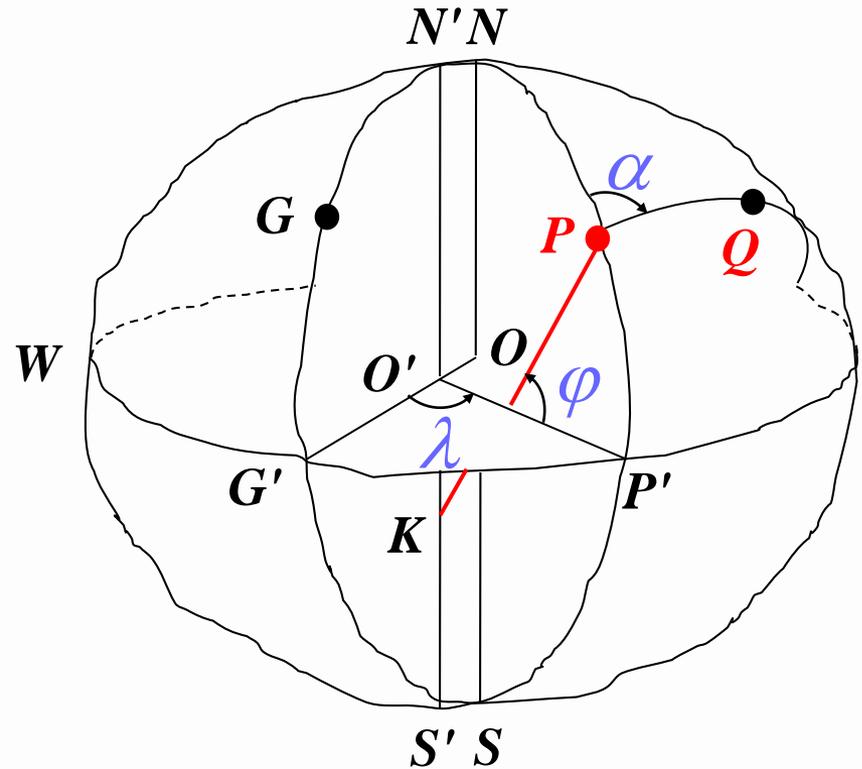
## 4. 天文测量— 观测数据

天文测量的观测数据：

天文经度

天文纬度

天文方位角





## 4. 天文测量— 基本方法

---

**天文测量法：**天文测量法是在地面点上架设仪器，通过观测天体（主要是恒星）并记录观测瞬间的时刻，来确定地面点的地理位置，即天文经度、天文纬度和该点至另一点的天文方位角。这种方法各点彼此独立观测，也无需点间同视，组织工作简单，测量误差不会积累。但因其定位精度不高，所以不是建立国家平面大地控制网的基本方法。

---

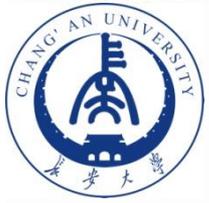




---

# 5、卫星测量-GPS





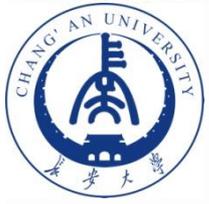
## 5. GPS测量— 基本概念

### Global Position System— basic conceptions

#### GPS全球定位系统

GPS是美国国防部于1973年授权开始研制的海陆空三军共用的美国第二代卫星导航系统，利用该系统，用户可以在全球范围内实现**全天候、连续、实时的三维导航定位和测速**；另外，利用该系统，用户还能够进行**高精度的时间传递和精密定位**。GPS系统在测量、导航、制导、精密定位、动态观测、授时、速度测量等方面，具有使用方便，观测简单，定位精度高，经济效益好等优点，显示出了强大功能及无比的优越性。





## 5. GPS测量— 基本概念

**Global Position System— basic conceptions**

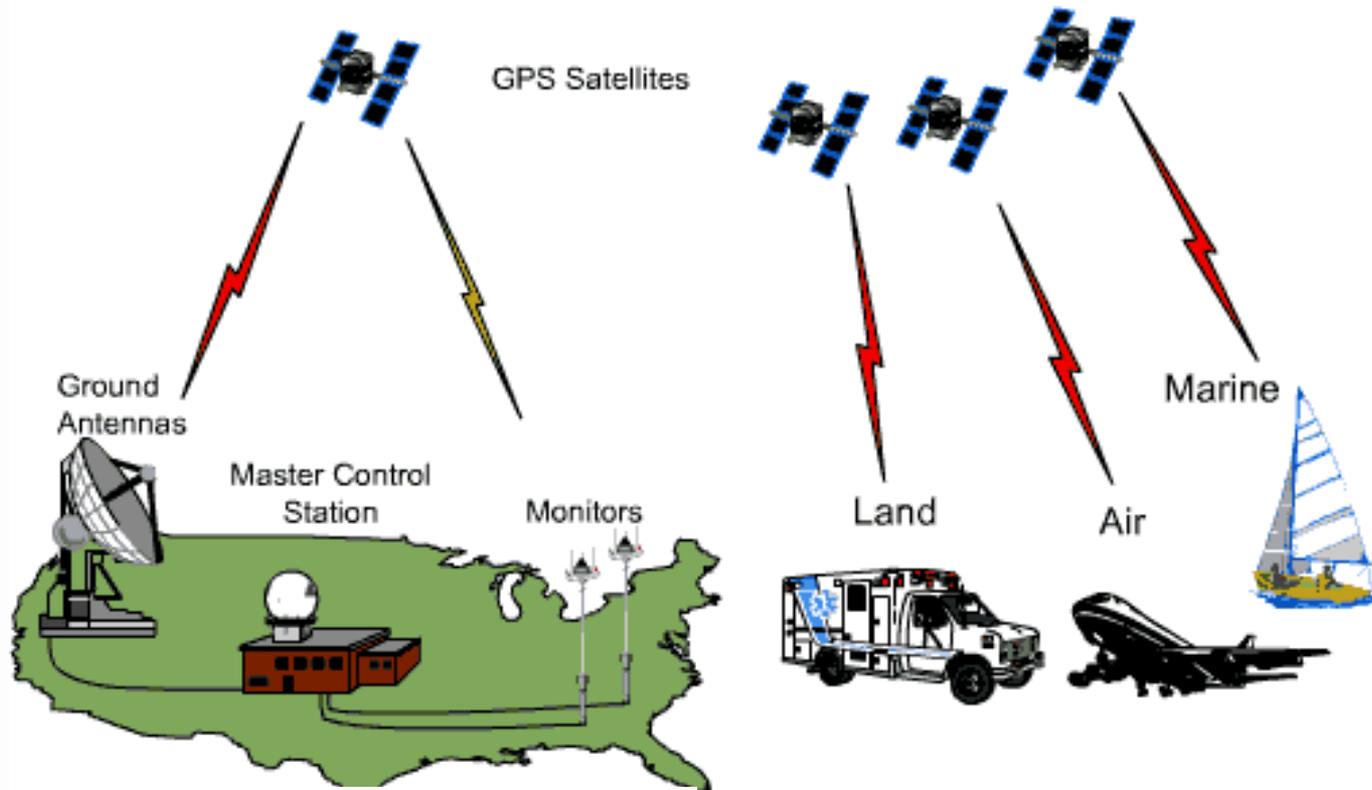
**GPS全球定位系统**





# 5. GPS测量— 基本概念

## 空间星座



地面监控

用户终端



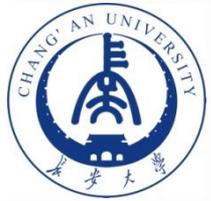


## 5. GPS测量— 基本概念

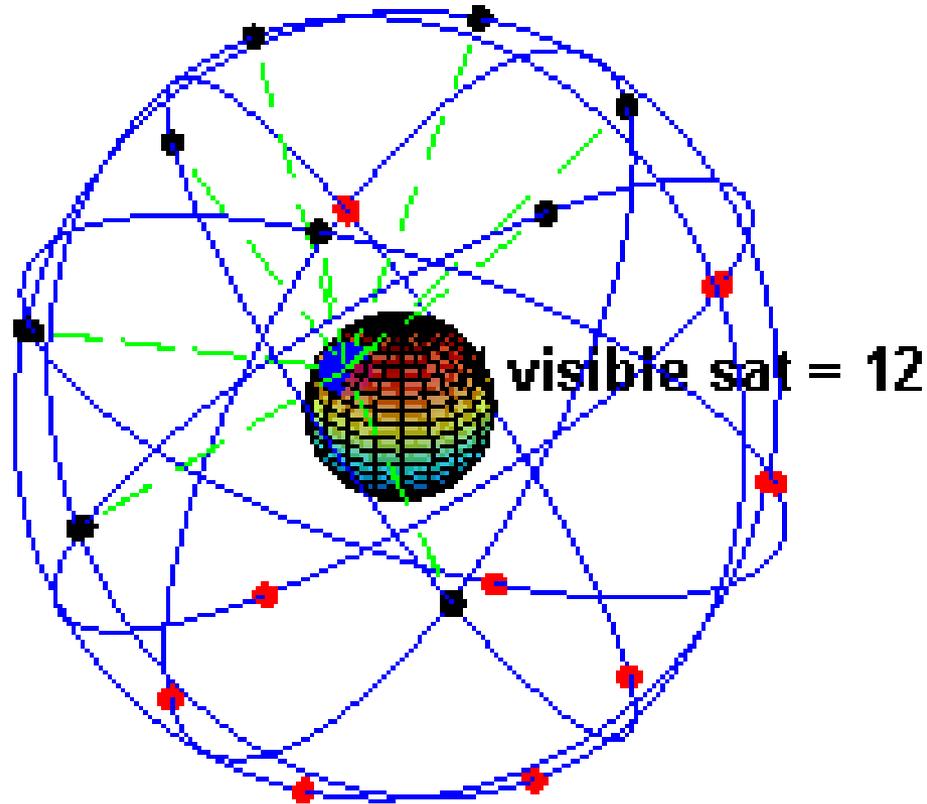
### GPS系统组成

① **空间星座**：由24颗工作卫星所共同组成GPS卫星星座，其中21颗可用于导航定位，另3颗为备用卫星。这24颗卫星分布在6个倾角为 $55^\circ$ 的轨道上绕地球运行。而发展到今天，在轨道上运行的卫星数量已经达到27颗。在地球上任何地点任何时刻都能观测到5—8颗卫星。卫星的高度约为2万公里，运行周期约为12个恒星时。每颗GPS工作卫星都发出用于导航定位的信号，GPS用户正是利用这些信号来进行工作的。





## 5. GPS测量— 基本概念



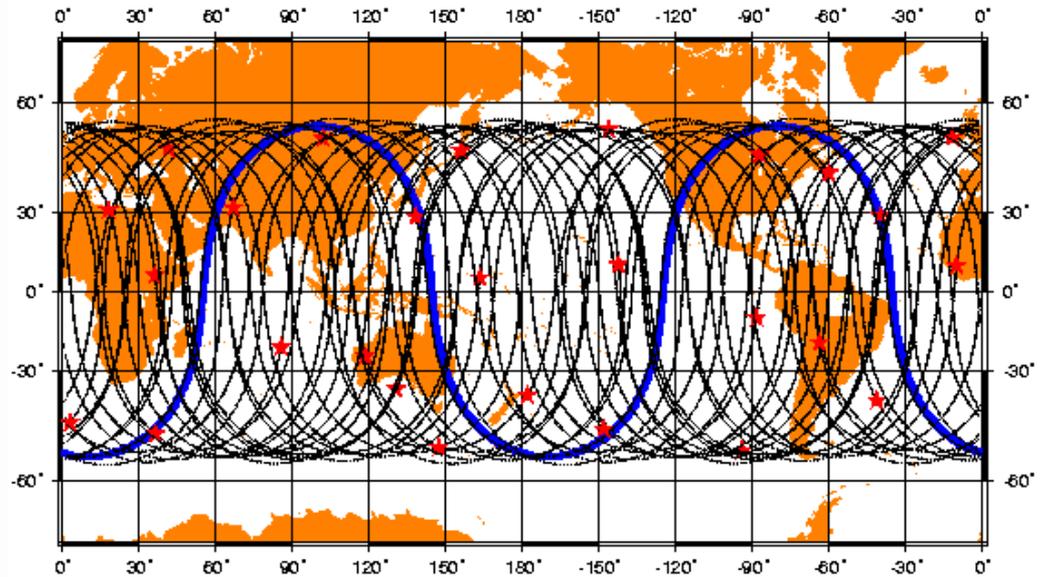
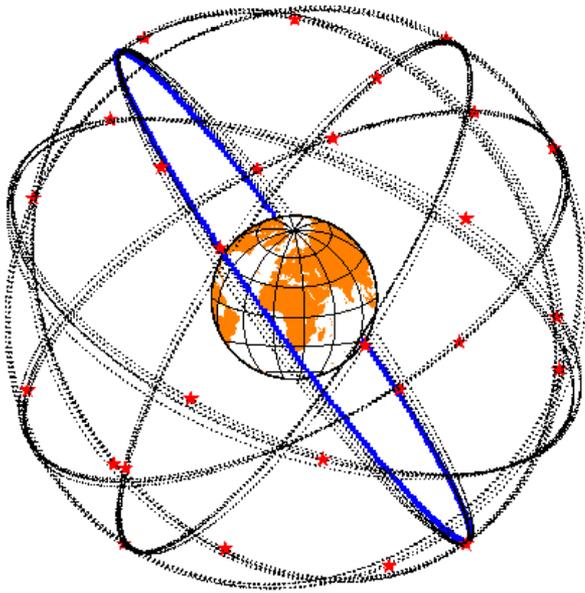
GPS卫星星座





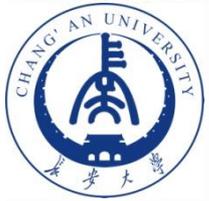
## 5. GPS测量— 基本概念

### GPS系统组成



GPS/GNSS卫星在不同角度下的运行轨迹





## 5. GPS测量— 基本概念

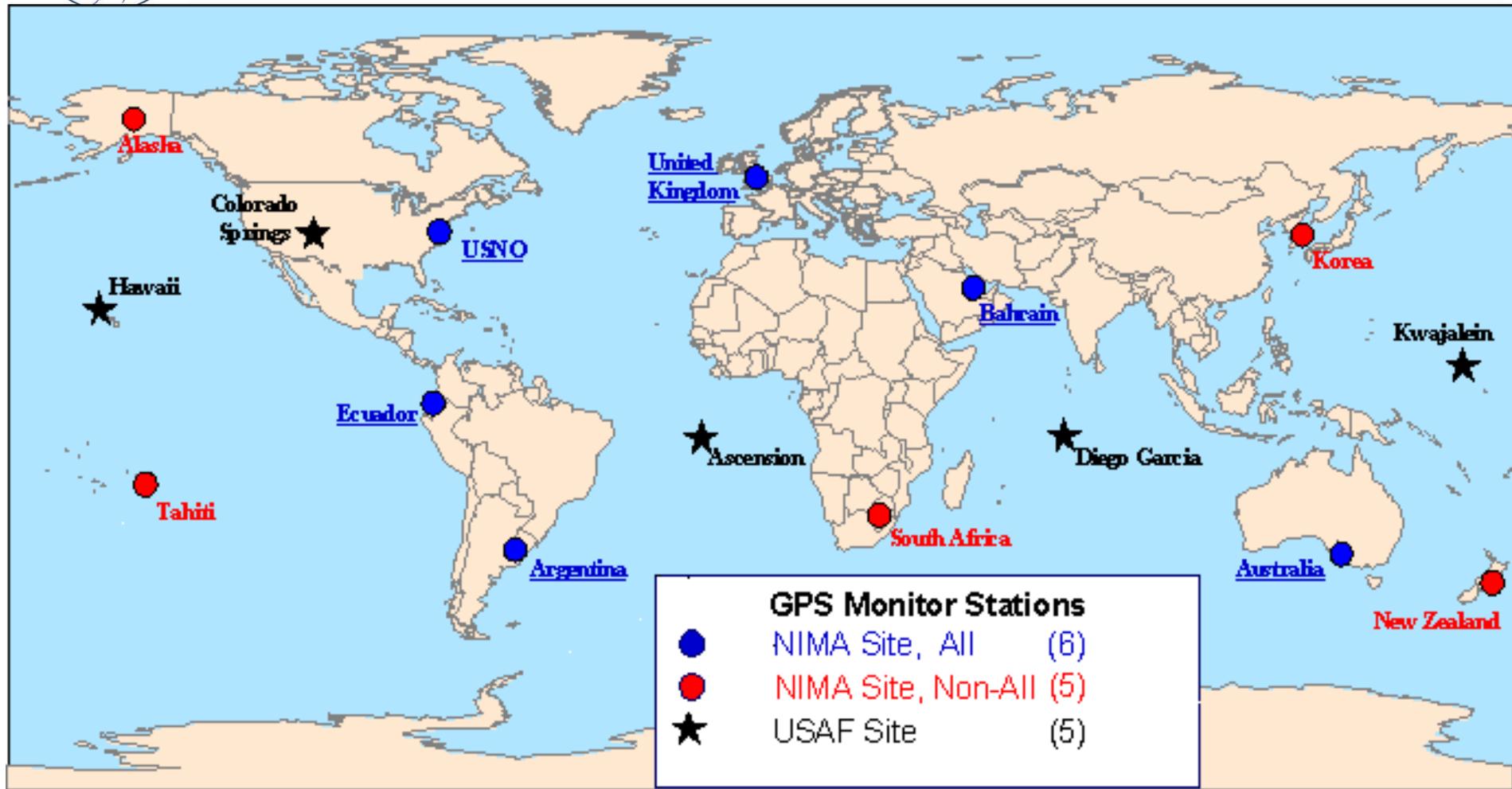
### GPS系统组成

**② 地面监控：**由分布在全球的若干跟踪站所组成的监控系统构成。主控站有一个，它的作用是根据各监控站对GPS的观测数据，计算出卫星的星历和卫星钟的改正参数等，并将这些数据通过注入站注入到卫星中去；向卫星发布指令，当工作卫星出现故障时，调度备用卫星，替代失效的卫星；同时具有监控站的功能。监控站的作用是接收卫星信号，监测卫星的工作状态。注入站是将主控站计算出的卫星星历和卫星钟的改正数等内容注入到卫星中去。





# 5. GPS测量—基本概念



GPS地面监控站



## 5. GPS测量— 基本概念

### GPS系统组成

③ **用户终端**：GPS的用户部分由GPS接收机、数据处理软件及相应的用户辅助设备所组成。其作用是接收GPS卫星所发出的信号，利用这些信号进行导航和定位等工作。





## 5. GPS测量— 基本概念



GPS用户终端部分



## 5. GPS测量— 基本概念

### GPS的测量模式

**根据定位所采用的观测值**

伪距定位，载波相位定位

**根据定位的模式**

绝对定位，相对定位

**根据获取定位结果的时间**

实时定位，非实时定位

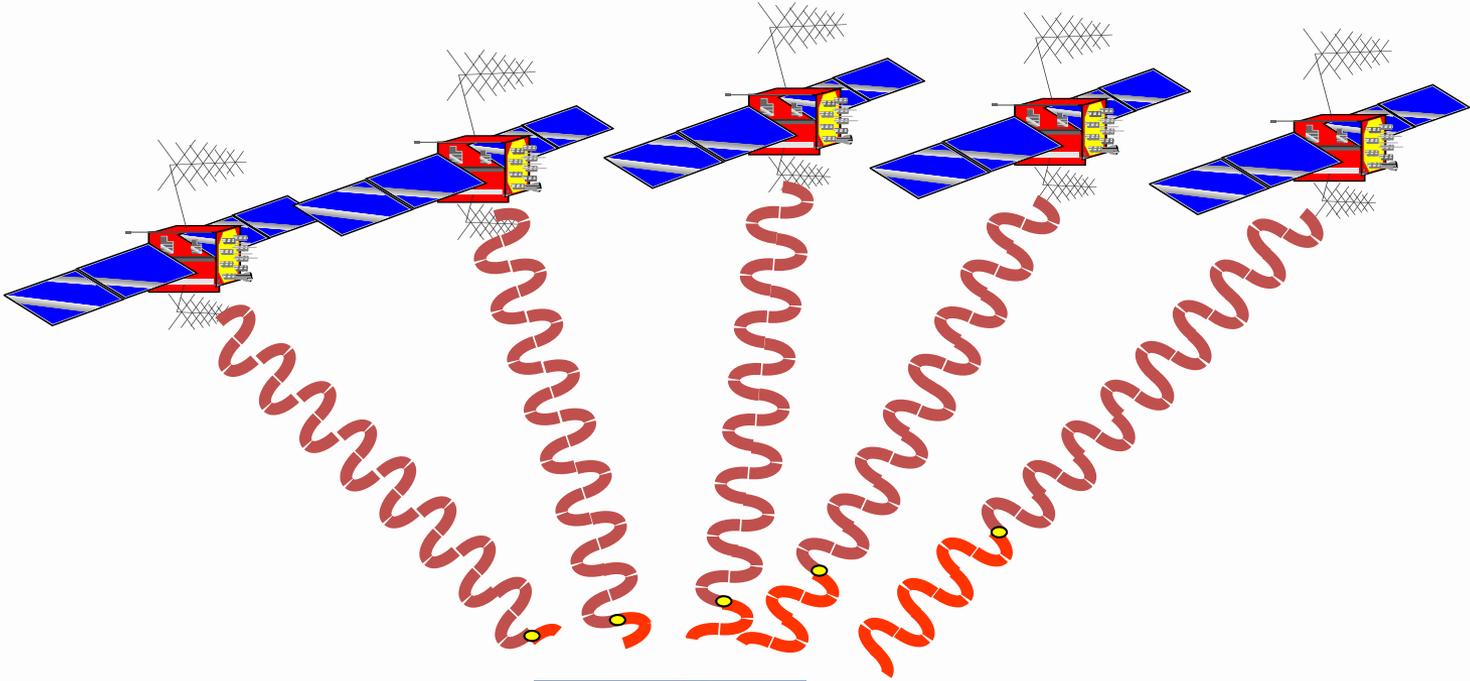
**根据定位时接收机的运动状态**

动态定位，静态定位

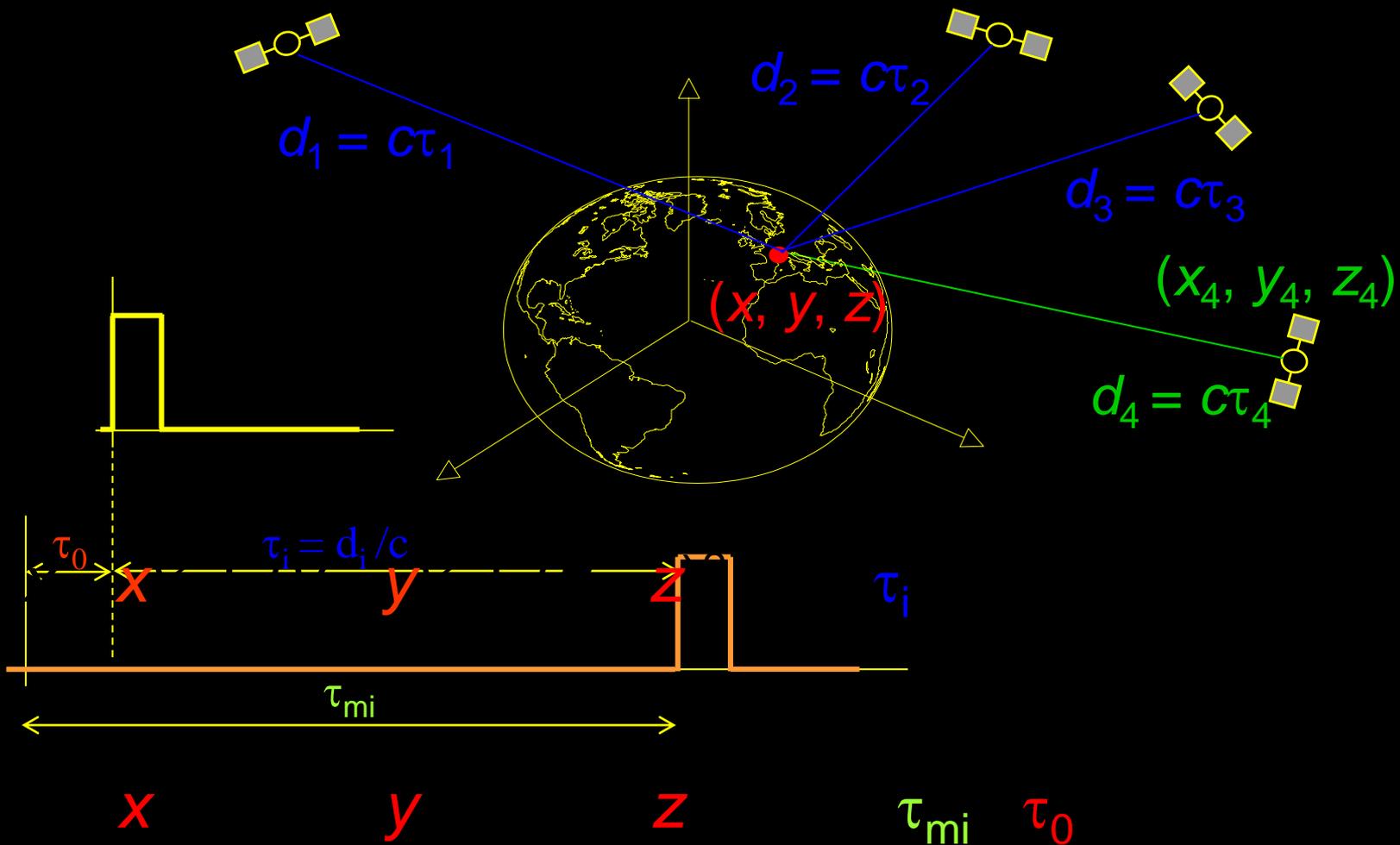


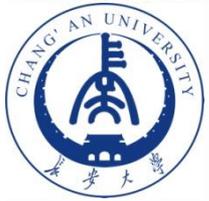


# 5. GPS测量— 定位原理



# Principles of Satellite Navigation Systems – Ranging Systems





## 5. GPS测量— 定位原理

### GPS伪距导航定位原理

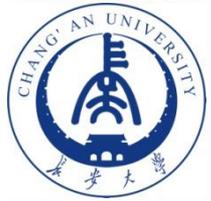
钟差:  $\Delta t_j = t_j - t, \Delta t_R = t_R - t$

信号正确传播时延:  $\tau = t^r - t^s$

信号实际传播时延:  $\tau' = t_R^r - t_j^s = t^r + \Delta t_R - (t^s + \Delta t_j)$

化为距离:  $c\tau' = c(t^r - t^s) + c\Delta t_R - c\Delta t_j$   
 $\Leftrightarrow \rho' + c\Delta t_j = \sqrt{(X - X_j)^2 + (Y - Y_j)^2 + (Z - Z_j)^2} + c\Delta t_R$





## 5. GPS测量— 应用领域



公路交通



城市勘测



石油物探



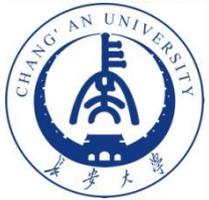
水下地形



水利水电



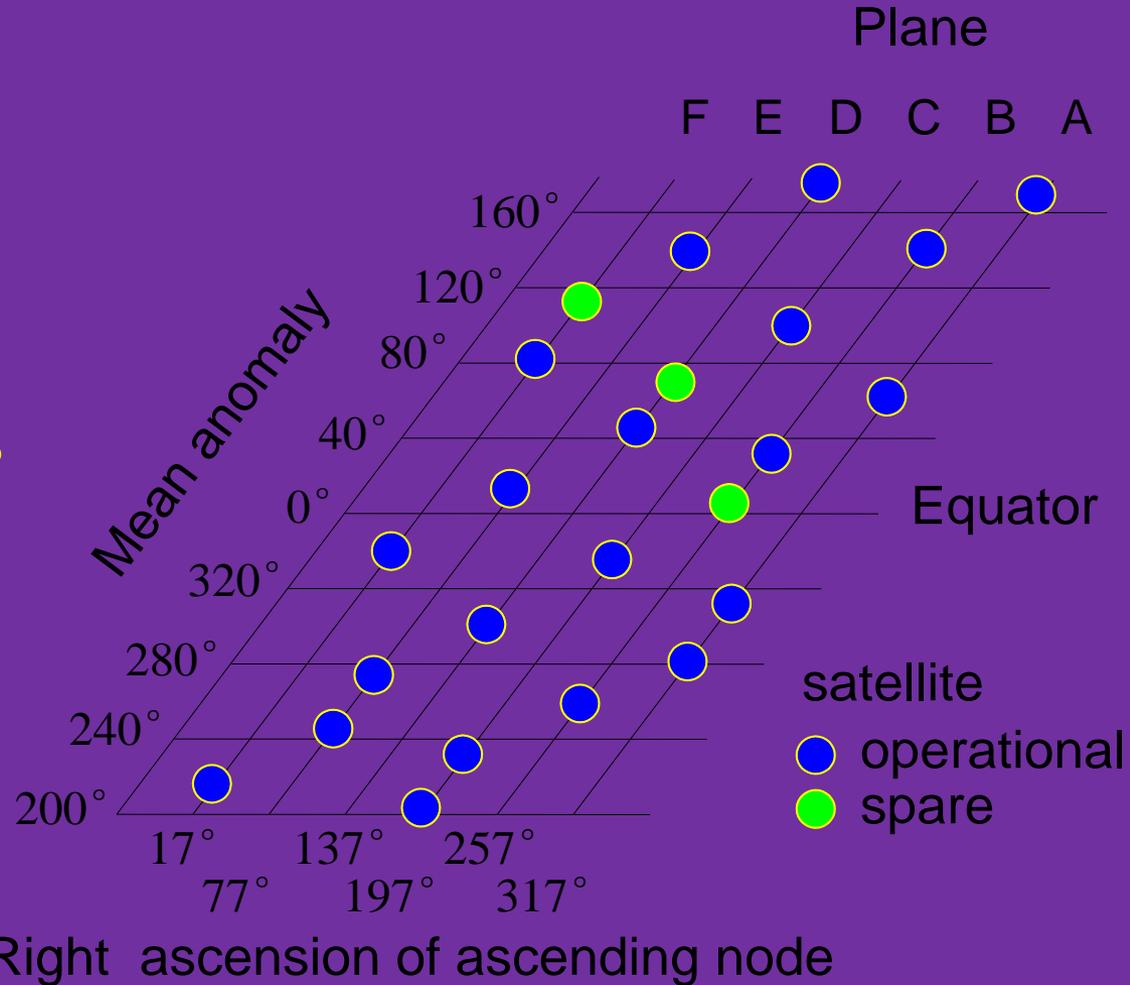
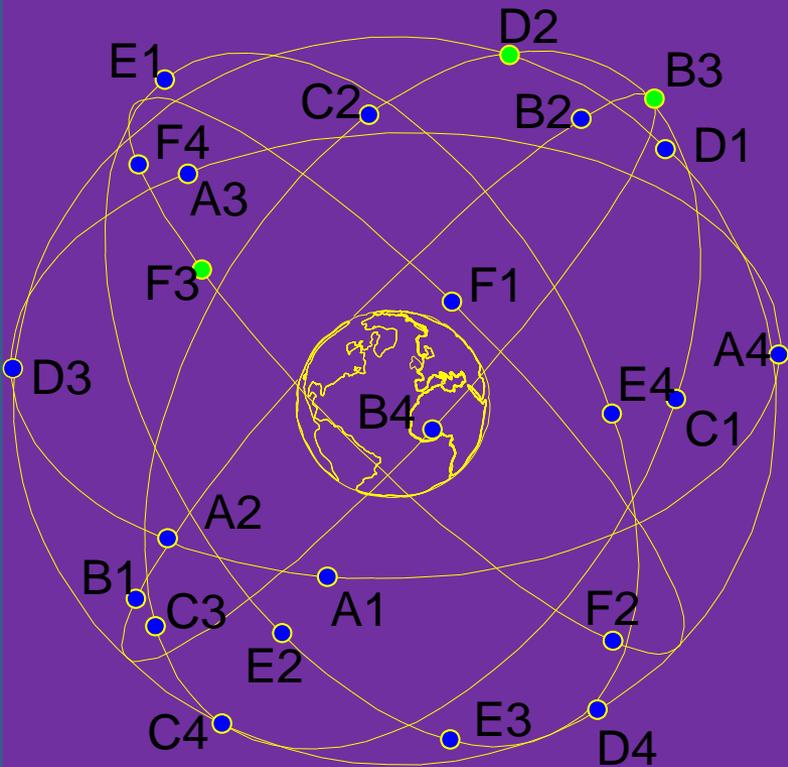
国土资源



# 5. GPS测量— 军事领域

<b>空军导航</b>			
<b>战机导航</b>	<b>空中加油</b>	<b>精确打击</b>	
<b>海军导航与定位</b>			
<b>舰只导航</b>	<b>舰载机引导</b>	<b>武器发射</b>	
<b>陆军导航与定位</b>			
<b>单兵导航</b>	<b>炮兵快速反应</b>	<b>侦察</b>	
<b>三军协同作战</b>			

# GPS Constellation

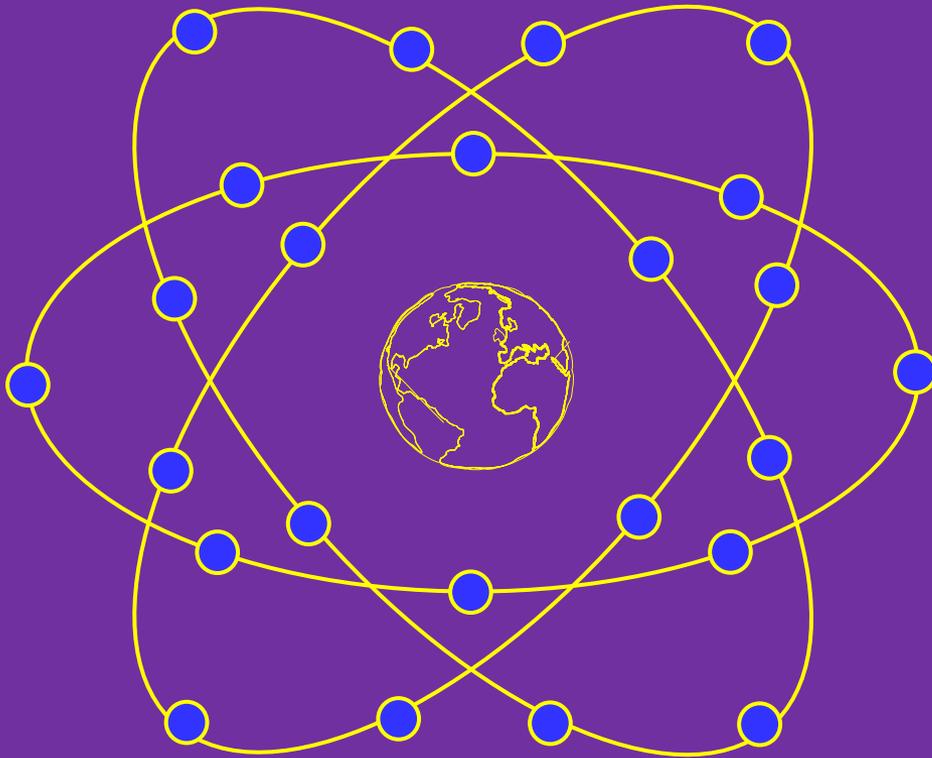


Inclination  $55^\circ$

Semimajor axis 26561.75 km (altitude above Earth 20183,6 km)

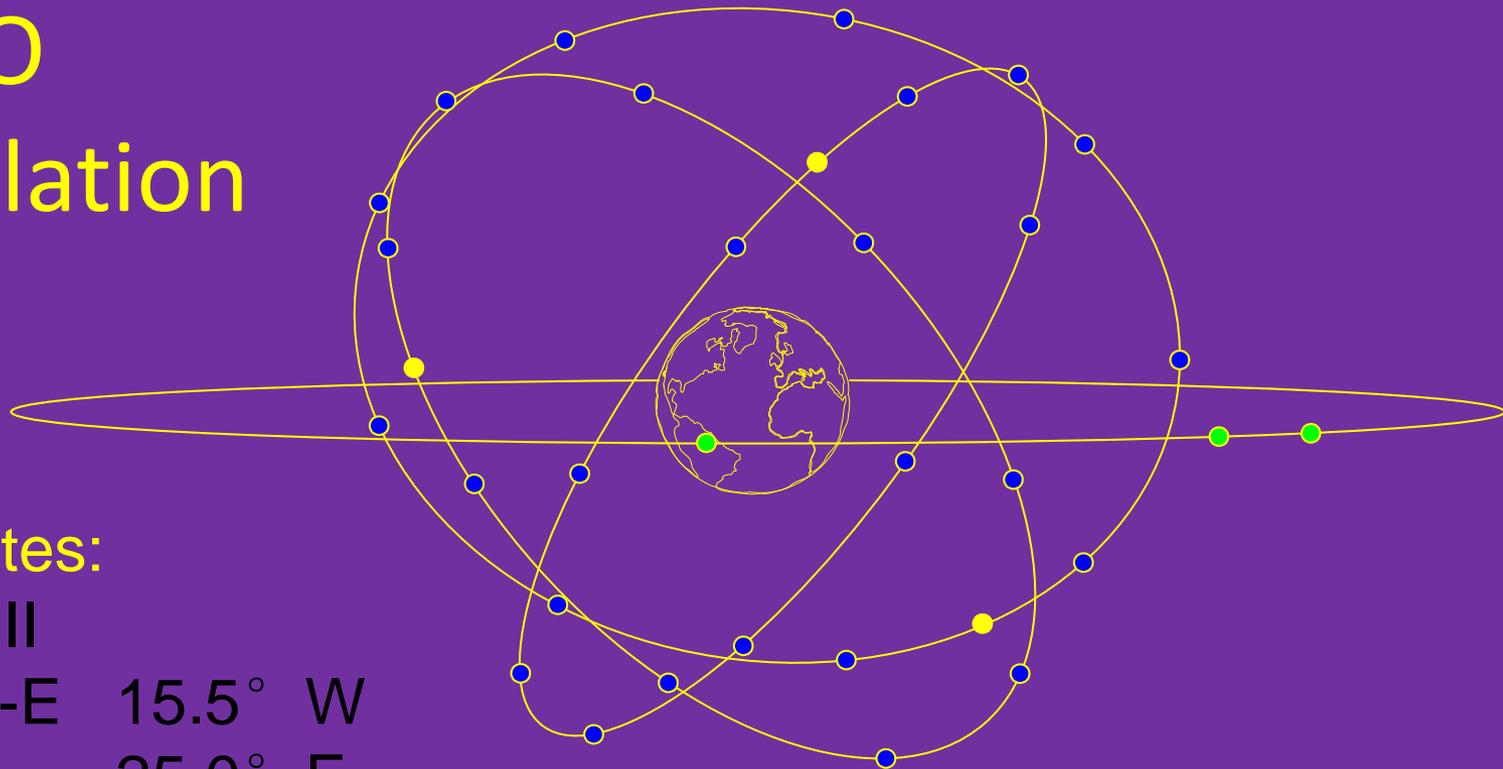
Excentricity nominally  $e = 0$ , generally  $e < 0,02$

# GLONASS Constellation



- 24 satellites (8 satellites in each of 3 planes)
- $e \sim 0$  (circular orbit)
- inclination  $64.8^\circ$
- altitude 19 100 km,
- orbit period  $11^h 15^m$
- angular spacing between orbits  $120^\circ$

# GALILEO Constellation



## 3 GEO satellites:

- Inmarsat III
  - AOR-E 15.5° W
  - F5 25.0° E
- ESA Artemis 21.5° E

## 30 MEO satellites:

- 9 satellites in each of 3 planes
- 3 spare satellites (1 in each plane)
- $e = 0$  (circular orbits)
- inclination 56°
- altitude 23 616 km



# 中国北斗卫星导航系统

**2010年1月17日**

中国在西昌卫星发射中心用“长征三号丙”运载火箭，将第三颗北斗导航卫星成功送入太空预定轨道

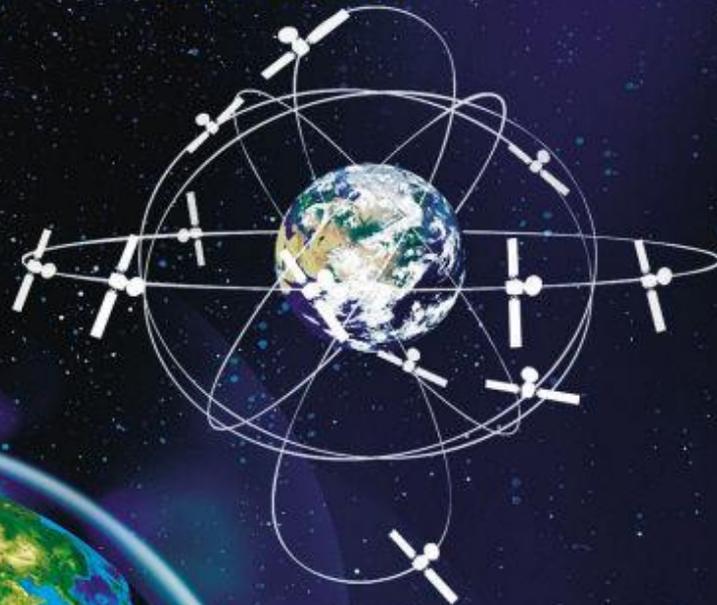


**中国正在实施北斗卫星导航系统建设工作**

将相继发射五颗静止轨道卫星和三十颗非静止轨道卫星，建成覆盖全球的北斗卫星导航系统

**按照建设规划  
2012年左右**

中国北斗卫星导航系统首先提供覆盖亚太地区的导航、授时和短报文通信服务能力



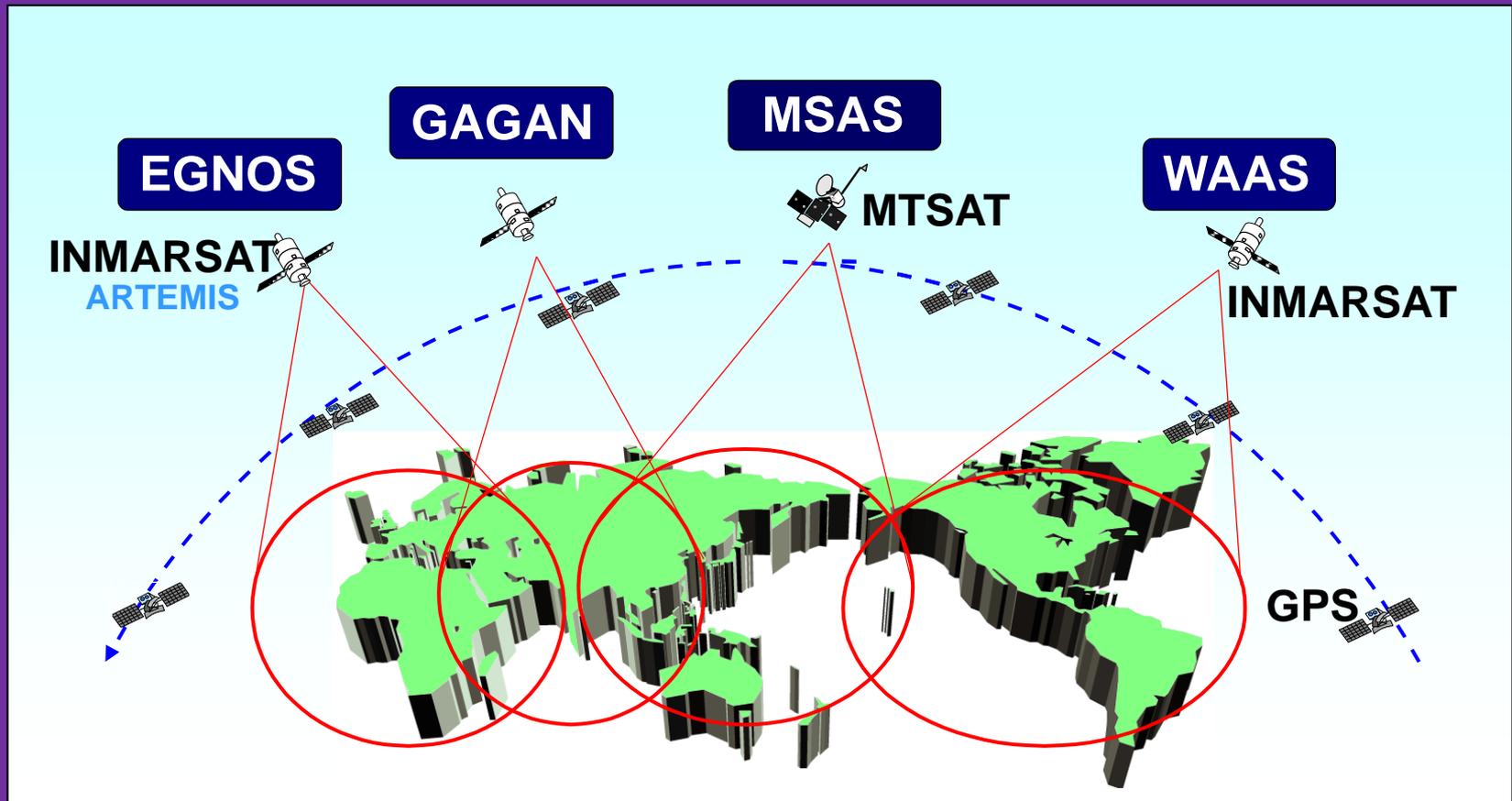
**到2020年左右**

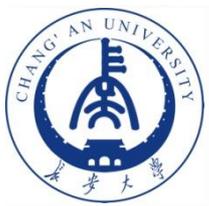
建成覆盖全球的北斗卫星导航系统



# Augmentations

## SBAS - Constellation





# 全球导航卫星系统GNSS





# GNSS卫星定位技术的发展历程

第四代

全球精密定位技术 - Global RTK

第三代

精密单点定位技术

网络RTK技术

第二代

常规RTK

广域差分定位

第一代

伪距单点定位

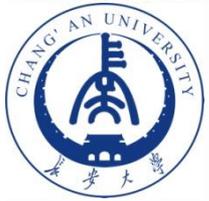
载波静态定位

伪距差分定位

绝对定位

相对定位

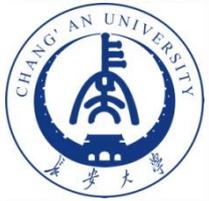




---

# 6、重力测量





# 6. 重力测量— 基本概念

## Gravity Survey— basic conceptions

### 1、 重力

#### 1) 质点、质体引力:

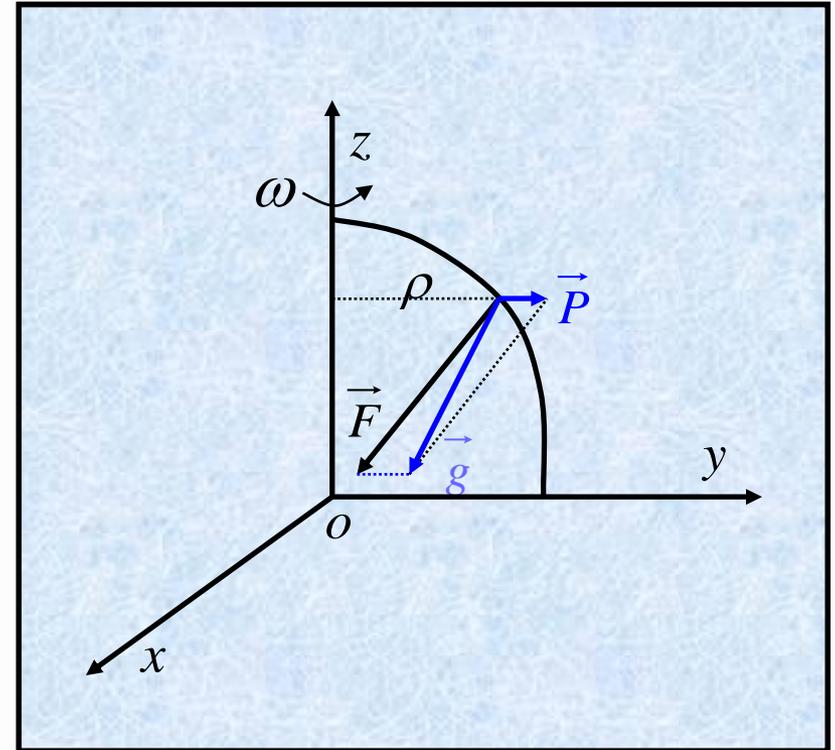
质点: 
$$\vec{F} = -f \frac{m \cdot m'}{r^2 \vec{r}}$$

质体: 
$$\vec{F} = -f \int_{(M)} \frac{dm}{r^2} \vec{r}$$

#### 2) 离心力、重力:

离心力: 
$$P = \omega^2 \rho$$

重力: 
$$\vec{g} = \vec{F} + \vec{\rho}$$





## 6. 重力测量— 基本概念

---

### 2 重力单位及全球变化:

$$1gal = 1cm / s^2 \quad 1mgal = 10^{-3} gal \quad 1\mu gal = 10^{-6} gal$$

### 3 重力基准:

全球: 维也纳, 波茨坦, IGSN-71, 国际绝对重力基准网

我国: 1957, 1985, 2000国家重力基准网

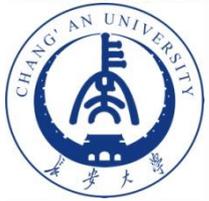
### 4 重力测量的方法:

绝对重力测量

相对重力测量

---





## 6. 重力测量— 绝对重力测量

### 1、原理 (method)

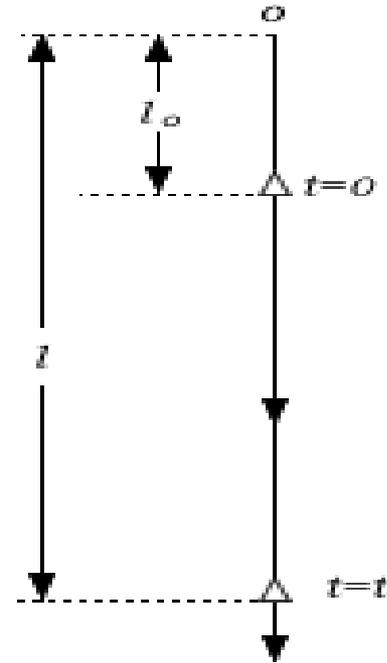
$$l = l_0 + V_0 \cdot t + \frac{1}{2} g \cdot t^2$$

### 2、数据 (data)

重力加速度

### 3、仪器 (instrument)

绝对重力仪





## 6. 重力测量— 相对重力测量

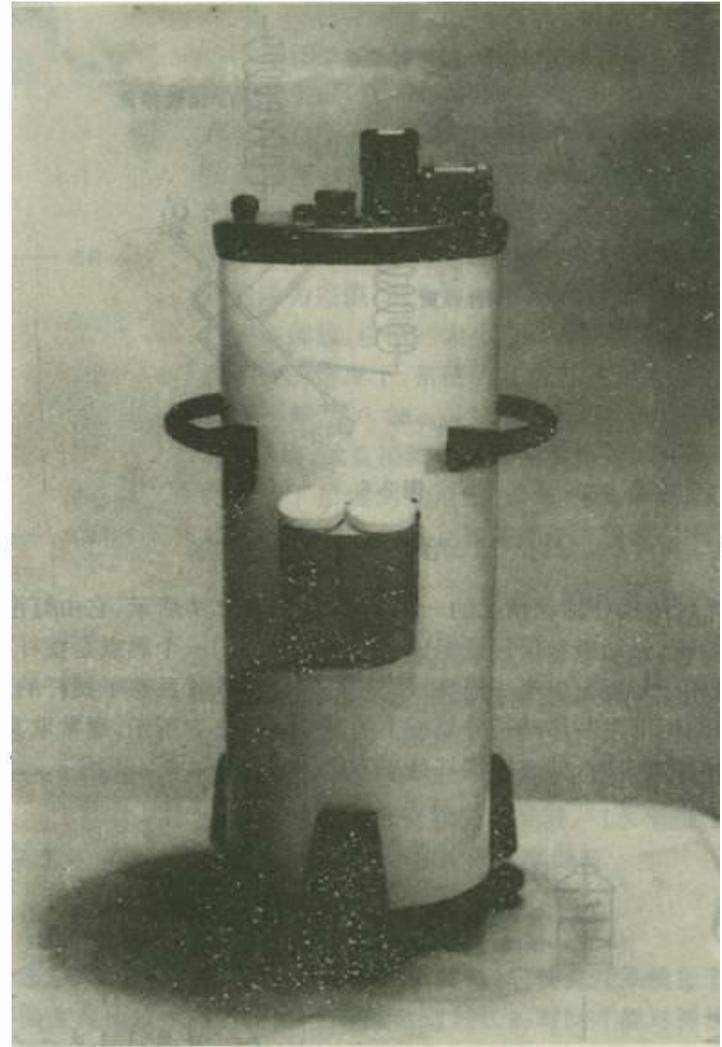
### 1、原理 (method)

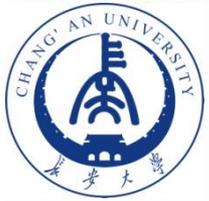
### 2、数据 (data)

相对重力加速度

### 3、仪器 (instrument)

相对重力仪（弹簧重力仪）

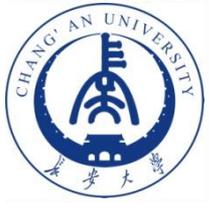




## 6. 重力测量— 航空重力测量

航空重力测量的基本原理是利用飞机携带的机载重力仪测出飞行剖面各时刻相对于地面基准重力点的重力变化，然后算出的各扰动改正项并通过一定的数据处理方法推算出相应时刻空中点的重力加速值，最后采用延拓方法将其归算为地面点的重力值。航空重力测量是相对重力测量，即在飞机起飞前，应当与地面已知重力点进行联测。





---

# 7、卫星激光测距-SLR



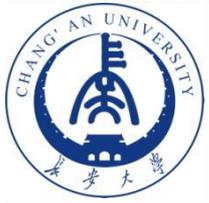


## 7. 人卫激光测距

### Satellite Laser Ranging – SLR

卫星激光测距（SLR）是20世纪60年代中期兴起的一项新技术。经过30多年的发展，已成为卫星精密定位观测的主要技术手段之一，是目前各种空间观测技术中**绝对定位精度最高一种**，它在全球地心坐标系的建立和维护中起着决定性的作用，在现代板块运动的实测、地球重力场模型和地心引力常数的改进、地球自转参数的精确测量等方面也都取得了丰硕的成果。



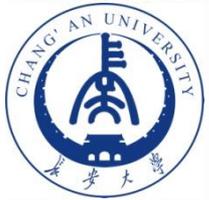


## 7. 人卫激光测距 - 基本原理

### 1) 激光

激光LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) 是指光的受激辐射以实现光放大。





## 7. 人卫激光测距 - 基本原理

### 激光具有的特点：

- (1) **输出功率高**。它在单位面积上的光能可高于太阳表面，所以能进行远距离测量。
- (2) **激光的谱线很窄**，便于在接收系统中用窄带滤光片来消除天空背景的噪声，从而大大提高信噪比。
- (3) **激光的发散角极小**，在很远的距离上光能量仍能集中在一个很小的范围内。有的激光测距系统发散角只有 $2''$ ，在月球表面上光斑直径也只有4km。





# 7. 人卫激光测距 - 基本原理

## 2) 激光测距原理

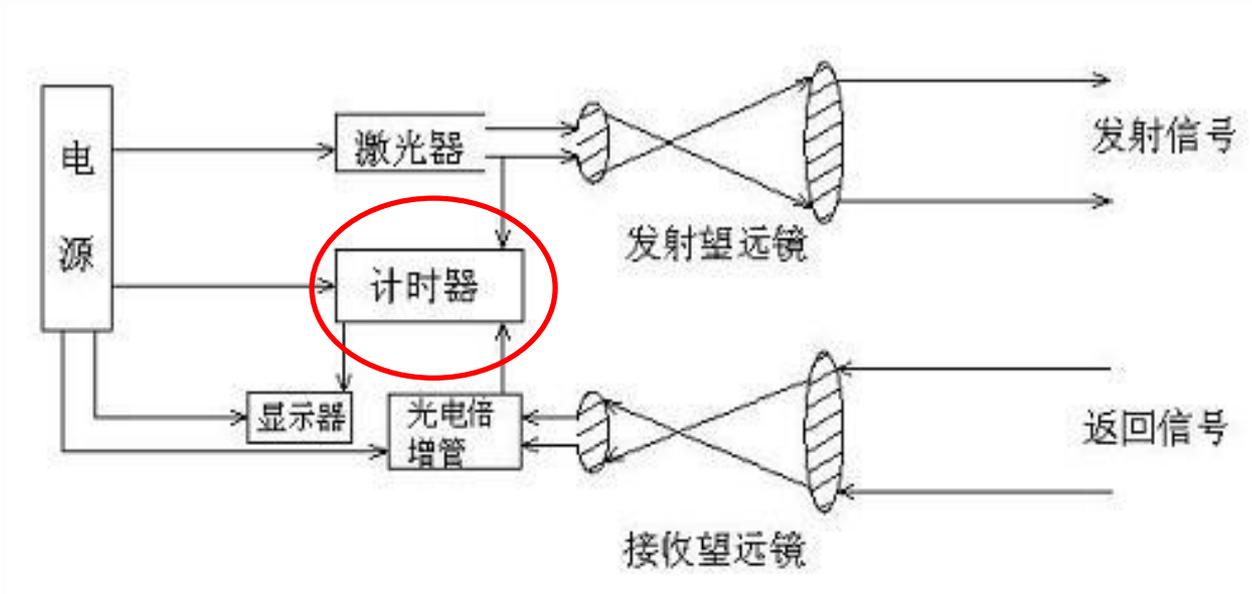
用安置在地面测站上的激光测距仪向配备了后向反射棱镜的激光卫星发射激光脉冲信号，该信号被棱镜反射后返回测站，精确测定信号往返传播的时间，进而求出观测瞬间从仪器中心至卫星质心间的距离的方法、技术，称为卫星激光测距或激光测卫（Satellite Laser Ranging）。目前的测距精度可达1cm左右。

激光测卫示意图





# 7. 人卫激光测距 - 基本原理



激光测卫SLR原理图





## 7. 人卫激光测距 - 激光测距卫星

如前所述，凡是安装了后向反射棱镜，可对其进行激光测距的卫星称为**激光测距卫星**。

激光测距卫星可以分为两类：

- 专提供激光测距用的卫星，如Lageos卫星、Starlette卫星等。



- 提供不同用途的卫星，如应用技术卫星ATS-6，海洋卫星Seasat-1，海洋地形试验卫星Topex/Poseidon，部分GPS卫星等。

**这些卫星之所以安装激光反射棱镜，主要是把激光测距也作为一种定轨的手段。**

神舟4号棱镜组





## 7. 人卫激光测距 - 激光测距卫星

---



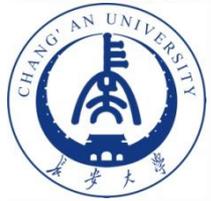
**LAGEOS satellite**



Satellite laser ranging  
retroreflector array

---





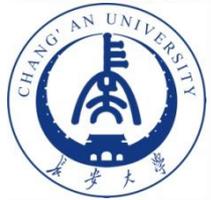
## 7. 人卫激光测距 - 人卫激光测距仪

### 1) 人卫激光测距仪的分类

人卫激光测距仪根据其构造及精度大体可以分为三代：

- 第一代人卫激光测距仪所产生脉冲宽度在10-40ns，测距精度约为1-6m。多数采用带调Q开关的红宝石激光器。
- 第二代测距仪的脉冲宽度为2-5ns，测距精度为30-100cm。采用改进了的脉冲分析方法。
- 第三代测距仪的脉冲宽度为0.1-0.2ns，测距精度为**1-3cm**，多数采用锁模Nd: YAG激光器。第三代仪器一般均能在计算机控制下实现对**卫星的自动跟踪**和单光子检测技术。





## 7. 人卫激光测距 - 人卫激光测距仪

---

### 2) 人卫激光测距仪的结构

整个测距仪是由激光器，望远镜，光电头，脉冲测量系统，时频系统和计算机等部分组成的。



GFZ 的 POTSDAM-2  
人卫激光测距仪





## 7. 人卫激光测距 - 人卫激光测距仪

---

### (1) 激光器

目前用作测距的激光器大体有红宝石激光器和掺钕钇铝石榴石 (Nd: YAG) 两类。

### (2) 望远镜

激光测距仪中的望远镜具有发射、接收信号，以及瞄准卫星等功能。既可分设3个望远镜分别实现上述功能，也可用一台望远镜实现上述功能。望远镜安置在转台上可绕横轴和竖轴转动，以指向不同方位角和不同高度角的卫星。

### (3) 光电头

光电头由窄带干涉滤光片和光电倍增管等组成。干涉滤光片可限制其它波长的杂散光而仅让激光信号通过，从而能大幅度减少天空背景噪声的影响，并使激光测距有可能在白天进行。光电倍增器应该选用响应时间极短，热噪声极小，增益大的元器件。

---

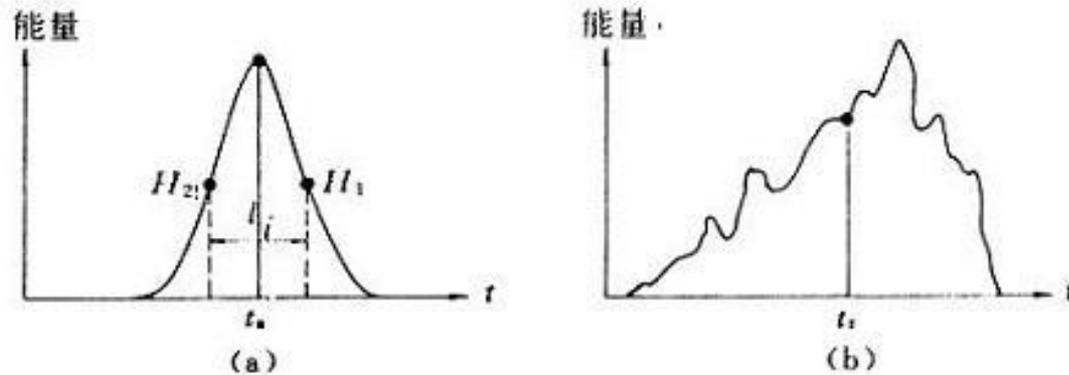




# 7. 人卫激光测距 - 人卫激光测距仪

## (4) 脉冲位置测量系统

量测回波脉冲的位置准确与否将直接影响测距精度。从卫星返回的回波脉冲由于受到大气干扰等原因而产生畸变。因而确定脉冲中心的位置时需采取一些特殊的方法，如通过测定信号波形面的矩心来予以测定等。采用单光子检测技术时自然不再需要对脉冲进行分析。单光子识别分析采用的是单光子雪崩二极管或触发雪崩二极管等技术。





## 7. 人卫激光测距 - 人卫激光测距仪

### (5)时频系统

时频系统具有下列两个功能：一是为计数器等设备提供稳定的频率，其稳定度应优于 $10^{-10}$ 。当卫星距离测距仪的距离为1万公里时，由于频率稳定度误差所造成的影响小于1mm。二是记录观测时刻，此项误差不应大于 $1\mu\text{s}$ 。由于卫星运动速度小于 $8\text{km/s}$ ， $1\mu\text{s}$ 的误差相当于8mm。原子钟和好的石英钟均可满足上述要求。本机钟与标准时间进行时间比对可以采用GPS等方法进行。

### (6)伺服系统

根据测站坐标的方位角和激光卫星的预报星历可求出不同时刻卫星的方位角和高度角，伺服系统马达能在计算机控制不断驱动望远镜绕纵轴和水平轴旋转以平稳地连续地跟踪卫星，而且可使卫星以一次通过时观测值的个数增加至数千个。





## 7. 人卫激光测距 - 人卫激光测距仪

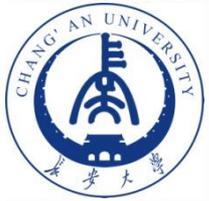
### (7)计算机

现代人卫测距仪均配备了计算机和相应的软件。其主要功能是：进行卫星轨道预报，通过伺服系统实现自动跟踪，设置距离门，采集观测数据，进行数据预处理等。



中国流动卫星激光测距仪  
Beijing (TROS)





## 7. 人卫激光测距 - 误差改正

### 测距仪仪器常数改正

这项误差是由于激光测距仪脉冲信号在测距仪内部传播时的时间延迟以及计数器的位置与测距仪的几何中心不一致而引起的。

仪器常数可以通过在观测前后对地面靶的校正观测来测定。地面靶至仪器中心间的距离事先已采用其它方法精确测定。将测距仪的测距结果与精确的已知值比较后即可求得仪器常数，并对观测值进行改正。





## 7. 人卫激光测距 - 误差改正

### 大气延迟改正

此项改正是由于激光脉冲信号在传播过程中需往返**两次穿过大气层**而产生的。大气延迟一般可分为**电离层延迟**和**对流层延迟**两项。由于激光测距仪使用的是频率极大的光信号，而电离层延迟又是与信号频率的平方成反比，故电离层延迟可以视为零而无需考虑。故对于激光测距仪而言，大气延迟改正是对流层延迟改正。





## 7. 人卫激光测距 - 误差改正

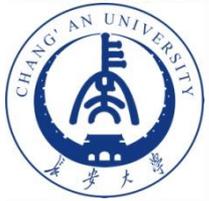
### 卫星上的反射棱镜偏心改正

激光测卫测定的是从测距仪至反射棱镜间的距离，而定轨时需要确定的是卫星质心的位置。反射棱镜与卫星质心不重合，因而在观测值上需对这种偏差加以改正。此项改正在卫星发射前可精确测定，向用户公布。

### 潮汐改正

固体潮及海洋负荷会引起测站坐标的变化从而影响距离观测值，潮汐改正较为复杂，可借助模型进行改正。





## 7. 人卫激光测距 - 用途

- (1) 目前激光测卫技术仍是测定点的绝对坐标的一种重要手段，在定义全球地心坐标系中起决定性作用。也是建立和维持全球性的或区域性的参考框架的一种重要方法。
- (2) 是测定极移、地球自转不均匀、及板块运动和地壳形变等地球动力学现象的重要手段之一。
- (3) 是确定地球重力场的低阶球谐函数系数的重要手段。
- (4) 是精确确定卫星轨道的重要手段。





## 7. 人卫激光测距 - 现状

目前全球约有50个左右的SLR固定台站以及少量的流动台站。测距精度已达到1-3cm。少数台站已达到**亚厘米级**的精度水平。

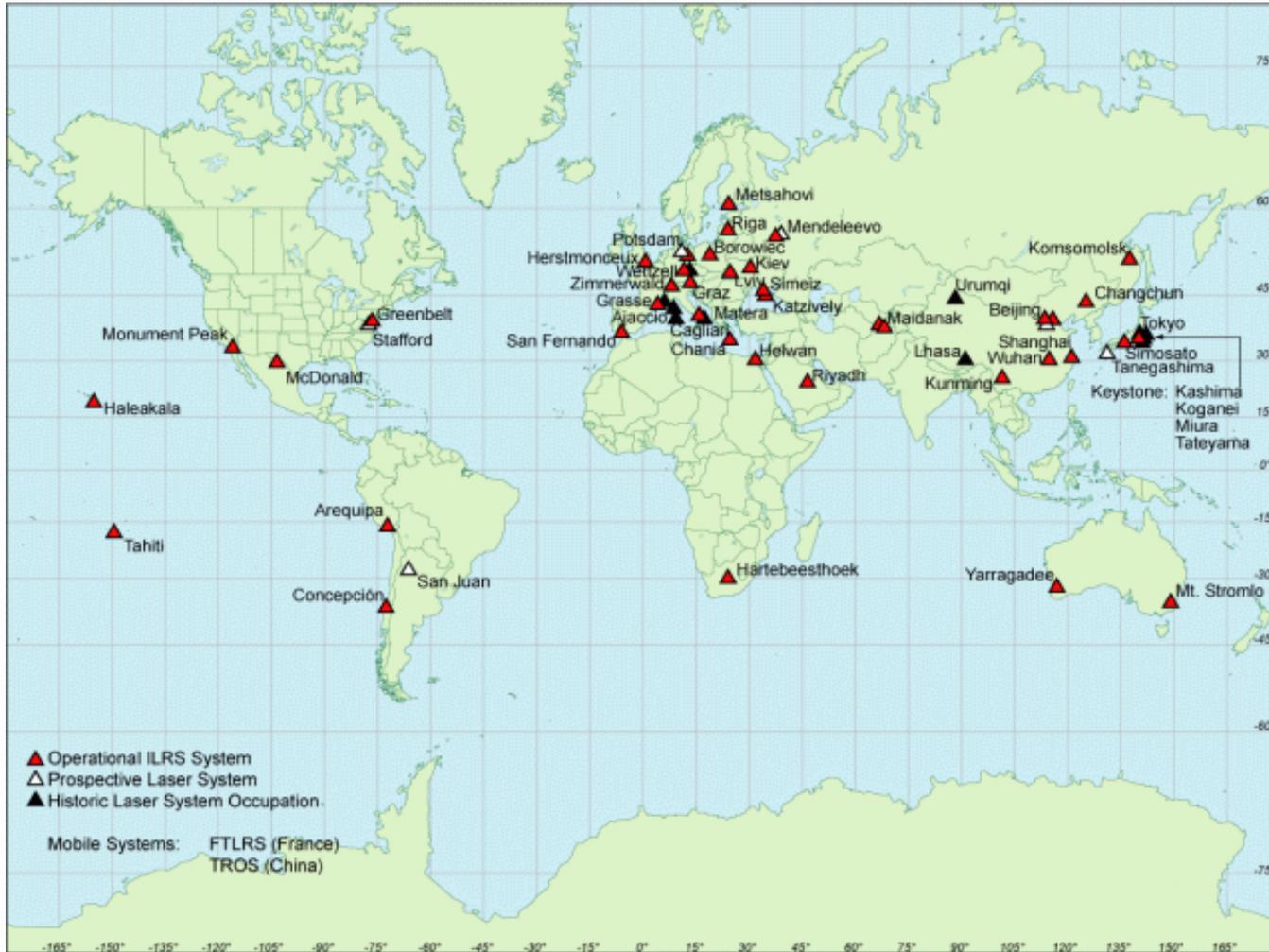


武汉SLR台站





# 7. 人卫激光测距 - 现状



SLR全球观测台站分布图



## 7. 人卫激光测距 - 现状

1981年以来我国在上海、武汉、长春、北京、昆明等地先后建立了SLR站。测距精度达到亚厘米级水平，并实现了白天观测。我国还自行研制了流动型SLR站TROS-1。

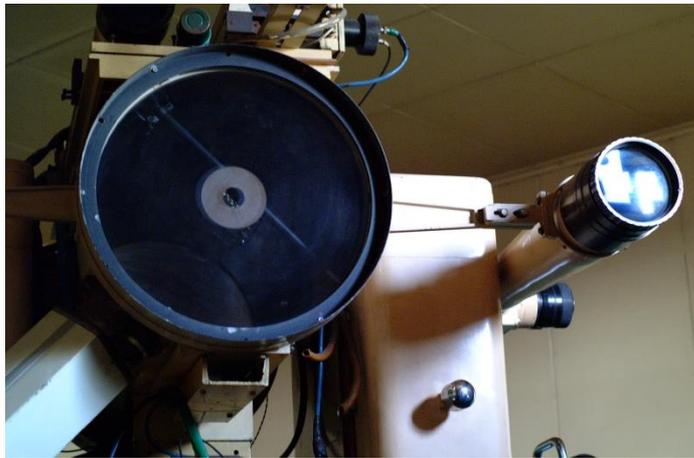
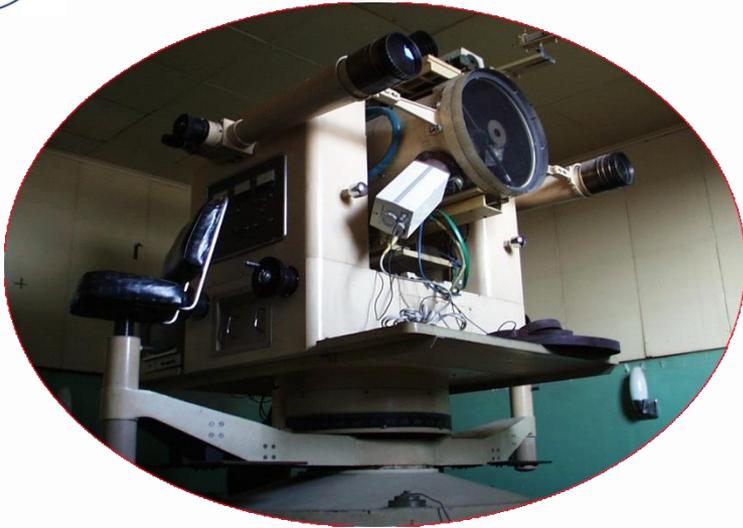


上海天文台60厘米  
卫星激光望远镜





## 7. 人卫激光测距 - 现状



我系曾研制建立了军队第一批卫星激光测距系统，为全国军事空间大地控制网的建立提供了精确、可靠的测量数据。





## 7. 人卫激光测距 - 现状

---



NGSLR at NASA's GGAO

---





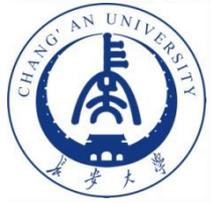
## 7. 人卫激光测距 - 未来

预计在不久的将来激光测距的精度还可能有很大的提高，达到mm级的测距精度。此外也有人提出在卫星上安装激光测距仪，在地面上安装廉价的反射棱镜以组成空基激光测距系统的建设。如能实现将进一步推动激光测距技术在大地测量中的广泛应用。



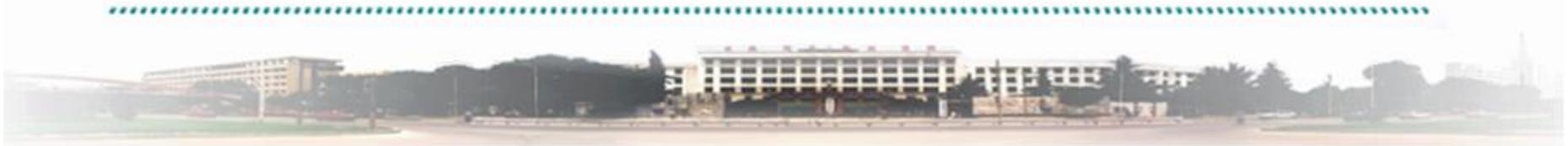
SLR2000 系统，NASA下一代的完全自动运行的SLR台站。





---

## 8、甚长基线干涉测量-VLBI





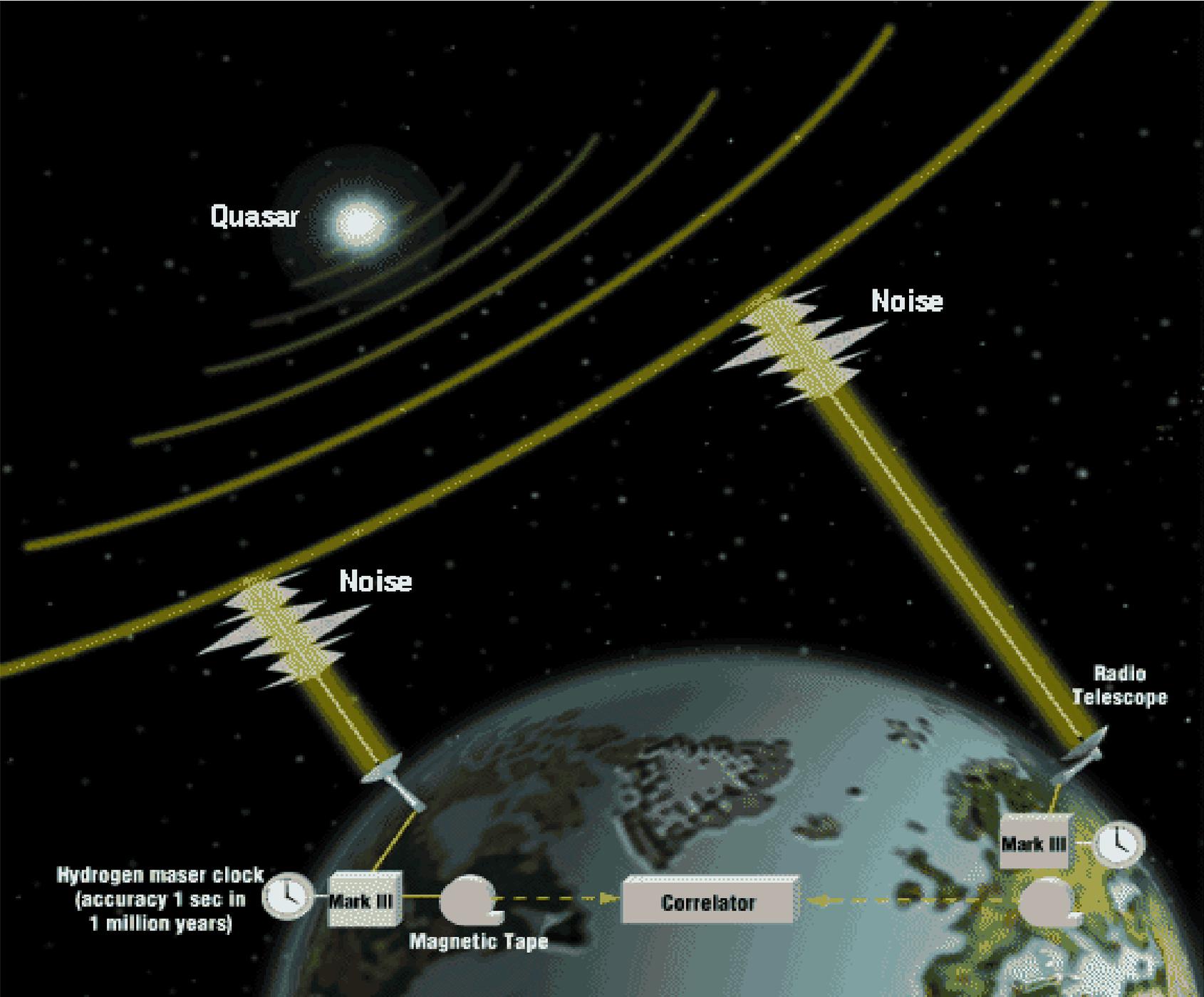
## 8. 甚长基线干涉测量

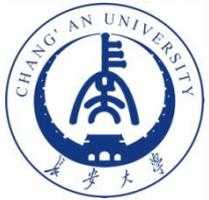
### Very Long Baseline Interferometer — VLBI

甚长基线干涉测量技术是20世纪60年代射电天文学领域中发展起来的一门新兴的测量技术。它能把相距成千上万公里的两台射电望远镜组合成一个分辨率非常高的射电干涉测量系统，不仅能有效地观测和研究射电天体的精细结构和变化，而且还能精确地测量地面点位、上万公里的基线长度、地球自转变化等，另外还能对深空飞行器进行精密的跟踪定位和导航。目前已在天文、地球物理、大地测量和空间技术等领域得到了广泛的应用。



# 甚长基线干涉测量示意图



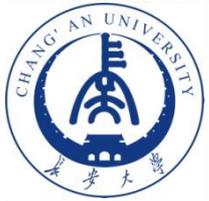


## 8. 甚长基线干涉测量

射电望远镜



河外射电源（河外类星体）



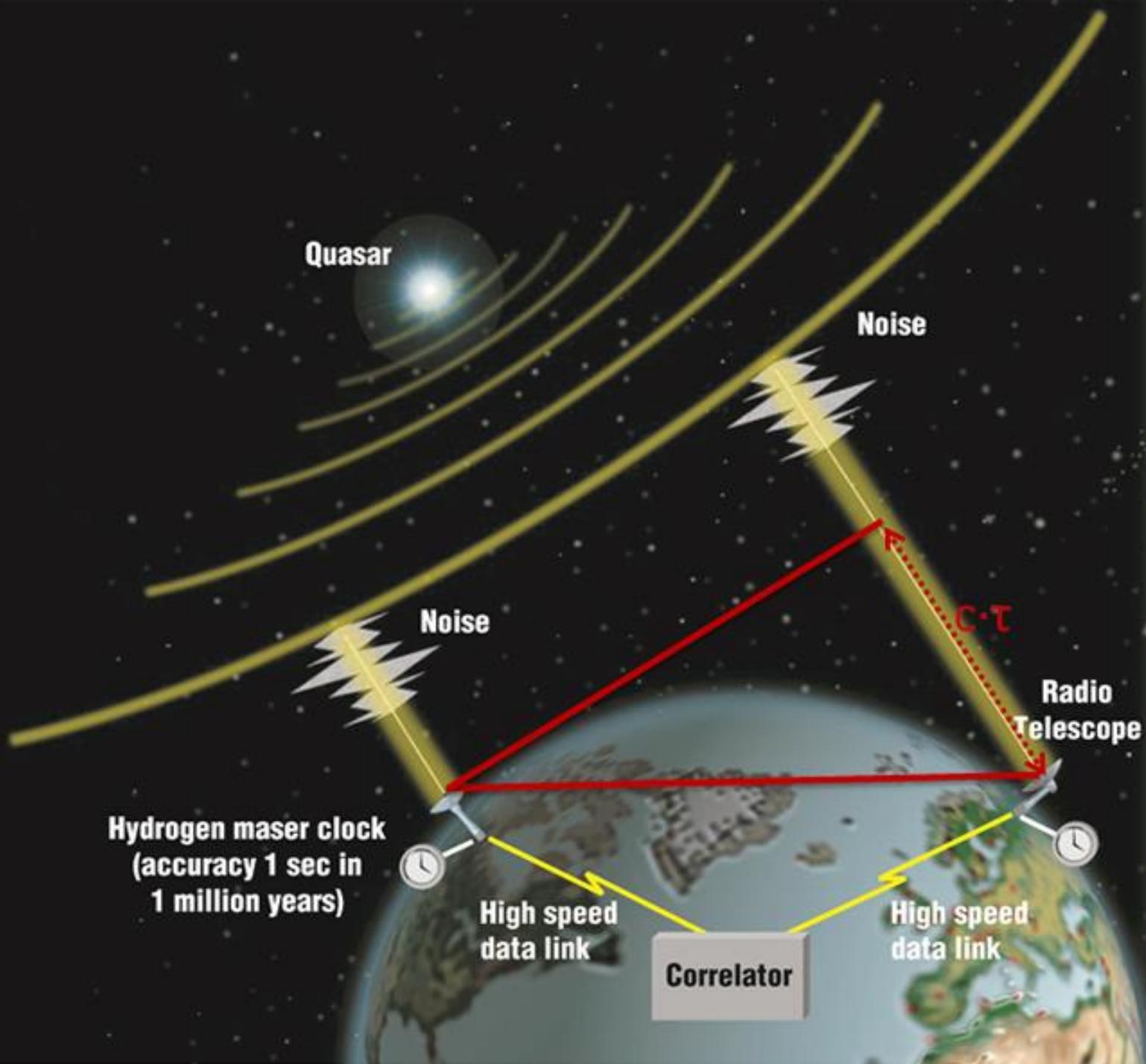
## 8. 甚长基线干涉测量 - 定义

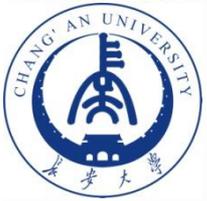
---

VLBI (即甚长基线干涉测量) 技术, 就是将几台射电望远镜, 通过干涉的方法联网同时工作, 使其测量精度或测量分辨率, 等效于一台巨型望远镜。VLBI 技术用于深空探测卫星跟踪定轨已经有二三十年。这项技术在国际上主要用于天文研究、天体测量和测地学。VLBI 分系统是绕月探测工程首次飞行任务中测控系统的一个分系统, 与中国国家航天测控网一起, 完成“嫦娥一号”卫星的精密测、定轨任务。

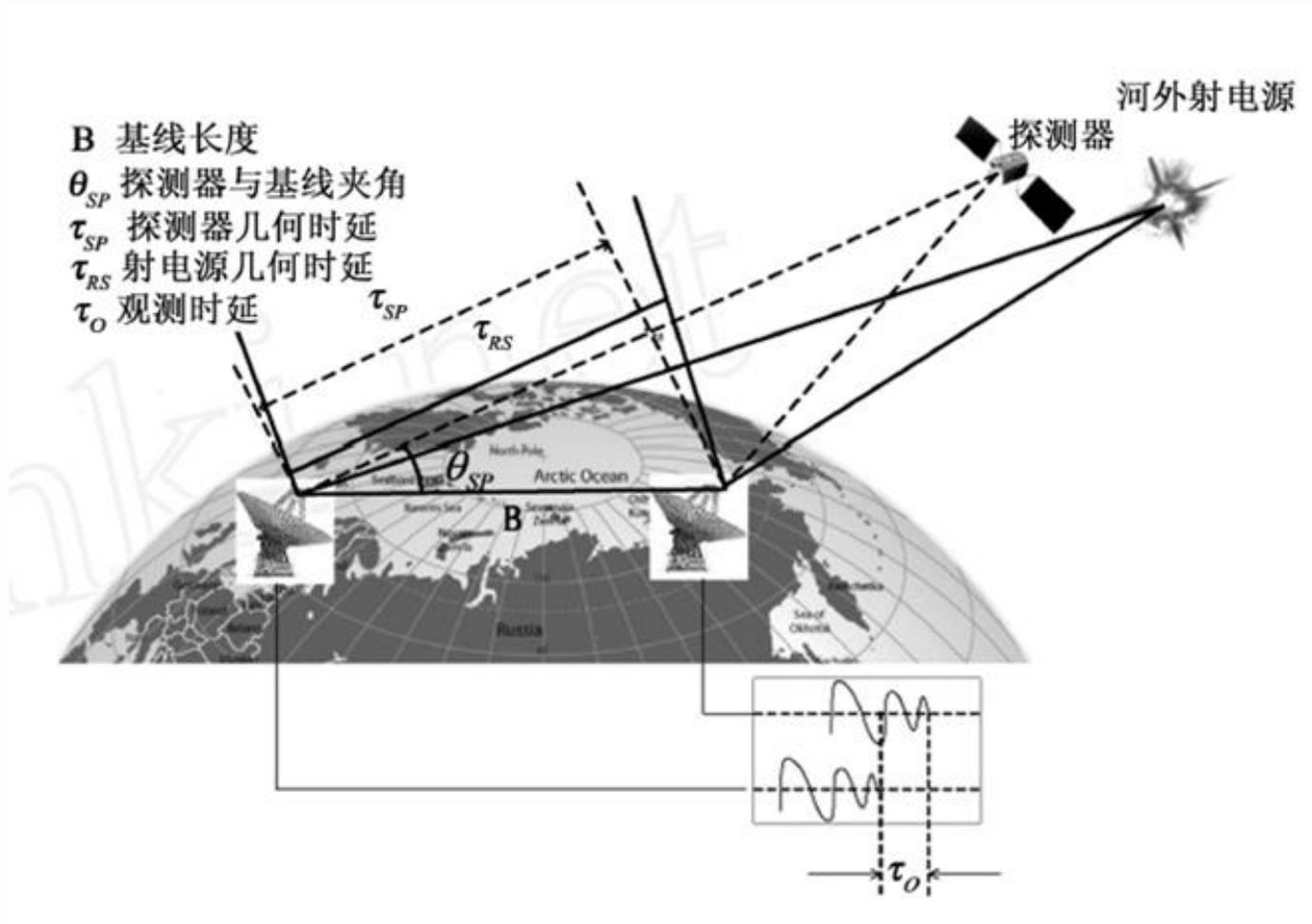
---







# 8. 甚长基线干涉测量



深空导航VLBI技术的基本原理图



## 8. 甚长基线干涉测量

### (1) 大气窗口

宇宙中的各种天体会发出波长不同的电磁波信号,其中大部分信号在通过围绕在地球四周的大气层时,将被大气层所吸收而无法到达地面。只有波长为 $0.4-0.76\mu\text{m}$ 的可见光,波长为 $0.76-2.5\mu\text{m}$ 的近红外谱段,波长为 $3.5-4.2\mu\text{m}$ 的中红外谱段和波长为 $8-14\mu\text{m}$ 的远红外谱段,以及波长在 $1.4\text{mm}$ ,  $3.5\text{mm}$ ,  $8\text{mm}$ 附近的微波波段和波长大于 $1\text{cm}$ 的微波波段的信号才能穿透大气层而到达地面,我们将其称为**大气窗口**。





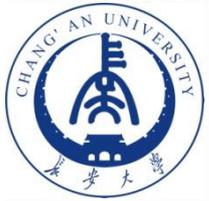
## 8. 甚长基线干涉测量

### (2) 河外射电源

指位于银河系以外的射电信号发射源，大体有下列三类：

- (a) **正常射电星系**：射电功率为 $10^{30}$ - $10^{34}$  w的星系称为正常射电星系。其无线电信号的输出功率约为可见光信号输出功率的百万分之一。换言之，一般星系的信号基本上都是以可见光的形式输出的。
- (b) **特殊射电星系**：射电功率比正常射电星系强 $10^2 \sim 10^6$ 倍，已接近甚至超过可见光的输出功率。多具有射电双源，其射电来自星系光学像两旁的延伸区。



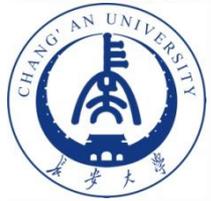


## 8. 甚长基线干涉测量

**(c) 河外类星体：**类星体是20世纪60年代发现的一种新型天体。目前大多认为它是属于星系一级的天体。类星体的体积很小，许多类星体的直径只有1光年左右，约为普通星系直径的十万分之一。**然而它所发出的无线电信号的功率却要比一般星系强百万倍。**于是类星体就成为射电观测中非常理想的观测目标。类星体也能发出很强的可见光信号，在照相底片上形成类似于恒星的点状成像，其角直径一般都小于1"。利用类星体可以很方便地把光学观测成果和射电干涉测量的成果相互联系起来。

由于正常射电星系所发出的无线电信号过于微弱，所以在射电干涉测量中主要观测后两类射电源，特别是河外类星体。





## 8. 甚长基线干涉测量 - 基本要求

---

### ➤ 射电望远镜

射电望远镜是一种能接收和处理来自太空的无线电信号的装置，由巨大的抛物面天线，高精度的原子钟，数据接收和处理设备等组成。

### ➤ 灵敏度

是指射电望远镜“最低可测”的能量值，此值越低灵敏度越高。为提高灵敏度常用的办法有降低接收机本身的固有噪声、增大天线接收面积、延长观测积分时间等。

---





## 8. 甚长基线干涉测量 - 基本要求

### ➤ 分辨率

指区分两个彼此靠近射电源的能力，分辨率越高就能将越近的两个射电源分开。利用射电望远镜进行观测时其角分辨率可用下列公式来估算：

$$\theta'' = \frac{\lambda}{D} \cdot \rho''$$

式中  $\theta$  为角分辨率， $\lambda$  为射电望远镜所接收的无线电信号的波长，通常为13cm和3.6cm， $D$  为射电望远镜接收天线的口径。





## 8. 甚长基线干涉测量 - 射电干涉测量

Arecibo Observatory,

National Astronomy and Ionosphere Center

<http://www.naic.edu/>

The Arecibo Observatory is part of the National Astronomy and Ionosphere Center (NAIC), a national research center operated by Cornell University under a cooperative agreement with the National Science Foundation (NSF).



阿雷西博 (Arecibo) 天文台，波多黎各（西印度群岛），USA

直径：305m、51米深、1974年建成  
占地大约20英亩，40000块铝制面板组成，900吨的接收平台  
射线频率：50 MHz (6 m) ~ 10,000 MHz (3 cm).





# National Radio Astronomy Observatory

<http://www.gb.nrao.edu/gbt>



**Green Bank Telescope , National Radio Astronomy  
Observatory , West Virginia , USA**

**世界上最大的钢结构的射电望远镜，直径100米，实际  
尺寸  $100 \times 110$  m**



## 8. 甚长基线干涉测量 - 射电干涉测量

### 怎样提高射电望远镜的分辨率呢？

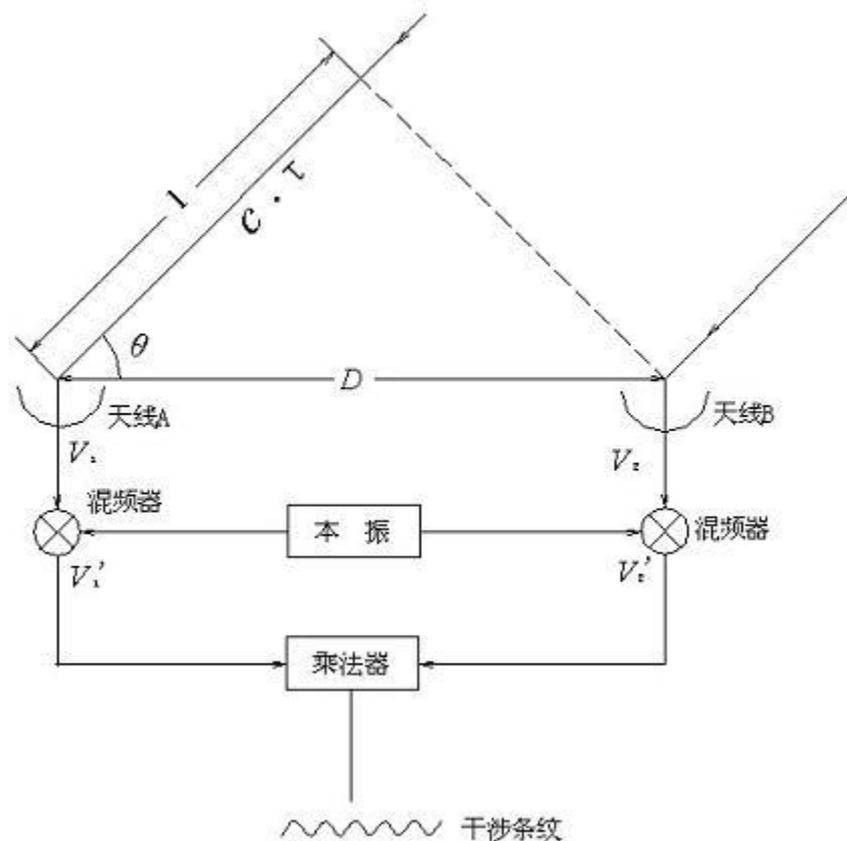
对单天线射电望远镜来说，**天线的直径**越大分辨率越高。但是天线的直径难于作得很大，目前单天线的最大直径小于300米，对于波长较长的射电波段分辨率仍然很低，因此就提出了使用两架射电望远镜构成的射电干涉仪。对射电干涉仪来说，**两个天线的最大间距**越大分辨率越高。另外，在天线的直径或者两天线的间距一定时，接收的无线电波长越短分辨率越高。





## 8. 甚长基线干涉测量 - 联线干涉测量

为较大幅度的提高角分辨率，提出了联线干涉测量的方法。通过**电缆（最远300km）**组成了一台虚拟的口径为 $D$ 的大射电望远镜。此时 $D$ 即为两台射电望远镜的距离。



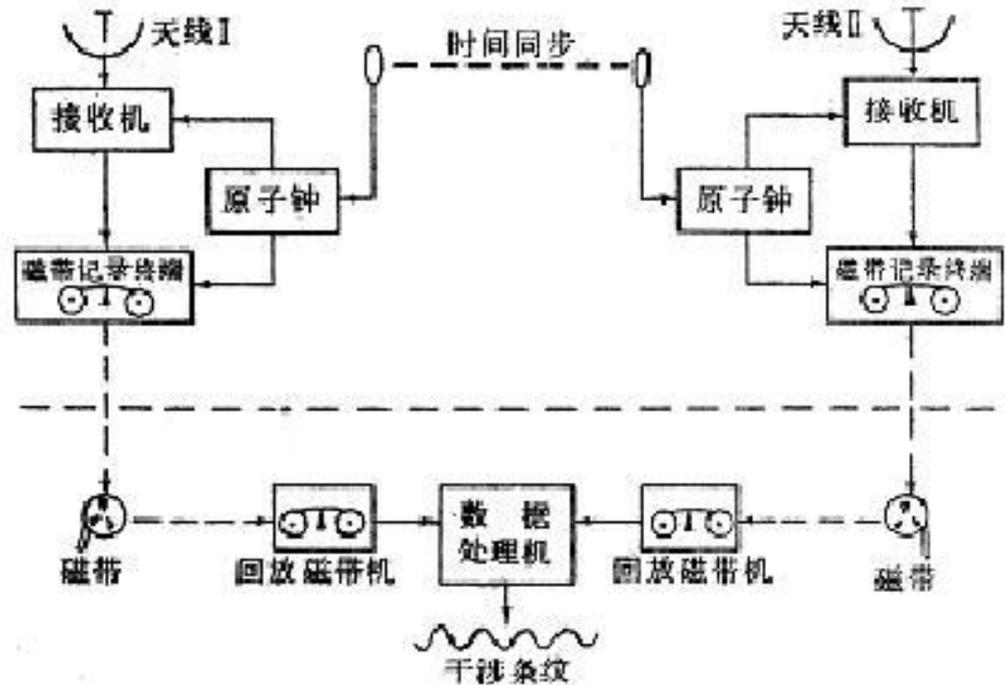
联线干涉测量示意图





## 8. 甚长基线干涉测量 - 基本原理

两台使用独立本振信号的射电望远镜A和B同时对某一射电源进行观测，利用射电干涉测量原理测定信号到达A、B两站的时间延迟以及延迟率，从而精确的测定基线向量AB及从射电望远镜至射电源的方向的一整套方法和技术称为**甚长基线干涉测量**。





## 8. 甚长基线干涉测量 - 系统组成

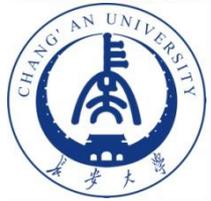
### (1) 大口径天线



Fairbanks天线

由于来自河外射电源的信号十分微弱，故射电望远镜通常均需配备大口径的抛物面天线，如25m口径的天线，36m口径的天线等。目前VLBI观测的信号波长通常为3.6cm和13cm，天线上还需配备相应的馈线。流动型VLBI站的天线的口径较小，一般为3-5m。抛物面天线的基线一般采用地平式。天线可绕纵轴和水平轴旋转，对准不同方位角和不同高度角的射电源。





## 8. 甚长基线干涉测量 - 系统组成

### (2) 数据接收和处理系统

- 接收系统的作用是：将天线搜集到的十分微弱的射电信号通过高频放大器进行放大，然后再与本机振荡器所产生的射频信号一起进入混频器。混频后的信号通过滤波后获得差频信号，其频率一般为100-500MHz。上述信号经中频放大器放大后与钟信号一并被记录在高密度磁带上。
- 数据处理一般采用高速型数据处理器。其主要工作是进行相关处理以求得时间延迟及延迟率，最后求解基线向量及其他待定参数。





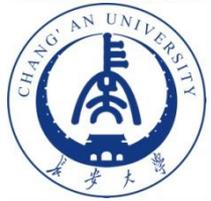
## 8. 甚长基线干涉测量 - 系统组成

上海天文台的接收设备



上海天文台的记录终端





## 8. 甚长基线干涉测量 - 系统组成

### (3) 氢原子钟及时间对比设备

用于空间大地测量的VLBI测定时延的精度应优于0.1ns，钟的频率稳定度达到 $10^{-14}$ ，只有氢原子钟才能达到这样的稳定度。VLBI观测时要求两地的氢原子钟精确同步，误差不大于 $1\mu\text{s}$ 。采用电视同步，Loran-C时间同步均能满足上述要求。用GPS共视法进行时间对比时，时间精度可以达到 $0.01\mu\text{s}$ 。





## 8. 甚长基线干涉测量 - 系统组成

### (4) 水汽辐射计

无线电信号通过位于大气层底部的中性大气层时会产生对流层延迟。中性大气延迟又可以分为干气延迟和水汽延迟两部分。其中水汽延迟虽然只占总延迟的10%左右，但由于水汽分布不均匀不规则，很难建立准确的改正模型，从而成为影响VLBI测量精度的一个重要误差来源。在监测站上配备一台水汽辐射计用以测定信号传播路径上的实际水汽含量是解决上述问题的一种途径。最近的研究结果表明，没有水汽辐射计时，在平差计算中引入天顶方向对流层延迟修正参数，或用随机模型来描述对流层延迟随时间变化也能取得较好的效果。



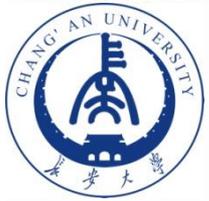


## 8. 甚长基线干涉测量 - 系统组成



瑞典 Onsala空间天文台的22 GHz的水汽辐射计





## 8. 甚长基线干涉测量 - 用途

- 用VLBI来测定基线向量，其相对精度可以达到 $10^{-8} - 10^{-9}$ ，是监测板块运动和建立维持全球参考框架的主要方法之一。
- 是测定极移和日长变化的主要方法之一。目前利用VLBI测定极移的精度可优于一毫角秒；测定日长变化的精度可以优于0.05ms。
- VLBI是建立惯性坐标系的一种重要手段。





## 8. 甚长基线干涉测量 - 用途

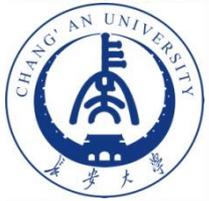


- 在“嫦娥工程”中，共有4台射电望远镜对“嫦娥一号”进行精确定位和观测，分别位于国家天文台北京密云地面站、云南天文台、上海天文台和乌鲁木齐天文台，共同组成VLBI网，结合上海天文台的数据处理中心共同组成测轨分系统对绕月探测卫星进行联合精确定位。这样一个网所构成的望远镜分辨率相当于口径为3000多公里的巨大的综合望远镜，测角精度可以达到百分之几角秒，甚至更高。



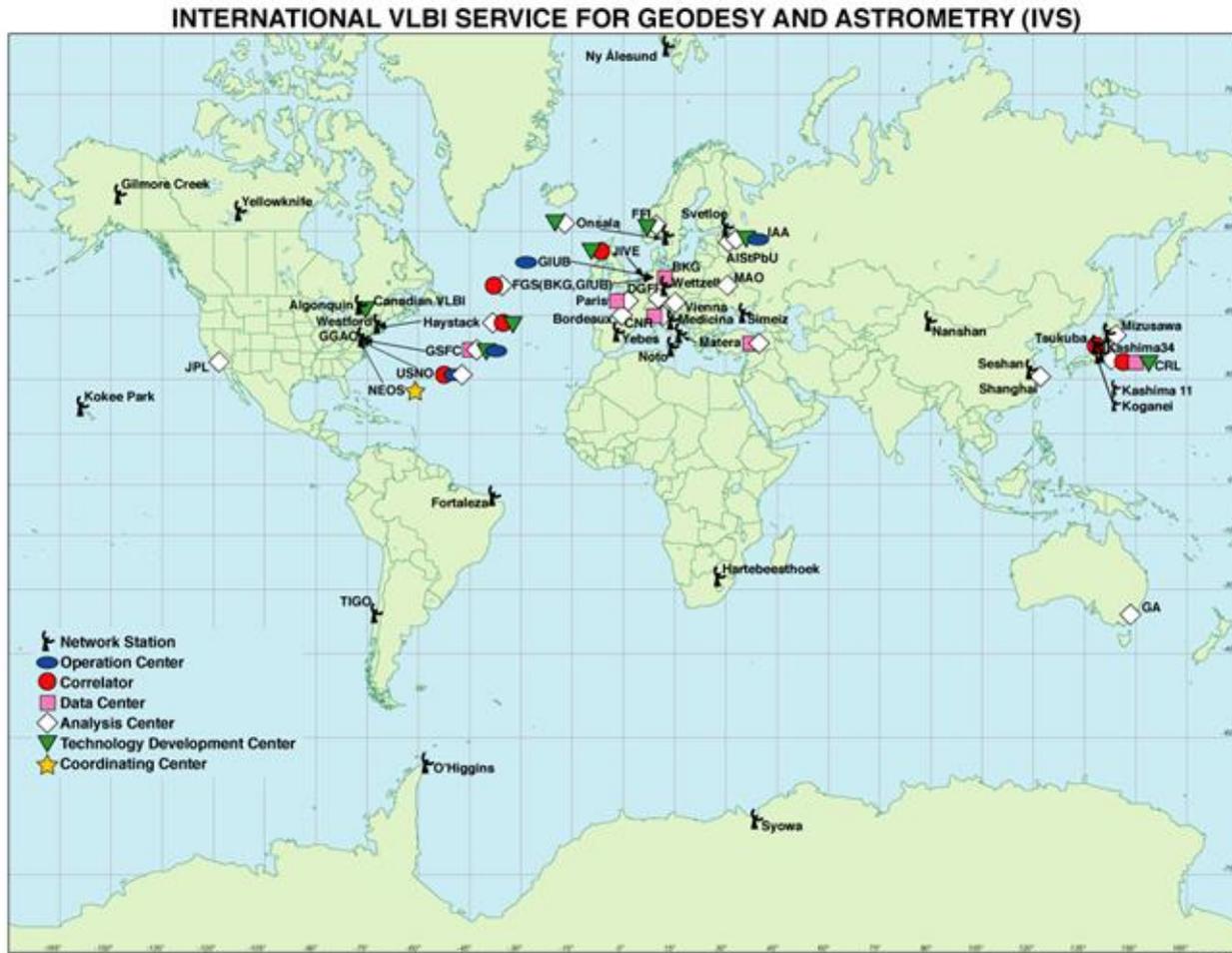
## 8. 甚长基线干涉测量 - 用途

- VLBI测轨分系统的具体任务是获得卫星的VLBI测量数据，包括时延、延迟率和卫星的角位置，并参与轨道的确定和预报。具体的任务有完成卫星在24小时、48小时周期的调相轨道段的测轨任务，完成卫星在地月转移轨道段、月球捕获轨道段以及环月轨道段的测轨任务。
- “嫦娥一号”所获取的数据将源源不断地以无线电波的方式传送回地球，此时，四个观测站形成的“甚长基线阵”，将这些无线电波接收，然后集中发送到北京总部，经过科学家解码，还原成图片和数据，以此作为认识月球的依据。



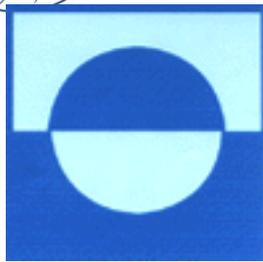
## 8. 甚长基线干涉测量 - 现状

目前全球约有40-50个VLBI站，VLBI用于大地测量领域的全球性计划主要有美国航空航天局NASA组织发起的地壳动力学计划（Crustal Dynamics Project），以及参加国际地球自转服务（IERS）的国际射电干涉测量网（IRIS）。





## 8. 甚长基线干涉测量 - 现状



### 上海天文台VLBI

<http://www.shao.ac.cn/>





## 8. 甚长基线干涉测量 - 现状

中科院乌鲁木齐天文台VLBI

<http://www.uao.ac.cn/>



25m射电望远镜南山观测基地VLBI站目前是全球和我国重要的地面参考点，射电望远镜接收系统的综合水平和观测状态已达到欧洲网的中上等水平。





## 8. 甚长基线干涉测量 - 现状



### 中科院云南天文台VLBI

<http://www.ynao.ac.cn>

- 云南天文台40m射电天文望远镜 2006年安装，已经开始运行。





## 8. 甚长基线干涉测量 - 现状



中科院国家天文台VLBI

<http://www.bao.ac.cn>



密云站50m天线是我国目前最大的射电天线，它的建成和投入使用，将为国家天文台，乃至中国科学院承担更多的国家任务奠定基础条件。



## 8. 甚长基线干涉测量 - 发展前景

---

由于VLBI能提供稳定的高精度的定位结果，所以在测定地球运动（极移，地球自转），板块运动以及建立维持参考框架等方面将继续发挥重要作用。

由于VLBI的设备庞大笨重，价格昂贵，其精度在近期内也难以取得突破，再加上近来GPS定位技术的迅速发展，目前已能获得与VLBI大体相仿的精度，因此GNSS与VLBI组合是未来的发展方向。

---



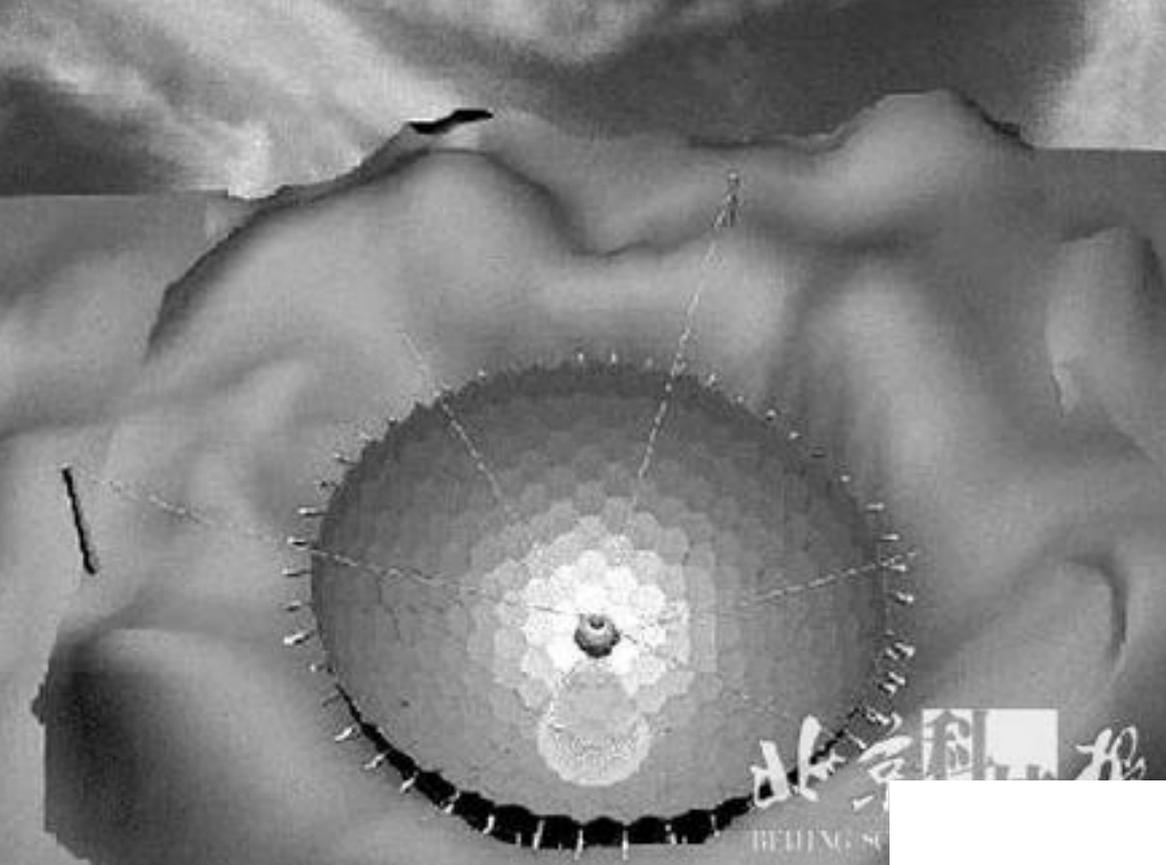


## 8. 甚长基线干涉测量 - 发展前景

### 我国的FAST计划

- 世界上最大的单口径500米的球面射电望远镜(five-hundred-meter aperturespherical telescope, 简称FAST), 被科学家形象地形容为山谷中的“天眼”, 科学家希望它能接收到来自某种“地外文明”发出的信号。已被国家发改委立项, 作为国家重大科技基础设施项目将在黔南布依族苗族自治州建设。该项目总投资6.27亿元, 建设期为5年。
- 项目拟采用我国科学家独创的设计和贵州省独特的喀斯特地形条件和极端安静的电波环境, 建造一个500米口径球面射电天文望远镜, 形成具有国际先进水平的天文观测与研究平台, 为我国开展暗物质和暗能量本质、宇宙的起源和演化、太空生命起源和寻找地外文明等研究活动提供重要支持。它的建设对于改善我国科技基础设施条件, 提升自主创新能力, 增强科技竞争能力, 促进原始性创新成果产生, 带动高新技术发展具有极其重要的战略意义。





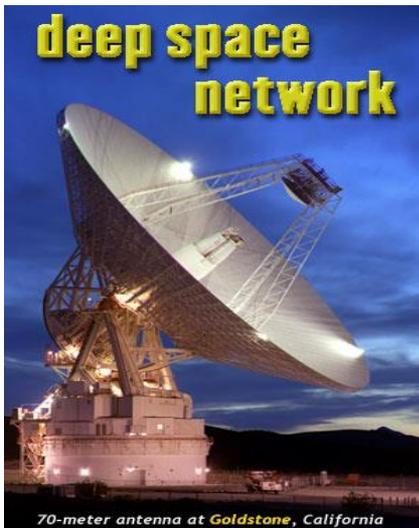
FAST望远镜模拟图



贵阳一处喀斯特洼地

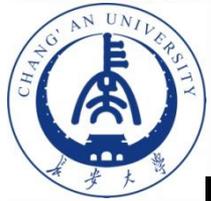


## 8. 甚长基线干涉测量 - 发展前景



我国正在贵州参与研究建立世界上最大的、口径为500米的射电望远镜。它的建立，将对我军深空目标的跟踪定位发挥重要作用。





## 8. 甚长基线干涉测量 - 发展前景



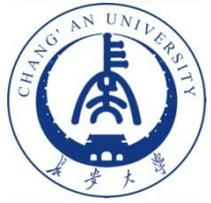
### SKA计划

International SKA Project Office

<http://www.skatelescope.org/>

- **平方公里阵列射电望远镜** (Square Kilometre Array 简称为 SKA) 是计划中的下一代巨型射电望远镜阵，工作在 $0.10 \sim 25\text{GHz}$ 的波段，有效接收面积可以达到大约1平方千米，SKA的灵敏度将比目前世界上最大的望远镜高2个数量级。其将由上千台天线组成，其中有一半天线位于中央直径5公里的区域内，另有四分之一的天线散布在周围150公里的区域内，其余的分布在大约3000公里的范围内。
- 目前，SKA的选址还未最终确定，**澳大利亚、阿根廷、南非和中国**都已被列入待选目标地之列。由于该望远镜的灵敏度极高，因此其建设地点必须远离大城市和各种无线电噪声源，同时，气候条件和地形也是必须考虑的因素。目前SKA已到其选址的关键时刻。

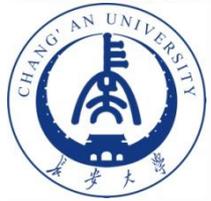




## 8. 甚长基线干涉测量 - 发展前景

- 建造它的**主要目的**是为了查明银河系中的重要结构和星系的演化过程。SKA可以观测到宇宙空间一向不为人觉察的长波辐射。专家们解释说，在宇宙大爆炸时期形成的第一批星系至今仍在放射着长波，如果捕捉到这些上百亿年前产生的辐射，便有可能揭示宇宙的演化进程。此外，科学家们同时表示，SKA还将被用来观测宇宙中的一些“暗物质”——分布在星系间的稀薄气体。
- 由于**SKA在观测范围和灵敏度方面都远远超过了目前已有的同类型望远镜**，其还有可能被用来搜索某些高智慧外星生物发出的微弱无线电波，以证实人们长期以来对外星生命的推测。

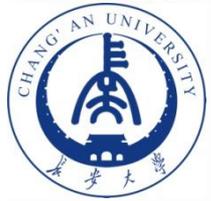




## 8. 甚长基线干涉测量 - 发展前景

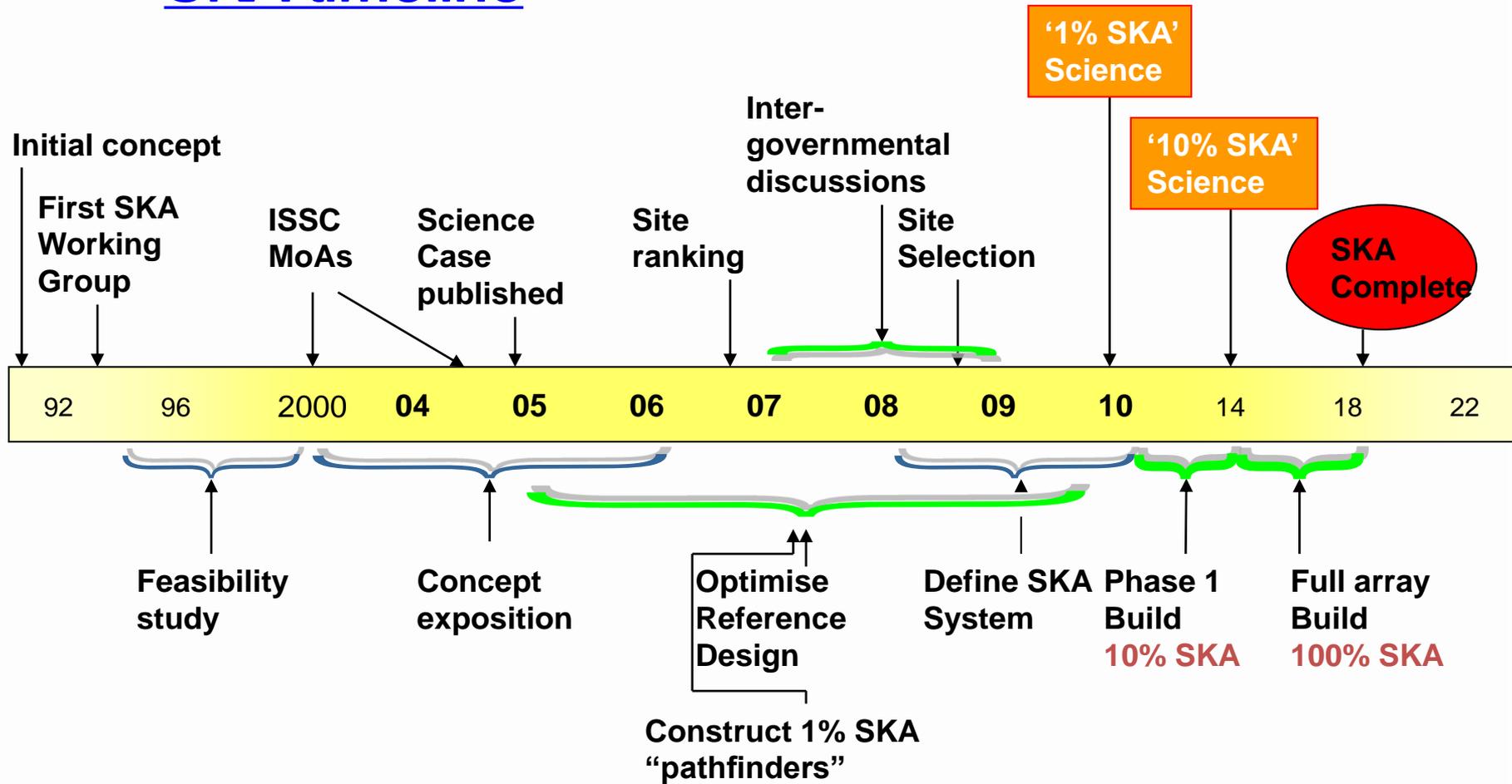
- SKA是目前最为庞大的国际科技合作项目之一，其耗资总额将达到10亿美元之巨。2020年，SKA全面运行。届时，人类探索太空的视界将大大扩大，因为SKA的接收能力将比现有的射电望远镜强大50倍，巡天的速度更是超越现有射电望远镜1万倍。
- SAT的体积在世界望远镜史上前无古人。目前世界上最大的固定射电望远镜是美国阿雷西堡望远镜，直径为305米；最大的全可动射电望远镜是30年前德国建成的100米口径射电望远镜和不久前美国西弗吉尼亚州建成的探测面为 $110 \times 100$ 米的射电望远镜。这几乎已成为大型射电望远镜的工程极限。

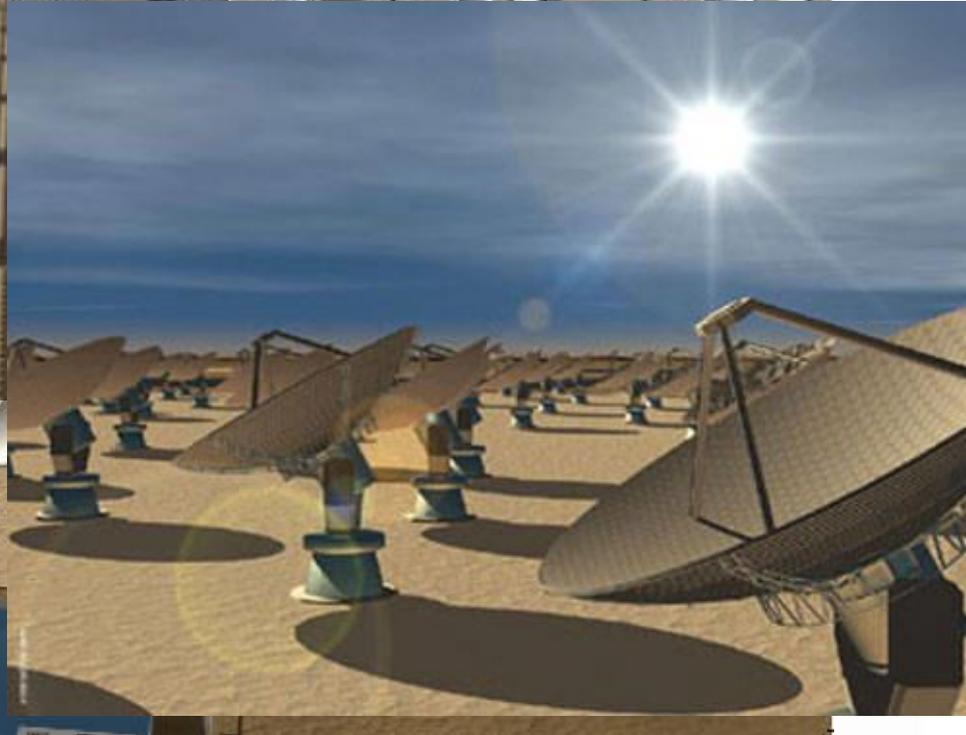




# 8. 甚长基线干涉测量 - 发展前景

## SKA timeline





## SKA计划的射电望远镜阵列



## 8. 甚长基线干涉测量 - 发展前景



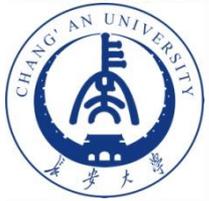
澳大利亚的试验场



---

# 9、卫星雷达测高-SA





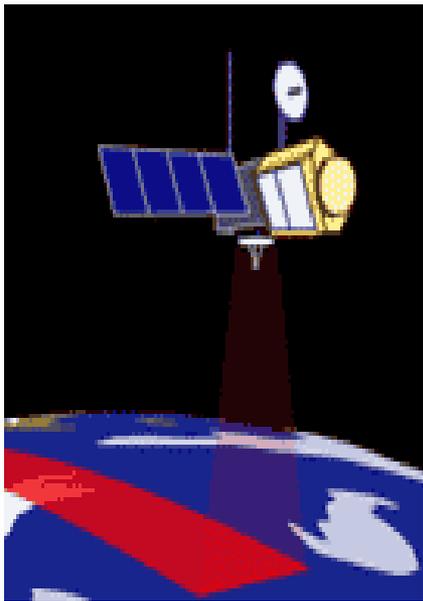
## 9. 卫星雷达测高

利用安置在卫星上的雷达测高仪测定**卫星至海平面的垂直距离**，并用激光测卫、多普勒和GPS等方法精密确定该卫星的运行轨道，这种测定海面形状的方法和技术称为**卫星测高**。由于卫星测高技术可测定的海洋大地水准面，进而用斯托克司反解公式推出海洋部分的**重力异常**，以弥补**海洋地区重力测量资料**的空白，因此对建立高精度、高分辨率的地球重力场模型具有重要作用。





## 9. 卫星雷达测高

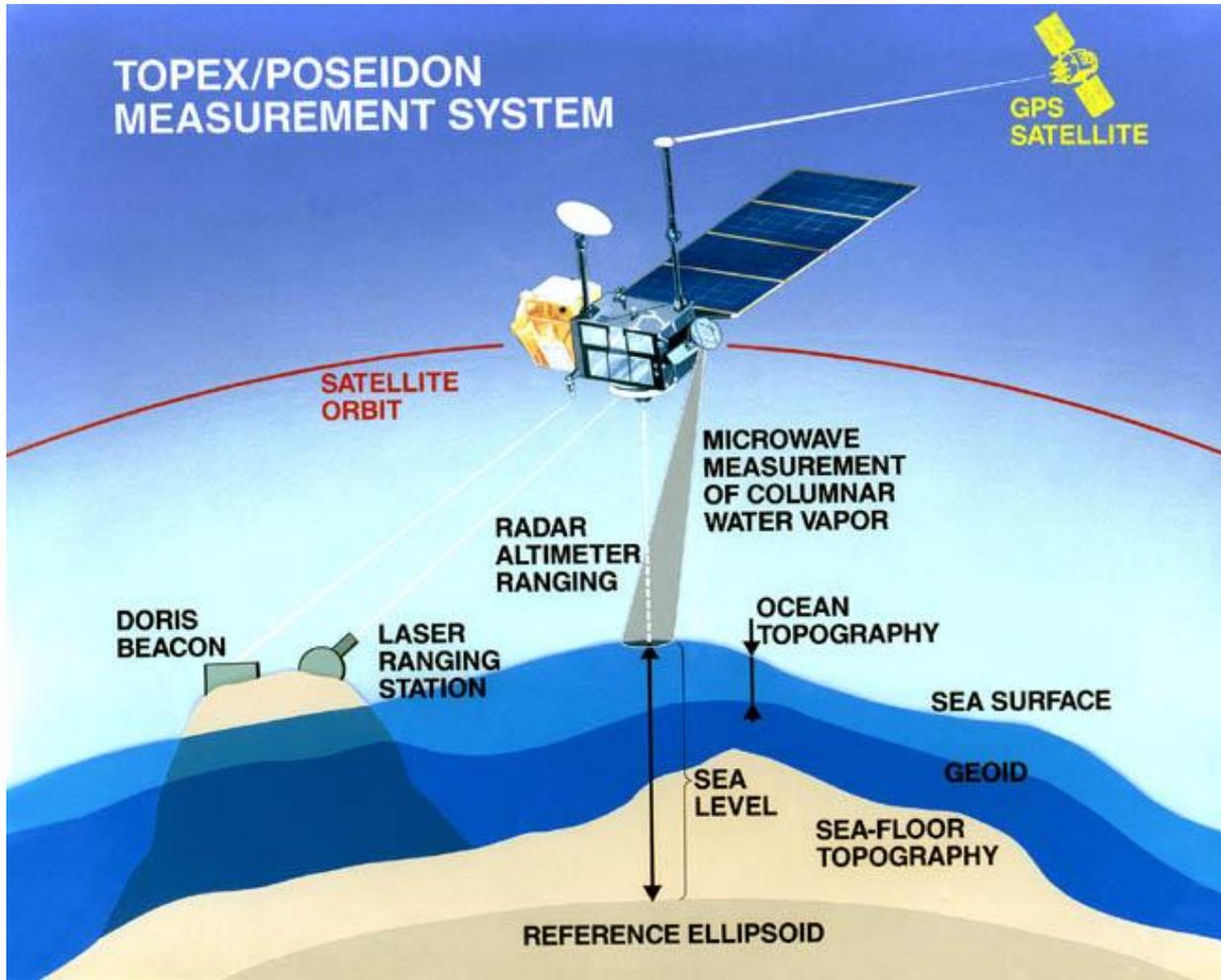


通过SLR、GPS、DORIS等手段精确确定测高**卫星的运行轨道**，同时又利用安置在卫星上的雷达测高仪测定至**瞬时海面间的垂直距离**来测定地球重力场，研究海洋学、地球物理学中的各种物理现象的方法和技术称为**卫星测高**。



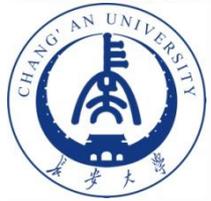


# 9. 卫星雷达测高

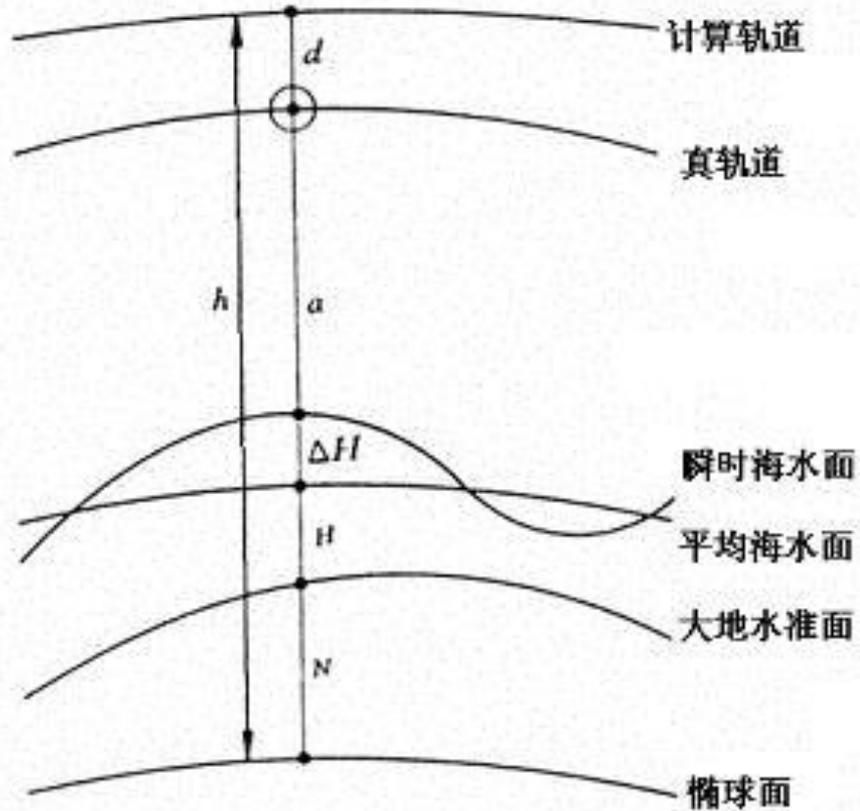


卫星测高示意图





# 9. 卫星雷达测高 - 基本原理



卫星测高基本原理图





## 9. 卫星雷达测高 - 基本原理

图中的  $h$  是测高卫星离开椭球面的垂直距离，也称大地高。通过SLR、GPS、DORIS等手段精确确定卫星的轨道后， $h$  即可据卫星的位置及椭球体的参数计算而得。由于  $h$  是据卫星轨道求得的，因而含有轨道误差  $d$ 。 $N$  为大地水准面起伏，即大地水准面与椭球面间的垂直距离。 $H$  为海面地形，即平均海水面与大地水准面间的差距，其值为1-2m。 $\Delta H$  为潮汐、海浪等的影响。 $a$  为卫星测高中的观测值，即卫星至瞬时海面间的垂直距离。 $d$  为计算轨道和真实轨道间的径向误差。由上图，可得

$$h = N + H + \Delta H + a + d \quad (2-2-12)$$





## 9. 卫星雷达测高 - 基本原理

在空间大地测量中卫星测高主要被用于确定地球重力场。由上式，可得

$$N = h - H - \Delta H - a - d$$

大地水准面起伏  $N$  是重力异常  $\Delta g$  的函数，精确测定整个海洋地区的大地水准面起伏  $N$  后，即可用斯托克斯反解公式求出重力异常值  $\Delta g$ ，从而建立精确的高分辨率的重力场模型。

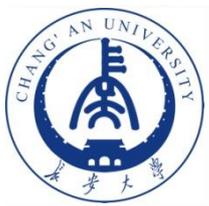




## 9. 卫星雷达测高 - 测高卫星

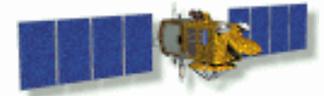
至今为止, 在全球已发射如下测高卫星 Skylab, Geos3, Seasat, Geosat, Ers- 1, Topex/Poseidon, Ers- 1, GF0, Envisat, Jason-1。





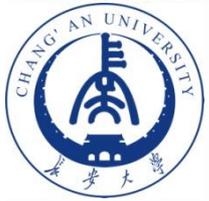
# 9. 卫星雷达测高 - 测高卫星

## 部分测高卫星的基本参数



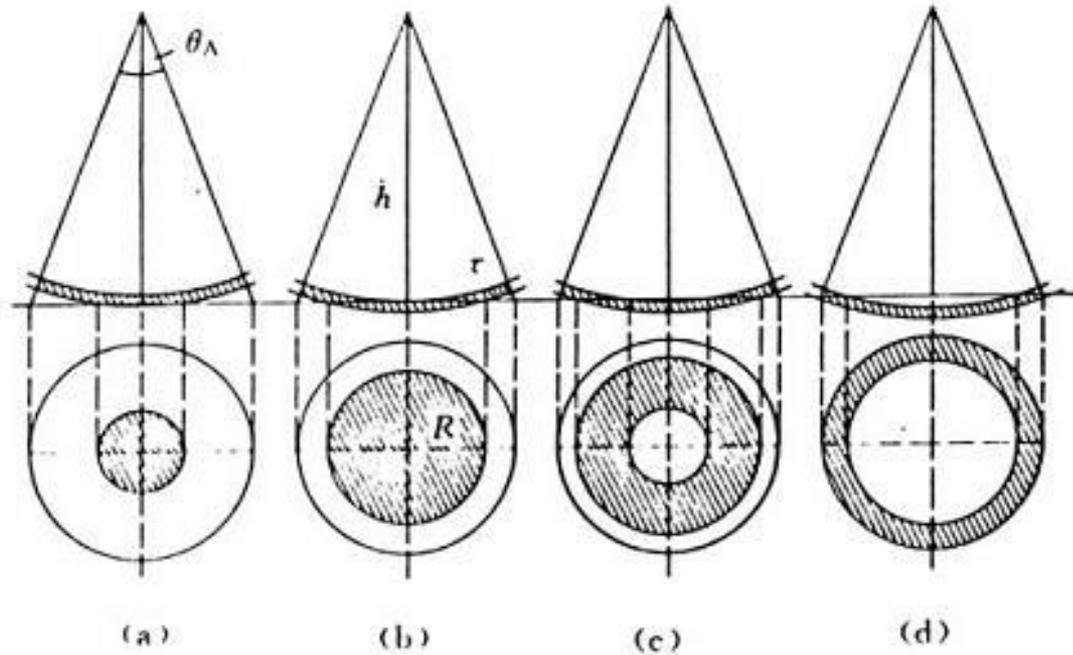
卫星名称	国名	发射日期	轨道高度(km)	轨道倾角(度)	工作寿命(年)	覆盖周期(天)	测高精度(cm)
Skylab	美国	1973.05.14	425	50	0.25		85-100
Geos-3	美国	1975.04.09	840	115	3.5	2.3	25-50
Seasat	美国	1978.06.28	800	108	0.3	3,17	20-30
Geosat	美国	1985.03.12	800	108	4	17	10-20
Ers-1	欧洲	1991.07.17	785	98.5	3	3, 35, 168	10
Topex/Poseidon	美/法	1992.08.10	1336	66	6	10	6
Ers-2	欧洲	1995.04.21	785	98.5	3	3, 35, 168	10
GFO	美国	1998.02.10	800	108	8	17	3.5
Jason-1	美/法	2001.12.07	1336	66	5	10	4.2
Envisat	欧洲	2003.03.01	800	98.55	5	35	4.5





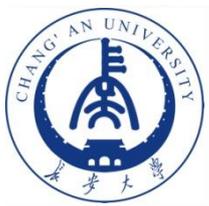
## 9. 卫星雷达测高 - 观测值

雷达测高仪向海面发射一个矩形脉冲测距信号，该信号到达海面后立即被反射回来。



雷达脉冲信号的反射过程





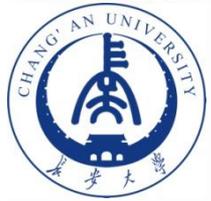
## 9. 卫星雷达测高 - 观测值

由于反射信号不再是一个矩形脉冲，故信号到达时间是以振幅达到最大振幅的一半的时刻来计的。脉冲信号的“照射”范围是一圆形区域，其大小取决于卫星高度和信号发射角。其直径一般为数公里。由于反射区域很大，故波浪的影响基本可以通过取平均值而得以消除。脉冲信号的发射速率很高，例如Geos-3以短脉冲模式工作时，每秒可发射100个脉冲信号，这些测量值一般不向用户提供。将这些观测值取平均值以形成标准点的值（如Geos-3的标准点观测值是将200个或320个观测值拟合后形成的），然后再提供给用户使用。观测值的精度取决于测高仪的分辨率以及拟合平滑的算法。



TOPEX/Poseidon  
卫星上的高度计





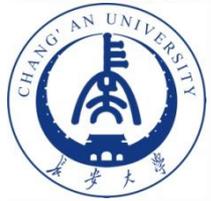
## 9. 卫星雷达测高 - 观测误差改正

### 1) 轨道误差

**(1)地球重力场模型的误差。**每颗卫星都对球谐函数中的某一部分特别敏感。因此可以对特定的卫星观测量研制特定的重力场模型。随着高精度、高分辨率的地球重力场模型的建立，此项误差可控制在数厘米以内。

**(2)跟踪系统的误差。**目前测高卫星的轨道是通过SLR, GPS, DORIS等方法来确定的。跟踪站的站坐标误差，各种不同类型的观测值中的误差以及轨道计算中所用的数学、力学模型的误差和计算误差等都将影响最终的定轨结果。目前此项误差也可控制在数厘米以内。





## 9. 卫星雷达测高 - 观测误差改正

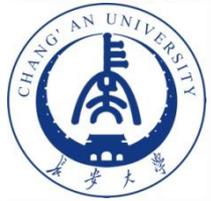
### 2) 信号传播误差

(1) **仪器误差**。包括以下几个方面：

- 测高仪的天线相位中心与卫星的质量中心间的偏差；
- 信号在测高仪的发射电路和接收电路中的时间延迟；
- 卫星钟的钟误差

以上几项都会影响最终的测量结果。但上述误差在卫星发射前均可进行控制和标定。例如Geos-3的标定值为5.30m。





## 9. 卫星雷达测高 - 观测误差改正

### (2) 大气延迟误差

此项误差又可分为电离层延迟和对流层延迟。

- 对于14 GHz的微波信号而言，电离层延迟为5~20cm。其具体数值取决于电离层中的总电子含量TEC。上述误差可用双频观测来予以消除。
- 对流层延迟约为2-3m。此项误差可用模型来加以改正，但遗憾的是由于水汽分布不规则，因而用模型来消除对流层中的水汽分量的效果较差。如果测高卫星上配备了水汽辐射计的话则能很好地解决上述问题。



Envisat卫星





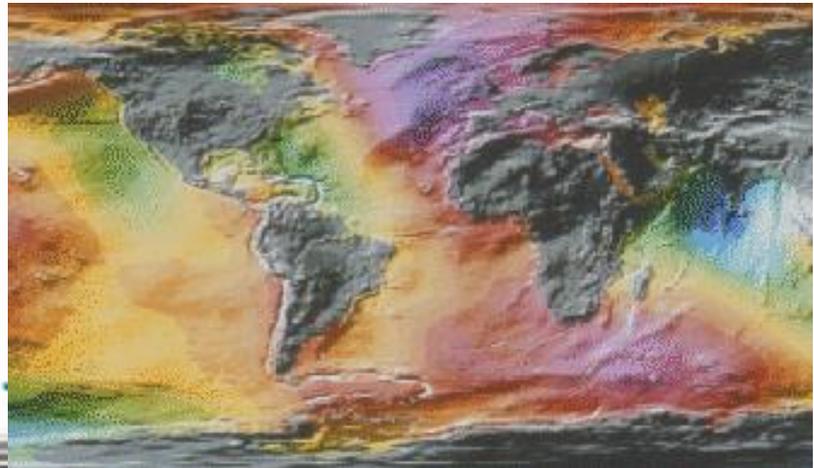
## 9. 卫星雷达测高 - 观测误差改正

### 3) 瞬时海面与大地水准面间的偏差

此处只需顾及因**潮汐**和**大气负荷**而引起的海平面变形量, 以及由**海面地形H**所代表的平均海水面与大地水准面之间的差异即可。

- 由气压不同而引起的海平面变化估计可达10-50cm。此项改正在很多情况下不被人们注意。在测高精度已提高至cm级的今天, 气压改正必须予以考虑。

ERS-1 world map of the means sea level.

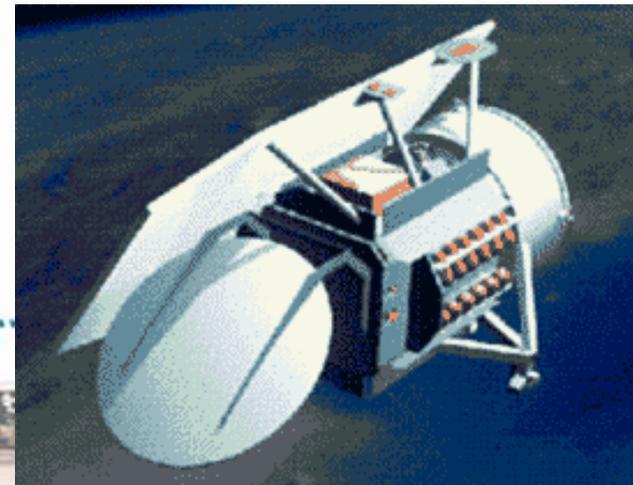


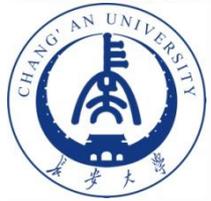


## 9. 卫星雷达测高 - 观测误差改正

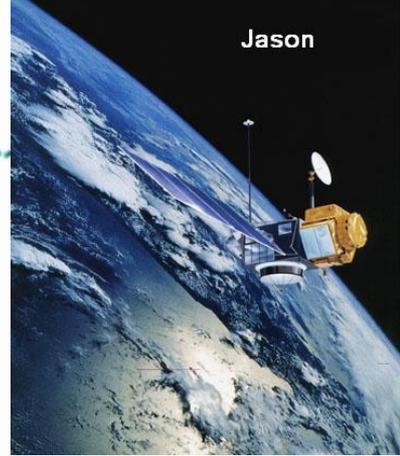
- 在广阔的海洋上由海洋潮汐而产生的海平面变化可达1m左右，在浅海及海岸附近则可达2m或更大。现在建立的许多海洋潮汐模型可对此进行改正，改正数的精度也能达到cm级。
- 海面地形H的值可达1-2m。在确定大地水准面时，海面地形需视为改正数。其值可据海面地形模型求得。在海洋学研究中海面地形H也可成为我们感兴趣的一种信号。

GFO卫星





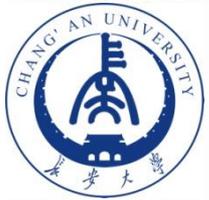
## 9. 卫星雷达测高 - 用途



### (1) 测定大地水准面和地球重力场

如前所述，利用卫星测高方法可以实际测定海洋区域的大地水准面。Seasat在三个月的飞行时间段中共提供了1648小时的测高数据，共有约500万个高程值。然后就能用斯托克斯反解公式求出重力异常值。美国国家地球物理数据中心利用Seasat资料求得了在南纬 $72^\circ$ 和北纬 $72^\circ$ 间的 $5' \times 5'$ 格网点上的重力异常值。利用轨道摄动法只能求得20阶和20次的低阶地球重力场模型。而用海洋测高资料后则可求得200阶和200次的地球重力场模型。





## 9. 卫星雷达测高 - 用途

### (2) 地球物理学研究

在海洋中大地水准面的形状与海底地形有关。因此依据大地水准面所提供的信号能探测出海底山脉、断裂带和地堑构造等大地构造，并给出地球物理解释。

TOPEX/Poseidon卫星





## 9. 卫星雷达测高 - 用途

### (3) 海洋学研究

在精确测定大地水准面的形状时，海面地形是一种噪声，需精确地加以改正。但对于海洋学家来说，海面地形包含了有关洋流和潮汐的大量信息。如果精确的大地水准面形状可由其他方法确定（如卫星跟踪卫星，卫星梯度测量等方法），那么用卫星测高资料即可求得精确的海面地形。据此可研究洋流，海潮的范围、幅度及其随时间的变化规律。同时还能把分属于不同高程系统的验潮站相互联系起来以建立一个全球统一的高程基准，此外利用卫星测高技术还能确定冰盖的形状大小及其变化情况。



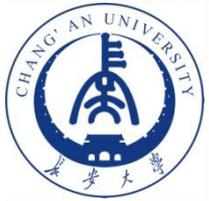


# 习题与思考题

---

- ① 什么是全球定位系统GPS？有哪些应用？
  - ② 简要叙述GPS测量定位的基本原理。
  - ③ 什么是人卫激光测距SLR？有哪些应用？
  - ④ 什么是甚长基线干涉测量VLBI？有哪些应用？
  - ⑤ 什么是卫星测高SA？有哪些应用？
- 





---

**第二章讲解结束，谢谢！**

