

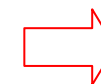


GPS静态测量

— 项目实施及质量控制

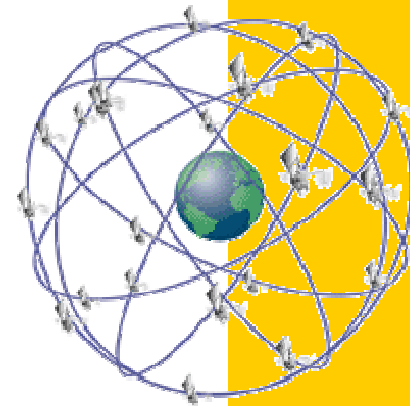


1. 绪论



GPS

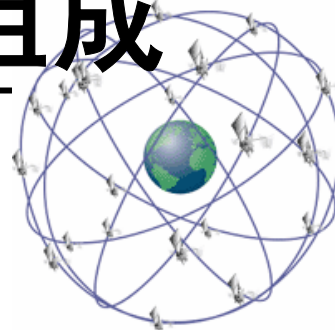
- **NAVSTAR GPS – NAVigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System**
- 美国建立的一个卫星导航定位系统
- 提供全天候、不间断的高精度定位、测速和定时服务



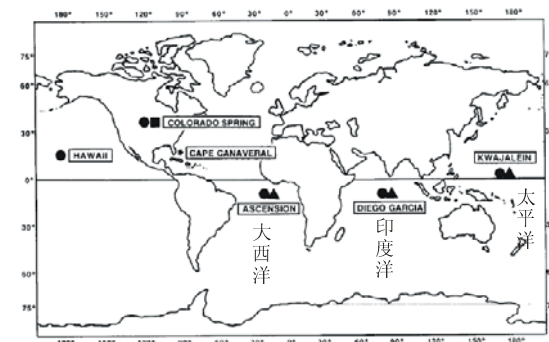
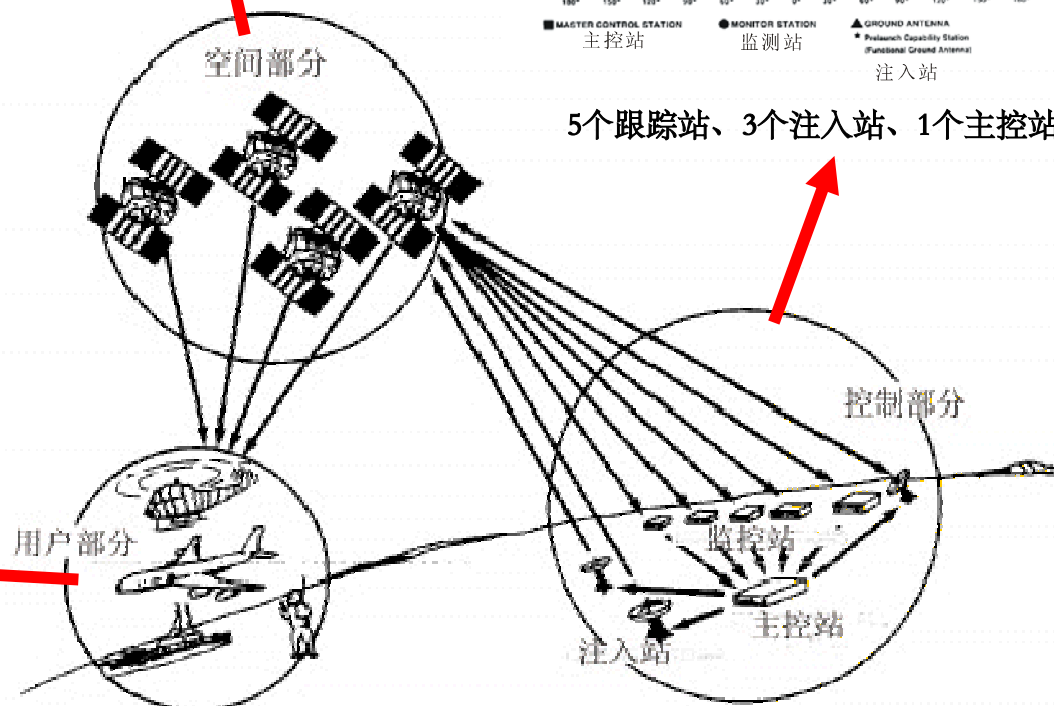
GPS的系统组成



接收设备



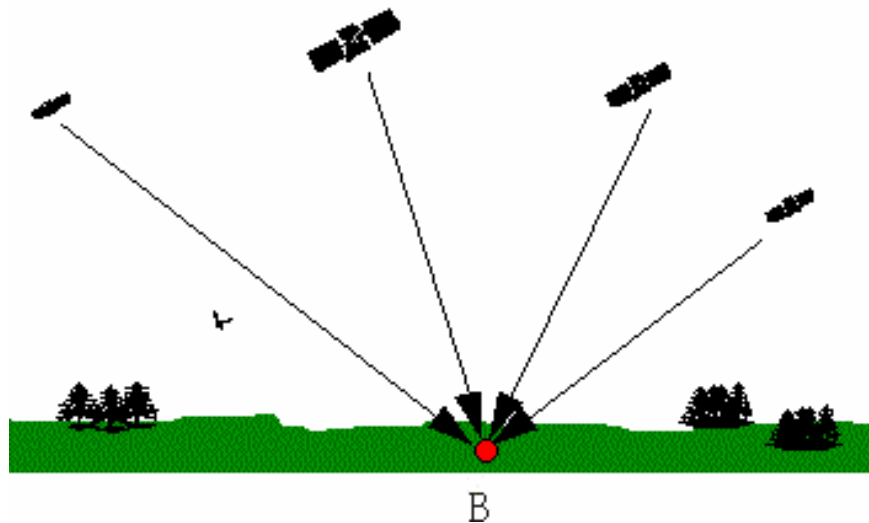
24颗GPS卫星所组成的星座



5个跟踪站、3个注入站、1个主控站

测量定位原理

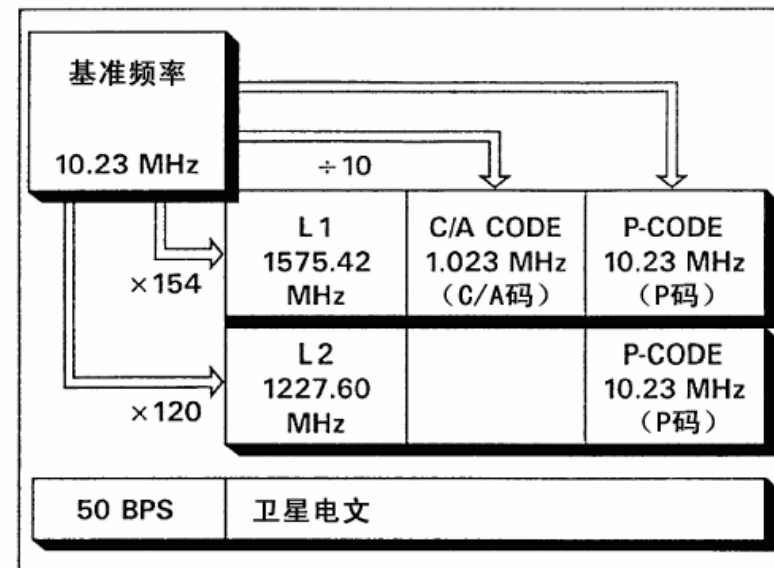
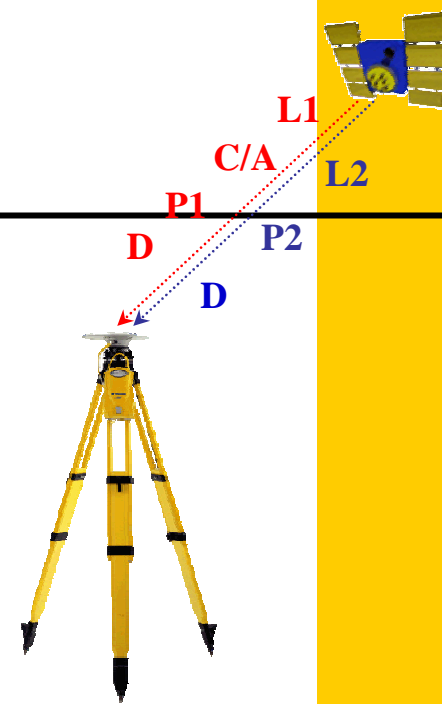
- **GPS**测量定位的基本原理 – 距离交会



单点定位

GPS卫星的信号

- 载波
 - L1、L2
 - 用于搭载信号
- 测距码
 - C/A码、P码
 - 用于测距
- 导航电文
 - 用于提供卫星轨道、钟及其他相关信息

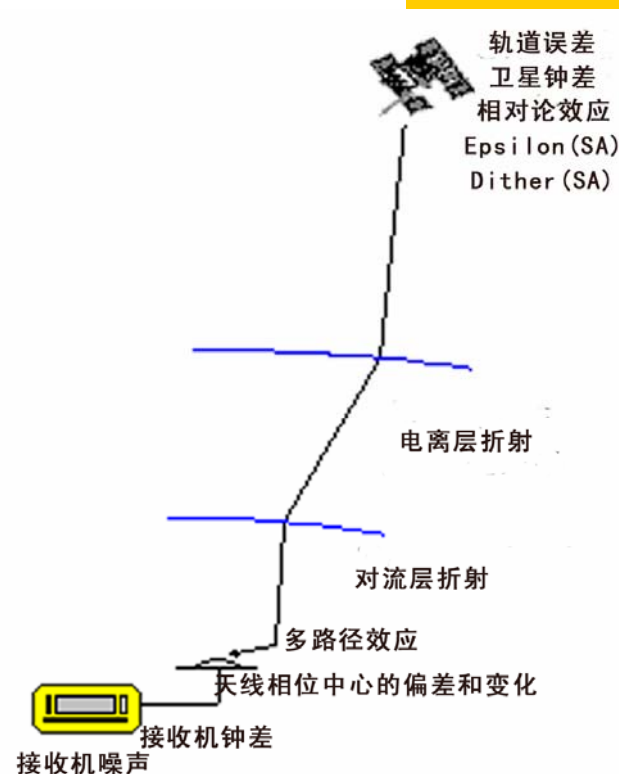


GPS的距离观测值

- 伪距
 - 利用测距码测定
 - 无模糊度问题
 - 精度分米级
- 载波相位
 - 利用载波测定
 - 有模糊度问题
 - 精度毫米级

GPS定位中的误差源

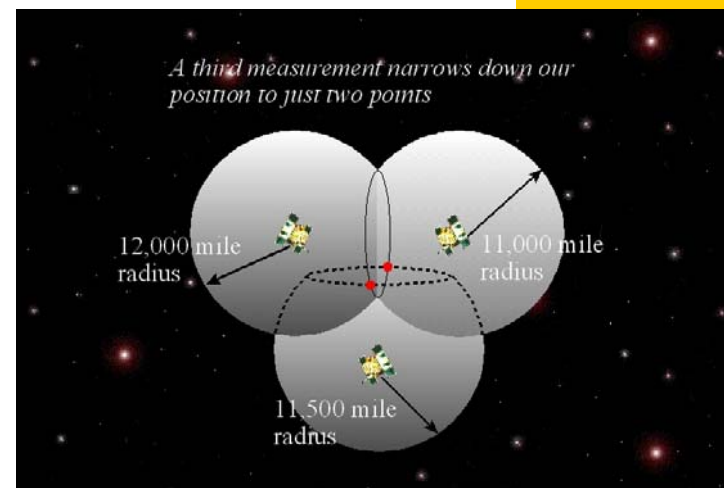
- 与卫星有关的误差源
 - 卫星轨道误差、卫星钟的误差、相对论效应、SA（已于2000年5月2日终止）等。
- 与传播途径有关的误差的源
 - 电离层折射、对流层折射、多路径效应、电磁波干扰等。
- 与接收设备有关的误差源
 - 接收机天线相位中心偏差和变化、接收机钟的误差等。



GPS定位中的误差源

单点定位的缺陷

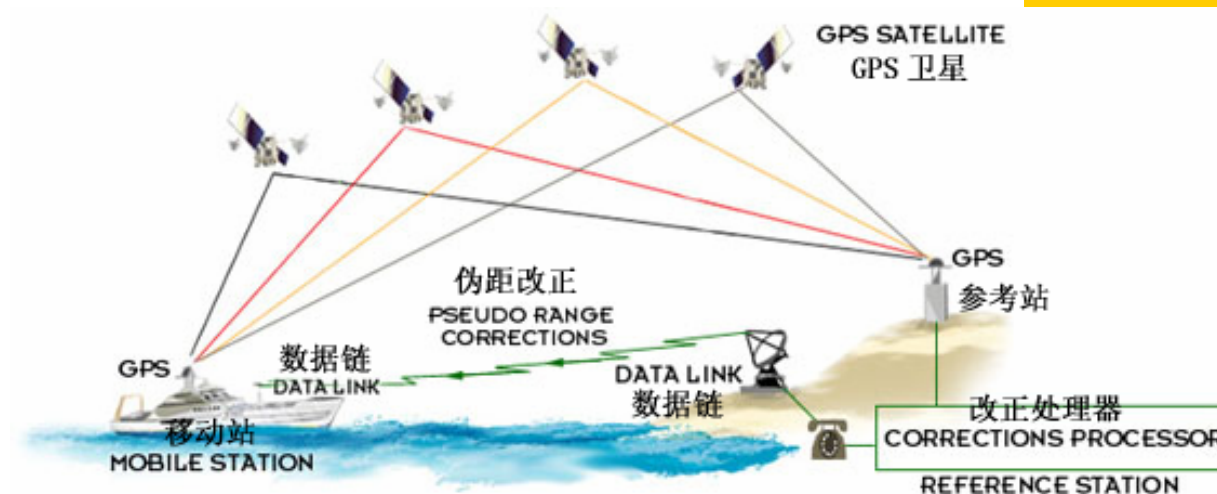
- 各种误差源对单点定位结果精度影响严重，即使经过标准模型进行改正后，定位精度也仅能达到**10m**左右



差分GPS（DGPS）

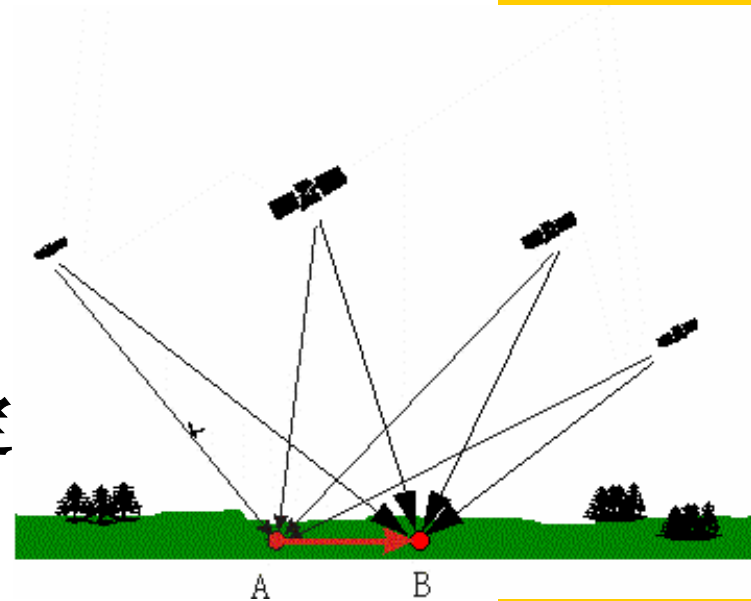
- DGPS的基本原理

- 利用参考站计算出误差或误差对定位结果的影响，供运动站修正自己的观测值或定位结果



相对定位

- 相对定位的基本原理
 - 利用进行同步观测数据，确定接收机间的相对位置（基线向量）
- 相对定位的特点
 - 通常采用载波相位观测值
 - 确定的是相对位置
 - 精度高，可达毫米级
 - 作业、数据处理复杂
- 测量中普遍采用的是相对定位模式

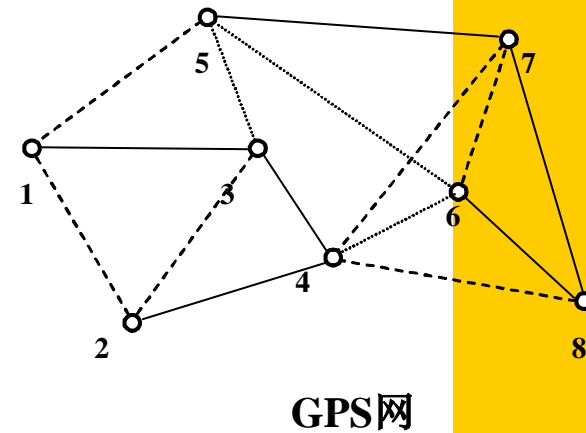


影响相对定位测量成果质量的因素①

- 影响单一基线质量的因素
 - 测量定位的几何条件
 - 卫星的数量、几何分布及位置变化幅度
 - 观测值
 - 观测值的质量：精度高低、周跳多少
 - 观测值的种类：单频还是双频、L2的质量、是否有P码伪距、是否有气象元素
 - 数据处理
 - 处理方法：软件、处理参数设置

影响相对定位测量成果质量的因素②

- 影响整体测量成果质量的因素
 - 单一基线的质量
 - 网形
 - 网平差处理的方法



本讲座的重点

- 围绕**GPS**网的建立介绍如下内容
 - GPS网的布设及外业观测
 - 基线解算及其质量控制
 - GPS网平差及其质量控制
- 核心问题
 - 质量控制（QC）

什么是质量？

- 质量的定义
 - 产品或工作的优劣程度
- **GPS测量产品质量的内涵**
 - 精度
 - 可靠性

质量 \neq 精度

质量=精度+可靠性(+应用目标符合度)

GPS测量产品质量的内涵

质量控制及其内容

- 质量控制的定义
 - 一种用来确保生产出的产品保持合乎规定水平的系统
- **GPS**测量产品质量控制的内容
 - 质量评价（评定质量的指标）
 - 质量改善（提高质量的方法）



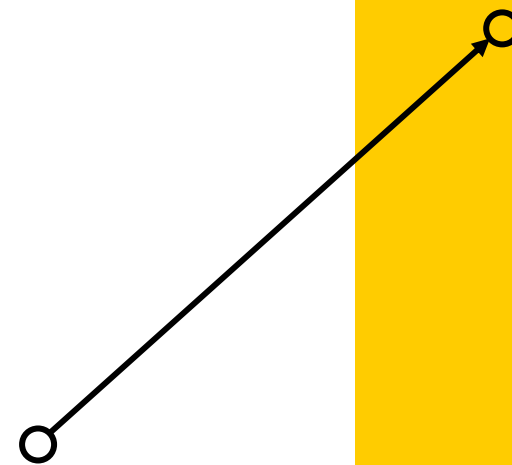
2. *GPS*网的布设 及 质量控制



2.1 GPS网

GPS基线向量

- 定义
 - GPS基线向量是通过在若干点上进行GPS同步观测所确定出的点间的相对位置关系
- 表达方式
 - 地心坐标的坐标差($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$)
 - 大地坐标的坐标差($\Delta B, \Delta L, \Delta H$)
 - 站心直角坐标(N, E, U)
 - 站心极坐标(S, A, EL)
- 问题
 - GPS基线向量缺少绝对位置基准

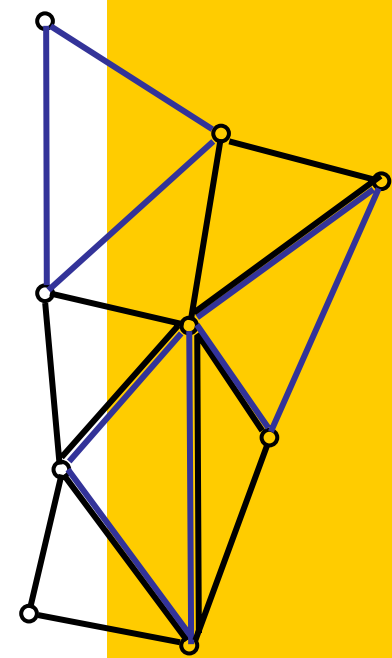


基线向量



GPS网

- **GPS网定义**
 - 由点和GPS基线向量所形成的一种结构
- **布设GPS网的最终目的**
 - 以一定的质量水平，确定网中点在某一坐标参照系下的坐标
- **GPS网的观测值**
 - GPS基线向量
- **GPS基线向量在GPS网中的作用**
 - 建立点间的相互关系

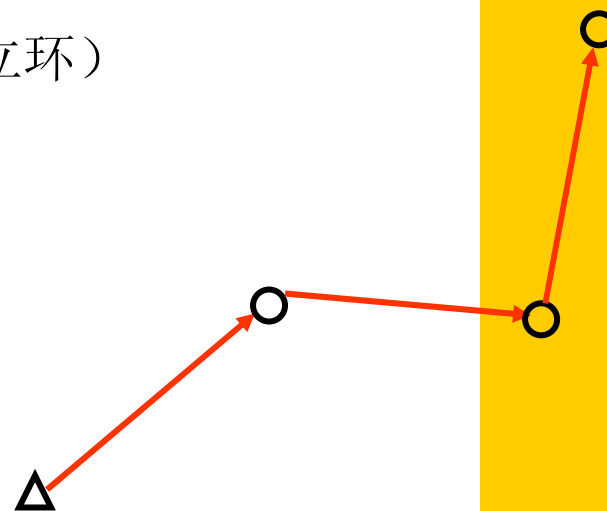


GPS网



GPS网的作用

- 绝对位置基准的传递
 - 绝对坐标信息通过基线向量进行传递
- 提供用于进行质量检核条件（冗余度）
 - 闭合条件
 - 闭合环 – 同步环、异步环（独立环）
 - 复测基线
 - 符合条件
 - 符合路线
- 提供提高质量的方法
 - 粗差的探测及处理
 - 平差处理



绝对位置基准的传递



GPS网与常规网①

- **GPS网的优势**

- 不需要通视
- 全天候作业
- 测站选择与网形无关，可专注于应用
- 作业效率高
- 易达到测量精度要求
- 可同时获得三维坐标

GPS网与常规网②

- **GPS网的劣势**

- 高效率对测量计划和调度有更高的要求
- 不能容忍空中的障碍物，因此不能用于地下、植物下或建筑物下
- **GPS**通常只能满足特定的测量需求
- 无法为后续的非**GPS**测量提供方位控制
- **GPS**的精度通常高于周围现有的控制
- **GPS**设备的投资成本高
- 需要新技能

GPS 网的工程应用

- 大地控制
- 工程控制
- 图根控制
- 形变监测
- 联合水准及重力资料建立精密（似）大地水准面模型

GPS网与CORS

- **CORS**

- Continuously Operating Reference Stations
(连续运行参考站)

- **趋势**

- CORS是现代化的空间三维基准实现方法
 - 在工程应用领域，CORS将会逐步取代常规GPS网
 - 近期，在不发达地区和偏远地区，常规GPS网仍将作为一项建立测量控制的主要手段

建立GPS网的三个阶段①

- 测前
 - 项目立项
 - 方案设计
 - 施工设计
 - 测绘资料收集整理
 - 仪器检验、检定
 - 踏勘、选点、埋石

建立GPS网的三个阶段②

- 测中
 - 作业队进驻
 - 卫星状态预报
 - 观测计划制定
 - 作业调度及外业观测
 - 数据传输、转储、备份
 - 基线解算及质量控制

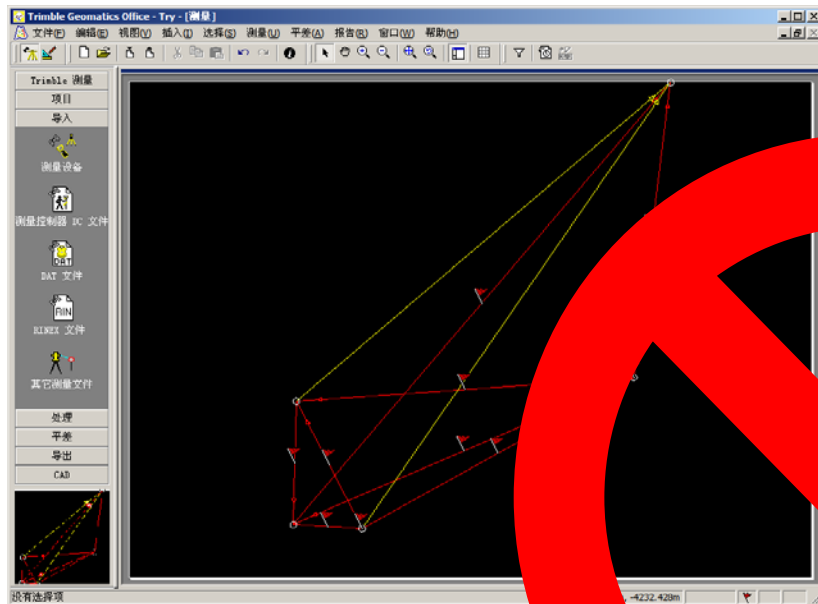
建立GPS网的三个阶段③

- 测后
 - 网平差（数据处理、分析）及质量控制
 - 整理成果、技术总结
 - 项目验收

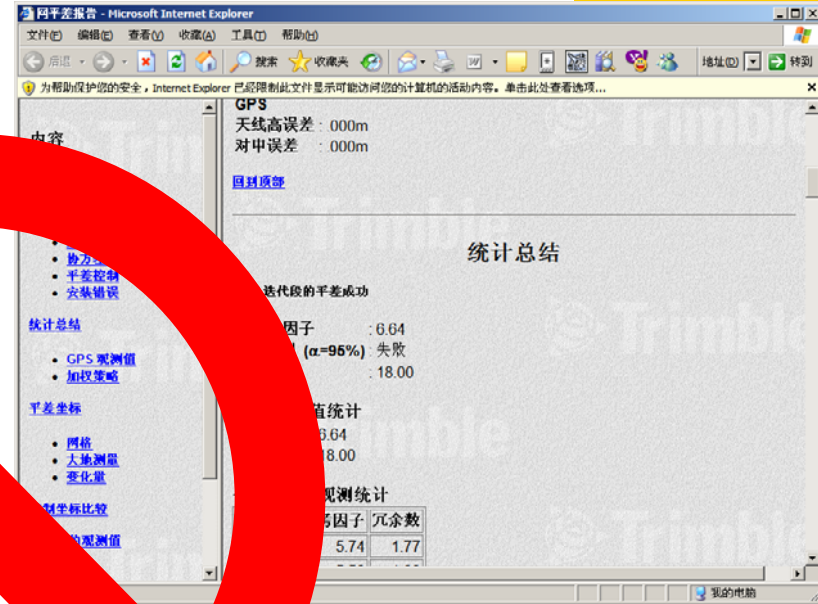


2.2 衡量GPS网质量的指标

评定质量方法时的常见错误



根据颜色和是否插旗来评定质量



根据报告中是否出现“失败”等字眼来评定质量

GPS 处理中

	ID	从测站	到测站	基线长度	参考变量	保存(S)
<input type="checkbox"/>	B64	0013	0025	8224.905m	电离层空闲	775.0
<input checked="" type="checkbox"/>	B68	0013	0014	3798.581m	L1 固定	
<input checked="" type="checkbox"/>	B69	0013	0015	1856.734m	L1 固定	
<input type="checkbox"/>	B70	0013	0024	14369.038m	电离层空闲 浮动	
<input checked="" type="checkbox"/>	B65	0025	0014	8955.241m	电离层空闲 浮动	
<input checked="" type="checkbox"/>	B66	0025	0015	9824.829m	电离层空闲 浮动	23.428.0
<input checked="" type="checkbox"/>	B67	0025	0024	7887.166m	电离层空闲 浮动	7.630.0
<input type="checkbox"/>	B71	0014	0015	3289.121m	L1 固定	1.7 43.582.0
<input checked="" type="checkbox"/>	B72	0014	0024	13023.709m	电离层空闲 浮动	2.913.0
<input checked="" type="checkbox"/>	B73	0015	0024	15404.230m	电离层空闲 浮动	13.224.0

☒ 覆盖重复基线解 (Q)

待定 10 接受, 0 拒绝

根据是否打钩和是否是固定解来评定质量

精度高就等于质量好

GPS网质量的两个方面

- **精度**

- 基线向量改正数的大小
- 基线向量的重复性
- 闭合差的大小
- 符合差的大小
- 相邻点距离中误差的大小
- 点位中误差大小

- **可靠性**

- 可探测出的观测值中粗差的大小
- 观测值中残余粗差对结果影响的大小



衡量精度的指标

控制指标是依据应用要求得出的
参考指标是依据统计原理得出的

- 质量指标

- 控制指标（必须满足，需要用户来判断）
 - 同步环闭合差
 - 异步环闭合差
 - 复测基线较差
- 参考指标（用于参考，不作要求，软件能自动判断）
 - 参考方差（ σ_0 ）
 - 均方根误差（RMS）
 - 确定模糊度时的RMS比值（RATIO值）

规范中有关GPS网精度的内容①

- 全球定位系统（GPS）测量规范（GB/T 18314 – 2001）

5.3 各级 GPS 网相邻点间基线长度精度用下式表示,并按表 1 规定执行。

$$\sigma = \sqrt{a^2 + (b \cdot d \cdot 10^{-6})^2} \dots\dots\dots(1)$$

式中: σ ——标准差,mm;

a ——固定误差,mm;

b ——比例误差系数;

d ——相邻点间距离,mm。

表 1 精度分级

级 别	固定误差 a ,mm	比例误差系数
AA	≤ 3	≤ 0.01
A	≤ 5	≤ 0.1
B	≤ 8	≤ 1
C	≤ 10	≤ 5
D	≤ 10	≤ 10
E	≤ 10	≤ 20

规范中有关GPS网精度的内容②

- 全球定位系统（GPS）测量规范（GB/T 18314 – 2001）

5.4 GPS 测量大地高差的精度,固定误差 a 和比例误差系数 b 按表 1 可放宽 1 倍执行。

5.5 AA、A 级站平差后在 ITRF YY 地心参考框架中的点位精度及对连续观测站经多次观测后计算的相邻站间基线长度年变化率测定精度,按表 2 规定执行。

表 2 点位精度和基线长度年变化率精度规定

级别	点位地心坐标精度, m	基线长度年变化率精度, mm/年
AA	≤ 0.05	≤ 2
A	≤ 0.1	≤ 3

如:

对于在C级网, 规范要求 $a \leq 10\text{mm}$, $b \leq 5$,
当基线边长为10km时,

$$\sigma = \sqrt{10^2 + (5 \times 10 \times 10^6 \times 10^{-6})^2} = 50.99(\text{mm})$$

规范中有关GPS网精度的内容③

• 全球定位系统（GPS）测量规范（GB/T 18314—2001）

12.2.1 同一时段观测值的数据剔除率，其值宜小于10%。

12.2.2 B级基线外业预处理和C级以下各级GPS网基线处理，复测基线的长度较差 d_s ，两两比较应满足下式的规定：

$$d_s \leq 2\sqrt{2}\sigma \quad \dots\dots\dots(2)$$

式中： σ ——相应级别规定的精度（按实际平均边长计算）。

12.2.3 各级GPS网同步环闭合差，不宜超过附录E规定。

12.2.4 C级以下各级网、及B级GPS网外业基线预处理结果，其独立闭合环或附合路线坐标闭合差应满足：

$$\begin{aligned} W_x &\leq 3\sqrt{n}\sigma \\ W_y &\leq 3\sqrt{n}\sigma \quad \dots\dots\dots(3) \\ W_z &\leq 3\sqrt{n}\sigma \\ W_s &\leq 3\sqrt{3n}\sigma \end{aligned}$$

式中： n ——闭合环边数；

σ ——相应级别规定的精度（按实际平均边长计算）。

$$W_s = \sqrt{W_x^2 + W_y^2 + W_z^2}$$

规范中有关GPS网精度的内容④

- 全球定位系统（GPS）测量规范（GB/T 18314 – 2001）

附录 E

（标准的附录）

同步观测环检核

三边同步环中只有两个同步边成果可以视为独立的成果，第三边成果应为其余两边的代数和。由于模型误差和处理软件的内在缺陷，第三边处理结果与前两边的代数和常不为零，其差值应小于下列数值：

$$\begin{aligned}W_x &\leq \frac{\sqrt{3}}{5}\sigma \\W_y &\leq \frac{\sqrt{3}}{5}\sigma \\W_z &\leq \frac{\sqrt{3}}{5}\sigma\end{aligned}\quad \dots\dots\dots (E1)$$

式中： σ ——相应级别规定的精度（按网的实际平均边长计算）。

对于四站以上同步观测时段，在处理完各边观测值后，应检查一切可能的三边环闭合差。

规范中有关GPS网精度的内容⑤

- 全球定位系统（GPS）测量规范（GB/T 18314 – 2001）

12.3.1 AA、A、B级基线精处理后应计算基线的 ΔX 分量、 ΔY 分量、 ΔZ 分量及边长的重复性，重复性定义为：

$$R_c = \left[\frac{\frac{n}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(C_i - C_m)^2}{\sigma_{C_i}^2}}{\sum_{i=1}^n 1/\sigma_{C_i}^2} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (4)$$

式中： n ——同一基线的总观测时段数；

C_i ——一个时段的基线某一分量或边长；

$\sigma_{C_i}^2$ ——该时段 i 相应于 C_i 分量的方差；

C_m ——各时段的加权平均值。

还应对各基线边长分量、北分量和东分量的重复性进行固定误差与比例误差的直线拟合，作为衡量基线精度的参考指标。

规范中有关GPS网精度的内容⑥

- 全球定位系统（GPS）测量规范（GB/T 18314 – 2001）

12.3.2 AA、A、B级GPS网，同一基线不同时段较差，应满足下式规定：

$$\begin{aligned}d_{\Delta X} &\leq 3 \sqrt{2} R_{\Delta X} \\d_{\Delta Y} &\leq 3 \sqrt{2} R_{\Delta Y} && \dots\dots\dots (5) \\d_{\Delta Z} &\leq 3 \sqrt{2} R_{\Delta Z} \\d_s &\leq 3 \sqrt{2} R_s\end{aligned}$$

式中 R 由(4)计算。

规范中有关GPS网精度的内容⑦

- 全球定位系统（GPS）测量规范（GB/T 18314 – 2001）

12.3.3 AA、A、B级基线精处理后，独立闭合环或附合路线坐标分量闭合差足：

$$\begin{aligned}W_X &\leq 2\sigma_{WX} \\W_Y &\leq 2\sigma_{WY} \dots\dots\dots (6) \\W_Z &\leq 2\sigma_{WZ}\end{aligned}$$

而

$$\begin{aligned}\sigma_{WX}^2 &= \sum_{i=1}^r \sigma_{\Delta X(i)}^2 \\ \sigma_{WY}^2 &= \sum_{i=1}^r \sigma_{\Delta Y(i)}^2 \dots\dots\dots (7) \\ \sigma_W^2 &= \sum_{i=1}^r \sigma_i^2\end{aligned}$$

式中 r 为
时输出。

环线全长闭合差应满足：

$$W \leq 3\sigma_W \dots\dots\dots (8)$$

$$\sigma_W^2 = \sum_{i=1}^r W D_{bi} W^T \dots\dots\dots (9)$$

$$W = \begin{bmatrix} \frac{\omega_{\Delta X}}{\omega} & \frac{\omega_{\Delta Y}}{\omega} & \frac{\omega_{\Delta Z}}{\omega} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

式中：

$$\omega = \sqrt{\omega_{\Delta X}^2 + \omega_{\Delta Y}^2 + \omega_{\Delta Z}^2} \dots\dots\dots (11)$$

D_{bi} ——环线中第 i 条基线方差——协方差阵。

规范中有关GPS网精度的内容⑧

- 全球定位系统（GPS）测量规范（GB/T 18314 – 2001）

12.5.4 C级以下各级GPS网无约束平差

12.5.4.1 在基线向量检核符合要求后,以三维基线向量及其相应方差——协方差阵作为观测信息,以一个点的WGS—84系三维坐标作为起算依据,进行GPS网的无约束平差。无约束平差须提供各点在WGS—84系下的三维坐标、各基线向量及其改正数和其精度信息。

12.5.4.2 无约束平差中,基线分量的改正数绝对值($V_{\Delta X}$ 、 $V_{\Delta Y}$ 、 $V_{\Delta Z}$)应满足下式:

$$\begin{aligned} V_{\Delta X} &\leq 3\sigma \\ V_{\Delta Y} &\leq 3\sigma \\ V_{\Delta Z} &\leq 3\sigma \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中: σ ——为相应级别规定的基线的精度。

否则,认为该基线或其附近的基线存在粗差,应在平差中采用软件提供的自动方法或人工方法剔除,直至上式满足。

规范中有关GPS网精度的内容⑨

- 全球定位系统（GPS）测量规范（GB/T 18314 – 2001）

12.5.5.3 约束平差中,基线分量的改正数与经过 12.5.4.2 粗差剔除后的无约束平差结果的同一基线相应改正数较差的绝对值($dV_{\Delta X}$ 、 $dV_{\Delta Y}$ 、 $dV_{\Delta Z}$)应满足下式

$$\begin{aligned}dV_{\Delta X} &\leq 2\sigma \\dV_{\Delta Y} &\leq 2\sigma \quad \dots\dots\dots(13) \\dV_{\Delta Z} &\leq 2\sigma\end{aligned}$$

式中： σ ——为相应等级基线的规定精度。

否则,认为作为约束的已知坐标、已知距离、已知方位中存在一些误差较大的值应采用自动或人工的方法剔除这些误差较大的约束值,直至上式满足。

规范中有关GPS网可靠性的内容①

- 全球定位系统（GPS）测量规范（GB/T 18314 – 2001）

6.3.2.2 AA、A、B 级 GPS 网应布设成连续网，除边缘点外，每点的连接点数应不少于 3 点。C、D、E 级 GPS 网可布设成多边形或附和路线。

6.3.2.3 A 级及 A 级以下各级 GPS 网中，最简独立闭合环或附和路线的边数应符合表 3 的规定。

表 3 最简独立闭合环或附和路线边数的规定

级 别	A	B	C	D	E
闭合环或附和路线的边数	≤5	≤6	≤6	≤8	≤10

6.3.2.4 各级 GPS 网相邻点间平均距离应符合表 4 要求。相邻点最小距离可为平均距离的 1/3~1/2；最大距离可为平均距离的 2~3 倍。

表 4 GPS 网中相邻点之间的平均距离 km

级 别 项 目	AA	A	B	C	D	E
平均距离	1 000	300	70	10~15	5~10	0.2~5

规范中有关GPS网可靠性的内容②

- 全球定位系统（GPS）测量规范（GB/T 18314 – 2001）

6.3.2.5 AA、A、B级GPS网点，应与GPS永久性跟踪站联测；其联测的站数，AA级不得少于4站，A级不得少于3站，B级不得少于2站。

6.3.2.6 A、B级GPS网，应尽量与周围的GPS地壳形变监测网、基本验潮站联测。

6.3.2.7 AA、A、B级GPS网点宜与参加过全国天文大地网整体平差的三角点、导线点和一、二等水准点并置或重合。

6.3.2.8 新布设的GPS网应与附近已有的国家高等级GPS点进行联测，联测点数不得少于2点。

6.3.2.9 B级GPS网，在高程异常变化剧烈地区，其点间的距离不宜超过100 km；在地壳断裂带或地震频发地区，其点间距离应适当缩短。

规范中有关GPS网可靠性的内容③

- 全球定位系统（GPS）测量规范（GB/T 18314 – 2001）

10.3.1 各级 GPS 测量基本技术要求应符合表 7 要求。

表 7 各级 GPS 测量基本技术要求规定

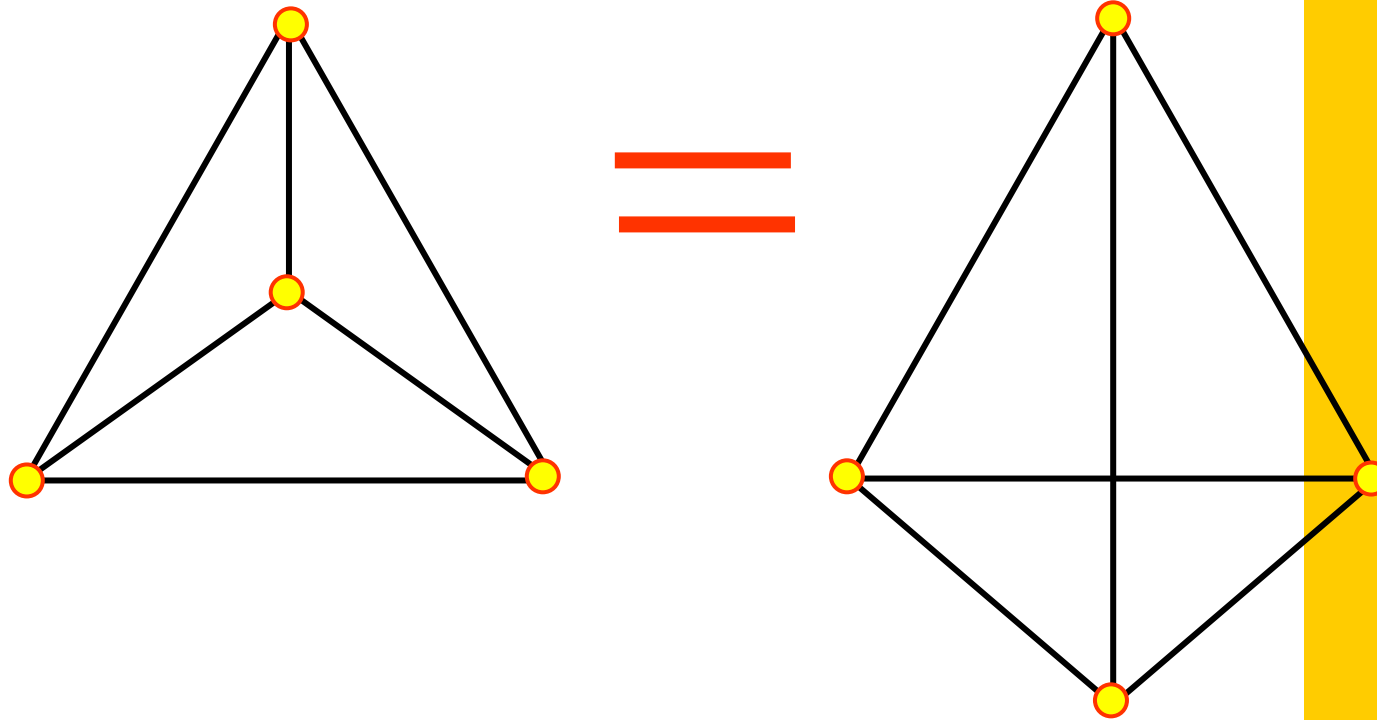
项 目 \ 级 别	AA	A	B	C	D	E
卫星截止高度角(°)	10	10	15	15	15	15
同时观测有效卫星数	≥4	≥4	≥4	≥4	≥4	≥4
有效观测卫星总数	≥20	≥20	≥6	≥6	≥4	≥4
观测时段数	≥10	≥6	≥4	≥2	≥1.6	≥1.6



2.3 影响GPS网质量的因素

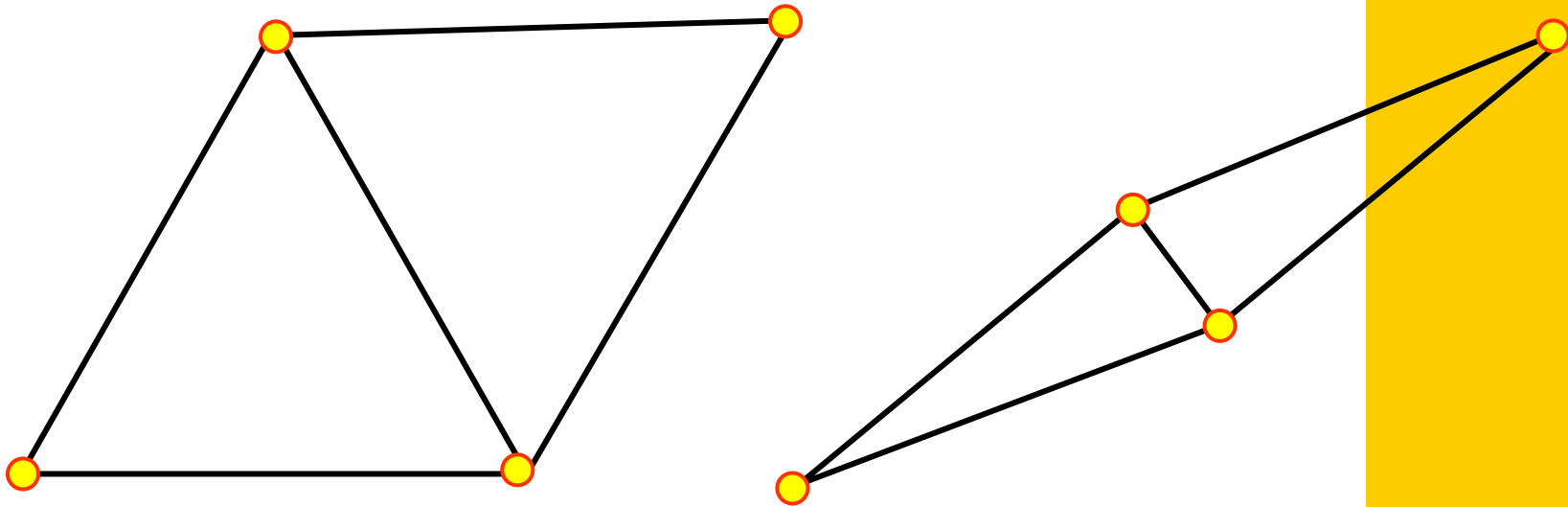
不影响GPS网质量的因素①

- GPS网中点的质量与点位分布无关



不影响GPS网质量的因素②

- 网的形状对GPS网的质量没有直接影响



对于上述两个网形，如果对应基线的质量相同，则两个网的质量也相同。

影响GPS网质量的因素

- 观测值的精度
 - 由观测方法和基线处理方法决定
- 起算数据的质量、数量、分布及与网的关系
 - 由网的设计和外业观测调度决定
- 网的结构（基线向量的数量及配置）
 - 由网的设计和外业观测调度决定
- 数学模型的完备性
 - 由数据处理软件决定
- 外业观测工作，如对中、量高、天线定向等
 - 由外业作业人员决定



2.4 保证GPS网质量的方法

保证GPS网质量的基本原则

- 观测值的精度和数量要保证
- 起算数据的质量要保证，数量要适当，分布要均匀，与网的关系要紧密
- 网的结构要坚强
- 数学模型要完备

第2，3点实际上是GPS网设计的问题



GPS网设计的原则

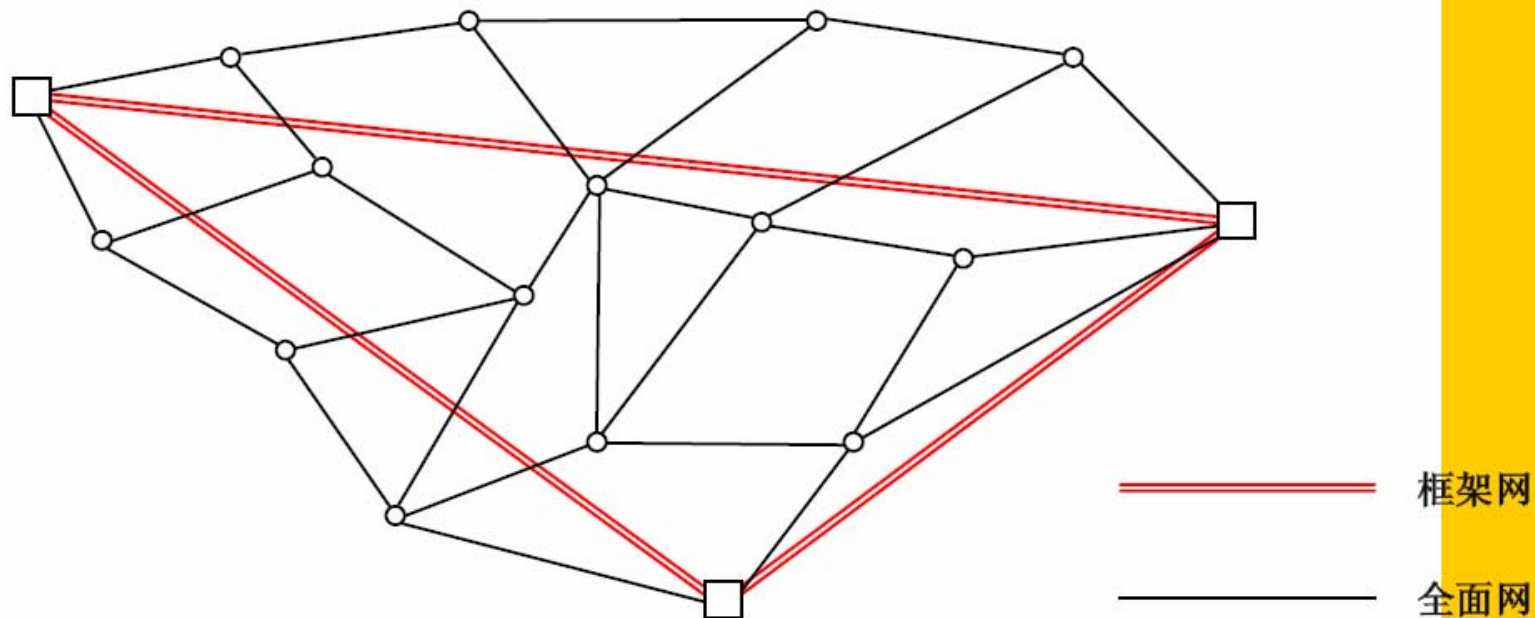
- 质量的要求
 - 保证成果质量
 - 便于质量控制
- 应用的要求
 - 利于成果的应用
- 观测的要求
 - 保证观测质量
 - 保证观测效率
 - 便于观测施工

起算数据的设计

- 起算数据数量与网质量的关系
 - 起算数据质量高时，数量可不限
 - 起算数据质量低时，数量要适当，具体数目与项目性质及数据处理方法有关
 - 旧网改造或加密扩充，起算点的数目可多一些
 - 新建网，起算点的数目可少一些
 - 独立坐标系下的工程网可固定一点一方向
- 起算数据的类型与网质量的关系
 - 涉及投影面高度问题的网应引入已知边长

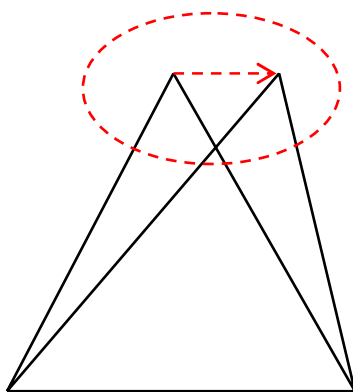
网的结构设计①

- 为覆盖面积大或延伸距离远的网布设高一等级的框（骨）架网

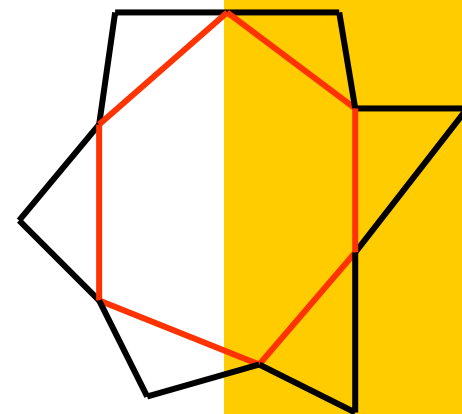


网的结构设计②

- 网中距离较近的点间要进行直接观测
- 保证网中具有足够数量的复测边和复测点
- 通过增设基线提高网的结构强度
- 最简异步环的边数不宜过多



短边必测



最简异步环

观测设计

- 仪器要求
 - 采用双频接收机、抗多路径天线、相同型号的天线
- 观测设施
 - 强制对中
- 观测环境
 - 避开多路径、电磁干扰的环境
- 观测要求
 - 进行天线定向；若非强制对中，则不同时段天线重新安置
 - 早晚观测、卫星多时观测、延长观测时段、提高采样率、降低截止高度角等
- 作业调度
 - 基线的布置（复测边、闭合环的配置）



2.5 *GPS*网的 布网及观测方案

GPS网的布网方案①

- 跟踪站式

- 形式：若干台接收机长期固定安放在测站上，进行常年、不间断的观测，数据处理通常采用精密星历由高精度数据处理软件进行。
- 优点：精度极高，具有框架基准特性。
- 缺点：需建立专门的永久性建筑即跟踪站，观测成本很高。
- 适用范围：一般用于建立**GPS**跟踪站或永久性的监测网。

GPS网的布网方案②

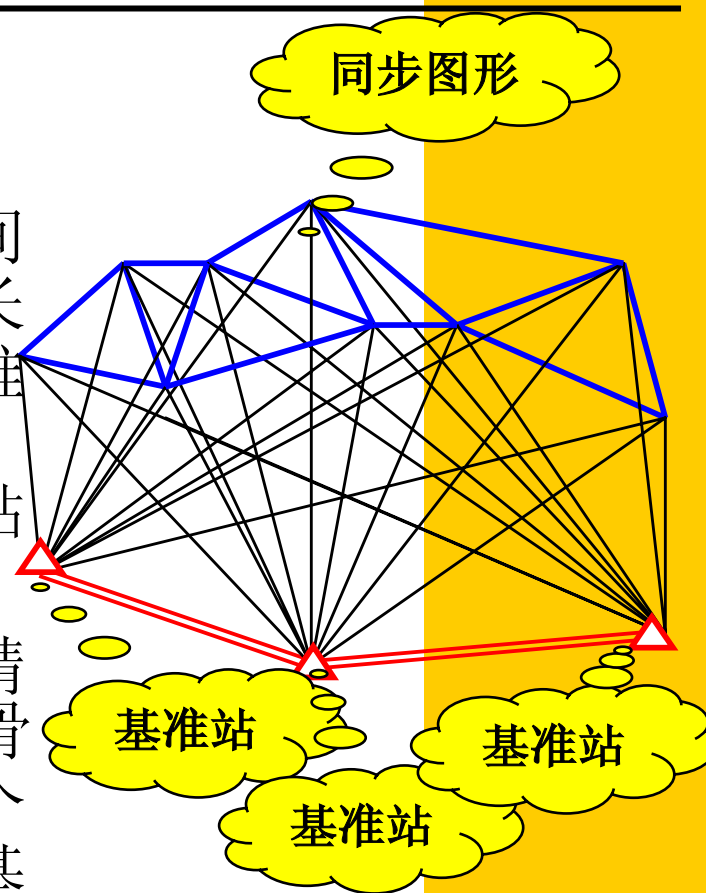
- 会战式

- 形式：一次组织多台GPS接收机，集中在一段不太长的时间内，共同作业。观测分阶段进行，在同一阶段中，所有的接收机，在若干天的时间里分别各自在同一批点上进行多天、长时段的同步观测，在完成一批点的测量后，所有接收机又都迁移到另外一批点上采用相同方式，进行另一阶段的观测，直至所有点观测完毕。
- 优点：具有特高的尺度精度。
- 适用范围：A、B级网。

GPS网的布网方案③

• 多基准站式

- 形式：若干台接收机在一段时间里长期固定在某几个点上进行长时间的观测，这些测站称为基准站，在基准站进行观测的同时，另外一些接收机则在这些基准站周围相互之间进行同步观测。
- 优点：①各基准站间基线向量精度高，可以作为整个GPS网的骨架。②其余同步观测图形与各个基准站之间也存在有同步观测基线，图形结构强。
- 适用范围：C，D级网。

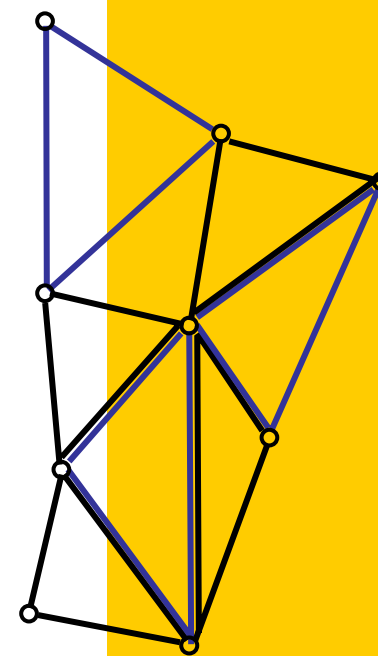


多基准站式的布网形式

GPS网的布网方案④

- 同步图形扩展式

- 形式：多台接收机在不同测站上进行同步观测，在完成一个时段的同步观测后，又迁移到其它的测站上进行同步观测，每次同步观测都可以形成一个同步图形，在测量过程中，不同的同步图形间一般有若干个公共点相连，整个GPS网由这些同步图形构成。
- 优点：扩展速度快，图形强度较高，且作业方法简单。
- 适用范围：C，D级网。

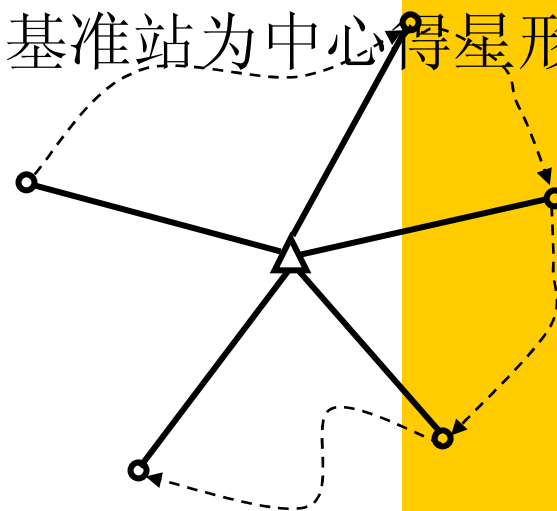


同步图形的扩展

GPS网的布网方案⑤

- 单基准站（星形网）式

- 形式：以一台接收机作为基准站，在某个测站上连续开机观测，其余的接收机在此基准站观测期间，在其周围流动，每到一点就进行观测，流动的接收机之间一般不要求同步，这样，流动的接收机每观测一个时段，就与基准站间测得一条同步观测基线，所有这样测得的同步基线就形成了一个以基准站为中心的星形。
- 优点：效率高。
- 缺点：图形强度弱，可靠性低。
- 适用范围：D，E级网。

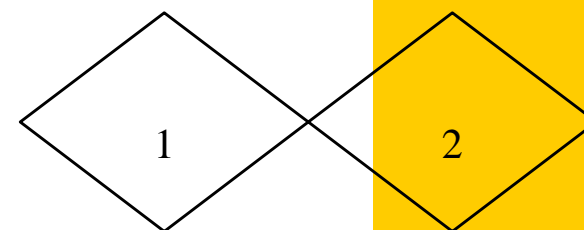


单基准站式的布网

调度方案①

- 点连式

- 形式：相邻的同步图形间只通过一个公共点相连。
- 优点：作业效率高，图形扩展迅速。
- 缺点：图形强度低，如果连接点发生问题，将影响到后面的同步图形。



点连式

调度方案②

- 边连式

- 形式：相邻的同步图形间有一条边（即两个公共点）相连。
- 优点：作业效率较高，图形强度较强。

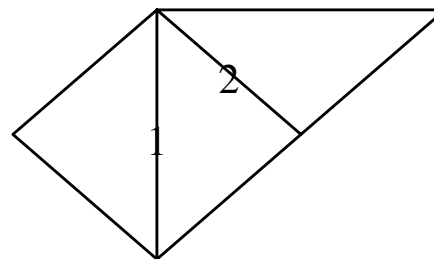


边连式

调度方案③

- 网连式

- 形式：相邻的同步图形间有3个（含3个）以上的公共点相连。
- 优点：图形强度最强。
- 缺点：作业效率低。



网连式

GPS网作业进度图

- **GPS网作业进度图**

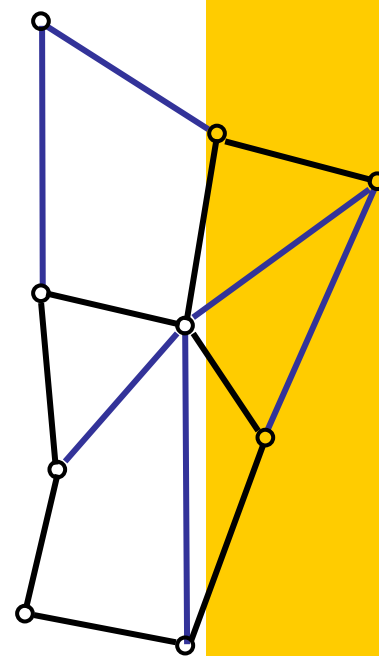
- 从已完成观测的同步图形中选取独立基线，在GPS网展点图上将被测点用直线连接起来，用以显示作业进度。

- **进度图的绘制**

- 应选取独立基线；
- 用不同的颜色表示不同时段的同时观测基线。

- **作用**

- 进行网形设计；
- 掌握作业进度。



同步图形的扩展



2.6 工程进度及费用估算

影响工程进度的因素

- 观测时段的长度
- 每点需观测的时段数
- 迁站所需的时间
- 每天可观测的时段数

重复设站次数

- 定义：在同一测站上所进行观测的时段数。
- 规范中规定了不同等级的网，每个测站的最少平均重复设站次数。

表 7 各级 GPS 测量基本技术要求规定

项 目 \ 级 别	AA	A	B	C	D	E
卫星截止高度角(°)	10	10	15	15	15	15
同时观测有效卫星数	≥4	≥4	≥4	≥4	≥4	≥4
有效观测卫星总数	≥20	≥20	≥9	≥6	≥4	≥4
观测时段数	≥10	≥6	≥4	≥2	≥1.6	≥1.6

表 7(完)

项 目 \ 级 别	AA	A	B	C	D	E
静态	≥720	≥540	≥240	≥60	≥45	≥40

最少观测期数

- 定义

- 根据规范要求，布设一GPS网，需要观测的最少时段数。

- 特性

- 最少观测期数与网的等级、点的数量和用于观测的接收机的数量有关。

- 计算公式：

The diagram illustrates the formula for the minimum number of observation periods (S_{\min}). The formula is $S_{\min} = \text{INT}\left(\frac{R \cdot n}{m}\right)$. The variables are defined in yellow thought bubbles: R is '最少平均重复设站次数' (Minimum average number of repeated station settings), n is '网的点数' (Number of points in the network), and m is '参与观测的接收机数' (Number of receivers participating in observation). The result S_{\min} is labeled as '最少观测期数' (Minimum number of observation periods).

$$S_{\min} = \text{INT}\left(\frac{R \cdot n}{m}\right)$$

工程进度及费用估算

- 用于估算工程进度
 - 最少观测期数/单天观测期数+机动天数
- 用于估算外业观测作业成本
 - 观测天数×单天成本

实例：

某网由100个点构成，计划用4台接收机进行观测，如果要求平均重复设站次数不得低于2.0，问至少需要观测多少个时段。

$$\text{最少观测时段数} = \text{INT}\left(\frac{100 \times 2.0}{4}\right) = 50$$



小结

本讲小节

- **GPS测量定位原理概述**
- **测量成果质量的内涵：质量=精度+可靠性**
- **测量成果质量控制的内容：评价+改善**
- **质量控制的环节：设计、外业、内业**
- **GPS网的质量评定、保证方法**
- **GPS网的布网及观测方案**
- **GPS网工程进度及成本估算**



3 基线解算的质量控制



3.1 概述

基线解算

- 定义
 - 利用多个测站的**GPS**同步观测数据，确定这些测站之间坐标差的过程
- 观测值
 - **GPS**载波相位观测值（主要）：原始观测值、差分观测值、不同频率的组合观测值
 - **GPS**伪距观测值（辅助）
- 结果
 - 基线向量
 - 精度（中误差）及误差相关性信息（协因数阵）

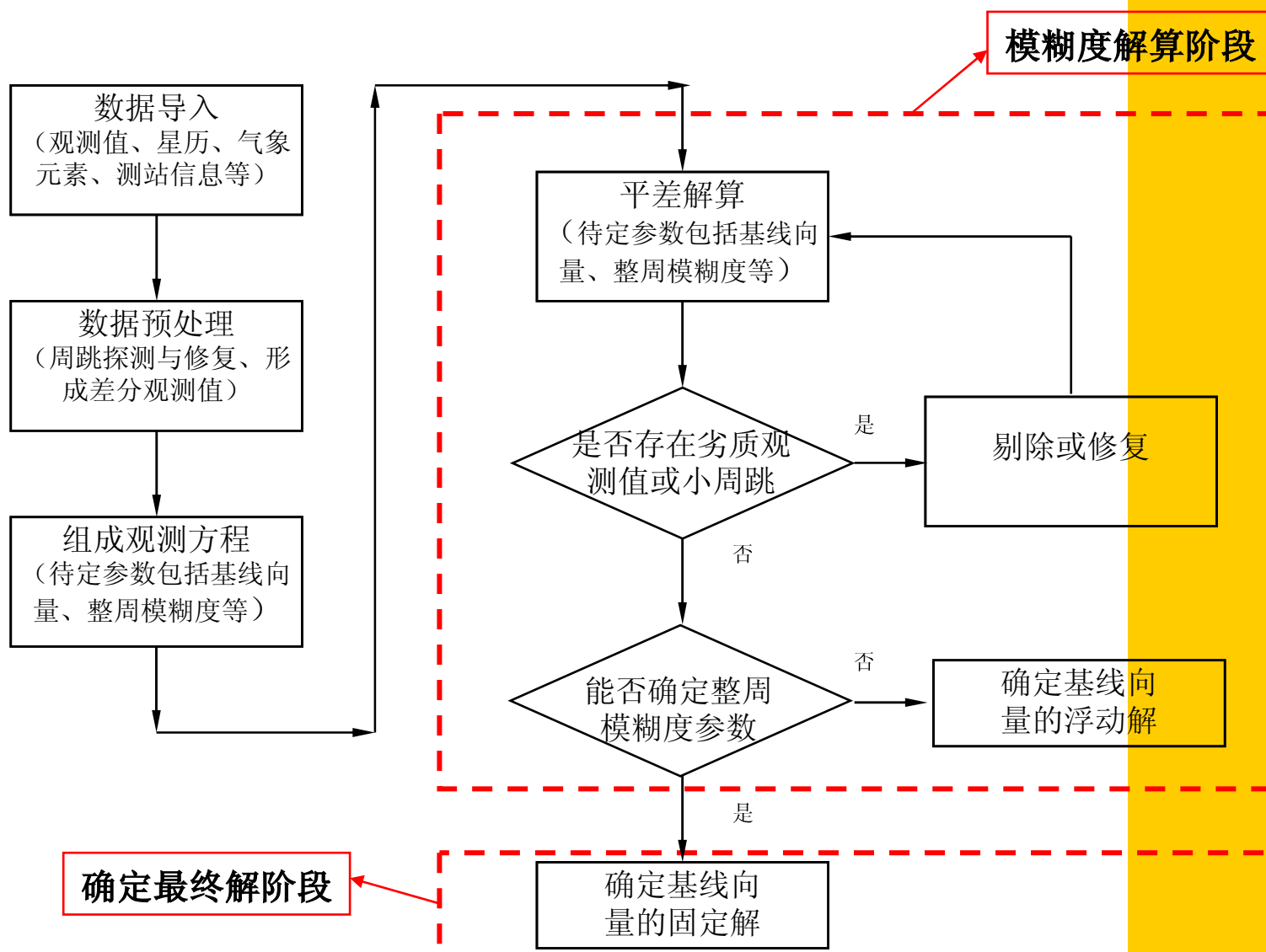
基线向量的表达方式

- 地心地固坐标 (**ECEF**)
 - 笛卡尔坐标系 — $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$
 - 大地坐标系 — $(\Delta B, \Delta L, \Delta H)$
 - ΔB : 纬差; ΔL : 经差; ΔH : 大地高差
- 站心地平坐标系
 - 直角坐标系 — (N, E, U)
 - N : 北方向; E : 东方向; U : 垂直方向
 - 极坐标系 — (S, A, H)
 - S : 距离; A : 方位角; H : 高度角

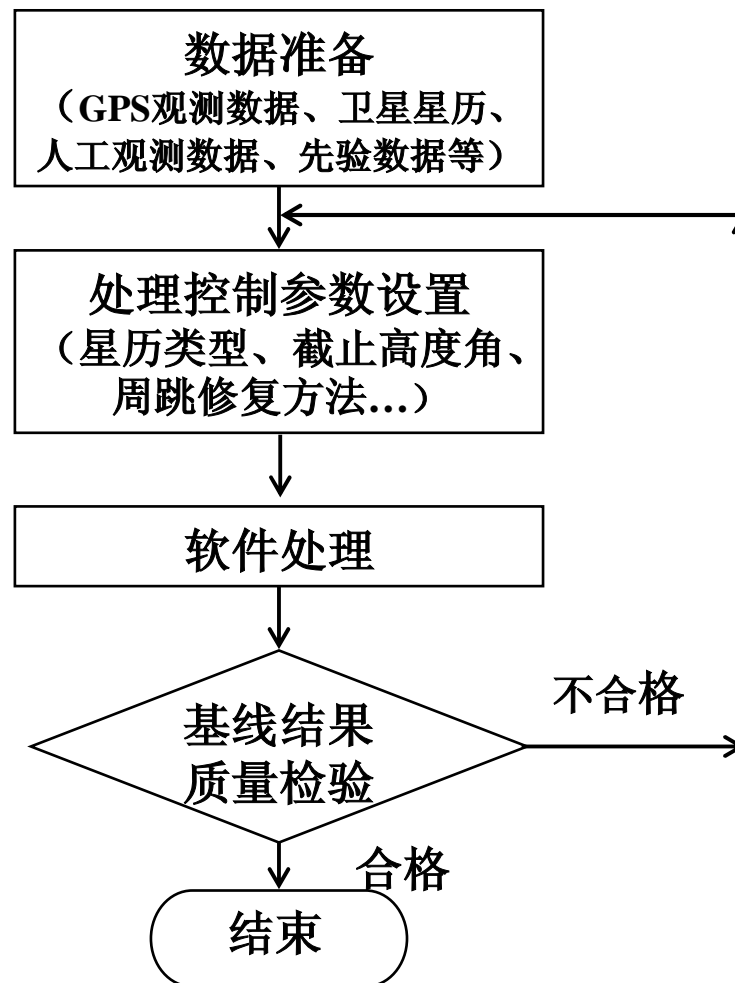
基线解算的分类

- 根据数学模型
 - 单基线解、多基线解、整体解（多站网解）
- 根据观测值类型
 - L1解、L2解、宽巷（Wide-lane）解、窄巷（Narrow-lane）解、无电离层影响（Ionosphere-free）解
- 根据所采用差分观测值的类型
 - 非（零）差解、单差解、双差解、三差解
- 根据模糊度的确定情况
 - 浮动解、固定解
- 根据数学模型分类
 - 单基线解（Single Baseline/Baseline Mode）
 - 多基线解（Multiple Baseline/Session Mode）
 - 整体解（多站网解）（Campaign Mode）

基线解算的流程（软件内部）



基线解算的流程（软件操作）



基线解算结果的内容①

- 解的类型（三差解，双差解，固定解，浮动解等）
- 不同系统下的输入、输出坐标
- 接收机的相关信息（如序列号等）
- 坐标分量估值的标准偏差
- 所有坐标参数（包括整周未知数参数等），的相
关矩阵或方差-协方差阵
- 卫星几何形状的信息（如**RDOP**值等）
- 信号跟踪记录（数据记录时间、卫星、通道、信
号质量等）

基线解算结果的内容②

- 数据删除率，采样率，数据剔除准则
- 星历内容综述，健康标志信息
- 进行的数据预处理措施（如对流层模型）
- 观测值改正数（残差**Residual**）
- 结果统计检验结果
- 整周未知数的确定结果
- 解的质量综述

基线解算结果的作用

- 后续数据处理的观测值（**GPS**基线向量网平差的观测值）
- 进行基线质量控制的依据

对基线解算质量影响最大的两因素

- 周跳
 - 处理方法
 - 修复
 - 标记并引入参数进行求解
- 整周模糊度（整周未知数）
 - 处理方法
 - 设法固定 – 固定解
 - 保持为实数 – 浮点解

此两项若处理不当，将引起基线分米及以上的误差；若处理正确，则基线精度将达厘米级。



3.2 基线质量的评定

质量的参考指标①

	ID	从测站	到测站	基线长度	解算类型	比率	参考变量	RMS
<input type="checkbox"/>	B14	D8	604	616.721m	L1 浮动		12.182	.012m
<input checked="" type="checkbox"/>	B24	D8	603	1190.458m	L1 固定	2.5	17.048	.015m
<input checked="" type="checkbox"/>	B9	s04	604	589.098m	L1 固定	1.7	16.520	.017m
<input type="checkbox"/>	B19	s04	603	305.744m	L1 浮动		8.785	.011m
<input checked="" type="checkbox"/>	B29	604	603	614.633m	L1 固定	2.5	17.399	.015m
<input checked="" type="checkbox"/>	B5	601	A	550.233m	L1 固定	2.7	6.755	.012m
<input checked="" type="checkbox"/>	B10	601	WGFS11	552.979m	L1 固定	6.2	4.274	.008m
<input checked="" type="checkbox"/>	B20	601	D19	476.287m	L1 固定	3.3	3.278	.007m
<input checked="" type="checkbox"/>	B11	A	WGFS11	850.135m	L1 固定	3.0	3.872	.006m
<input checked="" type="checkbox"/>	B31	A	D19	977.631m	L1 固定	3.5	3.088	.006m
<input checked="" type="checkbox"/>	B26	WGFS11	D19	388.645m	L1 固定	10.3	4.074	.007m

☒ 覆盖重复基线解(O)

待定 16 接受, 14 拒绝

某些软件采用质量的参考指标对基线进行质量控制

质量的参考指标②

- 单位权方差因子 $\hat{\sigma}_0$
 - 定义

$$\hat{\sigma}_0 = \sqrt{\frac{V^T P V}{f}}$$

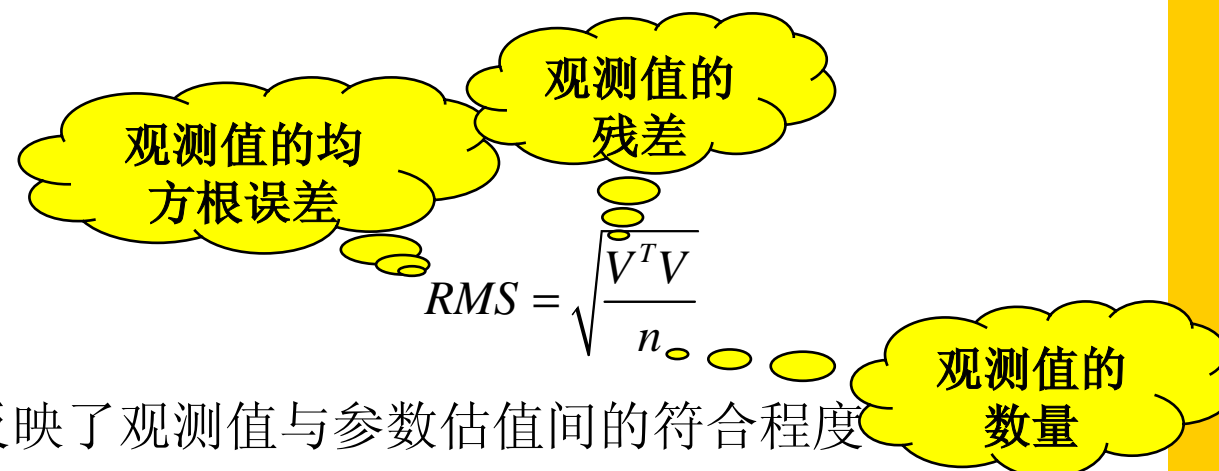
— 实质

- 又称为参考因子或参考方差
- 一定程度地反映了观测值质量的优劣

质量的参考指标③

- 观测值的RMS

- 定义：观测值残差的均方根（Root Mean Square）



– 实质

- 反映了观测值与参数估值间的符合程度
- 一定程度地反映了观测值质量的优劣
- 一般认为，RMS越小越好

质量参考指标④

- 数据删除率

- 定义：在基线解算时，如果观测值的改正数大于某一个阈值时，则认为该观测值含有粗差，则需要将其删除。被删除观测值的数量与观测值的总数的比值，就是所谓的数据删除率。
- 实质：数据删除率从某一方面反映出了**GPS**原始观测值的质量。数据删除率越高，说明观测值的质量越差。

质量的参考指标⑤

• RATIO

— 定义

$$RATIO = RMS_{\text{次最小}} / RMS_{\text{最小}}$$

— 实质

- 反映了所确定出的整周未知数参数的可靠性，该值总大于等于1，值越大，可靠性越高。
- 这一指标取决于多种因素，既与观测值的质量有关，也与观测条件的好坏有关。

在GPS测量中的“观测条件”指的是卫星星座的几何图形的分布和变化。通常，卫星数量越多、卫星分布越均匀、观测时间越长，观测条件越好。

质量参考指标⑥

- **RDOP**

- 定义：所谓**RDOP**值指的是在基线解算时待定参数的协因数阵的迹 ($tr(Q)$) 的平方根，即

$$RDOP = (tr(Q))^{1/2}$$

RDOP值的大小与基线位置和卫星在空间中的几何分布及运行轨迹（即观测条件）有关，当基线位置确定后，**RDOP**值就只与观测条件有关了，而观测条件又是时间的函数，因此，实际上对与某条基线向量来讲，其**RDOP**值的大小与观测时间段有关。

- 实质：**RDOP**表明了**GPS**卫星的状态对相对定位的影响，即取决于观测条件的好坏，它不受观测值质量好坏的影响。

质量的控制指标①

- 同步环闭合差

- 定义

- 由同步观测基线所组成的闭合环的闭合差。

- 特点：

- 理论上：由于同步观测基线间具有一定的内在联系，同步环闭合差在理论上应总是为0。
 - 实践中：只要数学模型正确、数据处理无误，即使观测值质量不好，同步环闭合差将非常小。

- 实质：

- 若同步环闭合差超限，则说明组成同步环的基线中至少存在一条基线向量是错误的
 - 若同步环闭合差没有超限，还不能说明组成同步环的所有基线在质量上均合格。

质量的控制指标②

- 异步环闭合差

- 定义

- 由相互独立的基线所组成的闭合环的闭合差。

- 实质

- 异步环闭合差满足限差要求时，则表明组成异步环的基线向量的质量是合格的。
 - 当异步环闭合差不满足限差要求时，则表明组成异步环的基线向量中至少有一条基线向量的质量不合格。
 - 要确定出哪些基线向量的质量不合格，可以通过多个相邻的异步环或重复基线来判定。

质量的控制指标②

- 复测基线较差（重复基线互差）

- 定义

- 不同观测时段，对同一条基线的观测结果，就是所谓重复基线。这些观测结果之间的差异，就是复测基线较差。

- 实质

- 复测基线较差满足限差要求时，则表明基线向量的质量是合格的。
 - 复测基线较差不满足限差要求时，则表明复测基线中至少有一条基线向量的质量不合格。
 - 要确定出哪些基线向量的质量不合格，可以通过多条复测基线来判定。

规范要求①

全球定位系统（GPS）测量规范（GB/T 18314 – 2001）

12.2 外业数据质量检核

12.2.1 同一时段观测值的数据剔除率,其值宜小于 10%。

12.2.2 B 级基线外业预处理和 C 级以下各级 GPS 网基线处理,复测基线的长度较差 d_s ,两两比较应满足下式的规定:

$$d_s \leq 2 \sqrt{2} \sigma \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中: σ ——相应级别规定的精度(按实际平均边长计算)。

12.2.3 各级 GPS 网同步环闭合差,不宜超过附录 E 规定。

12.2.4 C 级以下各级网、及 B 级 GPS 网外业基线预处理结果,其独立闭合环或附合路线坐标闭合差应满足:

$$\begin{aligned} W_x &\leq 3 \sqrt{n} \sigma \\ W_y &\leq 3 \sqrt{n} \sigma \quad \dots\dots\dots (3) \\ W_z &\leq 3 \sqrt{n} \sigma \\ W_s &\leq 3 \sqrt{3n} \sigma \end{aligned}$$

式中: n ——闭合环边数;

σ ——相应级别规定的精度(按实际平均边长计算)。

$$W_s = \sqrt{W_x^2 + W_y^2 + W_z^2}$$

规范要求②

全球定位系统（GPS）测量规范（GB/T 18314 – 2001）

附 录 E (标准的附录) 同步观测环检核

三边同步环中只有两个同步边成果可以视为独立的成果,第三边成果应为其余两边的代数和。由于模型误差和处理软件的内在缺陷,第三边处理结果与前两边的代数和常不为零,其差值应小于下列数值:

$$\begin{aligned}W_x &\leq \frac{\sqrt{3}}{5}\sigma \\W_y &\leq \frac{\sqrt{3}}{5}\sigma \quad \dots\dots\dots (E1) \\W_z &\leq \frac{\sqrt{3}}{5}\sigma\end{aligned}$$

式中: σ ——相应级别规定的精度(按网的实际平均边长计算)。

对于四站以上同步观测时段,在处理完各边观测值后,应检查一切可能的三边环闭合差。



3.3 基线质量的改善

影响基线质量的因素①

- 基线解算时所设定的起点坐标不准确

- 影响方式：导致基线向量发生偏差
- 影响程度：

The diagram illustrates the relationship between baseline vector error, baseline length, starting point coordinate error, and GPS satellite orbit height. It features a central equation with four callout boxes pointing to its components:

$$\frac{dD}{D} \approx \frac{dX}{d\rho}$$

- 基线向量的偏差 (Baseline vector error) points to dD
- 基线长度 (Baseline length) points to D
- 起点坐标的偏差 (Starting point coordinate error) points to dX
- GPS卫星轨道高度 (GPS satellite orbit height) points to $d\rho$

- 少数卫星的观测时间太短

- 影响方式：导致与该卫星有关的整周未知数固定困难
- 影响程度：对于基线解算来讲，对于参与计算的卫星，如果与其相关的整周未知数没有准确确定的话，就将严重影响整个基线解算结果的质量

影响基线质量的因素②

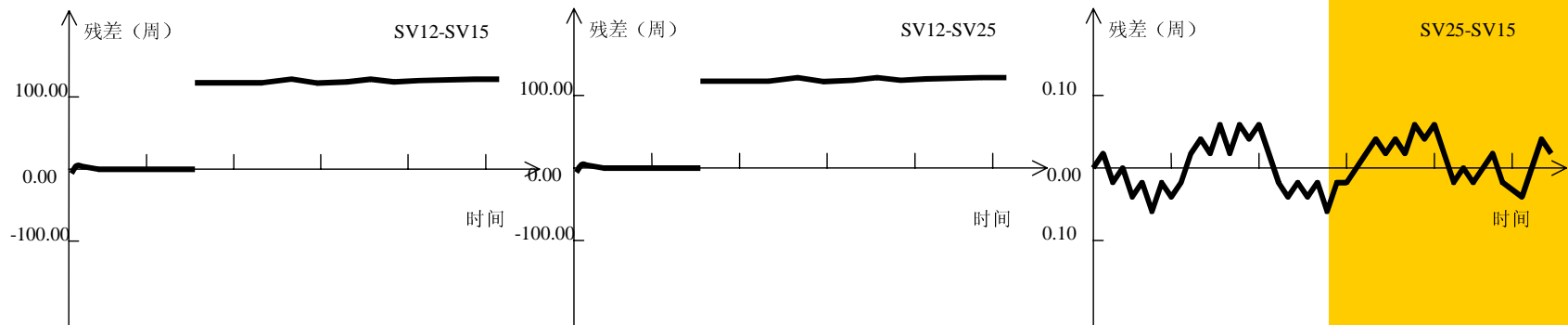
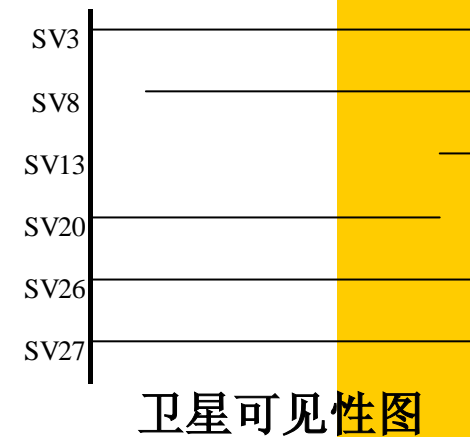
- 在整个观测时段中，有个别卫星或个别时间段周跳太多，致使周跳修复不完善
 - 影响方式：导致整周未知数固定困难
 - 影响程度：严重影响基线向量的质量
- 在观测时段内，多路径效应比较严重，观测值的改正数普遍较大
 - 影响方式：导致基线向量质量下降，严重时导致整周未知数固定困难
 - 影响程度
 - 随多路径效应的严重程度，对基线向量质量的影响程度有所不同
 - 多路径效应对基线向量的水平方向影响较大

影响基线质量的因素③

- 对流层折射影响或电离层折射影响较大
 - 影响方式：导致基线向量质量下降，严重时导致整周未知数固定困难
 - 影响程度
 - 随大气折射影响的严重程度，对基线向量质量的影响程度有所不同
 - 大气折射影响对基线向量的垂直方向影响较大
- 其它因素
 - 卫星轨道误差较大
 - 数学模型问题：地球潮汐、地球自转、卫星姿态及天线相位中心问题等

影响基线质量因素的判别①

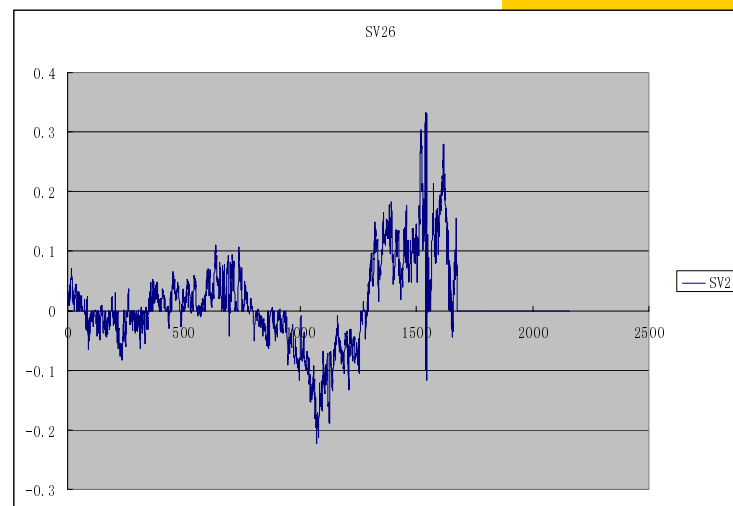
- 基线起点坐标不准确的判别
 - 无明确的方法
- 卫星观测时间短的判别
 - 通过卫星可见性图
- 周跳
 - 通过残差图（残差跳跃）



上面3幅双差残差图表明SV12存在周跳

影响基线质量因素的判别②

- 多路径效应严重
 - 通过残差图（残差中部分区间成系统性变化，且呈现周日特征）
- 对流层或电离层折射影响过大
 - 通过残差图（残差中部分区间成系统性变化，但无周日特征）



受多路径效应或大气折射影响的残差图

改善基线质量的方法①

- 基线起点坐标不准确的应对方法

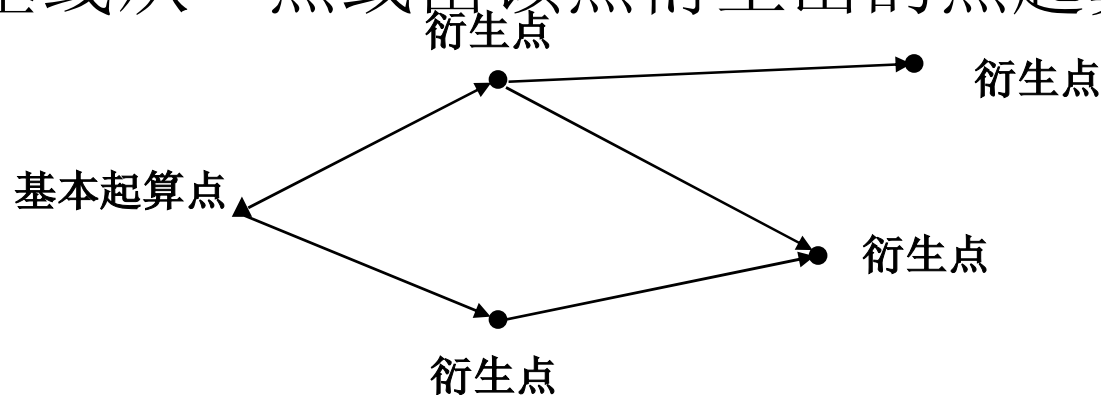
- 使用坐标精度高的点作为起算点

- 获取较为准确坐标的方法

- 与已知点（IGS跟踪站）联测（可获得分米级以上精度的地心坐标）

- 长时间单点定位（数小时单点定位，可获得米级精度的地心坐标）

- 所有基线从一点或由该点衍生出的点起算



改善基线质量的方法②

- 删卫星、截时段、改变截止高度角
 - 仅有个别卫星残差不正常时，可删卫星
 - 仅有个别时段观测值残差不正常时，可截时段
 - 当在卫星起落部分的观测值残差不正常时，可改变截止高度角

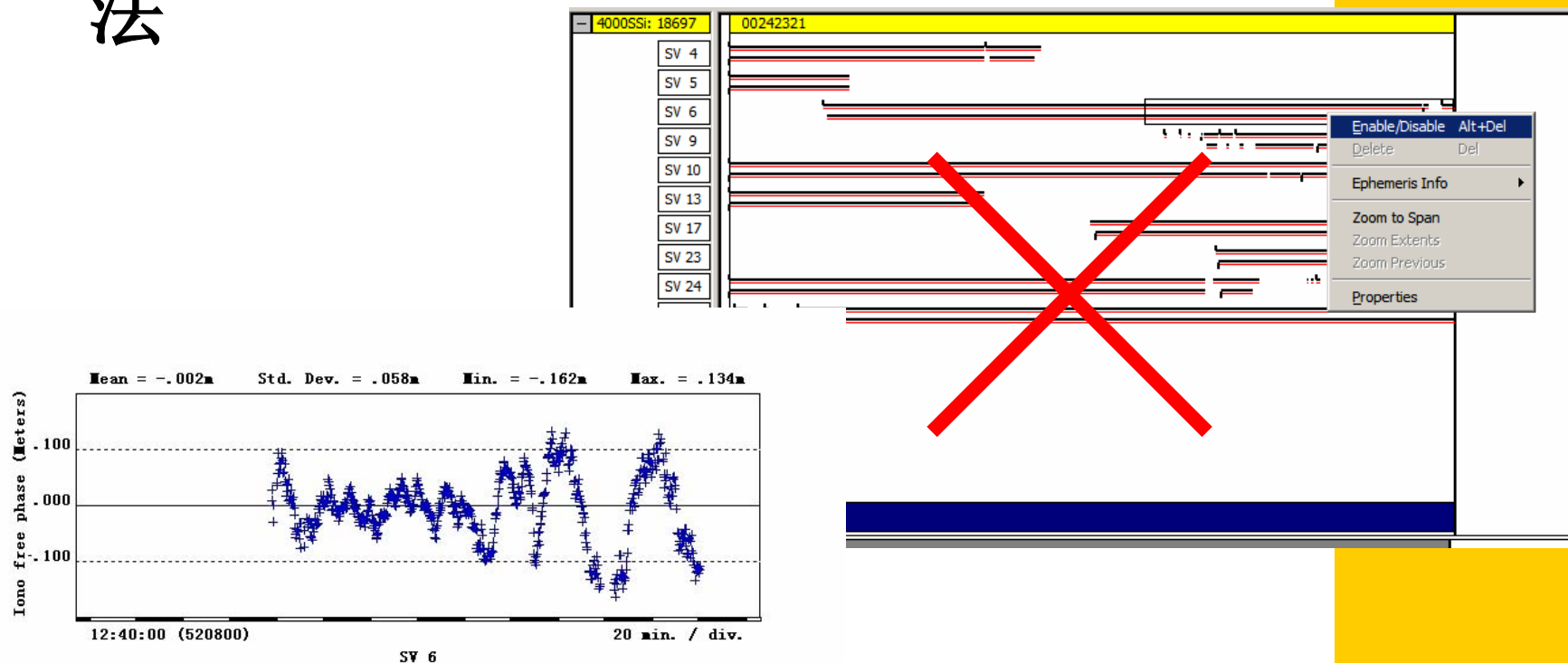
注意：以上方法都将减少有效的观测数据，从而减弱图形强度，一般不应大量地删除观测数据。

改善基线质量的方法③

- 改变其它控制参数
 - 数据删除标准 — 编辑因子
 - **RATIO**之阈值 — 取消此阈值，用户根据结果判定模糊度固定正确与否
 - 大气折射延迟改正方法或模型
 - 当**L2**相位为全波长时，可尽量采用**iono-free**组合消除电离层折射影响；当**L2**相位为半波长，对于短基线，可尝试仅使用**L1**单频数据处理
 - 对于对流层折射，可尝试不同的改正模型，以及天顶对流层延迟参数的估计方法（分段时间长度或随机过程的控制参数）
 - ...

基线精化处理的注意事项①

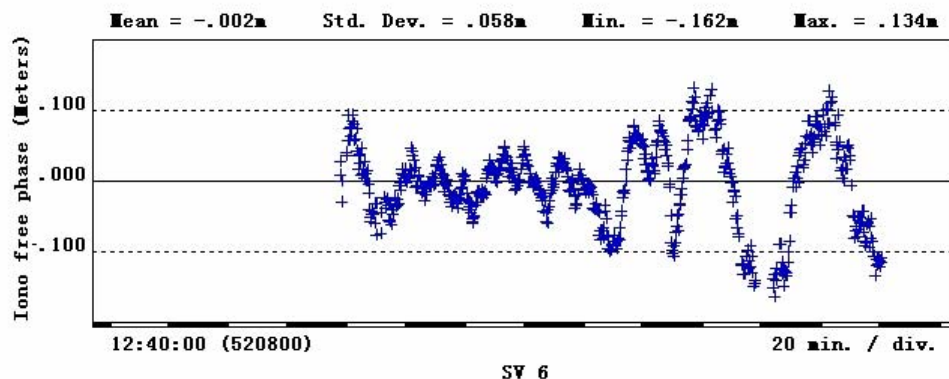
- 当观测值残差普遍较大，且具有一定系统性趋势时，不宜简单采用剔除观测值的方法



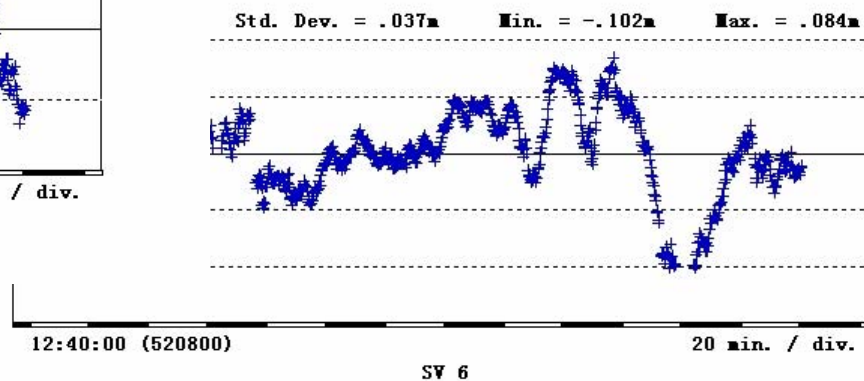
基线精化处理的注意事项②

- 采用iono-free观测值将改善残差的系统性分布趋势，但残差将会显著增大，究竟是否采用，应更具具体情况决定

Iono-free

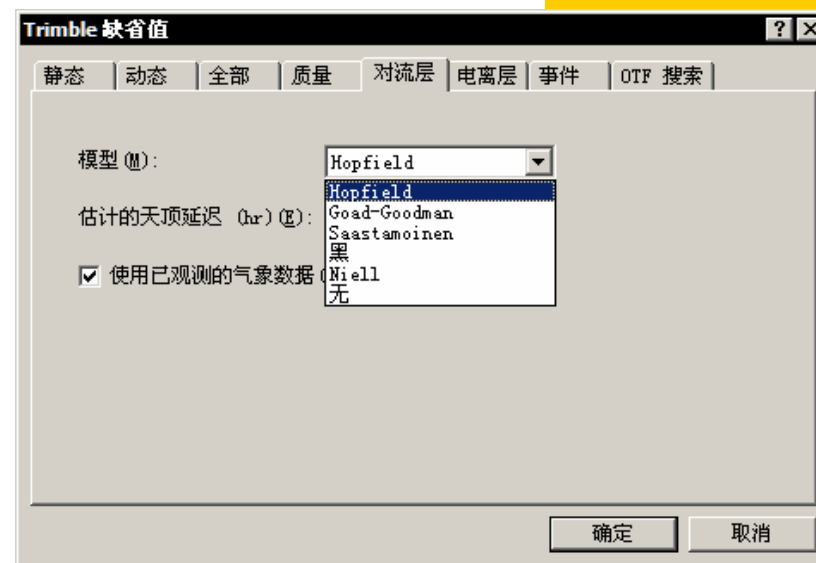


单频L1



基线精化处理的注意事项③

- 通常情况下，对流层折射延迟改正模型的差异不大，需根据实际处理结果来判定最终采用何种模型。
- 缩短天顶对流层估计的间隔将改善残差的系统性趋势，但不一定会改善成果，究竟是否采用，应更具具体情况决定



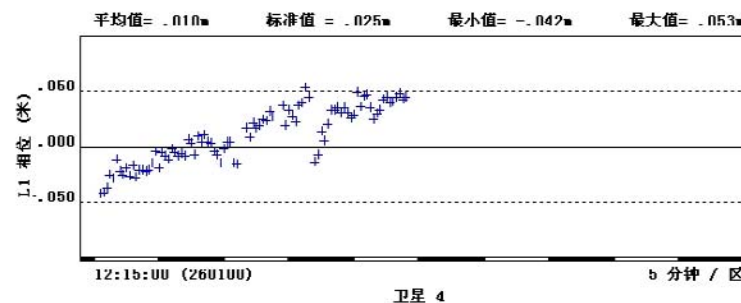
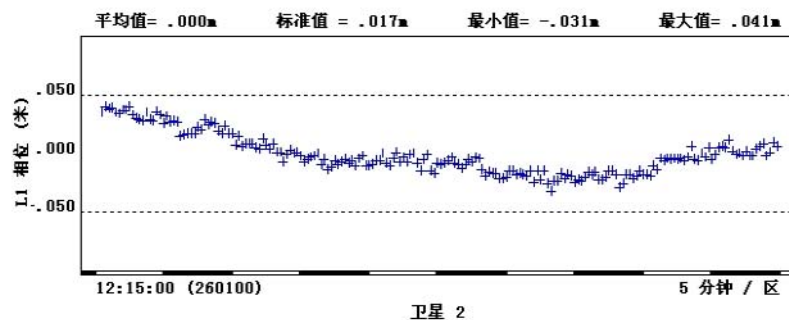
用户可选择基线解算时所采用的对流层折射延迟改正模型

基线精化处理的注意事项④

- 周跳较多时，应采用修复的方法；反之，则采用参数估计的方法
- 有时，浮动解要比固定解质量好

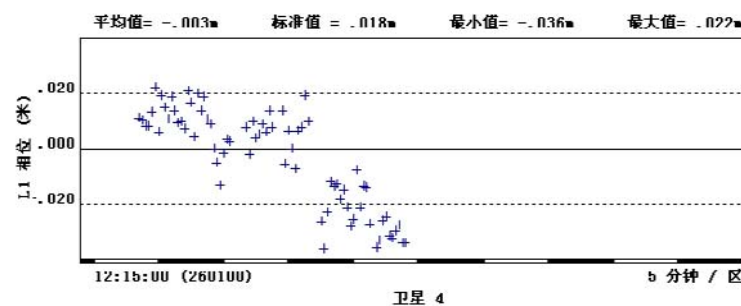
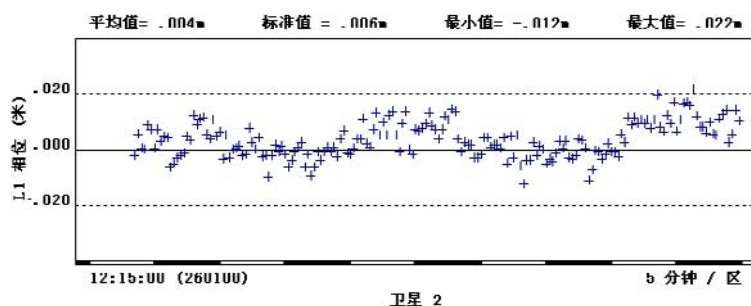
基线精化处理的注意事项⑤

- 若基线解算结果的观测值残差呈现出较强的系统性走势，通常表明模糊度未确定正确或周跳未被完全修复



基线精化处理的注意事项⑤

- 良好的基线解算结果，其观测值残差通常呈现出随机分布的特征





4 GPS网平差



4.1 概述

GPS网平差

- 观测值
 - 基线向量及其精度和误差相关信息（参见基线向量解）
- 结果
 - 待定点的坐标
 - 其它待定参数：尺度、旋转、运动速度
 - 各类精度指标：基线向量标准差，参数的精度及误差相关性，点位误差（椭圆）（绝对），基线误差（椭圆）（相对）
- 作用
 - 发现剔除粗差
 - 确定待定点坐标及其它参数（在指定基准下）
 - 精度评定

GPS网平差的类型①

- 无约束平差

- 特点

- 观测值全为GPS观测值；
 - 不引入起算数据或所引入的起算数据引起网的扭曲。

- 作用：

- 评定网的内符合精度，发现和剔除粗差
 - 得到各点在地心系（WGS-84/ITRF）系下经过了平差处理的三维空间坐标
 - 调整基线向量观测值的权

GPS网平差的类型②

- 约束平差

- 特点

- 观测值全为GPS观测值；
 - 所引入的起算数据将对网的形状产生影响。

- 作用

- 获取各点在地方坐标系下的坐标

GPS网平差的类型③

- 联合平差

- 特点

- 观测观测值除了GPS观测值已外，还包括其它常规几何观测值；
 - 所引入的起算数据将对网的形状产生影响。

- 作用

- 获取各点在地方坐标系下的坐标

构网基线的选取

- 基本原则
 - 独立基线构网
- 基线选取方法
 - 选取独立基线
 - 选取基线应构成闭合图形
 - 选取合格基线
 - 尽量选取短基线



4.2 网平差质量的评定

基线残差①

- 理论（统计）上的要求

$$|v_i| < \hat{\sigma}_0 \cdot \sqrt{q_i} \cdot t_{1-\alpha/2}$$

或

$$\frac{|v_i|}{\hat{\sigma}_0 \cdot \sqrt{q_i} \cdot t_{1-\alpha/2}} < 1 \text{ (标准化残差 } \frac{|v_i|}{\hat{\sigma}_0 \cdot \sqrt{q_i}} \text{)}$$

对于工程应用，本项统计检验结果仅供参考。

基线残差②

- 规范要求

12.5.4.2 无约束平差中,基线分量的改正数绝对值($V_{\Delta X}$ 、 $V_{\Delta Y}$ 、 $V_{\Delta Z}$)应满足下式:

$$\begin{aligned} V_{\Delta X} &\leq 3\sigma \\ V_{\Delta Y} &\leq 3\sigma \\ V_{\Delta Z} &\leq 3\sigma \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中: σ ——为相应级别规定的基线的精度。

否则,认为该基线或其附近的基线存在粗差,应在平差中采用软件提供的自动方法或人工方法剔除,直至上式满足。

12.5.5.3 约束平差中,基线分量的改正数与经过 12.5.4.2 粗差剔除后的无约束平差结果的同一基线相应改正数较差的绝对值($dV_{\Delta X}$ 、 $dV_{\Delta Y}$ 、 $dV_{\Delta Z}$)应满足下式

$$\begin{aligned} dV_{\Delta X} &\leq 2\sigma \\ dV_{\Delta Y} &\leq 2\sigma \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$dV_{\Delta Z} \leq 2\sigma$$

对于工程应用, 本项要求必须满足。

式中: σ ——为相应等级基线的规定精度。

否则,认为作为约束的已知坐标、已知距离、已知方位中存在一些误差较大的值应采用自动或人工的方法剔除这些误差较大的约束值,直至上式满足。

相邻点距离中误差

- 规范要求

5.3 各级 GPS 网相邻点间基线长度精度用下式表示,并按表 1 规定执行。

$$\sigma = \sqrt{a^2 + (b \cdot d \cdot 10^{-6})^2} \dots\dots\dots (1)$$

式中: σ ——标准差,mm;

a ——固定误差,mm;

b ——比例误差系数;

d ——相邻点间距离,mm

表 1 精度分级

级 别	固定误差 a ,mm	比例误差系数
AA	≤ 3	≤ 0.01
A	≤ 5	≤ 0.1
B	≤ 8	≤ 1
C	≤ 10	≤ 5
D	≤ 15	≤ 10
E	≤ 20	≤ 20

对于工程应用,本项要求必须满足。

起算点质量

- 方差因子检验（ χ^2 检验）
 - 检验约束平差的验后方差因子与无约束平差的验后方差因子是否一致。
- 检查点法

注意，对于工程应用，不要将 χ^2 检验是否通过作为网是否合格的指标。 χ^2 检验未通过通常可能由下列原因所引起：

无约束平差：

1. 给定了不适当的先验单位权方差；
2. 观测值之间的权比关系不合适；
3. 观测值中可能存在粗差。

约束平差：

起算数据与GPS网不相容。



4.3 网平差质量的改善

改善网平差质量的方法

- 改善基线的质量
- 删除粗差基线
- 降低劣质基线的权
- 选择合适的起算数据