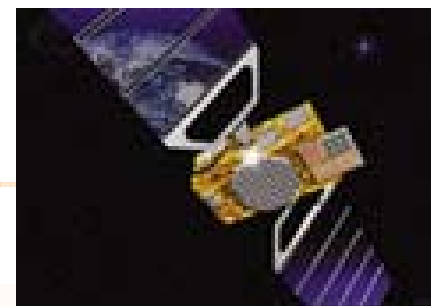
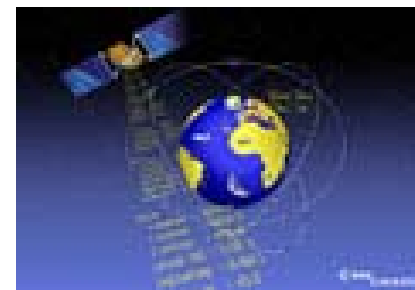


卫星定位技术与方法

第一讲 绪论



西南交通大学测量工程系

课程概述

- 目标：掌握**GPS**卫星测量基本原理及其应用
- 重点：基本概念、基本原理和基本方法的理解和掌握
- 阅读能力：独立完成作业、严禁拷贝
- 在学习制定教材的基础上，依据学生的兴趣和个人能力，学习内容和形式多样
- 其它要求：网上查阅**GPS**专业资料的能力；英文
- 成绩评定：平时成绩 **30%**；期末考试**70%**



课程大纲

1. 历史、发展和当前状况
2. 坐标系统与时间系统
3. 卫星轨道运动 及**GPS**卫星的坐标计算
4. **GPS**卫星信号与传播
5. **GPS**观测量、观测方程及误差分析
6. 绝对（单点）定位原理
7. 相对（差分）定位原理
8. **GPS**测量实施及软件操作（实习）
9. **GPS**应用



References

➤ Textbook

- 黄丁发、熊永良、袁林果. 全球定位系统（GPS）——理论与实践，西南交通大学，2005
- 周忠谟, 易杰军, 周琪. GPS卫星测量原理与应用（修订本）. 北京: 测绘出版社, 1997

➤ References

刘基余. GPS卫星导航定位原理与方法. 北京: 科学出版社, 2003

刘大杰. 全球定位系统(GPS)的原理与数据处理. 上海: 同济大学出版社, 1999

B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and J. Collins, GPS Theory and Practice, Fifth edition. Springer-Verlag, Wein, New York, 2001.

Alfred Leick. GPS Satellite Surveying, 3rd Edition. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2003.

NAVSTAR Global Positioning System Surveying. US Army Corps of Engineers. EM 1110-1-1003



Web Resources

- Global Positioning System Overview by *Peter H. Dana*.
http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps_f.html
- THE INTERAGENCY GPS EXECUTIVE BOARD (IGEB).
<http://www.igeb.gov/>
- GPS Applications Exchange. <http://gpshome.ssc.nasa.gov/>
- The International GPS Service (IGS). <http://igscb.jpl.nasa.gov/>
- U.S. Naval Observatory (USNO) GPS Operations
<http://tycho.usno.navy.mil/gps.html>
- U.S. Coast Guard Navigation Center
<http://www.navcen.uscg.gov/>



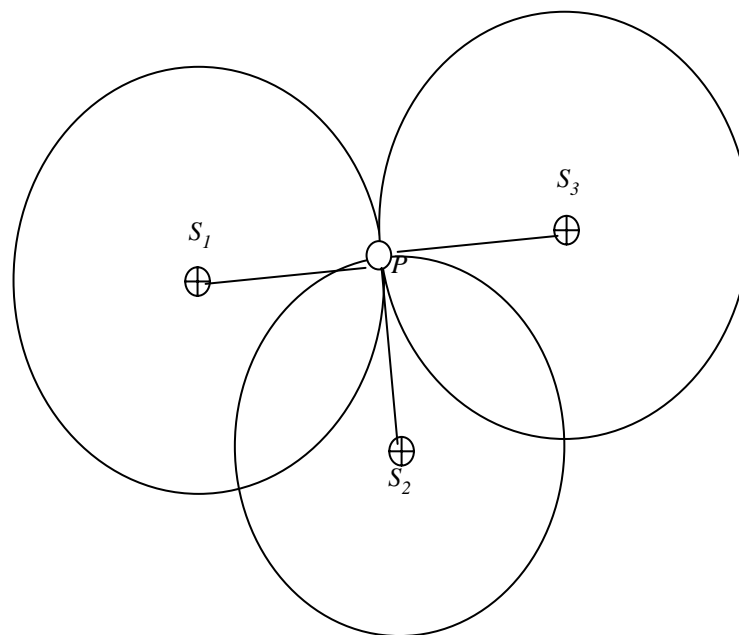
定位与导航的发展过程

- 天体导航
- 磁针（罗盘仪）导航
- 惯性导航
- 无线电导航：



无线导航定位基本原理

- 三边交会定位：
测量电磁波传播时间，
乘以光速获得距离。



无线导航定位基本原理

● 双曲线定位：

采用**Time Difference Of Arrival (TDOA)** 的方式，其原理是通过检测无线电波到达两个基站的时间差,获得距离差。待测点必定位于以两个基站为焦点的双曲线方程上。两条双曲线的交点即为待测点的二维位置坐标。

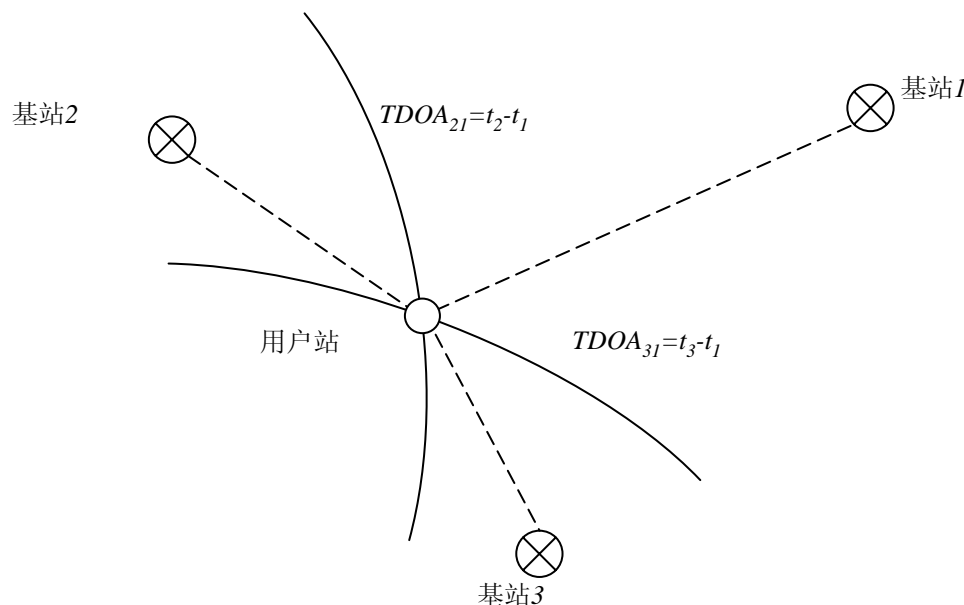


图1-2 双曲线定位原理

$$R_{21} = cd_{21} = R_2 - R_1 = \sqrt{(X_2 - x)^2 + (Y_2 - Y)^2} - \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2}$$

$$R_{31} = cd_{31} = R_3 - R_1 = \sqrt{(X_3 - x)^2 + (Y_3 - Y)^2} - \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2}$$

无线导航定位基本原理

● 多普勒定位

信号发射已知的频率信号 f_s ，
由观测点信号接收机跟踪。
接收机与发射器之间的相对
运动 ds/dt 产生接收频率 $f_s(t)$
随时间变化，即多普勒频
移：

$$f_r(t) = f_s \left(1 - \frac{1}{c} \frac{ds}{dt} \right)$$

与此相关的观测方程为：

$$| \mathbf{r}_k - \mathbf{r}_p | - | \mathbf{r}_j - \mathbf{r}_p | = | \Delta \mathbf{r}_{pk} - \Delta \mathbf{r}_{pj} | = | \Delta \mathbf{r}_{pjk} |$$

Tansit子午、DORIS星载多普勒定位系统等 采用此技术

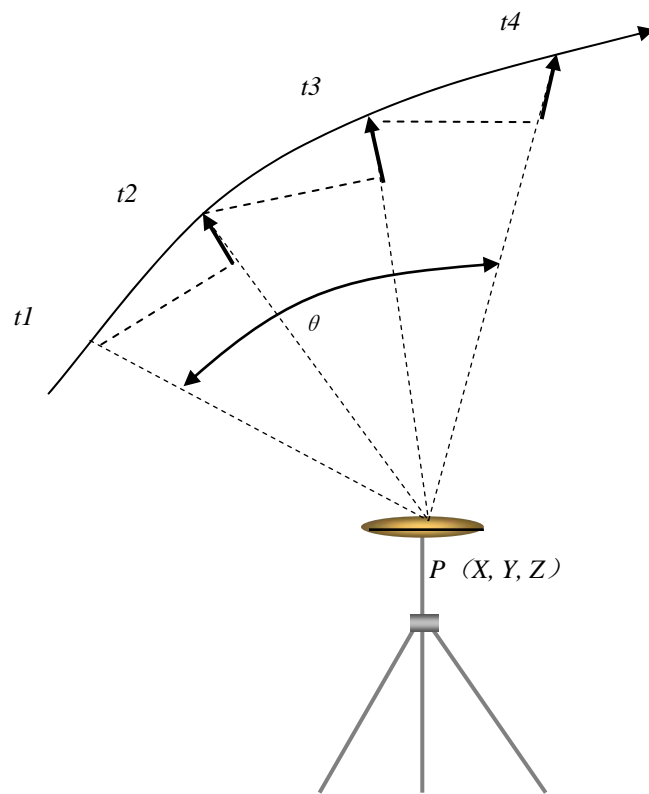


图1-3 多普勒定位原理

罗兰C（Loran-C）无线导航定位基本原理

- 罗兰C系统是由美国最先开发建设的远程无线电导航系统。罗兰一词就是英文“远程导航”（**Long Range Navigation**）词头缩写的音译
- 最早的罗兰系统是罗兰A，也称标准罗兰，是美国在二次世界大战初期研制成功的海用中程无线电导航系统。
- 罗兰C系统是第二次世界大战末期在罗兰A的基础上研制的。
- 罗兰C导航系统采用脉冲相位双曲面定位原理，如1.2.2节所述。
- 罗兰C台链覆盖地区有限，定位精度也较低，所以美国国防部决定，美军在1994年开始停止使用罗兰C导航系统，而采用性能更优越的GPS全球定位系统。



奥米伽（OMEGA）无线导航定位基本原理

- 奥米伽是甚低频超远程无线电导航系统。
- 奥米伽系统的研究始于**1947**年，第一个试验奥米伽系统于上世纪**60**年代初开始工作。到上世纪**70**年代有七个台投入使用，最后一个台在**1982**年**8**月开放。
- 奥米伽系统可以为全球绝大部分区域提供全天候定位、导航。
- 奥米伽采用相位双曲面定位原理，工作频率为**10.2~13.6kHz**，作用距离可达**15000km**，定位精度为**3.7~7.4km**（ 2σ ）。



子午卫星导航系统(TRANSIT)

- 子午卫星导航系统，又称**多普勒卫星定位系统**，它是**58**年底由美国海军武器实验室开始研制，于**64**年建成的“海军导航卫星系统”（**Navy Navigation Satellite System**）。这是人类历史上诞生的第一代卫星导航系统。
- **1957年10**月前苏联成功发射了第一颗人造卫星后，美国霍普金斯大学应用物理实验室的吉尔博士和魏分巴哈博士对卫星遥测信号的多普勒频移产生了浓厚的兴趣。
- **1958年12**月在克什纳博士的领导下开展了三项研究工作：
①研制卫星；②建立地球重力场模型以便卫星的精确定轨和准确预报卫星的空间位置；③研制多普勒接收机。
- 子午卫星导航系统于**1964年1**月正式建成并投入军方使用，直至**1967年7**月该系统才由军方解密供民间使用。此后用户数量迅速增长，最多达**9.5**万户，而军方用户最多时只有**650**个，不足总数的**1%**，可见因生产的需要民间用户远远大于军方。



子午卫星导航系统的组成

- **卫星星座**：子午卫星星座，由六颗独立轨道的极轨卫星组成。
- 在设计上要求卫星的轨道的偏心率为零，轨道倾角 $i=90^\circ$ ；
- **地面系统**：地面设有4个卫星跟踪站；1个计算中心；1个控制中心；2个注入站；1个天文台（海军天文台）。
- **四个卫星跟踪站**，它们分别位于加利福尼亚州的穆古角、明尼苏达州、夏威夷、缅因州。
- **计算中心**设在加州的穆古角，计算中心根据各跟踪站最近36小时的观测资料计算各卫星的轨道，并外推预报16小时的卫星位置，然后按一定的编码格式写成导航电文传送到注入站。
- 地面的2个**注入站**分别位于**穆古角**和明尼苏达州，注入站接收并存储由计算中心送来的导航电文，每12小时左右向卫星注入1次导航电文。

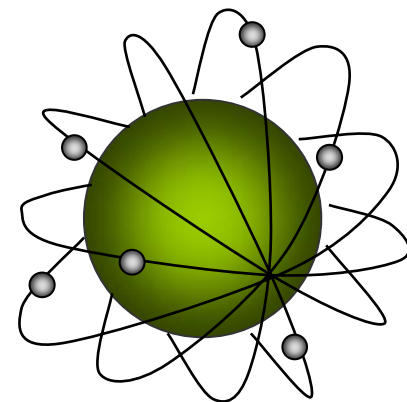


图1-4 子午卫星星座

子午卫星导航系统的技术特点

- **1) 定轨精度:** 在卫星跟踪技术条件一定, 使用相同的地球重力场模型且摄动修正精度一定的情况下, 卫星定轨精度主要取决于地面跟踪站的数量及其分布, 一般来说跟踪站越多、分布越广计算出的卫星轨道就越精确。
- **2) 卫星性能:** 限于早期火箭的运载能力, 子午卫星的重量、体积都很小。星体直径约为**50公分**, 卫星重量为**45~73公斤**。
- **3) 卫星信号:** 卫星配有一台频率相当稳定的钟, 由此产生一个频率为**4.9996MHz**基准钟频信号, 该信号再经过倍频器分别倍频**30**和**80**倍后, 形成两个频率为**149.988MHz**和**399.968MHz**的标准信号供卫星使用。
- **4) 定位精度:** 多普勒定位仪利用广播星历的单机定位精度一般为**10m**左右, 若观测**100**次卫星通过后的测量数据平差解算后, 可获得精度为**3~5m**地心坐标; 如果利用精密星历观测**40**次卫星通过的测量数据平差解算后, 可获得精度为**0.5~1m**地心坐标; 为了消除公共误差提高定位精度, 可利用**2**台以上的多普勒定位仪进行联测, 一般联测的定位精度为**0.5m**。



子午卫星导航系统的不足之处

- 1) 一次定位所需时间过长, 无法满足高速用户的需要
- 在一次测量定位的过程中, 要求卫星对于测点的起、止观测角度 θ 必须在 90° 左右 (参见图1-3)。因此一次定位一般需要连续观测一颗卫星通过的时间约为 **15~18** 分钟。
- 2) 卫星出现时间间隔过长, 无法满足连续导航的需要。
- 因卫星数量少导致中低纬度地面出现可观测卫星的时间间隔过长, 中纬度地区的用户平均 **1.5** 小时左右可以观测到一颗卫星。
- 3) 子午卫星导航系统的定位精度偏低。
- ①卫星轨道低, 受到地球不规则重力场的引力摄动和大气阻力摄动的影响很大
- ②卫星信号频率较低受电离层影响大,
- ③子午卫星的卫星钟频不够稳定,



全球定位系统（GPS）

- 导航卫星测时测距/全球定位系统（**Navigation Satellite Timing and Ranging/Global Positioning System**），简称**GPS**。**1973年12月**，美国国防部批准陆、海、空三军联合研制第二代的卫星导航系统——全球定位系统（**GPS**）。
- 该系统是以卫星为基础的无线电导航系统，具有全能性（陆地、海洋、航空、航天）、全球性、全天候、连续性、实时性的导航、定位和定时等多种功能。能为各类静止或高速运动的用户迅速提供精密的瞬间三维空间坐标、速度矢量和精确授时等多种服务。
- **GPS**计划经历了方案论证（**1974~1978年**），系统论证（**1979~1987年**），试验生产（**1988~1993年**）三个阶段，总投资**300亿美元**。整个系统分为卫星星座、地面监测控制系统和用户设备三大部分。



全球定位系统的技术特点

- 1) 定轨精度：目前的**GPS**卫星的跟踪技术条件，以及地球重力场模型的球阶函数的引力摄动修正等等精确定轨的推算技术手段，都比**70**年代优胜高明得多，因此卫星定轨精度也比过去高得多。
- 广播星历：是由美国本土以及海外军事基地上的**5**个卫星监测站的观测数据解算的。因测站数量少，故卫星定轨精度不高。广播星历所预报的卫星位置的切向误差 $\pm 5\text{m}$ ；径向误差 $\pm 3\text{m}$ ；法向误差 $\pm 3\text{m}$ 。
- 精密星历：是由美国国防制图局根据全球**20**多个卫星跟踪站的观测资料解算的，因测站数量多且分布范围广故卫星定轨精度较广播星历高一个数量级。值得指出的是，由国际**GPS**地球动力学服务组织（**IGS**）所测算预报精密星历比美国军方测定的精密星历的精度要高得多，卫星位置精度可达 ± 3 厘米。



全球定位系统的技术特点

- 2) 卫星性能: **GPS**卫星直径**1.5**米; 重量为**843.68**公斤(包括**310**公斤燃料); **GPS**卫星通过**12**根螺旋阵列天线发射张角约为**30**度的电磁波束垂直指向地面。**GPS**卫星采用陀螺仪与姿态发动机构成的三轴稳定系统实现姿态稳定,从而使天线始终指向地面。卫星还装有**8**块太阳能电池翼板(**7.2 m²**), 三组**15A**的镍镉蓄电池为卫星提供所需的电能。



全球定位系统的技术特点

3) 卫星信号：卫星配有**4**台频率相当稳定（量时精度为**10-13**秒）的原子钟（**2**台铯钟，**2**台铷钟），由此产生一个频率为：**10.23MHz**的基准钟频信号。该信号经过倍频器降低**10**倍的频率后，成为频率为**1.023MHz**测距粗码（**C/A**码）的信号频率；基准钟频信号的频率**10.23MHz**，直接成为测距精码（**P**码）的信号频率；基准钟频信号经过倍频器降低**204600**倍的频率后，成为频率为**50MHz**数据码（卫星星历、导航电文的编码）的信号频率；基准钟频信号再经过倍频器倍频**150**倍和**120**倍频后，分别形成频率为**1575.42MHz**（**L1**）与**1227.60MHz**（**L2**）的载波信号。



全球定位系统的技术特点

4) 定位精度：利用伪随距码（测距码）的信号单机测量，理论上按照目前测距码的对齐精度约为码波长的1/100计算，测距粗码（C/A码）的测距精度约为 $\pm 3\text{m}$ ；而测距精码（P码）的测距精度约为 $\pm 0.3\text{m}$ 。为了消除公共误差提高定位精度，可利用2台以上的载波相位GPS定位仪实行联测定位，对于载波信号单频机的相对定位精度可达： $\pm (5\text{mm} + 2\text{ppm} \times D)$ 其中D为两台仪器的相对距离；对于载波信号双频机，它能有效的消除电离层延时误差，其相对定位精度可达： $\pm (1\text{mm} + 1\text{ppm} \times D)$ ；GPS定位技术不但精度高，而且定位速度快，可以满足飞机、导弹、火箭、卫星等高速运动载体的导航定位的需要。



美国对GPS用户的限制性政策

- 1) 标准定位服务（SPS）和精密定位服务（PPS）：
- 标准定位服务方式（SPS）它通过美国军方已经公开的卫星识别码（C/A码）解调广播星历的导航电文，进行定位测量的，其单点定位精度约为20~40m。精密定位服务方式（PPS）是美国军方或者美国同盟国的特许用户使用的，其单点定位精度约为2~4m。使用这种服务方式一定要事先知道加密码（W码）和精码（P码）的编码结构。否则便无法解调锁定P码进而解读精密星历，实施精密测距。因此W码与P码对于非特许用户是绝对保密的。



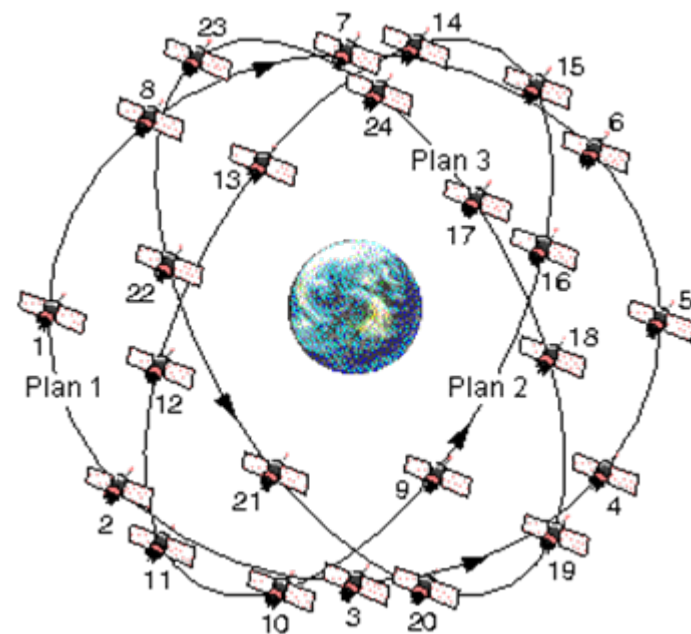
美国对GPS用户的限制性政策

- 2) 选择性可用 (SA) 政策——对 (SPS) 服务实施干扰：**
为了进一步降低标准定位服务方式 (SPS) 的定位精度，以保障美国政府的利益与安全，对标准定位服务的卫星信号实施 δ 技术和 ϵ 技术的人为干扰。
- δ 技术——将钟频信号加入高频抖动使C/A码波长不稳定。
 - ϵ 技术——将广播星历的卫星轨道参数加入人为误差，降低定位精度。
 - **3) 反电子欺骗技术(A-S)——对P码实施加密：**
 - 由于W码对非特许用户是严格保密的，所以非特许用户将无法应用破



全球导航定位系统（GLONASS）

- 1) 卫星星座：如图1-5所示，全球导航定位系统的空间卫星星座，由分布在三个独立椭圆轨道的**24颗（GLONASS）卫星**组成（另加**1颗备用卫星**），平均每个轨道上分布**8颗卫星**，各轨道升交点的赤经相差 **120°** ；轨道偏心率 **$e=0.01$** ；卫星轨道倾角 **$i=64.8^\circ$** ；卫星运行周期 **$T=11\text{h}15\text{m}$** （恒星时**11.28**小时）；卫星高度 **$H=19100\text{km}$** ；卫星设计的使用寿命为**4.5**年，直至**1995**年卫星星座布成，经过数据加载、调整和检验，已于**1996**年**1**月**18**日整个系统正式运转。



全球导航定位系统（GLONASS）

- 2) 地面系统：地面控制站组（GCS）设有1个系统控制中心（在莫斯科区的Golitsyno-2），1个指令跟踪站（CTS），整个跟踪网络分布于俄罗斯境内；CTS跟踪遥测着所有GLONASS可视卫星，对其进行测距数据的采集和处理，并向各卫星发送控制指令和导航信息。在GCS内装有激光测距设备对测距数据作周期修正，为此所有的GLONASS卫星上都装有激光反射镜。



全球导航定位系统（GLONASS）特点

- 1) 卫星信号: 每颗GLONASS卫星配有铯原子钟, 以便为所有星载设备提供高稳定的时标信号。GLONASS卫星同样向地面发射两种载波信号, L1载波信号的频率为1602~1616MHz; L2载波信号的频率为1246~1256MHz; 其中L1载波信号为民用, L2载波信号为军用。GLONASS卫星之间的识别方法采用频分复用制(FDMA), L1载波信号的频道间隔为0.5625 MHz, L2载波信号的频道间隔为0.4375 MHz。GLONASS卫星测距粗码(C/A码)的码频0.511MHz 码长为511比特, 重复周期为1ms; GLONASS卫星也采用类似GPS信号的P码, 尽管前苏联严格保密, 英国立茨大学G..R.Lennen博士还是成功地破译了P码。
- 2) 定位精度:
 - 水平精度: $\pm 50\sim 70\text{m}$; 垂直精度: $\pm 75\text{m}$;
 - 测速精度: $\pm 15\text{cm/s}$; 授时精度: $\pm 1\mu\text{s}$



俄罗斯联邦政府对**GLONASS**系统的使用政策

- 早在**1991**年俄罗斯联邦政府就首先宣称：**GLONASS**系统可供国防和民间使用，不带任何限制、不引入“**选择可用性（SA）**”机制，也不计划对用户收费，该系统将在完全布满星座后遵照以公布的性能运行至少**15**年。俄罗斯空间部队的合作科学信息中心作为**GLONASS**系统状态信息的用户接口，正式向用户公布**GLONASS**系统咨询通告。**1995**年**3**月**7**日俄罗斯联邦政府签署了一项“有关**GLONASS**面向民用的行动指导”的法令，确认了由民间用户早期启用**GLONASS**系统的可能性。俄罗斯联邦政府对**GLONASS**系统的使用政策，使得美国的**GPS**定位仪的生产商对美国政府实施的**SA**政策大为不满，考虑到美国的商业利益美国政府最后不得不于**2000**年**5**月**2**日取消**SA**政策。



双星导航定位系统（北斗一号）

- 1982年7月，美国L.A.Lvarez和C.Trophy及F.Rose三位科学家提出主动式卫星导航通信系统,并于1982年12月完成了总体设计，定名为**GEOSTAR**。该系统是一个局域实时导航定位系统，据1991年9月的报导，由于**GEOSTAR**系统缺乏竞争能力，拟投资的用户日渐减少，最后不得不中断该系统的建设。而我国类似**GEOSTAR**系统的**双星导航定位系统（北斗一号）**，已于**2000**年底发射了两颗同步静止定位卫星，并完成了大量的测试工作。该系统的第三颗同步静止定位卫星，在**2003**年**5月25**日发射，于**6月3日5**时顺利定点，系统大功告成。

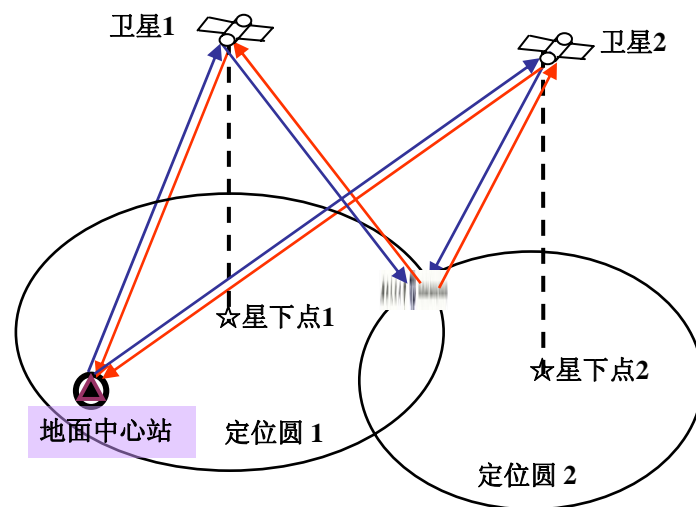


图1-6 双星导航定位系统的定位原理

双星导航定位系统（北斗一号）

- 1. 双星导航定位系统的组成
- 1) 卫星星座：由3颗同步静止卫星组成（其中1颗在轨备用）。轨道倾角 $i=0^\circ$ ；公转周期 $T=24\text{h}$ 恒星时；轨道高度 $H=36000\text{km}$ 。
- 2) 地面系统：一个中心站：负责系统测控、定位信号的发射与接收、用户坐标的解算与发布、双向授时等。
- 2. 双星导航定位系统的技术特点
- 1) 服务区域： $70^\circ \sim 145^\circ \text{ E}$ ； $5^\circ \sim 55^\circ \text{ N}$
- 2) 用户设备：定位收发机的瞬间发射功率较大。
- 3) 定位精度：平面精度 $\pm 20\text{m}$ ；垂直精度 $\pm 10\text{m}$

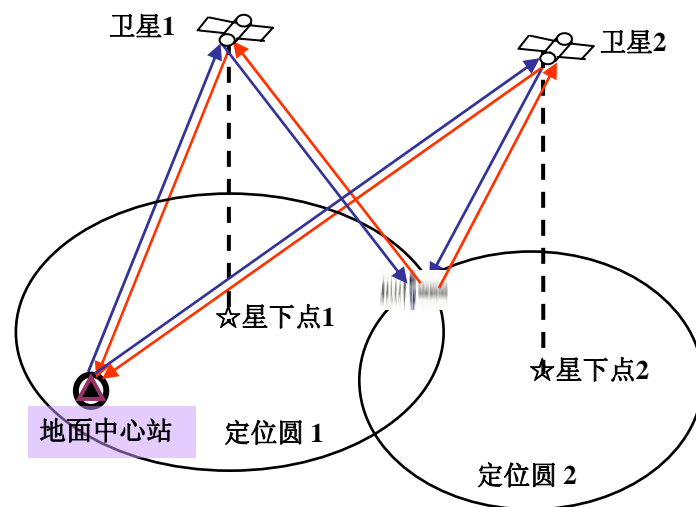


图1-6 双星导航定位系统的定位原理

双星导航定位系统（北斗一号）

- 双星导航定位系统的定位原理
- 双星导航定位系统的定位原理如图1-6所示：地面中心站通过2颗同步静止定位卫星传送测距问询信号，如果用户需要定位则马上回复应答信号。地面中心站可根据用户的应答信号的时差计算出卫地距离，这样以两颗定位卫星为中心以两个卫地距离为半径可作出两个定位球。而两个定位球又和地面交出两个定位圆，用户必定位于两个定位圆相交的两个点上（这两个交点一定是对称轴南北对称的）。地面中心站求出用户坐标后，再根据坐标在地面数字高程模型中读出用户高程，进而让卫星转告用户。
- 双星导航定位系统的最大优点是系统简单投资少，而最大缺点是他只能实施局域定位，接收发射机功率大且笨重还会暴露用户目标，在战时这是兵家最忌讳的事情。

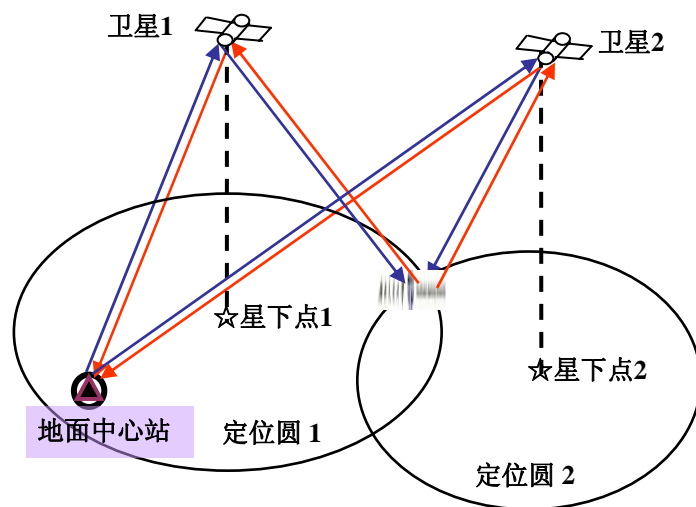
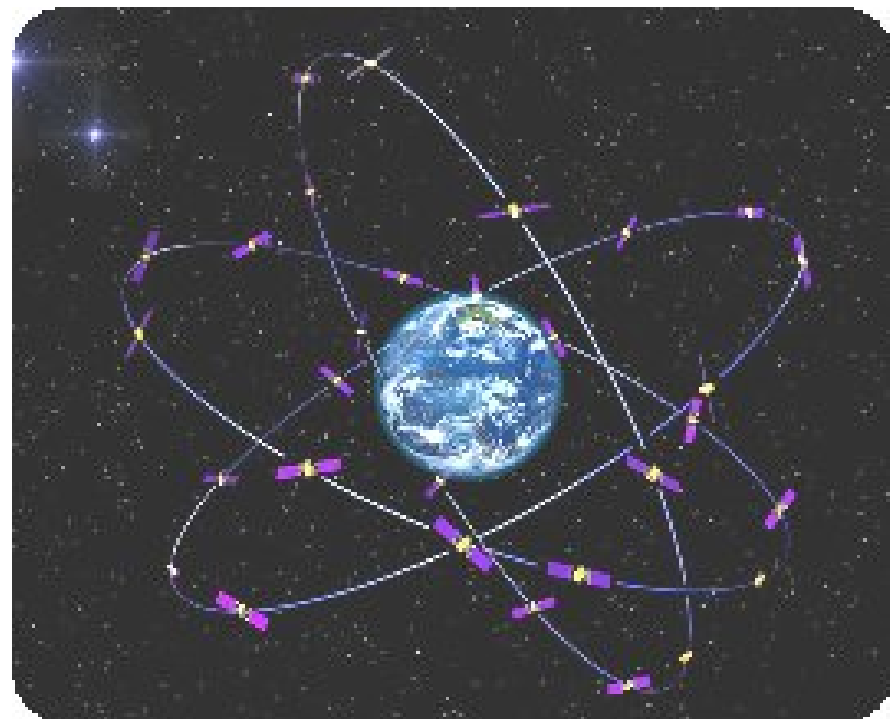


图1-6 双星导航定位系统的定位原理

伽利略系统（GAILILEO）

从1994年欧盟开始对伽利略（GAILILEO）系统方案实施论证以来，2000年欧盟已向世界无线电委员会申请并获 准 建 立 伽 利 略（GAILILEO）系统的L频段的频率资源。2002年3月欧盟15国交通部长一致同意伽利略（GAILILEO）系统的建设。该系统由欧盟各政府和私营企业共同投资（36亿欧元），是将来精度最高的全开放的新一代卫星定位系统。



伽利略系统（GAILILEO)-系统组成

- 1) 卫星星座：由3个独立的圆形轨道，30颗GNSS卫星组成（27颗工作卫星，3颗备用卫星）。卫星的轨道倾角 $i = 56^\circ$ ；卫星的公转周期 $T=14\text{h}23\text{m}14\text{S}$ 恒星时；轨道高度 $H=23616\text{km}$ ，如图1-7。
- 2) 地面系统：在欧洲建立2个控制中心；在全球构建监控网。
- 3) 定位精度：导航定位精度比目前任何系统都高。
- 2. 计划实施
- 1994年开始进入方案论证阶段；
- 2003年开始发射两颗试验卫星进入试验阶段；
- 2008年整个伽利略（GNSS）系统建成并投入使用；



伽利略系统 (GALILEO)--服务方式

GALILEO系统按不同用户层次分为免费服务和有偿服务两种级别。免费服务包括：提供 L_1 频率基本公共服务，与现有的**GPS**民用基本公共服务信号相似，预计定位精度为**10m**。有偿服务包括：提供附加的 L_2 或 L_5 信号，可为民航等用户提供高可靠性、完好性和高精度的信号服务。系统定义了三种类型的业务：

- ① 开放接入业务 (**OAS**)：向所有民用用户开放的免费业务。
- ② 一类控制接入业务 (**CAS 1**)：为商业应用提供的并实施控制接入的有偿服务。
- ③ 二类控制接入业务 (**CAS 2**)：为安全和军事应用提供的并实施控制接入的有偿服务。
- 所有这三类服务的精度都优于**10m**。**CAS 2**可实现水平**4m**、垂直**16m**的定位精度。



Assignment

1. Please read provided materials.
2. Give a brief description (constellation, frequency, time, accuracy, service, application, etc.) for the four global positioning systems: **GPS (USA), Galileo (Europe), Beidou (China), and GLONASS (Russia)**

