

# GNSS 测量原理与应用

李丽华

中国地质大学（北京）测量与导航工程系

lihuali@cugb.edu.cn

2020 春



## 第二章 坐标系统与时间系统

2.1 天球坐标系与地球坐标系

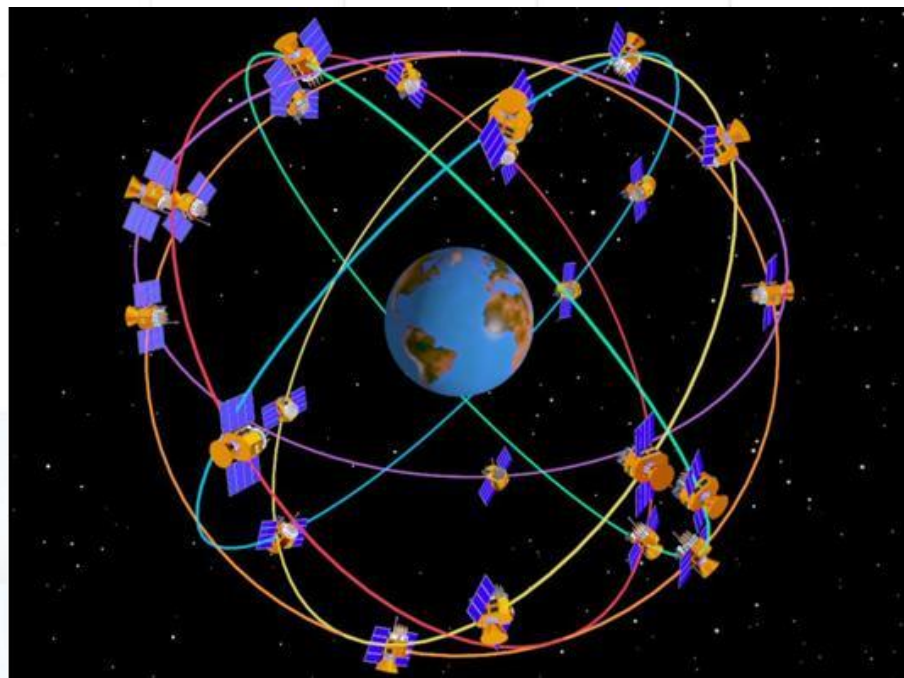
2.2 WGS-84坐标系和我国大地坐标系

2.3 坐标系统之间的转换

2.4 时间系统

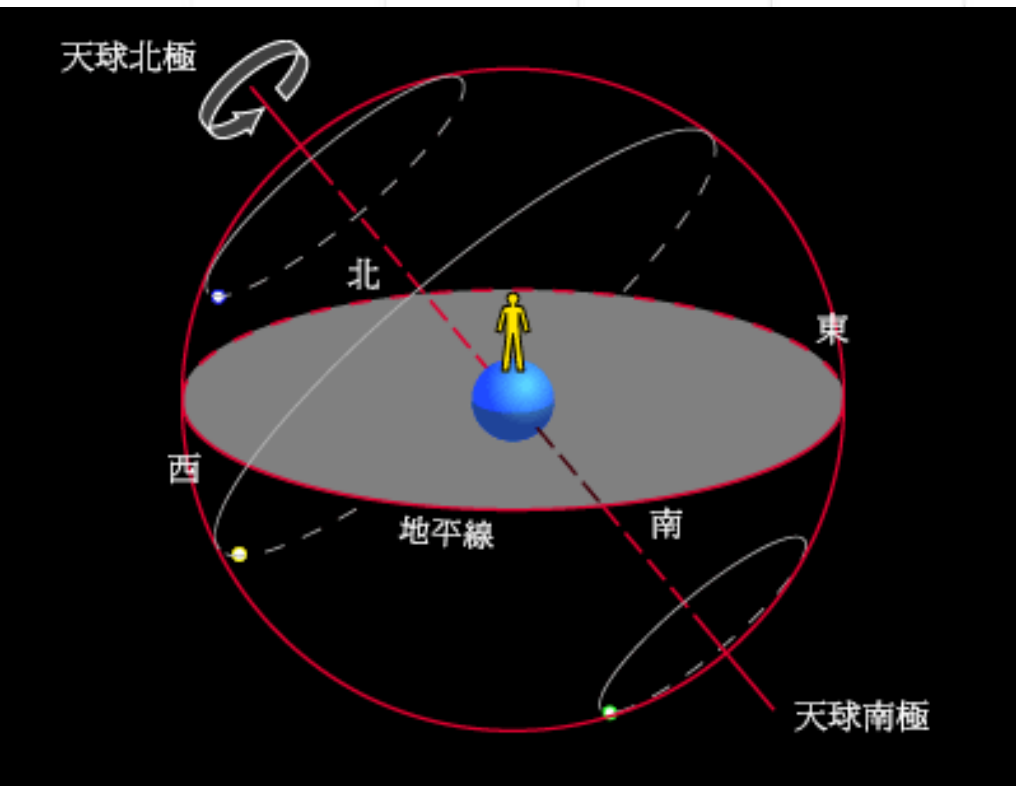


## 2.1 天球坐标系与地球坐标系



- 描述卫星位置-----天球坐标系

## 2.1 天球坐标系与地球坐标系



天球——以地球质心为中心，半径为任意长度的一个假想球体。

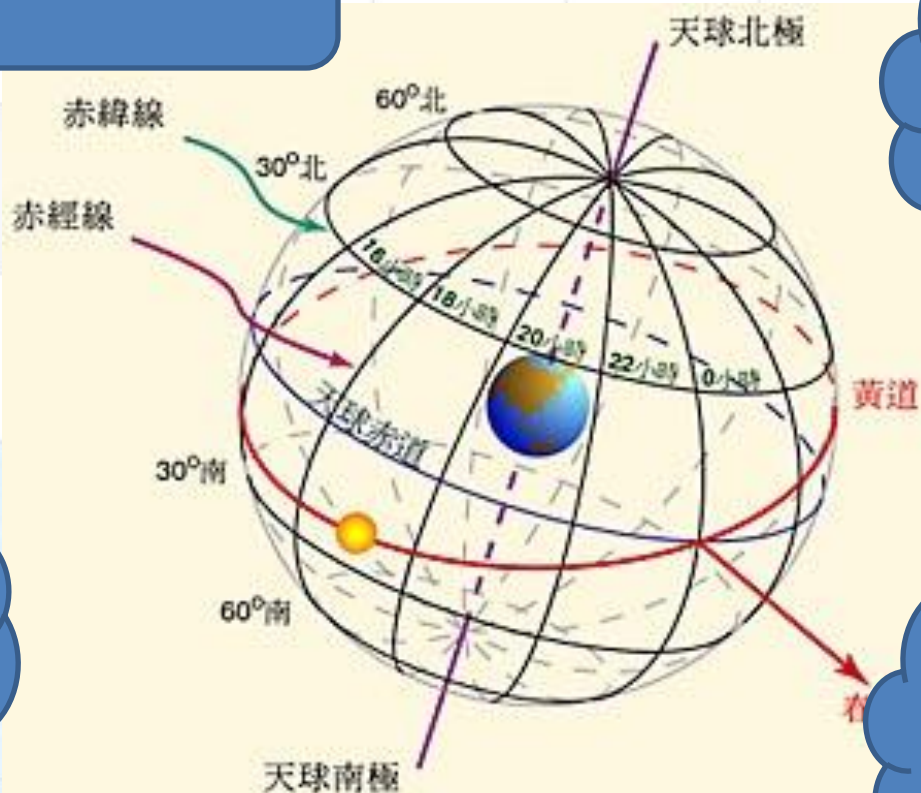


# 天球

天轴：地球自转轴的延伸线

天极 (NS)：  
天轴与天球的  
交点

天球子午  
面：含天  
轴，过天  
球上任意  
一点的平  
面

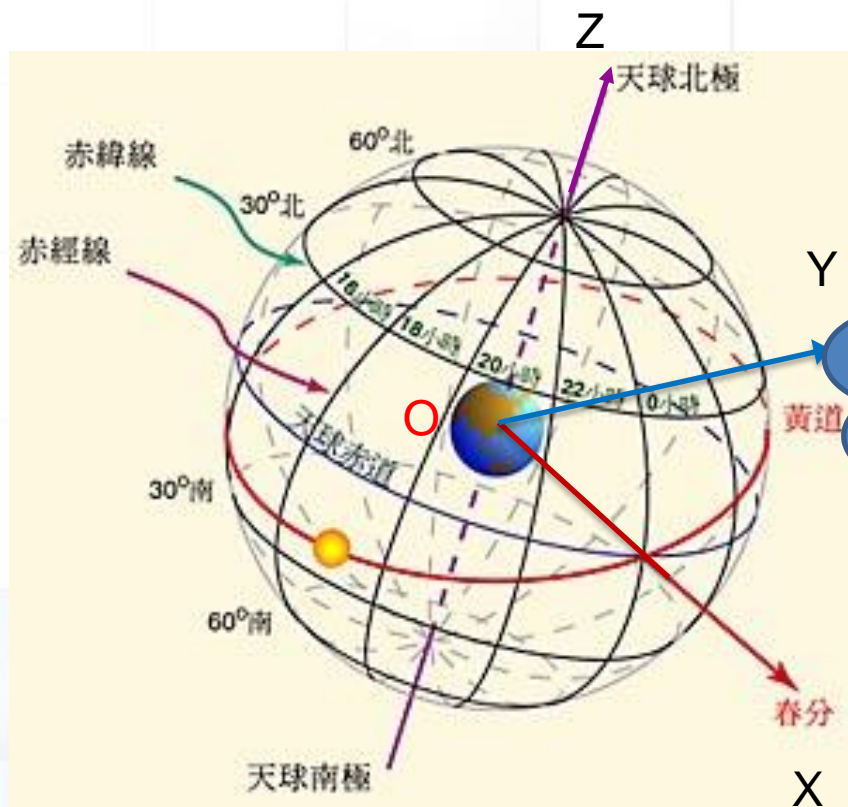


天球赤道  
面：通过  
地球质心，  
与天轴垂  
直的平面



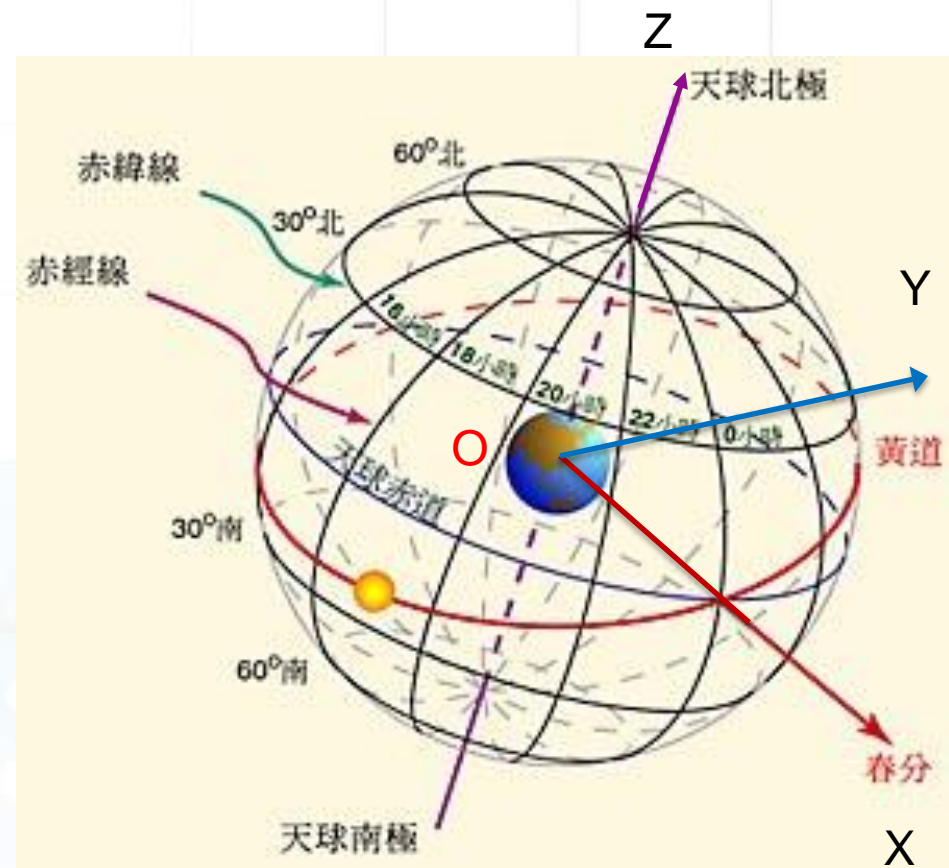
中国地质大学  
UNIVERSITY OF GEOLOGICAL SCIENCES



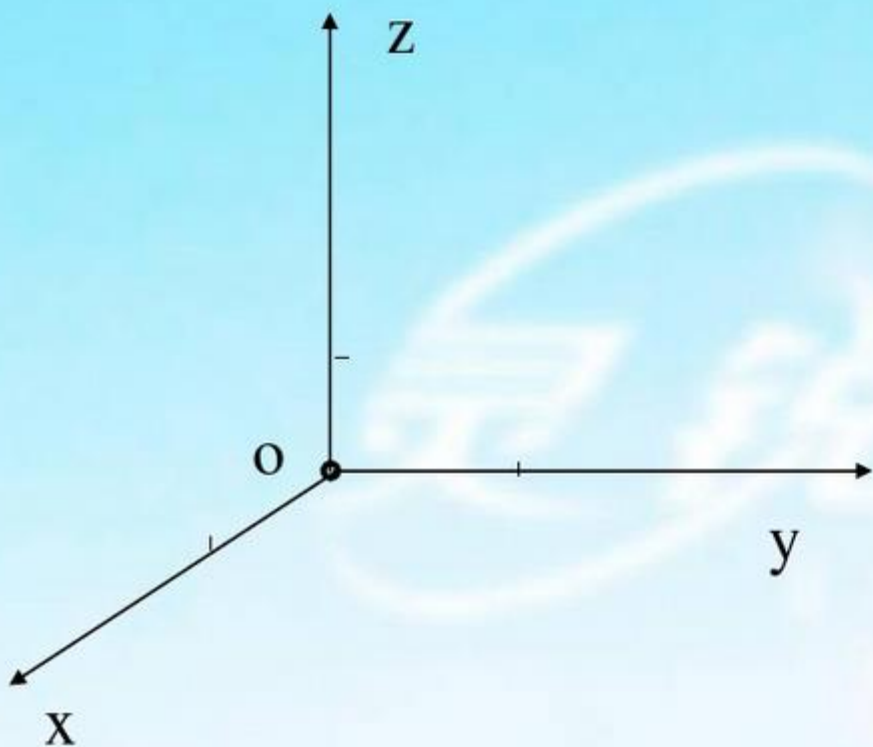


**黄道：地球公转的轨道面与天球相交的大圆，也可以说，地球公转时，地球上的观测者看到太阳在天球上的轨道**

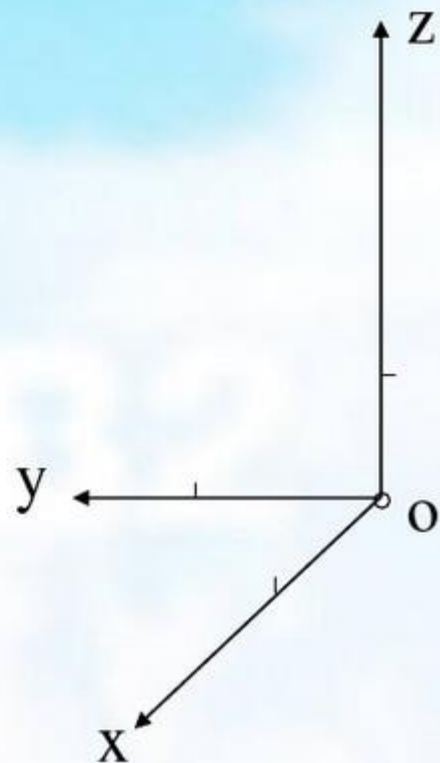
**春分点：太阳在黄道上，从天球的南半球向北半球运行时，黄道与赤道面的焦点**



坐标原点--地心O,  
Z轴与地球自转轴重合,  
X轴指向春分点 $\gamma$ ,  
Y轴为右手系。(固定)



右手坐标系



左手坐标系



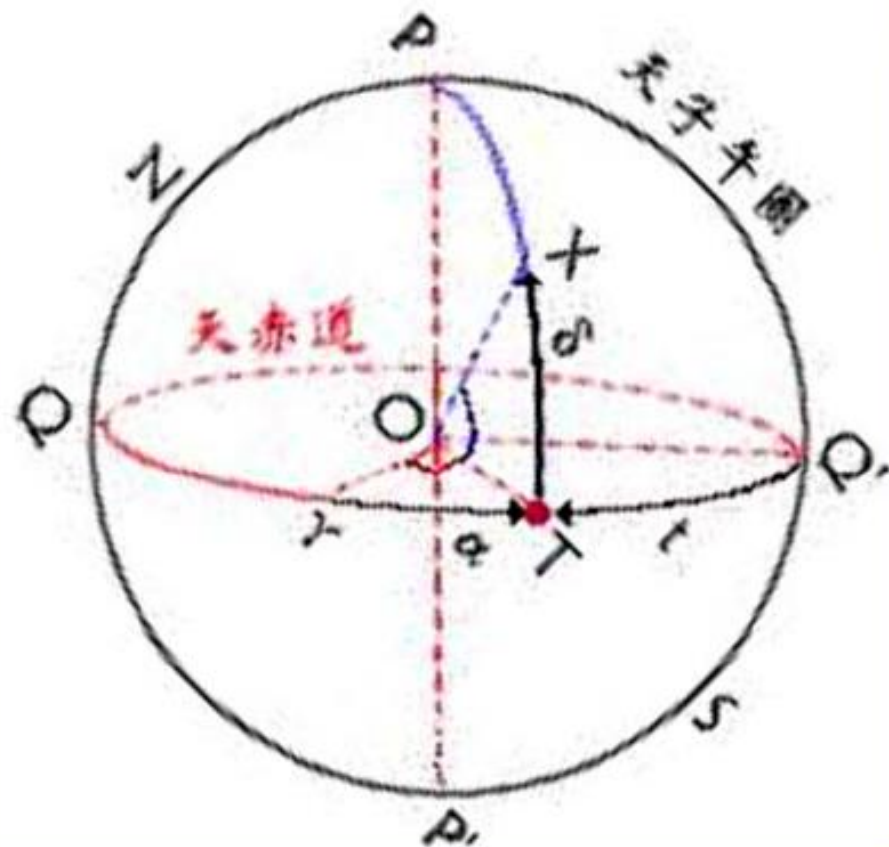
# 天球坐标系的表达方法

## ◆天球球面坐标系

(赤经, 赤纬, 向径)

## ◆天球空间直角坐标系

**(X, Y, Z)**



# 天球坐标换算关系

$$X = r \cos \alpha \cos \delta$$

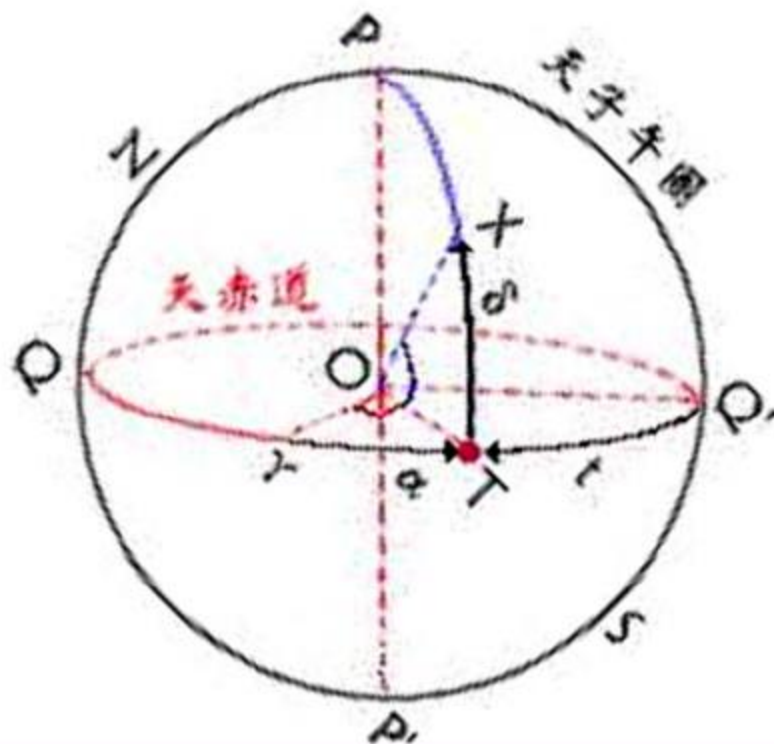
$$Y = r \sin \alpha \cos \delta$$

$$Z = r \sin \delta$$

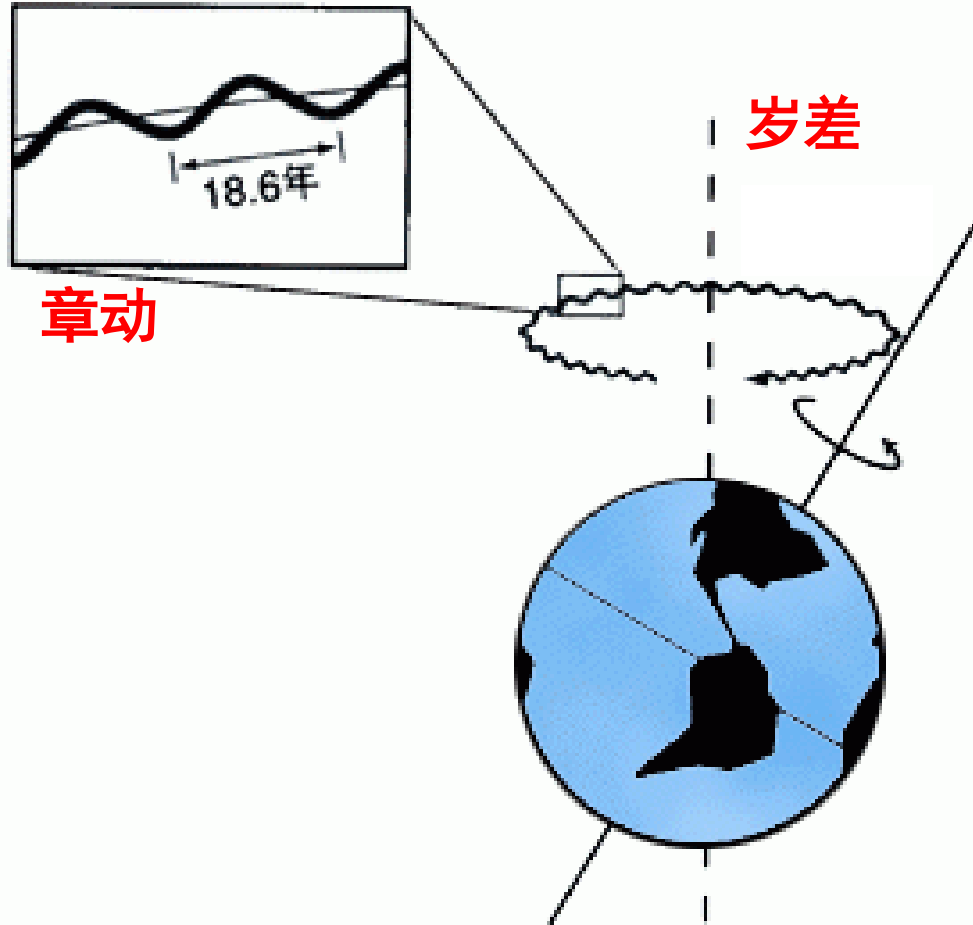
$$r = (X^2 + Y^2 + Z^2)^{1/2}$$

$$\alpha = \arctan (Y/X)$$

$$\delta = \arctan (Z/(X^2 + Y^2)^{1/2})$$



# 影响因素分析



章动

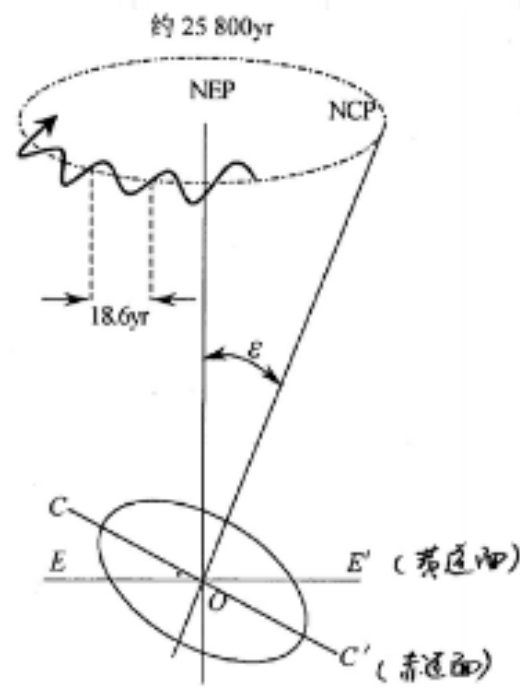
岁差

日、月对地球的引力 (gravitation) 产生力矩 (moment)，使地球自转轴的方向在天球上缓慢地运动

**岁差：**地球的自转轴相对于天球坐标系的摆动，其在太空中并不固定，而是以 **25800** 年的周期在转动（**长期性**），这个运动称之为岁差 (precession)。

**章动：** **短周期** 变化中幅值最大的约为  $9''$ ，**周期为 18.6 年**，这些短周期变化称之为章动 (nutation)

- 在岁差影响下，地球自转轴在空间绕北黄极产生缓慢旋转（从北天极上方观察为顺时针），使北天极以同样方式绕北黄极在天球上产生缓慢旋转
- 把随时间变化的极点叫**瞬时极**
- **瞬时北天极**：观测瞬间的北天极
- **瞬时平北天极**：通常把绕北黄极均匀运动的北天极称为**瞬时平北天极**，简称**平北天极**



**瞬时平天极**  
**瞬时真天极**  
**某固定历元的天球**





- 岁差和章动影响下，**瞬时天球坐标系**（ICS）坐标轴的指向在不断变化，它不是一个严格的惯性参考系，不能直接根据牛顿力学定律来研究卫星运动规律。因此要建立一个与惯性坐标系相接近的天球坐标系——**协议天球坐标系**
- 通常做法：
  - 选择某一时刻 $t_0$ 作为标准历元，此刻的瞬时北天极、瞬时春分点和瞬时天球赤道经该时刻岁差和章动改正后，可构成一个天球坐标系。这个坐标系称为**标准历元 $t_0$ 的平天球坐标系**，或**协议天球坐标系**，也叫**协议惯性坐标系**（GIS）



**瞬时天球坐标系与平天球坐标系（协议天球坐标系）：**  
经过了岁差和章动的改动，由瞬时天球坐标系变为平天球坐标系

### ◆瞬时真天球坐标系

- > 瞬时真天极、瞬时真赤道面、瞬时真春分点
- > 坐标轴指向随时间变化

### ◆瞬时平天球坐标系

- > 瞬时平天极、瞬时平赤道面、瞬时平春分点
- > 经过了章动改正

### ◆标准历元的平天球坐标系

- > 相应标准历元（2000.1.15）的一个特定时刻的平天球坐标系
- > 经过了标准历元到观测历元的岁差改正



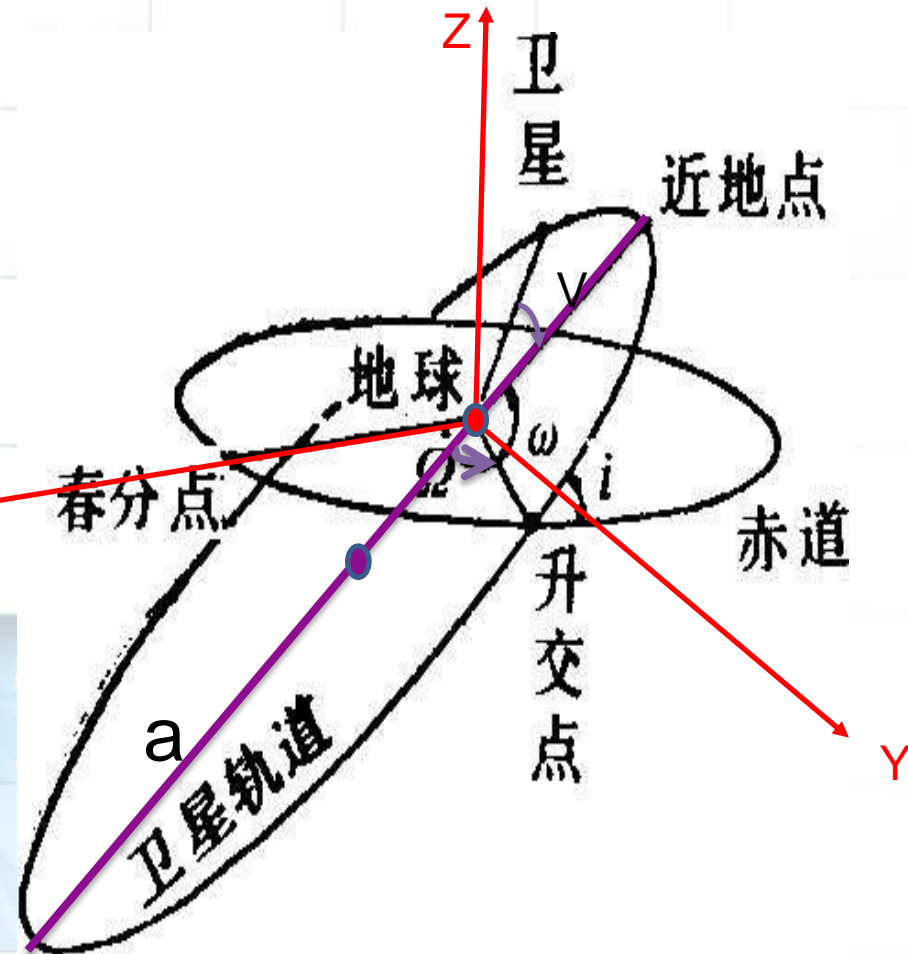
## 某观测历元 $t$ 的瞬时天球坐标系与平天球坐标系的转换步骤：

- 首先将JD2000.0协议天球坐标系中的坐标转换到观测历元 $t$ 的瞬时平天球坐标系中；
- 然后再将瞬时平天球坐标系中的坐标，转换到观测历元 $t$ 的瞬时天球坐标系中



# 卫星在天球坐标系中的坐标和轨道坐标

- 卫星绕地球质心作椭圆周运动。椭圆轨道与赤道的交点N叫升交点。
- 轨道平面与赤道平面夹角叫轨道倾角 $i$ ， $\Omega$ 叫升交点赤经， $\omega$ 叫近地点角距， $\nu$ 叫真近点角。再加上轨道椭圆的长半径 $a$ 和扁率 $f$ ，构成卫星轨道的六个轨道参数（又叫轨道根数）。





# 2.1 天球坐标系与地球坐标系

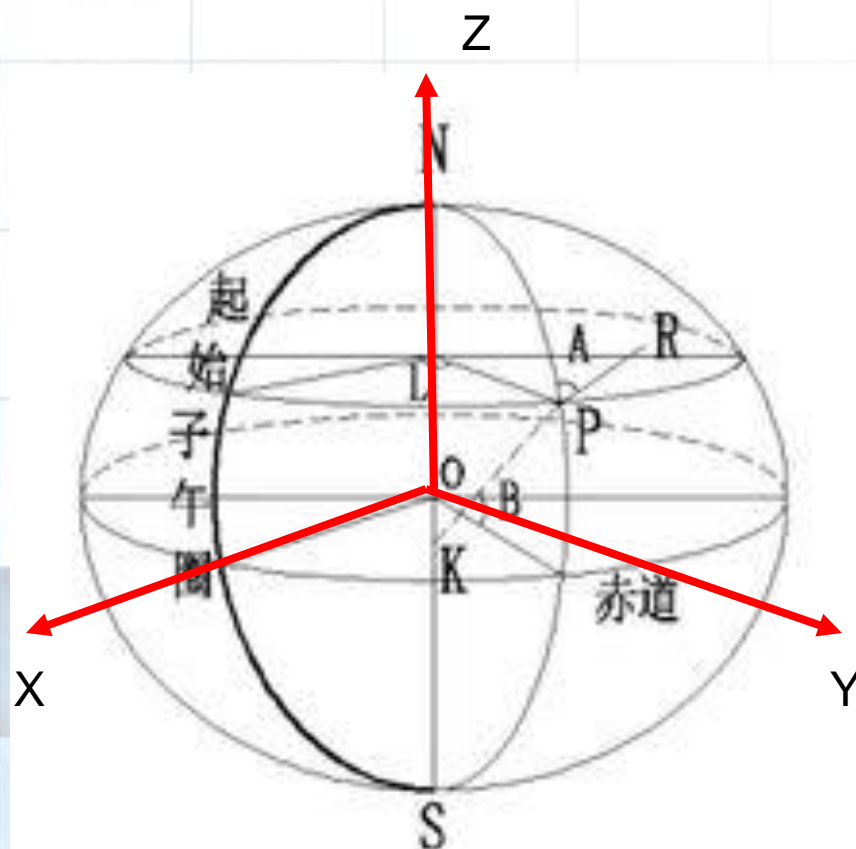
## 大地坐标系：描述地球上点的位置

- 地面上的点被认为是相对于地球固定不变的，所以其参照系统应是与地球体固连的坐标体系，目前普遍采用的就是所谓**大地坐标系**。

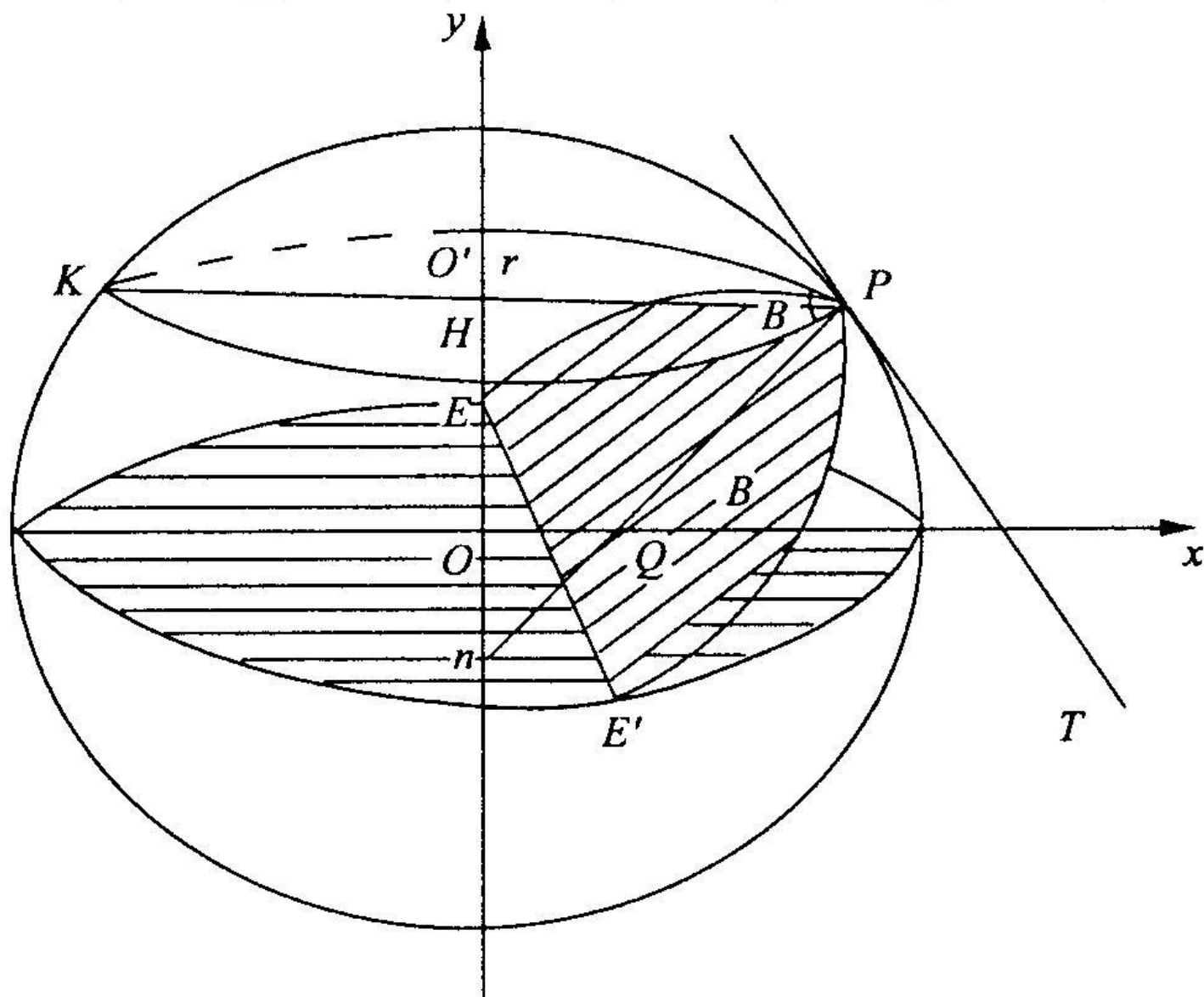


# 大地坐标系定义

- 坐标原点O--地心，  
Z轴：与地球自转轴重合，
- X轴指向过格林尼治子午面与赤道面交点，
- Y轴为右手系。  
(随地球转动)









# 大地坐标与空间直角坐标换算关系

$$\begin{cases} X=(N+H)\cos B\cos L \\ Y=(N+H)\cos B\sin L \\ Z=[(N(1-e^2)+H)]\sin B \end{cases}$$

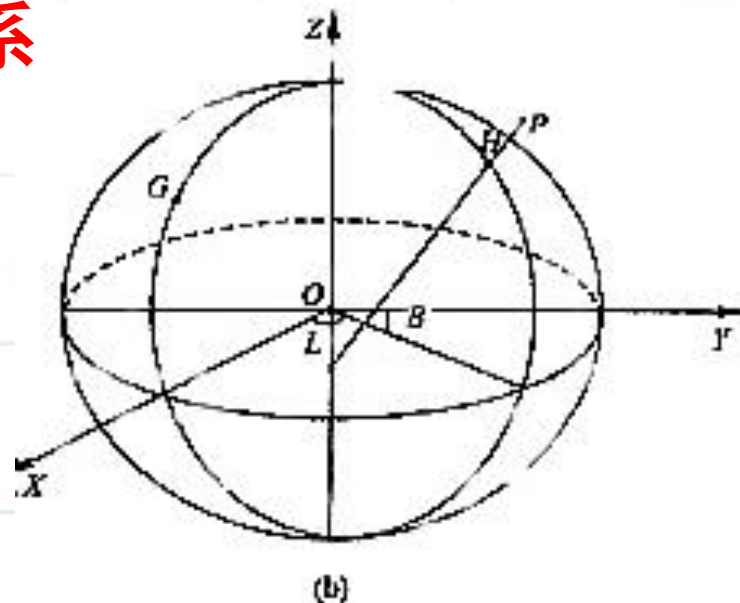


图 3.2 地理坐标系〔大地坐标系〕〔 $B, L, H$ 〕  
与地心空间直角坐标系〔 $X, Y, Z$ 〕

$$\begin{cases} L=\arctan(Y/X) \\ B=\arctan\{Z(N+H)/[(X^2+Y^2)^{1/2}(N(1-e^2)+H)]\} \\ H=Z/\sin B-N(1-e^2) \end{cases}$$

式中， $N=a/(1-e^2\sin^2 B)^{1/2}$ ， $N$ 为该点的卯酉圈曲率半径， $e^2=(a^2-b^2)/a^2$ ， $e$ 为椭球第一偏心率。

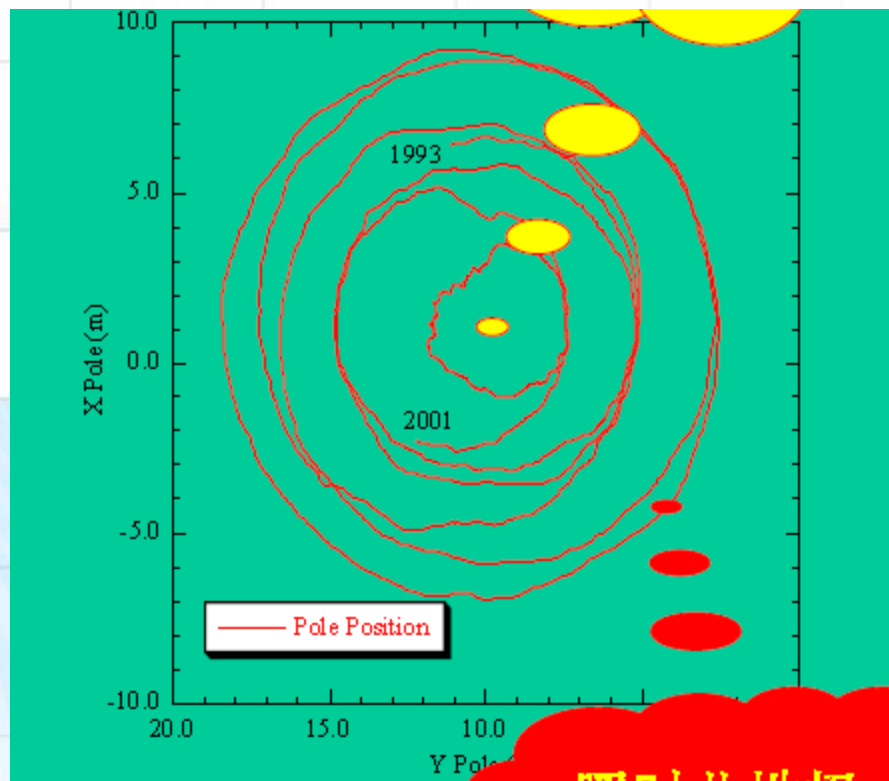


大地**直角坐标** ( $X, Y, Z$ ) 和**大地坐标** ( $B, L, H$ ) 之间同属于**同一坐标系**下的两种**不同的坐标表达方式**, 它们之间存在着唯一的数学“**换算**”关系。



# 极移——地球坐标系

➤ 极移-----地  
球自转轴相对  
于地球坐标系  
的摆动，地极  
点在地球表面  
的位置随时间  
而变化



瞬时北地极



地球坐标系	原点	Z轴	X轴
瞬时地球坐标系	地心	瞬时北地极	瞬时真赤道面和包含瞬时自转轴的格林尼治平子午面的交线
平地球坐标系	地心	协议地极原点 (如1900.00~1905.00年地球自转轴的瞬时平均位置)	与地心和CIO连线正交之平面和格林尼治平子午面的交线

BIH: 国际时间局

IERS: 国际地球自转服务组织





# 协议地球坐标系

WGS-84坐标系几何定义：

原点：地球质心；Z：指向BIH1984.0定义的协议地球极方向；  
X：指向BIH1984.0零子午面与CTP赤道的交点；Y：右手坐标系

GLONASS坐标系几何定义：原点位于地球质心，Z轴指向IERS推荐的协议地球极(CTP)方向，即1900—1905年的平均北极，X轴指向地球赤道与BIH定义的零子午线交点，Y轴满足右手坐标系。

CGCS2000几何定义：其原点为包括海洋和大气的整个地球的质量中心，Z轴由原点指向历元2000的地球参考极的方向，X轴由原点指向格林尼治参考子午线与地球赤道面（历元2000.0）的交点，Y轴与Z轴、X轴构成右手正交坐标系

GALILEO坐标系几何定义：

原点位于地球质心，Z轴指向IERS推荐的协议地球极(CTP)方向，X轴指向地球赤道与BIH定义的零子午线交点，Y轴满足右手坐标系。



## WGS84

**Origin** = Earth's centre of mass

**Z-Axis** = The direction of the Conventional Terrestrial Pole (CTP) for polar motion, as defined by BIH on the basis of the coordinates adopted for the BIH stations.

**X-Axis** = Intersection of the WGS 84 reference meridian plane and the plane of the CTP's equator, the reference meridian being the zero meridian defined by the BIH on the basis of the coordinates adopted for the BIH stations.

**Y-Axis** = Completes a right-handed, Earth Centered, Earth Fixed (ECEF) orthogonal coordinate system, measured in the plane of the CTP equator,  $90^\circ$  East of the x-axis.

WGS84 defines a reference frame for the earth, based on a reference geoid, using a reference ellipsoid.



# IERS、ITRS与ITRF

- **IERS**---指国际地球自转服务机构。
- **ITRS**---指国际地球参考系统。

**IERS**每年将全球各站观测数据综合处理，得出一种协议地球参考系统**ITRS**。

- **ITRF**---指构成**ITRS**的地面控制点网，即有“框架”之意。
- **IGS**---国际**GPS**地球动力学服务。几乎所有的**IGS**精密星历都是在**ITRF**框架下提供的。





## ITRS and ITRF

### ITRF NEWS

#### General concepts

#### Splinter meeting

## ITRF Products

#### ITRF solutions

#### Transformation parameters

#### VO Corner

## Domes Numbers

#### DOMES description DOMES request

## IERS Network

#### Network description

#### Local surveys

#### Site Information and Selection

## Get ITRF coord.

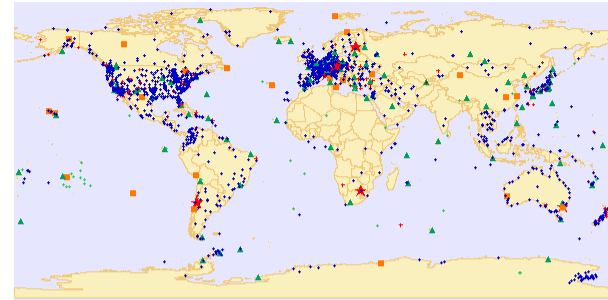
#### Get coordinates

#### Selected points

## ITRF Mailing list

## Welcome to the ITRF web site

The objective of this web site is to distribute the International Terrestrial Reference Frame (ITRF) products. ITRF94, ITRF96, ITRF97, ITRF2000, ITRF2005 and ITRF2008 solutions are available for download. It also contains the description and list of all the IERS stations.



- [ITRS and ITRF](#) : What are the ITRS and the ITRF? Latest news about the ITRF...
- [ITRF Products](#) : Description of ITRF solutions, download. Relationship between ITRS realizations, transformation parameters.
- [DOMES numbers](#) : What is the use of the DOMES numbering? Request a DOMES number.
- [IERS Network](#) : The IERS network description. Download the local ties between ITRF stations. [Consult information about an ITRF point, find an ITRF point...](#)
- [Get ITRF coord.](#) : Request ITRF coordinates online for a specific set of stations at any epoch in any ITRS realization from ITRF94.. Make a selection of stations, consult the selection and get the ITRF coordinates in tables or SINEX format.
- [ITRF Mailing list, FAQ, Links](#) : Subscribe to ITRFmail, questions about ITRS and ITRF..., Related web pages...

Tip : Want to add a station to the IERS station database? Request a **DOMES number** !

Should you have any questions, see the [FAQ](#) or





# ITRF: international Terrestrial Reference Frame

IERS 每年将全球站的观测数据进行综合处理和分析，得到一个ITRF框架，并以IERS年报和IERS技术备忘录的形式发布。

自1988年起，IERS已经发布ITRF88，89，90，91，92，93，94，96，97，ITRF2000，ITRF2005，ITRF2008，ITRF2014等全球坐标参考框架。



# 实现

- ITRS通过ITRF实现，全球观测基准站
- 基于VLBI, LLR, GPS和DORIS不同的空间大地测量技术
- IERS中央局综合分析得到



# CTRF建立

- 观测站选取： 均匀分布
- 主要的板块有足够的台站
- 应尽量位于所属板块的稳定部分
- 300多个台站，多种观测技术分析比较，  
IERS综合分析处理，形成一个综合CTRF



# IGS Product Table [GPS Broadcast values included for comparison]

		Accuracy	Latency	Updates	Sample Interval
<b>GPS Satellite Ephemerides/ Satellite &amp; Station Clocks</b>					
Broadcast	orbits	~100 cm	real time	--	daily
	Sat. clocks	~5 ns RMS ~2.5 ns SDev			
Ultra-Rapid (predicted half)	orbits	~5 cm	real time	at 03, 09, 15, 21 UTC	15 min
	Sat. clocks	~3 ns RMS ~1.5 ns SDev			
Ultra-Rapid (observed half)	orbits	~3 cm	3 - 9 hours	at 03, 09, 15, 21 UTC	15 min
	Sat. clocks	~150 ps RMS ~50 ps SDev			
Rapid	orbits	~2.5 cm	17 - 41 hours	at 17 UTC daily	15 min
	Sat. & Stn. clocks	~75 ps RMS ~25 ps SDev			5 min
Final	orbits	~2.5 cm	12 - 18 days	every Thursday	15 min
	Sat. & Stn. clocks	~75 ps RMS ~20 ps SDev			Sat.: 30s Stn.: 5 min





- Final: available at 12 days latency.
- Rapid: available with approximately 17 hours latency.
- UltraRapid: released four times each day (at 0300, 0900, 1500, and 2100 UT) and contain 48 hours worth of orbits;
- the first half computed from observations and the second half predicted orbit.
- The files are named according to the midpoint time in the file: 00, 06, 12, and 18 UT.



# 协定坐标系

## 坐标系定义：

理论定义——选定尺度单位, 原点, 取向

协定定义——实际应用中, 已知若干个测站点的坐标值通过观测又可反过来定义该坐标系 (协定定义). 如点位误差不存在, 则两者一致; 多数情况下不同, 因为测量误差始终存在.

凡依据这些已知点位测定的其他点位的坐标值均属于这一协定坐标系 而不属理论定义坐标系.

*GPS所采用的坐标系统是测轨跟踪站及其坐标值所定义的协定坐标系, 但与理论定义偏差不大.*

*卫星位置采用 WGS-84大地坐标系.*



# 天球坐标系与地球坐标系对比

- **天球坐标系：**  $(r\alpha\delta), (XYZ)$

坐标原点--地心O，Z轴与地球自转轴重合，X轴指向春分点 $\gamma$ ，Y轴为右手系。（固定）

- **地球坐标系：**  $(LBH), (XYZ)$

坐标原点--地心O，Z轴与地球自转轴重合，X轴指向过格林尼治子午面与赤道面交点，Y轴为右手系。（随地球转动）



坐标原点相同

协议天球坐标系：研究卫星运动轨道，

协议地球坐标系：研究地面点坐标，

➡需要两个坐标系进行变换。

步骤：

协议天球坐标系→瞬时天球坐标系→瞬时地球坐标系→协议地球坐标系。

