

武汉大学测绘学院
2019–2020 学年度第二学期期末考试
《卫星导航原理》课程试卷（A 卷）参考答案

考试类型：开卷 满分：100 分 答题要求：公式清晰、步骤完整、要点准确

1. GPS 系统主要由哪几个部分组成？请简述各部分的主要作用。

答：GPS 系统主要由空间部分、地面控制部分和用户部分组成。

- (1) 空间部分由 GPS 卫星星座组成，主要作用是接收并存储导航电文，发射导航定位信号，并接收、执行地面控制指令。
- (2) 地面控制部分由主控站、监测站、注入站等组成。监测站采集卫星观测数据和气象信息；主控站统一管理地面监控系统，收集监测站数据，计算星历和钟差，编制导航电文并控制卫星；注入站将导航电文和控制指令注入卫星。
- (3) 用户部分由用户、接收机及辅助设备组成。接收机接收 GNSS 卫星信号，完成信号处理、观测量测定和导航、定位、测速、授时解算。

2. 北斗卫星导航系统的主要发展阶段有哪些？其与 GPS 有何明显的差别？

答：北斗卫星导航系统的发展可概括为三个阶段：北斗一号为试验/示范系统，主要提供区域服务；北斗二号为区域系统，服务范围扩展到中国及亚太地区；北斗三号为全球系统，可提供全球导航、定位和授时服务。

与 GPS 相比，北斗的明显差别主要有：第一，星座构型不同。GPS 主要采用 MEO 中圆轨道星座；北斗三号采用 MEO、IGSO、GEO 组合的混合轨道星座，既保证全球覆盖，又增强中国及亚太区域的可见性和连续性。第二，服务特色不同。北斗除 RNSS 导航定位授时外，还具有短报文通信、区域增强等特色服务。第三，技术特点不同。北斗三号重视星间链路，可进行星间测距、通信和星历自主更新，从而减少对全球均匀布设地面监测站的依赖。第四，建设主体不同。GPS 是美国建设的全球卫星导航系统，北斗是中国自主建设、独立运行的全球卫星导航系统。

3. GPS 卫星信号包括哪些信号分量？请绘制 GPS 现代化之前的信号生成结构图。

答：GPS 卫星信号由载波、测距码和导航电文三类基本分量组成。载波用于承载调制信号、高精度测距和多普勒测量；测距码用于测定卫星至接收机的传播时间并区分卫星；导航电文提供卫星星历、卫星钟差、电离层参数和卫星健康状态等信息。

GPS 基准频率为

$$f_0 = 10.23 \text{ MHz.}$$

现代化之前的主要载波为

$$L_1 = 154f_0 = 1575.42 \text{ MHz}, \quad L_2 = 120f_0 = 1227.60 \text{ MHz.}$$

C/A 码速率为 1.023 MHz，P 码速率为 10.23 MHz，导航电文速率为 50 bps。

信号生成结构可用文字表示为：

- 1) 10.23 MHz 频率源经倍频产生 L_1 、 L_2 载波；

- 2) 导航电文 $D(t)$ 与 C/A 码 $C/A(t)$ 模二和后, 采用 BPSK 调制到 L_1 ;
- 3) 导航电文 $D(t)$ 与 P 码 $P(t)$ 模二和后, 采用 BPSK 调制到 L_1 和 L_2 ;
- 4) L_1 包含 C/A 码通道和 P 码通道, L_2 包含 P 码通道; 两路射频信号合成后经卫星天线发射。

4. GNSS 伪距单点定位受到哪些主要误差源的影响? 简要列出各项误差的量级及应对方法。

答: 伪距单点定位观测方程可概括为

$$P = \rho + c(\delta t_r - \delta t_s) + I + T + \varepsilon,$$

其中, ρ 为几何距离, δt_r 为接收机钟差, δt_s 为卫星钟差, I 为电离层延迟, T 为对流层延迟, ε 为多路径、接收机噪声等其他误差。主要误差源如下表。

误差源	参考量级	常用应对方法
卫星钟差	未改正可较大; 广播钟改正后通常为米级以内到数米量级	利用导航电文钟差参数改正; 高精度时采用精密钟差; 相对定位可差分削弱或消除
卫星轨道误差	广播星历通常为米级; 精密星历可达厘米级或更好	采用广播星历或 IGS 精密星历; 相对定位中可通过差分削弱
相对论效应	不改正可形成米级影响, 椭圆轨道附加项可达约 6.9 m	采用模型改正: 星钟频率预调, 并在钟差模型中加入相对论修正项
电离层延迟	常为数米至十余米, 低高度角或电离层活跃时更大	单频用 Klobuchar 模型或差分改正; 双频用无电离层组合消除一阶项
对流层延迟	天顶约 2 m 以上, 低高度角可达十米级	采用对流层模型、映射函数、估计天顶延迟或差分削弱
接收机钟差	接收机钟稳定度低, 不估计会造成很大距离误差	单点定位中作为未知数估计; 相对定位中由差分消除
多路径与接收机噪声	分米级至数米, 环境差时更大	改善观测环境, 提高截止高度角, 采用抗多路径天线和数据质量控制

5. 对于双频 GNSS 观测数据, 通常用 MW 组合观测值和 GF 组合观测值(几何距离无关组合)相结合来探测修复周跳, 请简要说明其原因。

答: 周跳是载波相位整周计数发生突变。发生周跳后, 小数相位仍可正常观测, 但整周模糊度发生阶跃变化, 因而会影响后续所有载波相位观测。

MW 组合本质上是宽巷组合, 对宽巷模糊度变化敏感, 几何距离、卫星钟差、接收机钟差等公共项被消除或削弱, 适合发现较大的周跳。但 MW 组合含伪距观测, 噪声较大, 对小周跳不够敏感。

GF 组合为几何无关组合，可消除几何距离和钟差等项，对两频相位差中的模糊度变化敏感。短时间内电离层变化较平稳时，GF 组合有利于探测小周跳；但电离层活跃时容易误判或漏判。

因此，MW 组合和 GF 组合具有互补性。MW 组合提供宽巷模糊度变化约束，GF 组合提供两频相位差变化约束，二者联合可提高周跳探测的可靠性，并有利于确定 L_1 、 L_2 两个频率上的周跳整数值。

6. 在进行 GPS 伪距单点定位时,为什么需要至少观测四颗卫星?如果用户采用 GPS+BDS 双系统接收机进行组合伪距单点定位时, 至少需要多少颗卫星, 为什么?

答：单 GPS 伪距单点定位的未知数包括接收机三维坐标 X 、 Y 、 Z 和接收机钟差 δt_r ，共 4 个未知数。每颗卫星提供 1 个伪距观测方程，因此至少需要同步观测 4 颗 GPS 卫星。

GPS+BDS 双系统组合伪距单点定位时，除三维坐标外，还需考虑接收机钟差以及系统间时间偏差。若以 GPS 时间为基准，未知数可写为 X 、 Y 、 Z 、GPS 接收机钟差、BDS-GPS 系统间偏差，共 5 个未知数。

因此双系统组合定位通常至少需要 5 颗卫星，并且观测中应包含两个系统的卫星。若只使用同一系统卫星，则退化为单系统定位，至少需要 4 颗卫星。

7. 为什么用双频观测值可消除一阶电离层延迟误差? 请由双频测码伪距观测值 P_1 和 P_2 ，推导消除一阶电离层延迟误差影响的线性组合观测值。

答：电离层是色散介质，一阶电离层延迟与信号频率平方成反比。设双频伪距观测为

$$P_1 = \rho + c\delta t + T + I_1,$$

$$P_2 = \rho + c\delta t + T + I_2,$$

且

$$I_2 = \frac{f_1^2}{f_2^2} I_1.$$

构造线性组合

$$P_{IF} = aP_1 + bP_2.$$

为了保留几何项并消除一阶电离层项，应满足

$$a + b = 1, \quad aI_1 + bI_2 = 0.$$

代入 $I_2 = \frac{f_1^2}{f_2^2} I_1$ ，可得

$$a + b = 1, \quad a + b \frac{f_1^2}{f_2^2} = 0.$$

解得

$$a = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}, \quad b = -\frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}.$$

因此双频测码伪距无电离层组合为

$$P_{IF} = \frac{f_1^2 P_1 - f_2^2 P_2}{f_1^2 - f_2^2}.$$

该组合能够消除一阶电离层延迟，但会放大观测噪声，并改变组合观测量的统计特性。

8. GPS 伪距差分定位的基本原理是什么？区域差分技术和广域差分技术之间有何差别？

答：GPS 伪距差分定位的基本原理是：在坐标已知的基准站同步观测卫星伪距，基准站利用已知坐标和卫星星历计算几何距离，并与实测伪距比较，求得伪距改正数 PRC 及其变化率 RRC，再通过数据链播发给流动站。流动站用这些改正数修正自身伪距，从而削弱卫星钟差、轨道误差、电离层延迟、对流层延迟等空间相关误差。

单站差分将各种误差合成为一个伪距改正数，结构简单、实时性好，但有效距离有限，通常约 10–20 km，随基准站距离增大精度下降。

区域差分 LADGPS 在一定区域内布设多个基准站，根据用户位置内插或拟合差分改正数。其可靠性和作用范围优于单站差分，典型范围可达百公里量级；但通常仍以综合改正为主，误差分离能力有限。

广域差分 WADGPS 在大范围内布设较少但分布较均匀的基准站，由处理中心分离卫星轨道、卫星钟差和大气延迟等误差源，并向用户播发分项改正信息。其服务范围可达千公里量级，网内精度与距离关系较弱，但系统复杂，建设和维护成本较高。

9. 什么是网络 RTK 技术和 PPP 技术？并简述各自的优缺点。

答：网络 RTK 是由多个连续运行参考站组成区域参考站网，实时联合建模空间相关误差，并向流动站发送改正信息，使流动站进行载波相位差分定位的技术。常见实现形式包括 VRS、FKP、MAC 等。

网络 RTK 的优点是可削弱电离层、对流层和轨道误差的空间相关影响，扩大单基站 RTK 的有效作业范围，实时性强，模糊度固定后可达到厘米级精度。缺点是依赖参考站网和通信链路，建设维护成本较高，服务范围通常受区域网限制。

PPP 即精密单点定位，是不依赖本地基准站、使用单台接收机非差观测值，并引入精密星历、精密钟差等产品，估计测站坐标、接收机钟差、对流层延迟和非差模糊度等参数的定位技术。

PPP 的优点是单机作业，不受附近基准站距离限制，全球适用，点位精度较均匀，适合大范围或无基准站地区。缺点是需要精密产品，常规 PPP 收敛时间较长；受轨道钟差产品、对流层建模和模糊度固定能力影响，实时性和初始化速度通常不如 RTK。

10. 两台单频 GPS 接收机进行短距离的静态相对定位，同步观测 8 颗卫星，连续观测 360 个历元，期间没有发生周跳现象。请结合所学的相对定位和模糊度域内的模糊度解算等知识，简要阐述该静态相对定位得到固定解基线的基本处理步骤，并分析相对定位模型中双差观测值（含伪距与载波相位）的数量、需要估计的参数种类和数目。

答：固定解基线的基本处理步骤如下：第一，两台接收机同步观测，读取单频伪距和载波相位数据，并进行粗差和周跳检查。题设连续 360 个历元且无周跳，因此同一卫星的整周模糊度在全弧段保持常数。第二，选取高度角较高、连续性好、信号质量好的卫星作为基准星。第三，构造站间单差和星间双差观测值，消除卫星钟差和接收机钟差，短基线下进一步削弱电离层、对流层和轨道误差。第四，采用伪距和载波相位联合平差，先求浮点基线解、双差模糊度浮点解及其协方差。第五，在模糊度域内进行整数模糊度搜索与检验，例如 LAMBDA 方法。第六，模糊度固定后，将整数模糊度代回观测方程重

新平差，得到固定解基线向量。

观测值数量：同步观测 8 颗卫星，选 1 颗为基准星，每个历元可形成 $8 - 1 = 7$ 个独立双差。单频条件下，每个历元有 7 个双差伪距观测值和 7 个双差载波相位观测值。连续 360 个历元，双差伪距观测值数量为

$$7 \times 360 = 2520,$$

双差载波相位观测值数量为

$$7 \times 360 = 2520,$$

合计

$$2520 + 2520 = 5040$$

个双差观测值。

需要估计的参数：短距离静态相对定位中，主要未知参数为静态基线向量 3 个分量，以及 7 个单频双差整周模糊度参数。卫星钟差和接收机钟差由双差消除；短基线下电离层、对流层和轨道残差通常被削弱或近似忽略。因此主要待估参数总数为

$$3 + 7 = 10.$$

若采用更严密模型，也可附加估计残余大气参数，但本题按短基线静态固定解模型通常不作为主要未知数。