

全球导航卫星系统

Global Navigation Satellite System

教师： 曾 庆 化

email: zengqh@nuaa.edu.cn



南航自动化学院 导航研究中心



5、GNSS功能实现原理

- 导航定位和授时系统应该说是**基础的基础**，它对整体社会的支撑几乎是全方位的，GNSS**主要**实现如下**几个功能**：
 - **通信功能**：GNSS系统间进行数据的上传或下发。对于北斗等系统可以提供用户和系统之间的通信功能。由于通信功能是GNSS其它应用功能的基础，在第三章已经明确阐述，本章节不再重复说明。
 - **授时功能**：进行GNSS全球的时间同步，并且为其它用户提供授时和时间同步服务；
 - **定位功能**：为用户提供静态或者动态的定位功能；
 - **测速功能**：采用获取的观测量进行用户速度的测量和计算；
 - **定向和测姿功能**：采用观测量实现接收机载体方位和姿态的高精度测量。



5.1 GPS授时功能原理

5.1.1 单站测时法

单站授时法分为**单向法授时**和**双向法授时**两种。

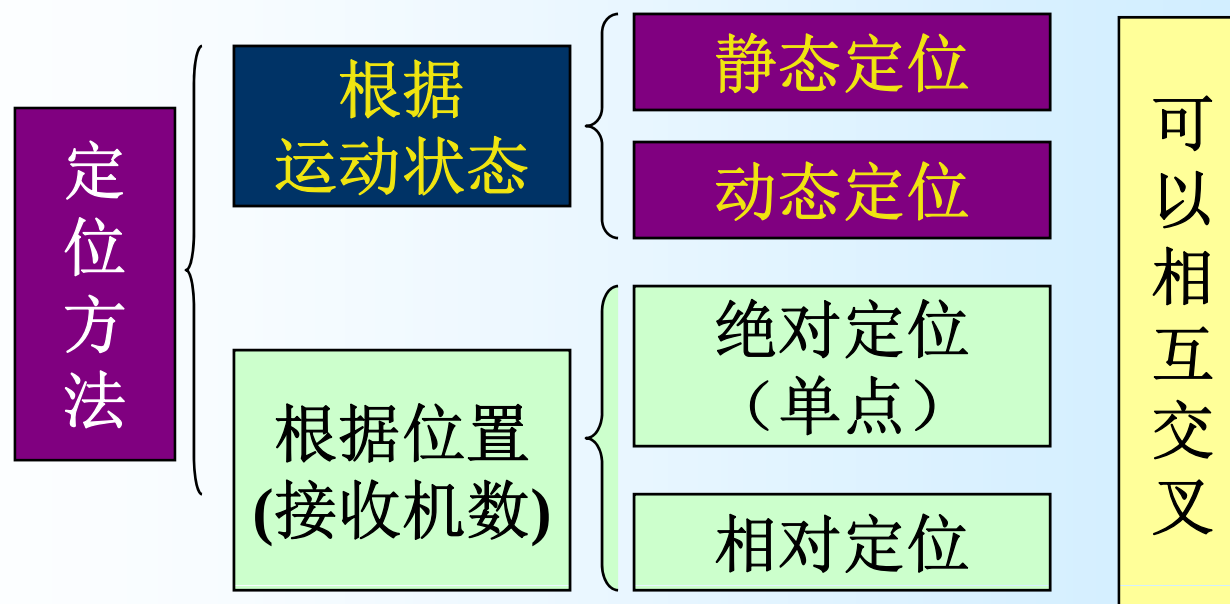
其中，**单向法授时**通常具有两种形式：

- 一种是地面段主控站发播基准时间信息至导航卫星，卫星向覆盖区转发，用户接收到基准信息后即可完成本地时定时，**北斗一代单向授时采用该方法**，其精度为**100ns**。
- 另一种是携带原子频标的导航卫星向覆盖区域内发播导航电文，导航电文包括基准时间信息、卫星星历和电文发播时刻，用户接收导航电文后，解析基准时间信息，计算并修正时延，即可完成本地时定时。一般所说的单站测时法，就是采用**GNSS接收机**在在特定观测站上进行测时。



5.2 GNSS定位基本概念和原理

GNSS定位方法的分类



5.2 GNSS定位基本概念和原理

- 静态定位和动态定位

静态定位

待测点在协议地球系中的位置可以认为是固定不变的定位。

动态定位

在一次观测期间有可以觉察的运动或者显著的运动。

根本区别：

在于建立数学模型中待测点的位置是否可以看成常数。



5.2 GNSS定位基本概念和原理

● 单点定位和相对（多点）定位

单点定位（绝对定位）

快速、简单方便

采用单个GPS接收机独立确定待测点在协议坐标系中的绝对位置的方法，称为单点定位或绝对定位。

优点

只需要一台接收机，可以独立定位，操作方便。

缺点

受到星历误差和大气延迟误差影响，定位精度一般。
（进行一般精度定位或者用组合导航提高精度）



5.2 GNSS定位基本概念和原理

- 单点定位和相对（多点）定位

多点定位（相对定位）

采用若干台GPS接收机同步跟踪同一组GPS卫星发射信号，从而确定GPS接收机之间的相对位置的定位方法。

相对定位的结果有时是各同步跟踪站之间的基线向量（三维坐标差）——所以，至少需要精确给出观测站网中的某一个观测站的坐标。

优点：能消除许多相似的误差，获得精度较高的坐标解。

缺点：需要多台接收机同步观测，一台故障，影响全局。

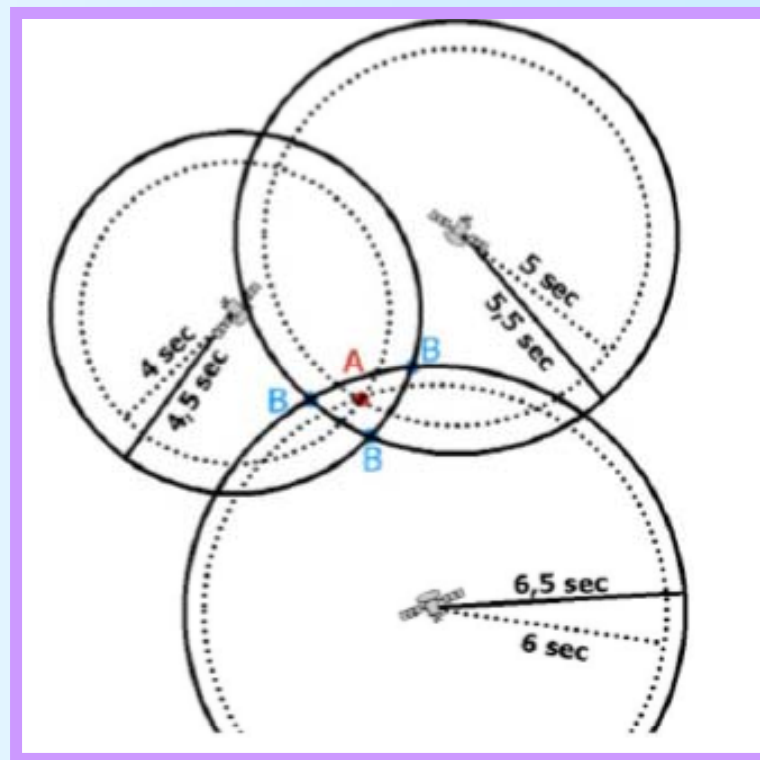


5.2 GNSS定位基本概念和原理

● GNSS基本定位原理

地面无线电定位原理
(圆弧定位系统)

- 1、站位置精确，已知发射电波；
- 2、无线电波弧线相交，得交点；
- 3、多站点最小二乘，求解位置。

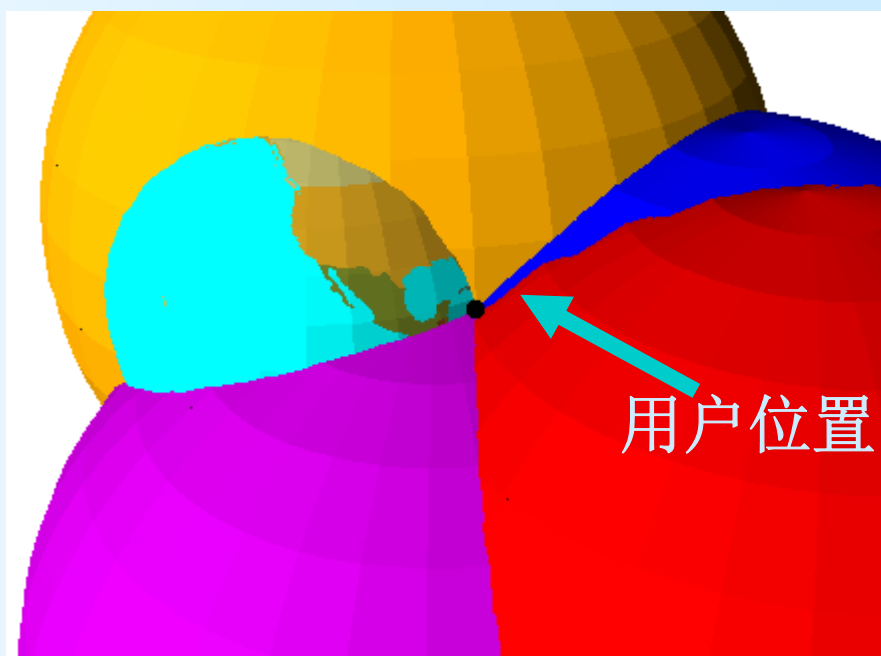
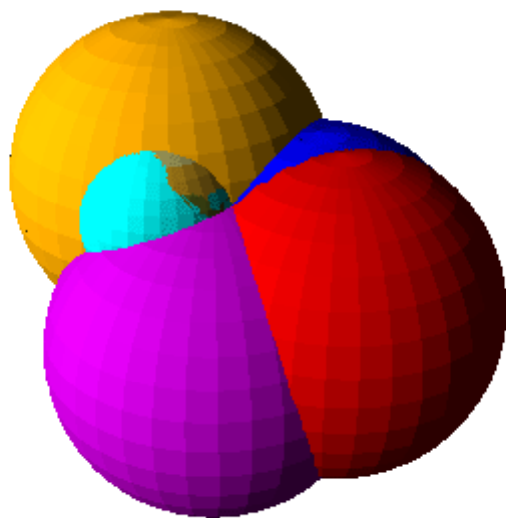


5.2 GNSS定位基本概念和原理

- GNSS基本定位原理

四个卫星，四个电波球，交于一点。

对于陆基载体来说，这个点交于地面（地球表面）。



5.2 GNSS定位基本概念和原理

● GNSS基本定位原理

用户接收到4颗卫星信号后，通过测定卫星距离，求解四个未知数，可以求出用户的三维位置和接收机钟差。

$$\begin{cases} \sqrt{(x^1 - x)^2 + (y^1 - y)^2 + (z^1 - z)^2} + c(\delta t^1 - \delta t) = \rho^1 \\ \sqrt{(x^2 - x)^2 + (y^2 - y)^2 + (z^2 - z)^2} + c(\delta t^2 - \delta t) = \rho^2 \\ \sqrt{(x^3 - x)^2 + (y^3 - y)^2 + (z^3 - z)^2} + c(\delta t^3 - \delta t) = \rho^3 \\ \sqrt{(x^4 - x)^2 + (y^4 - y)^2 + (z^4 - z)^2} + c(\delta t^4 - \delta t) = \rho^4 \end{cases}$$

原理上讲，四个独立方程，可以求解四个未知数。



5.2 GNSS定位基本概念和原理

5.2.2 GNSS测相伪距定位（多星单历元）

- 若整周模糊度是锁定前已经求得的，并且在量测的过程中，没有周跳现象发生，则可以利用未知数和解的个数进行直接求解。
- 但是若整周模糊度是未知数，通过方程和未知数关系的理论，可知无法实时求解。
- 需要采用其他的办法，比如：观测多历元，采用平差等技术手段实现。



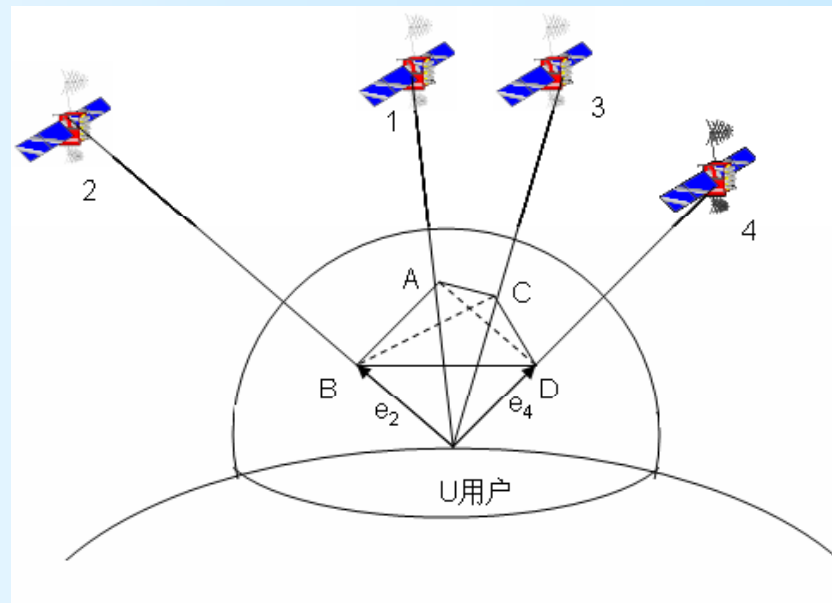
5.2 GNSS定位基本概念和原理

5.2.3 观测卫星的几何分布及其对单点定位精度的影响

定位精度取决于两类因素：

- 伪距观测量的精度
- 所观测的GPS卫星的空间几何分布

卫星的几何构架对位置误差的影响叫做**GDOP**（**Geometric Dilution of precision**），它一般表示为位置误差与测距误差的比率。



5.2 GNSS定位基本概念和原理

5.2.3 观测卫星的几何分布及其对单点定位精度的影响

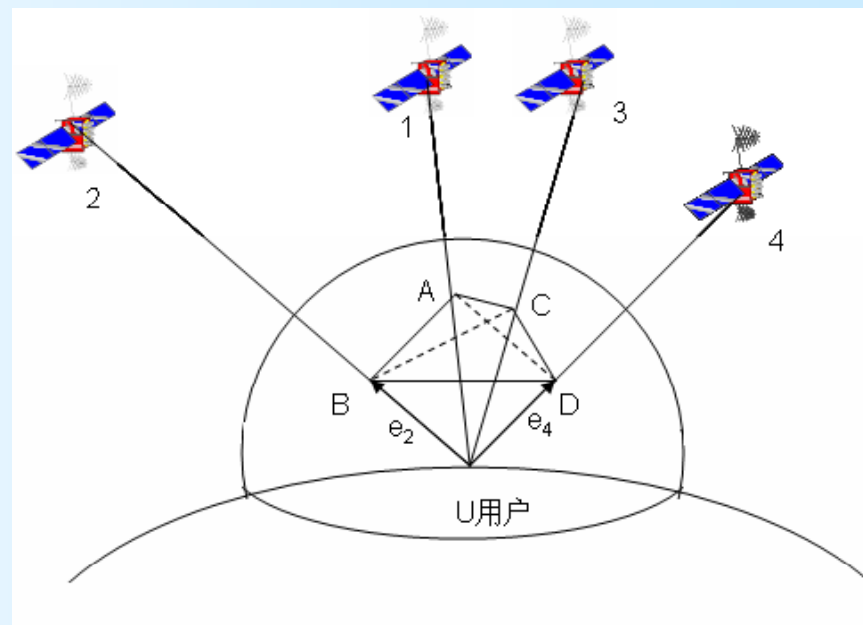
单位球上A、B、C、D四点
组成的体积为:V

有:

$$|GDOP| = \frac{\sqrt{\text{Trace} \left\{ a_i^*(t) \cdot [a_i^T(t)]^* \right\}}}{6V}$$

由此得**GDOP**与**V**成反比:

$$GDOP \propto \frac{1}{V}$$



卫星的几何分布示意图



5.2 GNSS定位基本概念和原理

5.2.3 观测卫星的几何分布及其对单点定位精度的影响

令: $(G_u^T G_u)^{-1} = G = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} & g_{14} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} & g_{24} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} & g_{34} \\ g_{41} & g_{42} & g_{43} & g_{44} \end{bmatrix}$

则: 几何误差系数 $GDOP = \left[\text{Trace}(G_u^T G_u)^{-1} \right]^{\frac{1}{2}} = (g_{11} + g_{22} + g_{33} + g_{44})^{\frac{1}{2}}$

位置几何误差系数 $PDOP = (g_{11} + g_{22} + g_{33})^{\frac{1}{2}}$

水平位置几何误差系数 $HDOP = (g_{11} + g_{22})^{\frac{1}{2}}$

垂直位置几何误差系数 $VDOP = g_{33}^{\frac{1}{2}}$

时间几何误差系数 $TDOP = g_{44}^{\frac{1}{2}}$

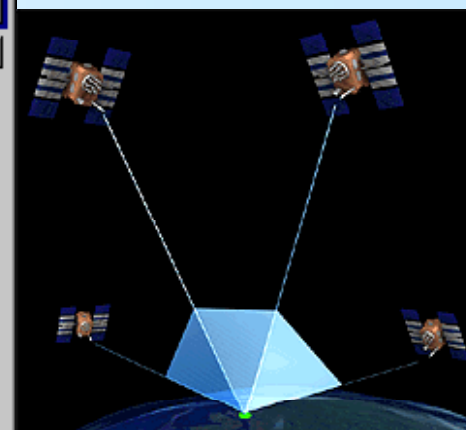
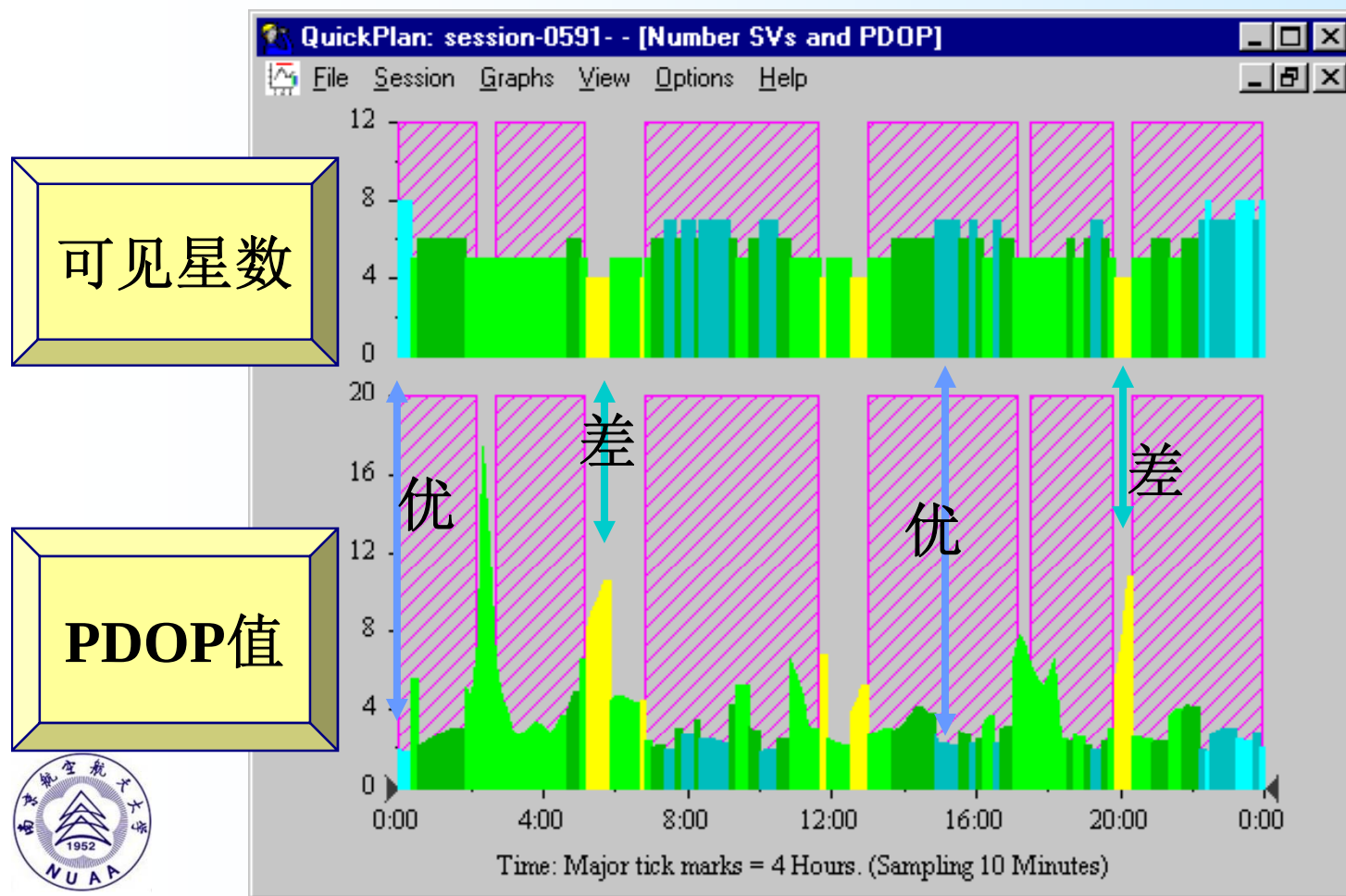
用户的空间位置误差
= PDOP × 测距误差



5.2 GNSS定位基本概念和原理

5.2.3 观测卫星的几何分布及其对单点定位精度的影响

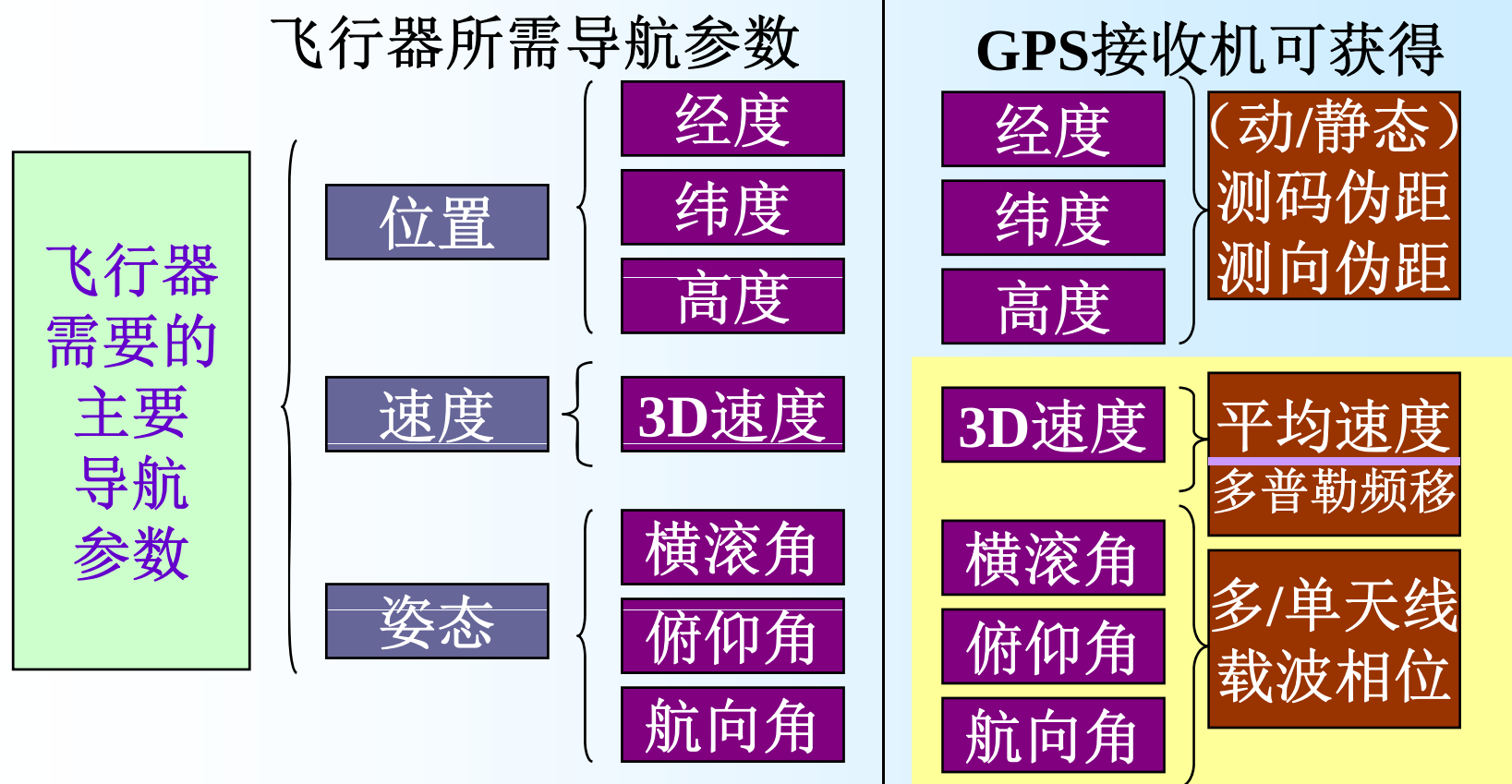
- 卫星数和PDOP的关系图（正向增长）



可见星越多，
PDOP越小。
定位精度越好

5.3 GNSS载体速度测量原理

● 相关背景



5.3 GNSS载体速度测量原理

● 5.3.2、多普勒频移法

由GPS导航电文知道：卫星的运动速度 $(\dot{x}^j, \dot{y}^j, \dot{z}^j)^T$ 为已知量

多普勒频移法得径向伪距变化率： $\dot{\rho}_i^j = \dot{R}_i^j + c\delta\dot{t}_i$

通过方程：

$$\dot{\rho}_i^j = (l_i^j, m_i^j, n_i^j) \left\{ \begin{bmatrix} \dot{x}^j \\ \dot{y}^j \\ \dot{z}^j \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{z}_i \end{bmatrix} \right\} + c\delta\dot{t}_i$$

求得载体的运动速度 $(\dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{z}_i)^T$ 。

用多普勒频移法测量载体速度时，为了保证测速精度，对于卫星分布图形（PDOP）的要求，与单点绝对定位时候的要求相同。



5.4 GNSS信息求解载体姿态算法

- 利用GPS载波相位信息定位精度可优于毫米级，将其观测测量进行相对位置求解为确定载体姿态的可行性提供了条件。
- GPS实时确定载体姿态是在载体上配置的天线，利用其载波相位观测值与载体之间的角位置关系，求解载体的姿态角度。
- 根据所配置的接收机天线的多少，可以将GNSS测姿方法分为多天线测姿方法和单天线测姿方法。



5.4 GNSS信息求解载体姿态算法

5.4.1 单天线测姿原理与算法

3、单天线定向测姿技术的相关结论

- 当单天线测姿系统应用于高速度载体比低速度载体好。当系统应用于慢速的载体上，比如：车辆时，最好能够用差分GNSS提供精度较高的定位和速度信息。
- 在单天线DGPS系统应用于车载姿态测量时，在车辆进行直线和小角度转弯时，单天线差分GPS测姿方法可以得到较精确的姿态信息，三维姿态角误差均能保持在 $0.2^{\circ} \sim 0.3^{\circ}$ ；
- 当进行大角度转弯开始和结束或者缓慢行驶时，系统输出的姿态误差较大，但三维姿态角误差均能保持在 1° 之内，能满足常规中低精度姿态测量系统的要求。



5.4 GNSS信息求解载体姿态算法

5.4.1 单天线测姿原理与算法

3、单天线定向测姿技术的相关结论

- 和多天线定位一样，由于**单天线定位信息来源于GNSS接收机**，因此在GNSS失锁时，测姿系统无有效信源，故而无法持续提供姿态信息。
- 基于单天线测姿的**优势**包括：
 1. 提供一种**低成本**的姿态测量系统，能为传统的姿态测量系统**提供备份**；
 2. 使用单天线（差分）GNSS测姿系统和SINS**组合系统**，可以提高航向状态的可观性，**提高测量精度**。

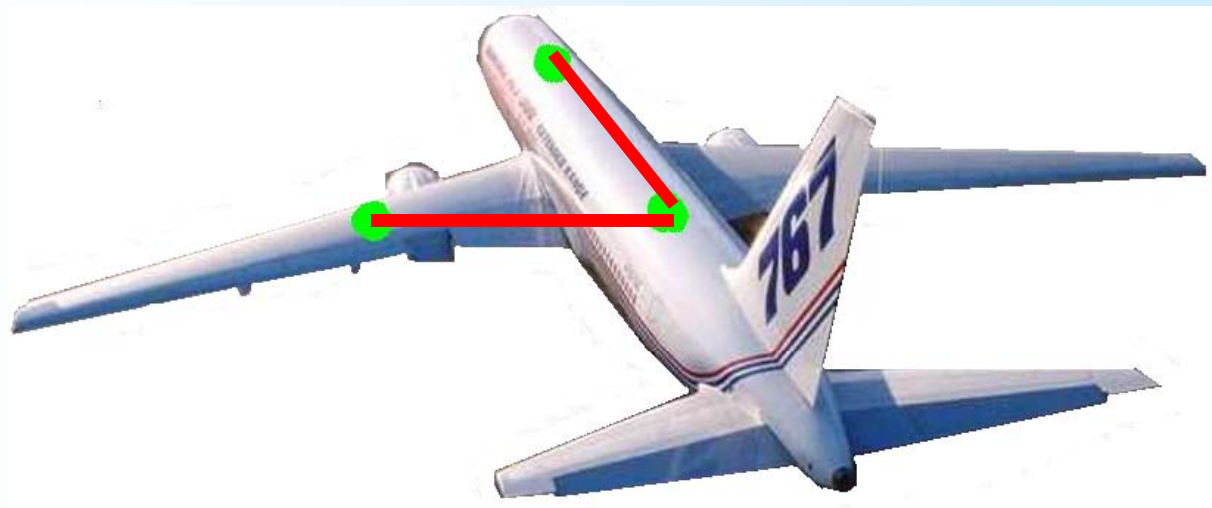


5.4 GNSS信息求解载体姿态算法

5.4.2 多天线测姿原理与算法

1、多天线姿态测量的基本思想

- 当该基线沿着载体**纵向放置**时，对应载体的姿态物理量是**航向角度**和**俯仰角度**；
- 当该基线沿着载体**横向放置**时，对应载体的姿态物理量是**航向角度**和**横滚角度**；



5.6基于北斗的单天线求姿态算法仿真分析

本实验将仿真两种北斗卫星导航星座：

- 1) 截止2013年4月的已发射16颗卫星的实时区域导航系统
- 2) 2020年计划完成的35颗卫星全球导航系统。

目前北斗卫星导航系统已经发射卫星16颗，其中14颗组网并提供服务，包括5颗地球静止轨道卫星，5颗倾斜地球同步卫星和4颗中地球轨道卫星。

具体仿真数据如下表所示：

表 5-2 两种仿真星座数据对比

	地球静止轨道卫星 (GEO)	倾斜地球同步卫星 (IGSO)	中地球轨道卫星 (MEO)
2013 年 3 月 14 颗卫星星座	5 颗	5 颗	4 颗
2020 年 35 颗卫星星座	5 颗	3 颗	27 颗

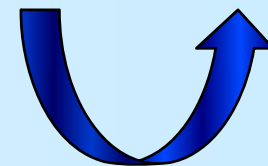


5.6基于北斗的单天线求姿态算法仿真分析

考虑到当前仿真飞机没有大动态或者大角度问题。

由于当前在轨运行的中轨道卫星（MEO）较少，若飞机处于盘旋等飞行状态时，将会导致星况不良等问题，造成解算失效等后果，因此，对于可靠地北斗单天线姿态测量系统还需要全星座的支持。

全星座或者多星座GNSS的支持有利于系统精度的进一步提高，以及可靠性的进一步提高。



本课程内容介绍——6章

第六章 GNSS差分增强技术

6.1 差分GPS定位原理

6.2 伪卫星增强技术

6.3 星基差分增强系统

6.4 GPS网络辅助—CORS系统（网络）

6.5 GNSS兼容互操作技术

6.6 GNSS完好性及组合导航技术

思考题



差分定位技术



差分定位中的基本数学模型——**单点**定位的数学模型。

差分定位**必须**使用多台接收机；
必须给出基准站的精确位置，
必须在基准站之间进行**GPS**同步观测。
利用误差的**相关性**来提高定位精度。

具有**相对**定位的某些特性。

差分定位是一种介于单点定位和相对（多点）定位之间的定位模式，兼有这两种定位模式的某些特点。



6.1 差分GPS定位原理

- 差分GPS的基本原理

- 利用**基准站**（设在坐标精确已知的点上）测定具有空间相关性的误差或其对测量定位结果的影响，供**流动站改正其观测值或定位结果**。

- 差分改正数的类型

- **距离改正数**：利用基准站坐标和卫星星历可计算出站星间的计算距离，计算距离减去观测距离即为距离改正数
- **位置（坐标改正数）改正数**：基准站上的接收机对GPS卫星进行观测，确定出测站的观测坐标，测站的已知坐标与观测坐标之差即为位置的改正数。
- 也有发送：**相位平滑伪距改正数**或者**相位改正数**。



6.1 差分GPS定位原理

6.1.2 载波相位差分定位

相对定位中，普遍采用三种观测量的差分形式：

单差、双差和三差。

相对定位中，相位差分不同仅取决于求差要素（站、星、历元），以及求差的次数，而和求差的顺序无关。

假设有两台接收机相对于两颗GPS卫星于两个历元进行同步观测，则可获得以下8个独立的载波相位观测量：

$$\varphi_1^j(t_1), \varphi_1^j(t_2), \varphi_1^k(t_1), \varphi_1^k(t_2), \varphi_2^j(t_1), \varphi_2^j(t_2), \varphi_2^k(t_1), \varphi_2^k(t_2)$$



6.1 差分GPS定位原理

6.1.2 载波相位差分定位

以下是三种形式的相位观测量的一次差——**单差**

$$\Delta\phi^j(t) = \phi_2^j(t) - \phi_1^j(t)$$

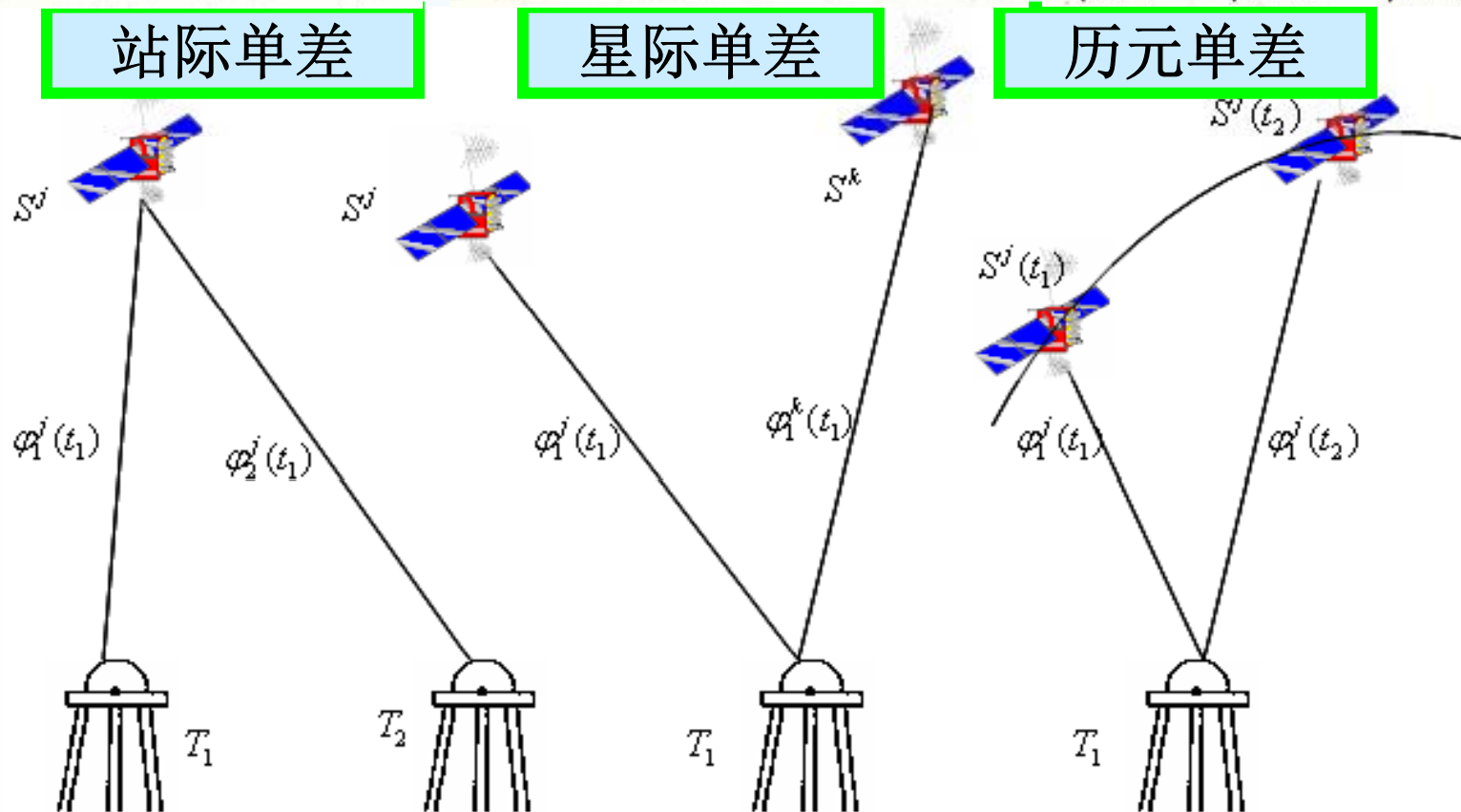
站际单差

$$\nabla\phi_i(t) = \phi_i^k(t) - \phi_i^j(t)$$

星际单差

$$\delta\phi_i^j(t) = \phi_i^j(t_2) - \phi_i^j(t_1)$$

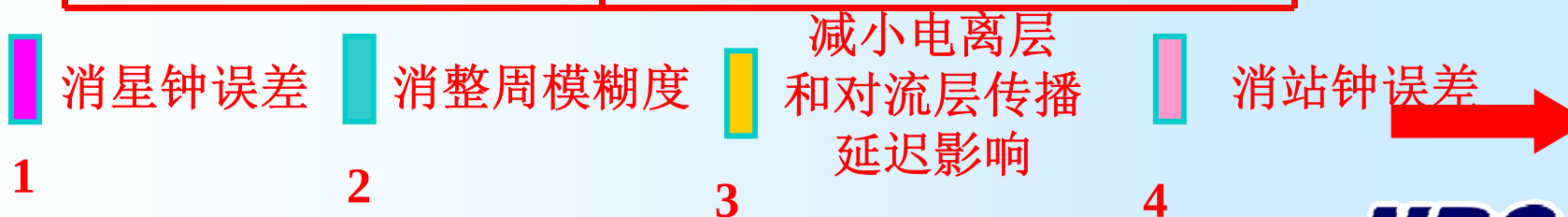
历元单差



6.1 差分GPS定位原理

6.1.2 载波相位差分定位—优点

	1	2	3	4		1	2	3	4
原观测方程					站际—星际双差★				
站际单差★					站际—历元际双差				
星际单差					星际—历元际双差				
历元际单差					站、星、历元三差				



6.1 差分GPS定位原理

6.1.3 差分与非差分方法的等价性说明

统一差分算法，与非差分和差分方法相比，优点主要是：

- 用等效和统一的方式完成非差分和差分GPS的数据处理。
- 数据处理方案可供选择，并且以组合方式进行应用；
- 可用相同的算法分别解出消去的参数；
- 权重矩阵仍保持为初始的对角阵；
- 采用初始的观测器，无需特殊的差分处理。

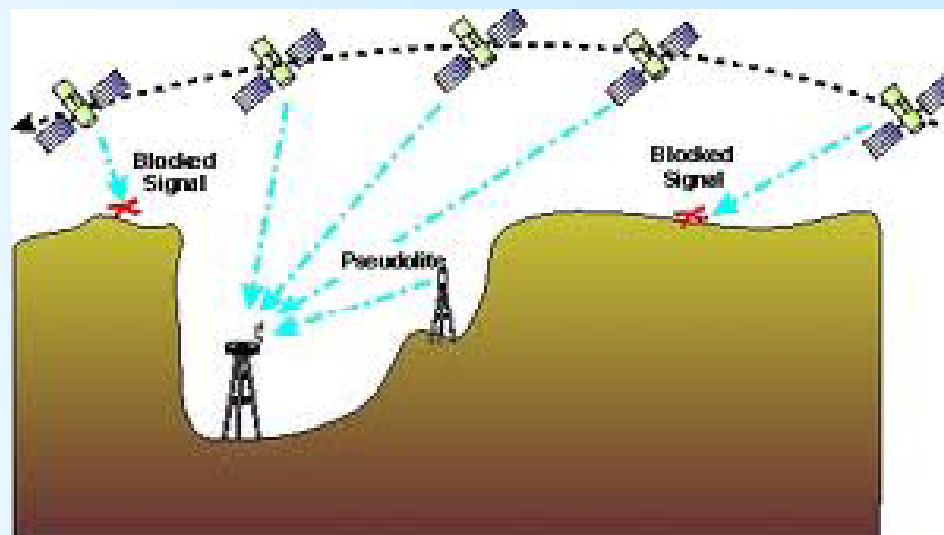


6.2 伪卫星增强技术

6.2.1 伪卫星技术背景及分类

GPS 与伪卫星组合定位优势:

- 拓展了定位区域与时段;
- 提高了 **GPS** 定位求解的速度和精度;
- 增强了系统的可靠性和可用性;



GPS与伪卫星差分图 



6.2 伪卫星增强技术

6.2.3 伪卫星增强技术相关技术问题

一般来说，解决远近效应问题应当从**软件**和**硬件**这两方面入手：

- 硬件方面包括：**伪卫星发射器硬件结构、编码、频率、信号发射方式和发射天线等**；
- 软件方面包括：**伪卫星与接收机的位置布设、用户接收机端的数据处理软件等方面**。

具体方法如下：

- a. 采用**码分多址**方法；
- b. 采用**频分多址**方法（简称**FDMA**）；
- c. 采用**时分多址**方法（简称**TDMA**）。



6.3 星基差分增强系统

为此，各国纷纷研制卫星广域增强系统，将GNSS、差分技术、伪卫星技术和通信卫星技术有机地整合起来。

- 广域增强系统的主要特点

- 在一个广大的区域内建立起若干个GNSS跟踪站组成差分GNSS网，通过数据通信连接；
- 实现区域实时精密定轨并提供精密预报星历，克服SA中广播星历人为精度降低；
- 实现较为精确确定区域电离层模型以消弱电离层的影响；



6.3 星基差分增强系统

2. 卫星广域增强系统的运行机制

广域增强系统运行机制如下：

- 局部参考站位于已知位置，获取其所能观测到的每颗卫星的伪距和计算卫星的电离层时滞；
- 参考站通过通讯链将伪距和电离层时滞传送到主控站；
- 主控站估算星历误差、包括SA误差和卫星时钟误差在内的等效距离误差及电离层时滞参数，并进行完好性计算；
- 主控站将误差修正向量发送给用户，并向用户发布完好性信息；
- 用户利用误差修正量修正测得的伪距，然后再进行定位计算，以提高导航定位的精度。



6.4 GPS网络辅助—CORS网

6.4.2 CORS 的构成和定位中的误差源

1. **基准站**：基准站负责对**GPS原始数据的采集**，数据采集后发送到管理中心。
2. **管理中心**：数据在管理中心经过数据处理后，形成数据中心，管理中心可以**向用户发布原始的GPS数据以及各种类型的RTK改正数据**。
3. **用户接收机**：**接收和处理管理中心发来的数据包**，并提供定位信息。
4. **CORS定位误差**主要是由**基准站观测误差、流动站观测误差和差分误差信息的数学内插模型**等引起的。



6.4 GPS网络辅助—CORS网

6.4.3 世界主要CORS系统应用领域和特点

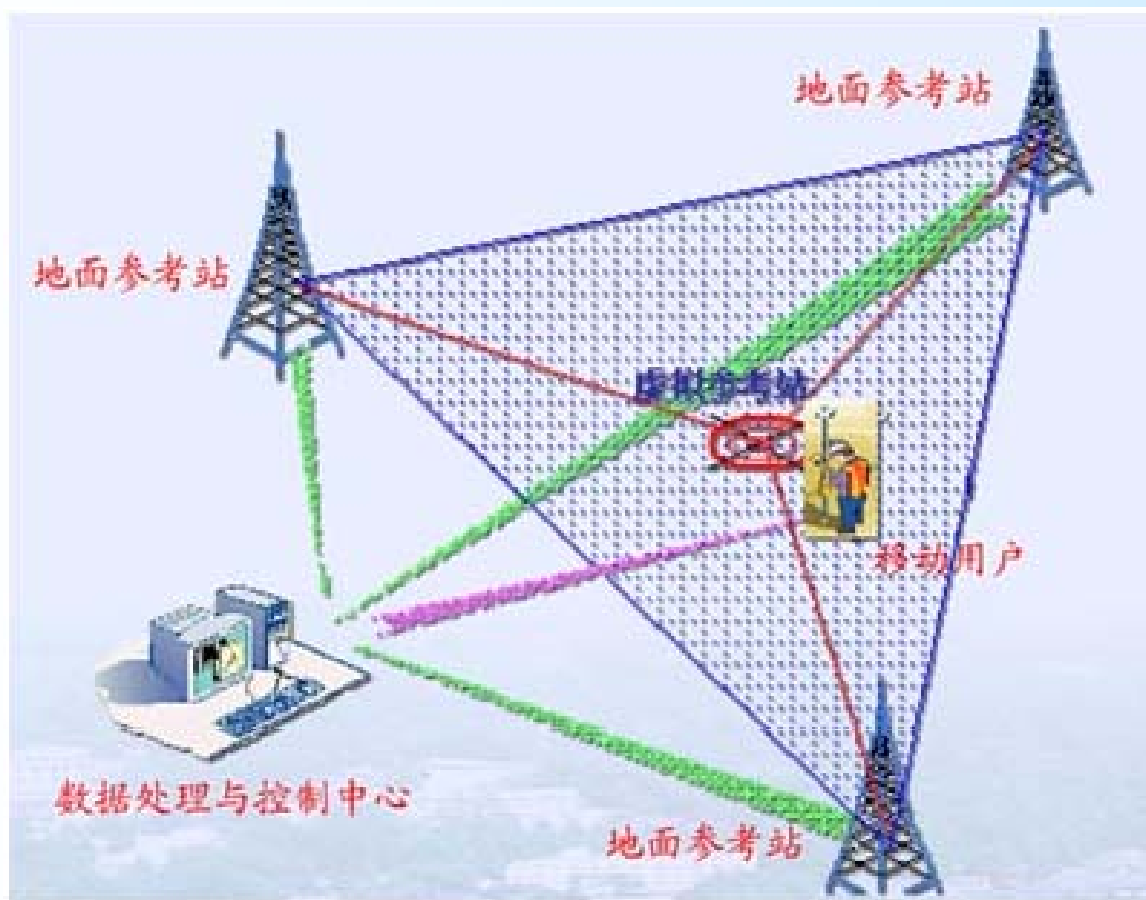
虚拟参考站VRS技术

1. 在一定区域内架设一定数量的**基准站**，精确测定这些基准站的位置及变化率，基准站连续接收卫星信号，然后将信息传送至信息处理中心。
2. 基准站**接收流动站**发送的接收机**概略位置信息**，数据处理中心会根据移动站的位置，选择与之较近（通常**5米范围内**）或定位精度较好的基准站信息，“**虚拟**”出一个**参考站**，保证了**虚拟参考站与流动站误差**的相关性。
3. 根据**各基准站上误差信息**通过一定的数学模型**内插出该虚拟站的误差**，将虚拟出的站点改正数据播发给流动站。



6.4 GPS网络辅助—CORS网

6.4.3 世界主要CORS系统应用领域和特点 虚拟参考站VRS技术



6.5 GNSS兼容互操作技术

多卫星导航系统的兼容与互用的概念是：

- **兼容性**是指当用户单独或联合使用基于空间的定位、导航和授时（PNT）服务时，各卫星导航系统之间没有相互干扰。
- **互用性**是指当民用用户联合使用基于空间的定位、导航和授时（PNT）服务时，在用户层次上可以获得比单独使用一个系统的服务或信号更好的性能。

可见，实现多卫星导航系统间的兼容并不一定要实现多卫星导航系统之间的互用，而实现系统间互用性却首先必须实现多系统间的兼容。



6.5 GNSS兼容互操作技术

GNSS兼容互操作的优势

实现GNSS间的兼容与互用后，可以构成三方面的优势：

- **GNSS用户**：卫星星座对地覆盖好、定位精度高、可靠性高、对单一系统依赖降低、自主完好性高、载波相位整周模糊度求解能力提高、首次定位时间缩短；
- **GNSS服务提供商**：地面监测站数量减少、有助于建设无缝的PNT服务环境、伪随机码数量增加、更易实现信号质量监测、增强系统的建设成本降低；
- **用户接收机制造商**：导航卫星信号和坐标系定义都将趋于统一。用户接收机信息处理算法也将趋于统一，因此接收机的设计和制造将大大简化，用户接收机成本、体积和功耗降低。



6.6 GNSS完好性及组合导航技术

- **完好性**是评价全球卫星导航系统（GNSS）性能的重要指标之一。
- **完好性**是指：当GNSS出现故障导致某项运行参数偏差过大，或者由于系统多项因素的综合影响，而使系统提供的定位结果超过规定限值时，**GNSS及时发现并通告用户的能力**。
- **完好性监测技术**主要是**完成卫星导航系统的故障检测功能，并对检测到的故障及时报警，从而确保其在规定范围内具有较好的工作能力**。



6.6 GNSS完好性及组合导航技术

- 由于卫星故障引起的定位误差无法通过差分处理，只能通过及早发现和通知用户剔除故障星来消除，因此GNSS完好性监测是保证卫星系统能够正常工作的重要手段。
- 卫星导航系统完好性的研究主要包括卫星自主完好性监测技术（SAIM）、地面增强完好性监测技术（GAIM）、接收机自主完好性监测技术（RAIM）三大类。
- 前二者属于系统顶层设计范畴，后者属于用户终端性能要求。下面主要介绍接收机自主完好性监测技术（RAIM）和地面增强完好性监测技术（GAIM）。



本课程内容介绍——7章

第七章 GNSS的各类应用探讨

7.1 卫星授时中在电力系统中的应用

7.2 GPS在大地测量方面的应用

7.3 GNSS在车辆交通系统中的应用

7.4 GNSS在航海中的应用

7.5 GNSS在航空航天方面的应用

7.6 GNSS在其他领域的应用

7.7 本章小结

思考题

参考文献



第七章 GNSS的各类应用探讨

卫星导航在**军事、智能交通**、工业、精细农业、林业、渔业、土建工程、矿山、地球物理勘探、资源调查、陆地与海洋测绘、地理信息产业、海上石油作业、地震预测、气象预报、环保研究、电信、旅游、娱乐、管理、社会治安、医疗急救、**搜索救援**，以及**时间传递、电离层测量**等领域已得到广泛应用，并显示出巨大的应用潜力。

