

XH

羲和系统技术规范

XH/T 2101-2013

GNSS 广域实时精密定位数据处理 技术规范

Specification for Wide Area Real-time Precise Satellite
Navigation and Positioning Data Processing

(V1.0)

导航与位置服务科技专项总体专家组
地球观测与导航技术领域导航主题专家组 发布

目 次

前 言.....	III
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语、定义和缩略语.....	1
3.1 术语和定义.....	1
3.2 缩略语.....	4
4 参考框架.....	4
4.1 时间系统.....	4
4.2 坐标系统.....	4
4.2.1 惯性系.....	5
4.2.2 地固系.....	5
4.2.3 地固系转惯性系.....	5
5 数据处理准则.....	5
5.1 概述.....	5
5.2 功能与流程.....	5
5.3 观测量选取.....	6
5.4 数据预处理.....	6
5.5 导航卫星实时精密轨道处理.....	7
5.5.1 处理流程.....	7
5.5.2 参数设置.....	7
5.5.3 误差与动力学模型.....	8
5.5.4 处理结果.....	9
5.5.5 产品生成.....	9
5.6 导航卫星实时精密钟差处理.....	9
5.6.1 处理流程.....	9
5.6.2 参数设置.....	10
5.6.3 误差模型.....	10
5.6.4 处理结果.....	10

5.6.5 产品生成	10
5.7 区域实时电离层处理	10
5.7.1 处理流程	11
5.7.2 参数设置	11
5.7.3 电离层模型	12
5.7.4 结果输出	12
5.7.5 产品生成	12
5.8 未校正的相位硬件延迟	13
5.8.1 处理流程	13
5.8.2 参数设置	13
5.8.3 误差模型	14
5.8.4 处理结果	14
5.8.5 产品生成	14
6 观测误差与动力学模型	14
6.1 观测误差模型改正	14
6.2 动力学模型	15
7 处理性能指标	15
附录 A.....	17
附录 B.....	19
附录 C.....	25
附录 D.....	30

前 言

本规范是羲和系统技术规范之一,对羲和系统广域实时精密定位数据处理技术规范作约定。

本规范主要起草单位: 武汉大学卫星导航定位技术研究中心。

本规范主要起草人: 施闯, 楼益栋, 唐卫明, 王潇, 张硕。

GNSS 广域实时精密定位数据处理技术规范

1 范围

本规范规定了羲和系统广域实时精密定位处理中心高精度数据处理所涉及到的相关参考框架、输入观测量、误差改正及生成产指标,并给出了数据处理的基本处理方法、改正模型、参数选用。本文档适用于羲和系统 GNSS 广域实时精密定位数据处理中心日常产品处理。

2 规范性引用文件

下列文件对于本规范的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

(1) 全球定位系统(GPS)术语及定义, The terms and definition related to global positioning system(GPS), 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2003-11-19, GB/T 19391-2003

(2) Dennis D. McCarthy, Gerarrd Petit (eds), 2003, IERS Conventions(2003), IERS Technical Note No.32

3 术语、定义和缩略语

3.1 术语和定义

以下术语和定义适用于本文件。

3.1.1

WGS84 坐标系 WGS84 coordinates system

由美国国防部在与 WGS72 相应的精密星历系统 NSWC-9Z-2 基础上,采用 1980 大地参考系和 BIH1984.0 系统定向所建立的一种地心参考系

3.1.2

2000 国家大地坐标 CGCS2000

2000 大地坐标系是全球地心坐标系在我国的具体体现,其原点为包括海洋和大气的整个地球的质量中心。Z 轴指向 BIH1984.0 定义的协议极地方向(BIH 国际时间局),X 轴指向 BIH1984.0 定义的零子午面与协议赤道的交点,Y 轴按右手坐标系确定。

3.1.3

世界时 universal time (UT)

世界时是非常近似地符合于在本初子午线上观测太阳周日平均运动的一种时间测量。

3.1.4

协调世界时 universal time coordinated (UTC)

以世界时作为时间初始基准，以原子时作为时间单元(s)基础的标准时间。

3.1.5

历元 Epoch

指一个时期和一个事件的起始时刻或者表示某个测量系统的参考日期。

3.1.6

载波相位平滑 carrier phase smoothing

在 GPS 接收机中利用积分载波相位测量值来平滑较低精度的伪距，以减小由码相位跟踪噪声造成的误差的方法。

3.1.7

非差载波相位观测方程 undifferenced carrier phase observation equation

载波相位观测值是接收机(天线)和卫星位置的函数，只有得到了它们之间的函数关系，才能从观测值中求解接收机(或卫星)的位置。这个函数关系式就是波相位观测方程，没有进行求差的波相位观测方程就是非差载波相位观测方程。

3.1.8

非差无电离层组合观测值 ionosphere-free combination observation

不同频率的非差载波相位观测值之间的一种线性组合，这种线性组合观测值不受电离层延迟的影响。

3.1.9

GNSS 卫星钟偏差 GNSS clock bias

单颗 GNSS 卫星钟的时间与 GNSS 系统时间之差。

3.1.10

周跳 cycles slips

在 GPS 接收机进行载波相位跟踪时，因某种原因产生的整数载波跳变。

3.1.11

模糊度 ambiguity

当一个接收机对卫星进行连续观测，为重建载波相位的伪距观测值，其中所包含的待解未知整周数，称为整周模糊度。

3.1.12

GPS 天线相位中心 GPS antenna phase center

指 GPS 天线的电气中心。

3.1.13

天线高 antenna height

观测时接收机天线相位中心至测站中心标志面的高度。

3.1.14

组合观测值 combinative observation

由原始载波相位观测值通过一定的数学运算得到的观测值。

3.1.15

星历误差 ephemeris error

通过轨道数据计算出的卫星位置与实际位置之差。

3.1.16

卫星钟误差 satellite clock error

通过卫星数据计算出的卫星钟时间与实际卫星钟时间的差异。

3.1.17

相位未校准硬件延迟 uncalibrated phase delays

信号在卫星和接收机通道中传播有一定的时间延迟,伪距和载波相位都受到硬件延迟偏差的影响,另外,卫星和接收机基准振荡器的初始相位与零相位存在一个初始相位偏差,载波相位还受到初始相位偏差的影响。由于初始相位偏差与硬件延迟偏差难以分离,通常将相位硬件延迟与初始相位偏差统称为相位未校准硬件延迟。

3.1.18

相位未校准硬件延迟小数的部分 Fractional-cycle biases

由于卫星端和接收机端初始相位偏差以及硬件延迟偏差与整周模糊度参数难以分离,使得非差窄波相位观测方程中的模糊度参数为实数值。非差模糊度由一个整数模糊度和一个由于接收机和卫星端硬件延迟偏差与初始相位偏差引起的小数部分组成。

3.1.19

协议惯性坐标系 Conventional inerial system

选择某一时刻作为标准历元,并将此刻地球的瞬时自转轴(指向北极)和地心至瞬时春分点的方向,经过瞬时的岁差和章动改正后,分别作为 z 轴和 x 轴的指向。由此所构成的空

间固定坐标系，为所取标准历元 t_0 平天球坐标系，也称协议惯性坐标系（Conventional inertial system，简称 CIS），天体以及 GPS 卫星等的星历通常都是在该系统中表示。国际大地测量学协会（IAC）和国际天文学联合会（IAU）决定，从 1984 年 1 月 1 日后启用的协议坐标系，其坐标轴的至指向，是以 2000 年 1 月 15 日 TDB（太阳质心力学时）为标准历元（标以 J2000.0）的赤道和春分点定义的。

3.2 缩略语

以下缩略语适用于本文件。

GPS，全球定位系统（Global Positioning System）。

GNSS，全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System）。

GPST，GPS 时间系统（Global Positioning System Time）。

EOP，地球自转参数（earth orientation parameter）。

GMF，全球投影函数（Global Mapping Function）。

MW，Melbourne-Wübbena。

UPD，相位为校准硬件延迟（Uncalibrated Phase Delays）。

FCBs，相位未校准硬件延迟的小数部分（Fractional-cycle biases）。

SSL，标准海平面气温气压模型（Standard Sea Level）。

IERS，国际地球自转服务（International Earth Rotation Service）。

JPL，喷气推进实验室（Jet Propulsion Laboratory）。

IAU，国际天文学联合会（International Astronomical Union）。

EGM，全球超高阶地球重力场模型（Earth Gravitational Model）。

4 参考框架

4.1 时间系统

采用北斗时间系统 BDT 或 GPS 时间系统 GPST。

4.2 坐标系统

处理过程将依据要求采用惯性系与地固系坐标系统，本规范做以下规定：

4.2.1 惯性系

采用协议惯性坐标系，建议采用参考历元时间为 J2000。

4.2.2 地固系

采用的参考框架为 ITRF 框架（参见附录 A.1）。可采用的坐标包括 WGS-84 大地坐标系（参见附录 A.2）、1980 西安坐标系（参见附录 A.3）、1954 年北京坐标系（参见附录 A.4）。

4.2.3 地固系转惯性系

本规范规定地固系与惯性系之间转换所用的岁差、章动，应按照 IAU2000 岁差、章动理论处理；所用的先验地球定向参数（EOP）根据 IERS 公告 A 获得。

5 数据处理准则

5.1 概述

广域实时精密定位数据处理以 GNSS 载波/伪距双频或三频观测量为基本观测量，采用实时非差处理模式实现。处理过程中最大化精确考虑各项误差改正，生成矢量化改正信息，包括卫星轨道、卫星钟差、区域电离层、未校正的相位硬件延迟改正量。

5.2 功能与流程

本规范规定了 GNSS 广域实时精密定位数据处理所需的处理功能与流程，处理功能包括：

- a) 数据预处理
- b) GNSS 卫星实时精密轨道处理
- c) GNSS 卫星实时精密钟差处理
- d) GNSS 卫星伪距硬件延迟处理
- e) GNSS 卫星相位硬件延迟处理
- f) 区域电离层实时改正处理

数据处理整体流程如图 1 所示。



图 1 广域实时精密定位处理流程

5.3 观测量选取

本规范规定广域实时精密定位数据处理的观测量为基准站网传输到数据中心的实时数据流。观测量选取应遵照以下规定：

(1) 观测数据类型

GNSS 双频/三频伪距和\波相位观测值。

(2) 采样率

采用 1 秒或更高采样率。

(3) 数据完整性

选取的基准站数据完整性应在 99.9%以上，并且选取的实时实测历元观测值完整性应在 100%。

(4) 基准站数据时效性

选取的观测数据延迟时间应小于 2 秒。

(5) 截止高度角

截止高度角可自行设定。

(6) 码观测值

根据接收机的类型，如果是交叉相关接收机，利用去相关处理，将 C1/C2 码观测值改正为 P1/P2 观测值。

5.4 数据预处理

本规范规定了广域实时精密定位数据预处理应具备的处理功能，包括：

- a) 数据完整率统计。
- b) 数据延迟时间统计。
- c) 接收机钟跳探测与修复。

- d) 伪距与载波粗差剔除。
- e) 载波周跳探测与标记。
- f) 伪距码相关处理。

5.5 导航卫星实时精密轨道处理

导航卫星实时精密轨道处理应采用非差无电离层组合观测值及数学模型,处理获得健康卫星的实时三维位置信息。处理包括(1)卫星轨道初始位置信息与动力学参数短弧段处理更新;(2)通过高精度数值积分方法获取离散的对应历元的卫星三维位置。本规范规定了处理过程中的待估参数、误差与动力学模型、结果输出以及实时产品,并给出处理方法参考。

5.5.1 处理流程

导航卫星实时精密轨道处理流程,参考图2。

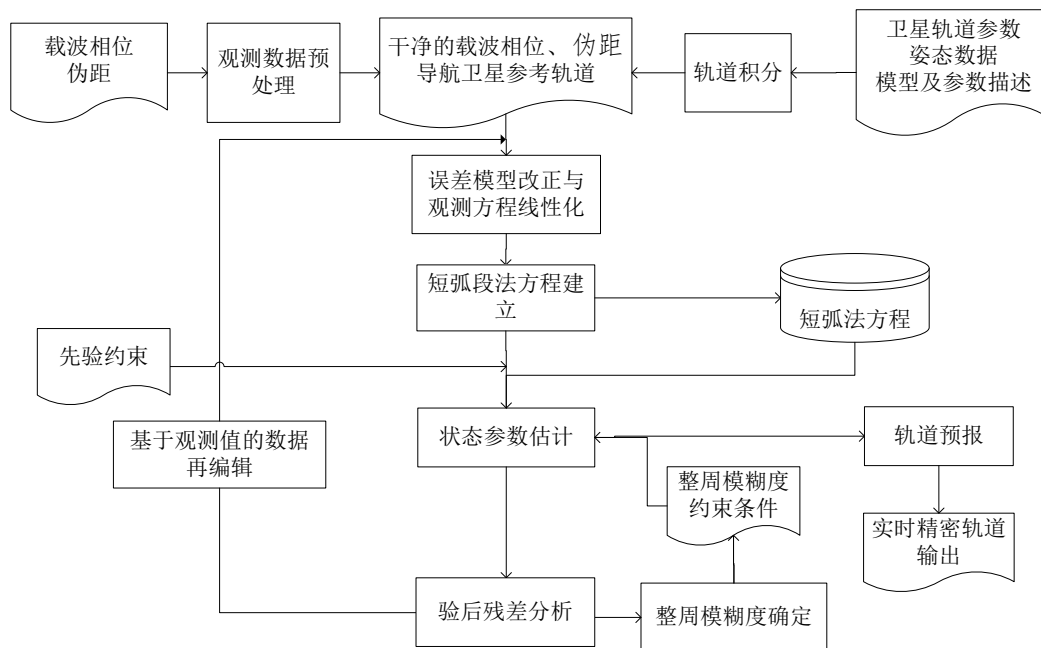


图 2 导航卫星实时精密定轨处理流程图

5.5.2 参数设置

导航卫星精密轨道处理中应包含以下待估参数,如表1所示。

表 1 导航卫星实时精密轨道处理参数设置

参数	处理模式	处理方法建议
测站坐标	静态估计	周解更新,并转换到 ITRF 框架下
卫星钟差	随机白噪声处理	单历元处理

接收机钟差	随机白噪声处理	单历元处理
卫星运动状态参数	短弧度常参数估计	参考历元时刻的卫星初始位置参数和速度参数
太阳光压模型参数	模型改正+经验力参数	估计 BERNE 光压模型 5 参数, 包括 D、Y、B 方向的常系数及 B 方向的两个周期项系数。
对流层延迟	模型改正+随机游走估计	a) 天顶对流层延迟, 每个测站每小时估计一个天顶对流层延迟参数。 b) 水平梯度, 每 24 小时估计一个北方向和东方向的对流层水平梯度参数。
非差模糊度	固定解	双差模糊度固定解作为虚拟观测值引入。
地球自转参数	常参数估计	每天估计地球自转参数 (X、Y 方向的极移和 UT1-UTC) 及其变化率

5.5.3 误差与动力学模型

本规范规定导航卫星实时精密轨道处理过程中应改正的观测误差模型与动力学模型。观测误差改正参见 6.1 节 WC01 至 WC06 项。摄动力应考虑地球非球体引力位摄动、N 体摄动、因日月引力引起的地球固体潮摄动及海潮摄动、大气潮摄动、地球自转形变摄动、因相对论效应引起的摄动等。非保守摄动力包括: 太阳直射辐射压摄动。图 3 给出处理过程中需要考虑的摄动力, 动力学模型参加表 7。

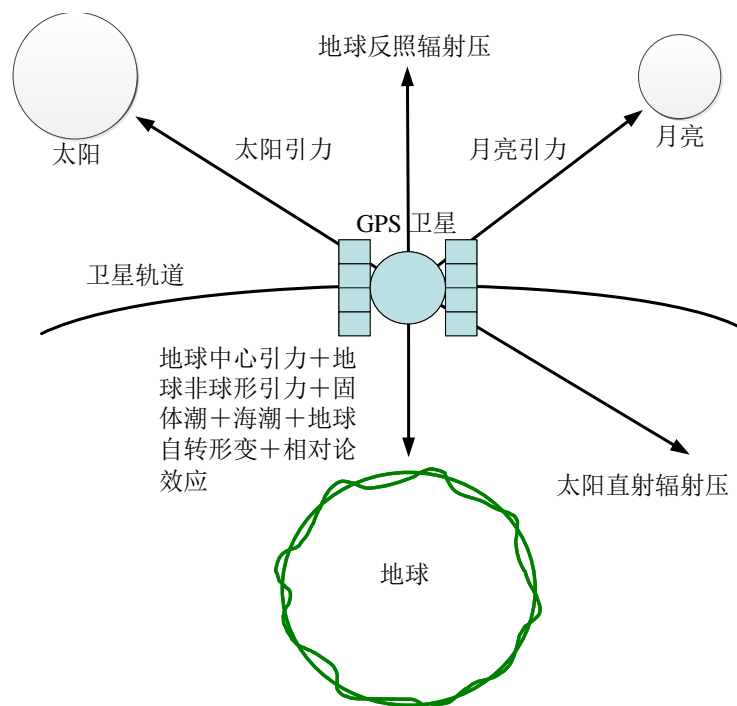


图 3 导航卫星摄动力

5.5.4 处理结果

导航卫星实时精密轨道处理结果输出应包含：

- a) 估计的参数（参见 5.5.1 节）
- b) 估计参数的精度信息
- c) 观测值残差
- d) 卫星观测时段信息
- e) 各测站的星座分布信息（高度角、方位角、DOP）

5.5.5 产品生成

轨道产品应为地固系下每一历元时刻的三维位置坐标以及与广播星历卫星之间的改正值。更新时间 30 秒。

5.6 导航卫星实时精密钟差处理

导航卫星实时精密钟差处理应采用非差无电离层组合观测值及数学模型，获得健康卫星的实时卫星钟差，与轨道处理采用两个独立的进程完成。实时卫星钟差处理采用实时滤波方式进行 1 秒更新的处理，获取每个观测历元的卫星钟差，处理耗时须小于 1 秒。本规范规定了处理过程中的待估参数、误差模型、结果输出以及实时产品，并给出处理方法参考。

5.6.1 处理流程

导航卫星实时精密钟差处理流程，参考下图 4 所示。

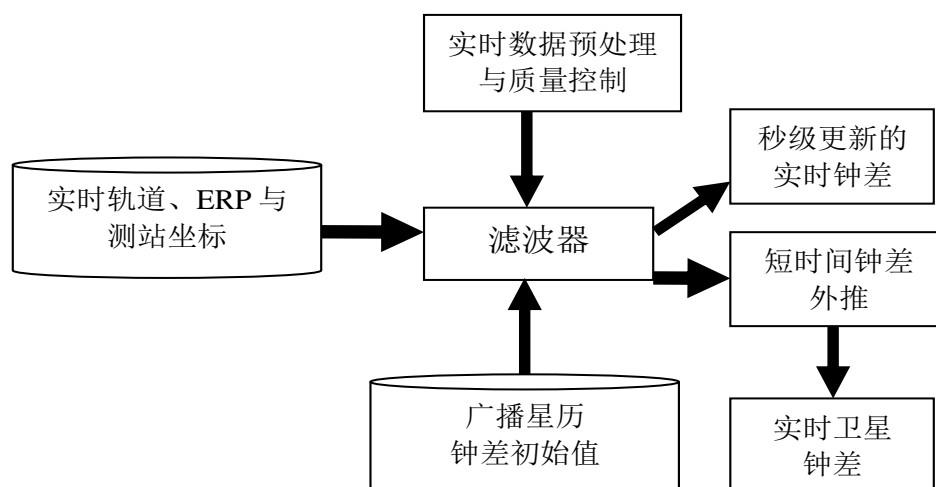


图 4 导航卫星实时精密钟差处理流程图

5.6.2 参数设置

表 2 导航卫星实时精密钟差处理参数设置

参数	处理模式	处理方法建议
测站坐标	固定	约束到 ITRF 框架下，建议采用 IGS08.snrx 文件固定测站坐标
卫星钟差	随机白噪声处理	单历元处理
接收机钟差	随机白噪声处理	单历元处理
对流层延迟	模型改正+随机游走估计	a) 天顶对流层延迟，每个测站每小时估计一个天顶对流层延迟参数。 b) 水平梯度，每 24 小时估计一个北方向和东方向的对流层水平梯度参数。
非差模糊度	固定或消除	建议历元间差分方法消除。

5.6.3 误差模型

观测误差改正参见 6.1 节 表 6 中 WC01 至 WC06 项。

5.6.4 处理结果

导航卫星实时精密钟差处理结果输出应包含：

- a) 估计的参数（参见 5.6.1 节）
- b) 估计参数的精度信息
- c) 观测值残差
- d) 卫星观测时段信息
- e) 各测站的星座分布信息（高度角、方位角、DOP）
- f) 基准钟的钟差信息

5.6.5 产品生成

卫星钟差产品为实时精密钟差与对应时刻由广播星钟差计算的钟差之间的改正值，每秒更新一次。

5.7 区域实时电离层处理

区域实时电离层处理采用双频/三频伪距/载波观测量，采用载波相位平滑伪距和非差无

几何观测值 P4/L4 及数学模型，进行电离层延迟信息的提取，实现区域电离层延迟实时模型化，可生成格网点垂直电离层延迟信息。

5.7.1 处理流程

区域实时电离层处理流程，参考下图 5 所示。

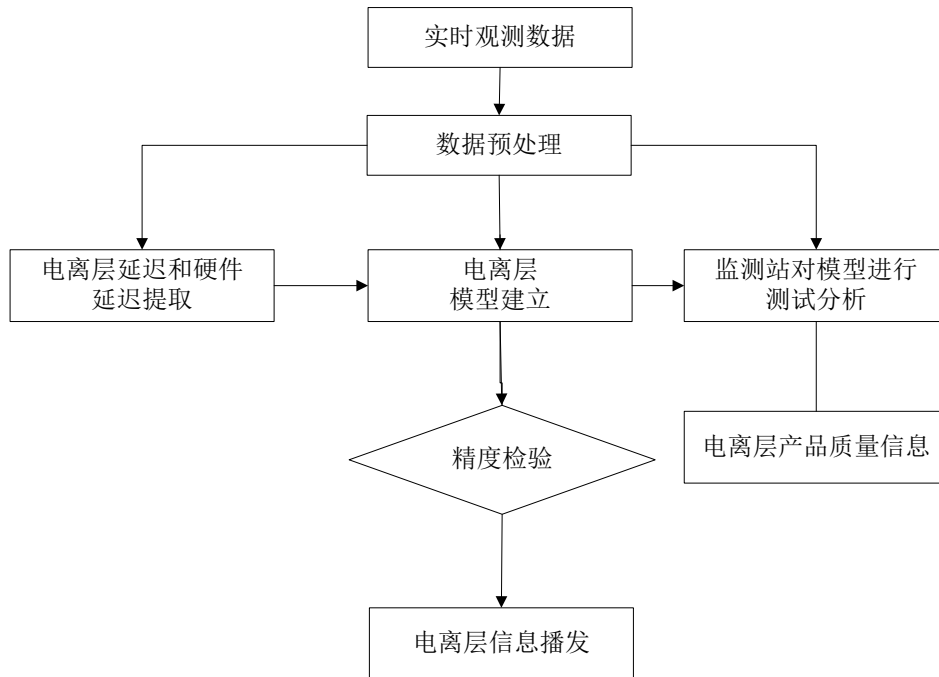


图 5 区域电离层处理流程图

5.7.2 参数设置

对于全球电离层延迟模型化及硬件延迟处理，应包含以下待估参数，如下表 3 所示。

表 3 全球实时电离层及硬件延迟处理参数设置

参数	处理模式	处理方法建议
模糊度参数	载波相位平滑伪距	采用载波相位平滑伪距和非差无几何观测求解 L4 组合模糊度
球谐模型系数	分段线性估计	分段线性估计中加入时段相关性约束，采用 15 阶的球谐函数，一天分为 12 个时段。
硬件延迟偏差	卫星硬件延迟偏差重心基准约束	加入所有观测到卫星硬件延迟偏差 DCB 之和为零的基准约束，每个接收机估计一个硬件延迟偏差参数，每颗卫星估计

		一个硬件延迟偏差参数。
--	--	-------------

对于区域电离层延迟模型化处理，应包含以下待估参数，如下表 4 所示：

表 4 区域实时电离层处理参数设置

参数	处理模式	处理方法建议
模糊度参数	载波相位平滑伪距	采用载波相位平滑伪距和非差无几何观测求解 L4 组合模糊度
模型系数	最小二乘估计	模型化过程中整体估计
硬件延迟偏差	卫星 DCB 采用全球电离层球谐模型结果，区域测站接收机 DCB 需要分离得到	利用全球电离层球谐模型系数和卫星 DCB 分离区域测站接收机 DCB

5.7.3 电离层模型

a) 球冠谐模型、低阶球谐函数模型和多项式模型

球冠谐函数模型建议取 8 阶 6 次，低阶球谐函数模型建议取到 5 阶次，多项式模型建议取到 8 阶次。由于多项式模型存在边际效应，因此，球冠谐函数和低阶球谐函数比多项式模型改正效果好。根据实际情况可选择不同的区域模型对中国区域电离层延迟进行建模。

b) 电离层投影函数和高度

采用单层电离层模型，投影函数为改进的单层投影函数 MSLM，电离层高度设为 450km。

5.7.4 结果输出

区域实时电离层处理结果输出应包含：

- a) 估计的参数（参见 5.7.1 节）
- b) 估计参数的精度信息
- c) 观测值残差

5.7.5 产品生成

利用估计得到的球谐函数模型，按照 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 的格网，每 5 分钟内插出各个格网点上的电离层延迟。

5.8 未校正的相位硬件延迟

未校正的相位硬件延迟（FCB）处理，通过直接估计导致模糊度非整数特性的每颗卫星 FCB，实现 PPP 的模糊度固定。FCB 处理应在固定处理系统获取的实时轨道与钟差产品基础上，对每颗卫星不同频率观测值的 FCB 进行估计，以保持轨道、钟差与 FCB 的自洽。FCB 结果可以表达为宽巷、窄巷，也可以表达为每一个频率的观测值改正值。

5.8.1 处理流程

未校正的相位硬件延迟处理流程，参考下图 6 所示。

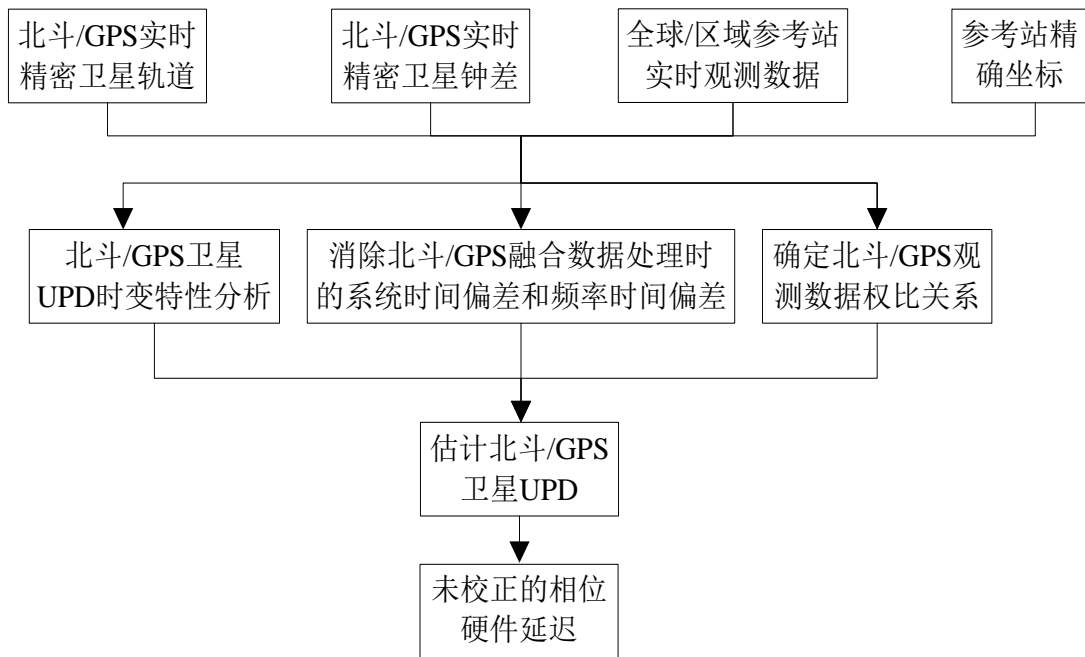


图 6 未校正的相位硬件延迟处理流程

5.8.2 参数设置

表 5 未校正的相位硬件延迟处理参数设置

参数	处理模式	处理方法建议
测站坐标	固定	约束到 ITRF 框架下，建议采用 IGS08. snx 文件固定测站坐标
卫星轨道	固定	固定为处理系统提供的实时轨道
卫星钟差	固定	固定为处理系统提供的实时钟差
接收机钟差	随机白噪声处理	单历元处理
对流层延迟	模型改正+随机游走估计	c) 天顶对流层延迟，每个测站每小时估计一个天顶对

		流层延迟参数。 d) 水平梯度,每 24 小时估计一个北方向和东方向的对流层水平梯度参数。
模糊度	浮点解+固定	解算各个测站每颗卫星的非差无电离层相位组合观测值与宽巷组合观测值的浮点模糊度参数
未校正的相位 硬件延迟(FCB)	分段估计	分段估计宽巷模糊度的 FCB 与窄巷 FCB, 或者不同频率观测值 FCB。

5.8.3 误差模型

观测误差改正参见 6.1 节 表 6 中 WC01 至 WC06 项。

5.8.4 处理结果

未校正的相位硬件延迟处理结果输出应包含:

- a) 估计的参数 (参见 5.8.1 节)
- b) 估计参数的精度信息
- c) 观测值残差
- d) 卫星观测时段信息
- e) 各测站的星座分布信息 (高度角、方位角、DOP)
- f) 模糊度固定成功率

5.8.5 产品生成

未校正相位硬件延迟产品包括两类: 宽巷 FCB 与窄巷 FCB, L1 波段 FCB 与 L2 波段 FCB (第三频产品为保留项)。更新时间: 宽巷 FCB 每 2 小时一组, 窄巷 FCB 每 15 分钟一组; L1 波段 FCB 与 L2 波段 FCB 每 15 分钟一组。

6 观测误差与动力学模型

广域实时精密定位数据处理包括的误差模型及改正包括观测误差模型与动力学模型改正两部分, 本规范给出了应用到的改正项及改正方法参考, 如下:

6.1 观测误差模型改正

下表 6 给出 GNSS 观测误差改正项。

表 6 观测误差模型改正

改正项编号	观测误差改正项描述	改正方法
WC01	天线相位中心改正	具体方法可参考附录 B. 2
WC02	相对论效应改正	具体方法可参考附录 B. 3
WC03	天线标石中心改正	具体方法可参考附录 B. 5
WC04	对流层延迟改正	具体方法可参考附录 B. 6
WC05	地球自转改正	具体方法可参考附录 B. 7
WC06	潮汐项改正	进行固体潮改正与海洋潮汐改正，具体方法可参考附录 B. 8, B. 9

6.2 动力学模型

下表 7 给出 GNSS 卫星精密定轨动力学模型。

表 7 动力学模型

改正项编号	模型描述	备注
DLX01	重力场	建议采用 EGM2008 12 阶 (+C21, S21)
DLX02	地球固体潮	建议 IERS 2003 规定模型，可参考附录 C. 1。
DLX03	海洋潮	建议 IERS 2003 规定模型，可参考附录 C. 2。
DLX04	三体引力	建议考虑太阳、月亮、水星、金星、火星、木星、土星、天王星、海王星和冥王星（均视为质点）对卫星参数的摄动力，具体计算方法可参考附录 C. 3。
DLX05	太阳光压力	建议采用 BERN 5 参数模型，考虑地影、月影的影响，详见附录 C. 4。
DLX06	相对论效应	动力学修正建议采用 IERS 2003 规定模型，参见 IERS 2003 协议 10.12。引力时间延迟效应，参见 IERS 2003 协议 11.17。

7 处理性能指标

表 8 广域实时精密定位处理性能指标

性能项	类别	最低指标要求	备注
-----	----	--------	----

实时轨道精度	GPS	10cm	三维平均精度
	GLONASS	20cm	三维平均精度
	北斗	20cm	径向精度
实时轨道更新时间	GPS	2 小时/30 秒	处理弧段更新时间 2 小时，产品更新时间 30 秒
	GLONASS	2 小时/30 秒	处理弧段更新时间 2 小时，产品更新时间 30 秒
	北斗	2 小时/30 秒	处理弧段更新时间 2 小时，产品更新时间 30 秒
实时钟差精度	GPS	0.3ns	/
	GLONASS	0.3ns	/
	北斗	0.3ns	/
实时钟差更新时间	GPS	1 秒/1 秒	处理间隔与产品更新时间 1 秒
	GLONASS	1 秒/1 秒	处理间隔与产品更新时间 1 秒
	北斗	1 秒/1 秒	处理间隔与产品更新时间 1 秒
区域电离层精度	/	0.5m	电离层活动异常除外
区域电离层更新时间	/	5 分钟/30 秒	处理更新时间 5 分钟，产品更新时间 30 秒
FCB 精度	/	0.1 周	/
FCB 更新时间	/	15 分钟/30 分钟	处理更新时间 15 分钟，产品更新时间 30 秒

附录 A

(资料性附录)

坐标时间系统

A.1 ITRF 实现

由一组 IERS 测站的站坐标、站坐标的年变化率以及相应的地球定向参数 EOP 来实现的。

ITRF 具体定义为：

- 1) 坐标原点位于包括海洋和大气层在内的地球的质量中心；
- 2) 尺度为广义相对论意义下的局部地球框架内的尺度；
- 3) 坐标轴的指向是由 BHI 1984.0 来确定的；
- 4) 坐标轴指向随时间的变化应满足“地壳无整体旋转”这一条件。

A.2 WGS-84 大地坐标系

1) 地球椭球基本参数

长半径 $a=6378137\text{m}$

地球引力常数 (含大气层) $GM=3986005 \times 10^8 \text{m}^3 \text{s}^{-2}$

正常化二阶带谐系数 $C_{2,0}=-484.16685 \times 10^{-6}$

地球自转角速度 $\omega=7292115 \times 10^{-11} \text{rads}^{-1}$

2) 主要几何和物理常数

短半径 $b=6356752.3142\text{m}$

扁率 $a=1/298.257223563$

第一偏心率平方 $e^2=0.00669437999013$

第二偏心率平方 $e^2=0.006739496742227$

椭球正常重力位 $u_0=62636860.8497 \text{m}^2 \text{s}^{-2}$

赤道正常重力 $g_e=9.9703267714 \text{ms}^{-2}$

A.3 2000 国家大地坐标系

长半轴 $a=6378137\text{m}$

扁率 $f=1/298.257222101$

地心引力常数 $GM=3.986004418 \times 10^{14} \text{m}^3/\text{s}^2$

自转角速度 $\omega=7.292115 \times 10^{-5} \text{rad/s}$

A.4 1980 西安坐标系

1) 参考椭球基本参数

长半径 $a=6378140\text{m}$

地球引力常数 (含大气层) $GM=3986005\times 10^3\text{s}^{-2}$

二阶带谐系数 $J_2=1082.63\times 10^{-6}$

地球自转角速度 $w=7292115\times 10^{-11}\text{rads}^{-1}$

2) 主要几何和物理常数

短半径 $b=6356755.2882\text{m}$

扁率 $a=1/298.257$

第一偏心率平方 $e_1^2=0.00669438499959$

第二偏心率平方 $e_2^2=0.00673950181947$

椭球正常重力位 $u_0=62636830\text{m}^2\text{s}^{-2}$

赤道正常重力 $\gamma_0=9.780318\text{m s}^{-2}$

A.5 1954年北京坐标系

长半径 $a=6378245\text{m}$

短半径 $b=6356863.0188\text{m}$

扁率 $a=1/298.3$

第一偏心率平方 $e_1^2=0.006693421622966$

第二偏心率平方 $e_2^2=0.006738525414683$

附录 B

(资料性附录)

卫星数据处理及误差改正方法

GPS 信号从卫星发射到接收机天线接收,再到用户接收机把测距信号量测出来,会受到各种因素的影响,每种因素都会对信号产生一定的误差。本附录主要包括数据处理以及各种误差的处理方法。

B.1 观测值定权策略

观测值根据高度角定权,具体定权策略参见附录 B。高度角 30° 以上观测值权定为 1,高度角低于 30° 的观测值按照 $1/2\sin(e)$ 定权, e 表示高度角。

B.2 天线相位中心改正

天线相位中心改正包括天线相位中心偏差改正和天线相位中心变化改正两部分。卫星和接收机都要进行天线相位中心改正。利用 `igs08_www.atx` 模型,进行该项改正。

B.3 相对论效应改正

人为地将 GPS 卫星钟的标准频率降低约 0.00457Hz 之后,卫星钟的相对论效应仍有残余,这部分影响可以通过公式进行改正:

$$\Delta rel = -\frac{2}{c^2} \mathbf{X}^s \cdot \dot{\mathbf{X}}^s \quad (\text{B.1})$$

其中 \mathbf{X}^s 为卫星的位置向量, $\dot{\mathbf{X}}^s$ 为卫星的速度向量。

B.4 相位缠绕改正

相位缠绕的改正公式为:

$$\square \phi = \text{sign}(\zeta) \arccos(\mathbf{D}' \cdot \mathbf{D} / (|\mathbf{D}'| |\mathbf{D}|)) \quad (\text{B.2})$$

式中, $\zeta = \hat{\mathbf{k}} \cdot (\mathbf{D}' \times \mathbf{D})$, $\hat{\mathbf{k}}$ 表示卫星到接收机的单位向量, \mathbf{D}' 、 \mathbf{D} 分别表示卫星和接收机天线的有效偶极矢量,可以根据卫星坐标系下的坐标单位矢量和接收机地方坐标下的单位矢量用下式计算得到:

$$\mathbf{D}' = \hat{x}' - \hat{k}(\hat{k} \cdot \hat{x}') - \hat{k} \times \hat{y}' \quad (\text{B.3})$$

$$\mathbf{D} = \hat{x} - \hat{k}(\hat{k} \cdot \hat{x}) + \hat{k} \times \hat{y} \quad (\text{B.4})$$

B.5 天线标石中心改正方法

根据测站信息文件对测站进行天线标石中心改正。

B.6 对流层延迟改正方法

利用 SSL 模型计算参考站的气压和温度，一般将所有测站的相对湿度都设为 60%。利用 Saastamoinen 模型计算天顶对流层延迟干分量和湿分量，投影函数为 GMF 模型，并进行对流层水平梯度改正。

B.6.1 SSL 模型

利用对流层延迟改正模型需要知道测站的气温气压等信息，对于没有温度计和气压计的测站则需要按照经验模型计算。

测站的气象元素包括大气压 P 、干温度 t_d 和湿温度 t_w 表示。其中湿温度可以用相对湿度 Hr 或者水汽压 e 来表示。

$$\begin{aligned} Hr &= \frac{e}{E_\omega} \times 100\% \\ E_\omega &= 6.11 \times 10^{\frac{7.5t_d}{t_d+237.3}} \\ e &= 6.11 \times 10^{\frac{7.5t_w}{t_w+237.3}} \end{aligned} \quad (\text{B.5})$$

式中 E_ω 为干湿度 t_d 对应的饱和水汽压。

海平面处的标准气象元素一般取 $P_0=1013.25\text{mbar}$ ， $T_0=10^\circ\text{C}$ ， $H_0=50\%$ 。按照下面的公式可以计算出海拔高度为 h （以米为单位）处的温度、气压和相对湿度的近似值：

$$\begin{aligned} T &= T_0 - 0.0065h \\ P &= P_0 \left(1 - 2.26 \times 10^{-5}h\right)^{5.225} \\ H &= H_0 \exp\left(-6.396 \times 10^{-4}h\right) \end{aligned} \quad (\text{B.6})$$

B.6.2 Saastamoinen 模型

Saastamoinen 模型天顶对流层延迟的干分量和湿分量可分别表示为：

$$\begin{aligned} ZHD &= \frac{0.002277P}{f(B,h)} \\ ZWD &= \frac{e}{f(B,h)} \left(\frac{0.2789}{T} + 0.05 \right) \end{aligned} \quad (\text{B.7})$$

其中， T 表示测站处的气温； P 、 e 分别是测站处的大气压和水汽压（单位：毫巴）；

$f(B,h)$ 是纬度和高程的函数，纬度和高程的函数为（ h 的单位为千米）：

$$f(B,h) = 1 - 0.00266\cos 2B - 0.00028h \quad (\text{B.8})$$

B.6.3 GMF 模型

GMF 模型采用数值天气模型（NWM）提供的高精度全球对流层折射率来解算延迟量，其参数是建立在全球格网及 ECMWF（欧洲中尺度天气预报中心）40 年的再分析数据提供的气压、气温和湿度信息基础上的，并且考虑了测站经度对解算的影响，其模型较为复杂。GMF 采用 3 项连分式投影函数形式。干分量延迟投影函数分成两分：

$$MF_{dry}(E) = m_{dry}(E) + m_{dry}(E) \quad (\text{B.9})$$

其中：

$$m_{dry}(E) = \frac{1 + \frac{a_{dry}}{b_{dry}}}{1 + c_{dry}} \frac{\sin E + \frac{a_{dry}}{\sin E + \frac{b_{dry}}{\sin E + c_{dry}}}}{\sin E + \frac{b_{dry}}{\sin E + c_{dry}}} \quad (\text{B.10})$$

$$a_{dry} = \sum_{i=1}^{55} \left\{ \left[a_{havg}(i)a_p(i) + b_{havg}(i)b_p(i) \right] \times 10^{-5} + \left[a_{hamp}(i)a_p(i) + b_{hamp}(i)b_p(i) \right] \times 10^{-5} \right\}$$

$$(\text{B.11})$$

$$b_{dry} = 0.0029 \quad (\text{B.12})$$

$$c_{dry} = 0.062 + \left\{ \left[\cos \left(\frac{doy - 28}{365.25} \times 2\pi + phh \right) + 1 \right] \frac{c_{11h}}{2} + c_{10h} \right\} (1 - \cos \lambda) \quad (\text{B.13})$$

$$a_p(i) = \sum_{n=0}^9 \sum_{m=0}^n P_{n+1, m+1} \cos(m\lambda) \quad (\text{B.14})$$

$$b_p(i) = \sum_{n=0}^9 \sum_{m=0}^n P_{n+1, m+1} \sin(m\lambda) \quad (\text{B.15})$$

$$P_{n+1, m+1} = \sum_{i=0}^9 \sum_{j=0}^{\min(j,m)} \left\{ \left(\frac{1}{2}\right)^j + \sqrt{(1 - \sin^2 \lambda)^j S} \right\} \quad (B.16)$$

$$S = \sum_{k=0}^{\text{int}\left(\frac{i-j}{2}\right)} \frac{(-1)^k (2i - 2k + 1)!}{(k+1)! \times (i-k+1)! \times (i-j-2k+1)!} \times \sin \lambda^{i-j-2k} \quad (B.17)$$

当测站处于北半球时，即 $\lambda \geq 0$ ， $\text{phh} = 0$ ， $c_{11h} = 0.007$ ， $c_{10h} = 0.002$ ，当测站处于南半球时，即 $\lambda \leq 0$ 则 $\text{phh} = \pi$ ， $c_{11h} = 0.007$ ， $c_{10h} = 0.002$ ，其中 E 为高度角。

$$m_{dry}(E) = \frac{1}{\sin(E)} - \frac{\frac{a_{ht}}{1 + \frac{b_{ht}}{1 + c_{ht}}}}{\sin E + \frac{a_{ht}}{\sin E + \frac{b_{ht}}{\sin E + c_{ht}}}} \quad (B.18)$$

其中 $a_{ht} = 2.53 \times 10^{-5}$ ， $b_{ht} = 5.49 \times 10^{-3}$ ， $c_{ht} = 1.14 \times 10^{-3}$ 。

GMF 湿分量延迟投影函数为：

$$MF_{wet}(E) = \frac{1 + \frac{a_{wet}}{1 + \frac{b_{wet}}{1 + c_{wet}}}}{\sin E + \frac{a_{wet}}{\sin E + \frac{b_{wet}}{\sin E + c_{wet}}}} \quad (B.19)$$

其中，

$$a_{wet} = \sum_{i=1}^{55} \left\{ [a_{mavg}(i)a_p(i) + b_{mavg}(i)b_p(i)] \times 10^{-5} + [a_{wamp}(i)a_p(i) + b_{wamp}(i)b_p(i)] \times 10^{-5} \right\} \times \cos\left(\frac{\text{doy} - 28}{365.25} \times 2\pi\right) \quad (B.20)$$

其中， $b_{wet} = 0.0000$ ， $c_{wet} = 0.043$ $a_{ha \ v \ \xi}$ $b_{ha \ v \ \xi}$ $a_{ha \ \eta}$ $b_{ha \ \eta}$ $a_{wa \ v \ \xi}$ $b_{wa \ v \ \xi}$

a_{wamp} 、 b_{wamp} 均按表查询。

B.6.4 水平梯度模型

实际上, 大气层并不是各向均质的, RezaGhoddousi-Fard (2009) 提出一种增加了对流层水平梯度 (Horizontal Gradients) 的改正模型, 附有水平梯度的对流层延迟改正模型可以表示为:

$$\Delta T = m(\varepsilon)_h ZHD + m(\varepsilon)_w ZWD + m(\varepsilon)_{azi} (G_N \cos\phi + G_E \sin\phi) \quad (\text{B.21})$$

其中下标 azi 代表梯度, ϕ 表示方位角, (G_N, G_E) 表示梯度向量, $(\cos\phi, \sin\phi)$ 表示方位角向量。梯度映射函数 $m(\varepsilon)_{azi}$ 各方向的不均匀性主要来自水汽, 所以用湿分量的映射函数作为梯度映射函数。

$$m(\varepsilon)_{azi} = m(\varepsilon)_w \frac{1}{\tan\varepsilon} \quad (\text{B.22})$$

B.7 地球自转改正

假设测站坐标为 (X_R, Y_R, Z_R) , 卫星坐标为 (X^S, Y^S, Z^S) , 则由地球自旋转引起的距离改正量为:

$$\Delta D_{\omega} = \frac{\tilde{\omega}}{c} [Y^S (X_R - X^S) - X^S (Y_R - Y^S)] \quad (\text{B.23})$$

其中, c 表示真空中的光速, $\tilde{\omega}$ 表示地球自转角速度, 该距离改正量对卫星坐标的改正量为:

$$\begin{pmatrix} X^{S'} \\ Y^{S'} \\ Z^{S'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha & -\cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X^S \\ Y^S \\ Z^S \end{pmatrix} \quad (\text{B.24})$$

其中 $\alpha = \tilde{\omega} \tau$, 为地球在信号传播过程中转过的角度, τ 为信号传播时间, $(X^{S'}, Y^{S'}, Z^{S'})$ 为进行了地球自转改正后的卫星坐标。

B.8 地球固体潮

固体潮对测站位置影响的近似公式为 (IERS Standards, 1989):

$$\Delta r = \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j}{GM} \cdot \frac{\mathbf{r}^4}{\mathbf{R}_j^3} \left\{ \left[3l_2 (\hat{\mathbf{R}}_j \cdot \hat{\mathbf{r}}) \right] \hat{\mathbf{R}}_j + \left[3 \cdot \left(\frac{h_2}{2} - l_2 \right) \cdot (\hat{\mathbf{R}}_j \cdot \hat{\mathbf{r}})^2 - \frac{h_2}{2} \right] \hat{\mathbf{r}} \right\} + \left[-0.025m \cdot \sin \phi \cos \phi \sin(\theta_g + \lambda) \right] \cdot \hat{\mathbf{r}} \quad (\text{B.25})$$

式中： GM_j 为摄动天体的引力常数（ $j=2$ 表示月球， $j=3$ 表示太阳）； ϕ 、 λ 分别表示测站纬度和经度； \mathbf{r} 表示测站到地心的矢径； $\hat{\mathbf{r}}$ 表示测站在地心参考框架下的单位矢量； \mathbf{R}_j 为摄动天体到地心的矢径； $\hat{\mathbf{R}}_j$ 为天体在地心参考框架下的单位矢量； l_2 、 h_2 分别表示二阶 Love 数和 Shida 数（ $l_2 = 0.6090$ ， $h_2 = 0.0852$ ）； θ_g 表示格林尼治平恒星时。

B.9 海洋潮汐

每个测站各分潮波位移改正的振幅和相位可以根据测站位置从相应网站获得,有了分潮波的振幅和相位,可叠加某些潮波成分,得到测站位移的负荷变形:

$$\Delta_j = \sum_{i=1}^N f_i A_j \cos(\omega_i t + \chi_i + u_i - \phi_j) \quad j=1,2,3 \quad (\text{B.26})$$

其中 Δ_j 当 $j=1,2,3$ 时分别表示测站在 S 、 W 、 U 向的海潮负荷变形； N 表示所考虑的潮波总个数； f_i 表示与月球升交点经度有关的系数； A_j 、 ϕ_j 分别表示与测站第 j 个位移分量所对应的第 i 个分潮波的振幅和格林尼治相位； ω_i 表示第 i 个分潮波的角频率， χ_i 表示其天文幅角数， u_i 表示与月球升交点经度有关的参数。

式中给出的横向海潮负荷改正以 S 向和 W 向为正方向,用户计算海潮负荷对测站三维直角坐标系的影响时,求出的横向海潮负荷改正值转到 N 方向和 E 方向为正方向($-\Delta_1, -\Delta_2, \Delta_3$),结合测站的经纬度(ϕ, λ),即可得到直角坐标形式的三维潮汐改正 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ :

$$\begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin \phi \cos \lambda & -\sin \lambda & \cos \phi \cos \lambda \\ -\sin \phi \sin \lambda & \cos \lambda & \cos \phi \sin \lambda \\ \cos \lambda & 0 & \sin \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\Delta_1 \\ -\Delta_2 \\ \Delta_3 \end{pmatrix} \quad (\text{B.27})$$

附录 C

(资料性附录)

卫星精密定轨的力模型

C.1 地球固体潮

由于地球是一个非刚体，在日月等天体的引力作用下，地球陆地部分会发生形变，以致质量重新分布，这种形变称固体潮。固体潮对卫星定轨产生两种直接的影响，一种是地壳的起伏和位移使得地面跟踪站的位置改变，这一影响称“几何潮汐”，它在卫星观测模型中加以改正；另一种影响是固体潮使得内部质量分布随时间变化，从而使得地球的引力场也随时间而变化，这一影响称“动力潮汐”，它在卫星的动力模型中加以考虑。固体潮引起地球引力系数随时间变化，进而对卫星产生摄动加速度。与引力位相似，固体潮造成的摄动位可以通过地球引力位的变化来表达，其归一化的形式为 (McCarthy, 1996, McCarthy, et al, 2004):

$$\Delta R_{st} = \frac{GM_e}{r} \left[\sum_{l=2}^{l_{\max}} \left(\frac{a_e}{r} \right)^l \sum_{m=0}^l ((\Delta \bar{C}_{lm})_{st} \cos m\lambda + (\Delta \bar{S}_{lm})_{st} \sin m\lambda) \bar{P}_{lm}(\sin \phi) \right] \quad (C.1)$$

球谐系数表示固体潮引起相对于平均地球的变化。在实际应用的计算过程中我们可以分为二步进行。

第一步，使用与频率无关的 LOVE 数计算月球和太阳的引潮位。

$$\begin{aligned} (\Delta \bar{C}_{20})_{st_1} &= \frac{1}{\sqrt{5}} k_2 \frac{a_e^3}{GM_e} \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j}{r_j^3} P_{20}(\sin \phi_j) - \langle \Delta \bar{C}_{20} \rangle \\ (\Delta \bar{C}_{21})_{st_1} + i(\Delta \bar{S}_{21})_{st_1} &= \frac{1}{3} \sqrt{\frac{3}{5}} k_2 \frac{a_e^3}{GM_e} \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j}{r_j^3} P_{21}(\sin \phi_j) e^{-i\lambda_j} \\ (\Delta \bar{C}_{22})_{st_1} + i(\Delta \bar{S}_{22})_{st_1} &= \frac{1}{12} \sqrt{\frac{3}{5}} k_2 \frac{a_e^3}{GM_e} \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j}{r_j^3} P_{22}(\sin \phi_j) e^{-i2\lambda_j} \end{aligned} \quad (C.2)$$

式中， k_2 为二阶 LOVE 数； a_e 和 M_e 分别为地球半径与地球质量； G 为牛顿万有引力常数； M_j 和 r 分别为摄动天体（日或月）的质量及离地球质量中心的距离； λ_j 和 ϕ_j 为摄动天体（日或月）在地固坐标系中之经纬度值。

二阶 LOVE 数是地球因变形产生质量重新分配所引起引力位变化的比例参数，用来反应地球内部构造的参数，根据前人的研究 k_2 值约为 0.3。

第二步，主要是修改海洋潮汐对固体潮球谐系数的影响：

$$\begin{aligned}(\overline{\Delta C}_{21})_{st_2} - i(\overline{\Delta S}_{21})_{st_2} &= A_1 \sum_{s(2,1)} \delta k_s H_s (\sin \theta_s + i \cos \theta_s) \\(\overline{\Delta C}_{22})_{st_2} - i(\overline{\Delta S}_{22})_{st_2} &= A_2 \sum_{s(2,2)} \delta k_s H_s (\cos \theta_s - i \sin \theta_s) \quad (C.3) \\A_1 &= \frac{(-1)}{Ae\sqrt{4\pi(2-\delta)}}, \quad A_2 = \frac{1}{Ae\sqrt{4\pi(2-\delta)}}\end{aligned}$$

其中， $\delta k_s = k_s - k_2$ ， k_s 为二阶 LOVE 数； H_s 为海潮的振幅； θ_s 为海潮幅角，由六个 Doodson 引数及 Doodson 变量组合而成； δ Kronecker 符号。

C.2 海洋潮

受到日月引力作用，海洋会产生潮汐的变化，该变化使得地球内部质量重新分配，从而产生海潮形变位。海潮形变位可以通过地球引力位的变化来表达，其归一化的形式为 (McCarthy, 1996, McCarthy, et al, 2004):

$$\Delta R_{ot} = \frac{GM_e}{r} \left[\sum_{l=2}^{l_{\max}} \left(\frac{a_e}{r} \right)^l \sum_{m=0}^l ((\overline{\Delta C}_{lm})_{ot} \cos m\lambda + (\overline{\Delta S}_{lm})_{ot} \sin m\lambda) \overline{P}_{lm}(\sin \phi) \right] \quad (C.4)$$

$$\begin{cases} (\overline{\Delta C}_{lm})_{ot} = F_{lm} \sum_k A_{klm} \\ (\overline{\Delta S}_{lm})_{ot} = F_{lm} \sum_k B_{klm} \end{cases} \quad (C.5)$$

$$F_{lm} = \frac{4\pi a_e^2 \rho_w}{M_e} \sqrt{\frac{(l+m)!}{(l-m)(2l+1)(2-\delta_{0m})}} \left(\frac{1+k_l'}{2l+1} \right) \quad (C.6)$$

$$\begin{bmatrix} A_{klm} \\ B_{klm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (C_{klm}^+ + C_{klm}^-) \\ (S_{klm}^+ - S_{klm}^-) \end{bmatrix} \cos \Theta_k + \begin{bmatrix} (S_{klm}^+ + S_{klm}^-) \\ (C_{klm}^+ - C_{klm}^-) \end{bmatrix} \sin \Theta_k \quad (C.7)$$

ρ_w 为海水的平均密度； k_l' 负载 LOVE 数； \sum_s 则表示对引潮中各分潮波超波 k 求和；

C_{klm}^\pm ， S_{klm}^\pm 分别为 l 次 m 阶海潮正向和逆向分潮波系数。

C.3 三体引力

卫星在围绕地球运行时，不但受到中心天体地球引力的影响，而且还受到月球、太阳和其它星（金星、木星、水星、土星、火星、天王星、海王星、冥王星等）引力的影响。我们在这里把中心天体地球之外的其它天体称为摄动天体，人造地球卫星称为被摄动体。如果摄

动天体，中心天体和被摄动体都看做是质点，则根据 Newton 第二定律，摄动天体对卫星产生的摄动加速度为 (McCarthy, 1996, McCarthy, et al, 2004):

$$a_{nb} = \sum_{i=1}^n GM_i \left(-\frac{\vec{r} - \vec{r}_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^3} - \frac{\vec{r}_i}{\vec{r}^3} \right) \quad (\text{C.8})$$

式中， n 、 M_i ：摄动天体个数及第 i 个摄动天体的质量； G 牛顿万有引力常数； \vec{r} 、 \vec{r}_i ：分别为卫星及第 i 个摄动天体在惯性坐标系的位置向量。

天体在惯性坐标系的位置向量可由星历表查得，本规范列入计算的星体包括：日、月及九大行星。目前常用的行星星历为 JPL 提供的星历，有 DE200、DE403、DE405、DE406 等几种。

C.4 相对论效应

由于广义相对论效应，卫星在地球质心为原点的局部惯性坐标系中的运动方程将不同于仅考虑牛顿引力场时的运动方程。这种差异可看作卫星受到一个附加的摄动。研究表明，对低轨卫星的主要相对论效应来自地球本身的施瓦西 (Schwarzschild) 场，而太阳引力场对卫星产生的相对论摄动加速度小于 10^{-14}m/s^2 完全可忽略不计。据 Dallas 公式，相对论引起的摄动加速度为 (McCarthy, 1996, McCarthy, et al, 2004):

$$a_{re} = \frac{GM_e}{c^2 r^3} \left\{ \left[(2\beta + 2\gamma) \frac{GM_e}{r} - \gamma (\dot{\vec{r}} \cdot \dot{\vec{r}}) \right] \vec{r} + (2 + 2\gamma) (\vec{r} \cdot \dot{\vec{r}}) \dot{\vec{r}} \right\} \quad (\text{C.9})$$

式中， β, γ 为相对论常数，它们随不同引力理论而异，对 Einstein 广义相对论而言， $\beta = \gamma = 1$ ； c 为光速； GM_e 地球的万有引力常数； \vec{r} ， $\dot{\vec{r}}$ 为卫星在协议惯性坐标系中的位置和速度矢量。

C.5 太阳光压模型

GPS 卫星采用光压摄动模型包括：ROCK4/42 先验模型 (Fliegel et al, 1992)，BERN 先验模型 (Springer et al, 1999)；JPL 先验模型 (Bar-server Y.E. et al, 1997, 2005) 等。高精度 GPS 定轨时，通常采用 BERN 光压模型，可表述为：

$$\begin{aligned} \vec{a}_{sp} = & D(\beta_0) \cdot \vec{e}_D + Y(\beta_0) \cdot \vec{e}_Y + B(\beta_0) \cdot \vec{e}_B \\ & + Z_1(\beta_0) \sin(u - u_0) \cdot \vec{e}_Z + [X_1(\beta_0) \sin(u - u_0) + X_3(\beta_0) \sin(3u - u_0)] \cdot \vec{e}_X \end{aligned} \quad (\text{C.10})$$

$$\begin{aligned}
D(\beta_0) &= D_0 + D_{C2} \cdot \cos(2\beta_0) + D_{C4} \cdot \cos(4\beta_0) \\
Y(\beta_0) &= Y_0 + Y_{C2} \cdot \cos(2\beta_0) \\
B(\beta_0) &= B_0 + B_{C2} \cdot \cos(2\beta_0) \\
Z_1(\beta_0) &= Z_{10} + Z_{C2} \cdot \cos(2\beta_0) + Z_{S2} \cdot \sin(2\beta_0) + Z_{C4} \cdot \cos(4\beta_0) + Z_{S4} \cdot \sin(4\beta_0) \\
X_1(\beta_0) &= X_{10} + X_{1C} \cdot \cos(2\beta_0) + X_{1S} \cdot \sin(2\beta_0) \\
X_3(\beta_0) &= X_{30} + X_{3C} \cdot \cos(2\beta_0) + X_{3S} \cdot \sin(2\beta_0)
\end{aligned} \tag{C.11}$$

式中 \bar{a}_{sp} 为太阳光压摄动加速度, β_0 为太阳相对于卫星轨道平面的高度角, u 为卫星纬度幅角, u_0 为太阳纬度幅角, \bar{e}_D 为卫星至太阳方向单位矢量, \bar{e}_Y 为沿太阳板方向单位矢量, \bar{e}_B 与 \bar{e}_D 、 \bar{e}_Y 构成右手坐标系, \bar{e}_X 为星固系 X 轴单位矢量, \bar{e}_Z 为星固系 Z 轴单位矢量。

D_0 、 Y_0 、 B_0 由 GPS 各卫星长期观测拟合得到, 如下表所示:

表 C.1 GPS 各卫星 BERN 先验参数

卫星编号	卫星型号	D_0 (10-8)	Y_0 (10-8)	B_0 (10-9)
G01	BLOCK IIR-M	-10.0000	0.0000	0.0000
G02	BLOCK IIR-B	-10.0000	0.0000	0.0000
G03	BLOCK IIA	-9.0395	0.5637	-0.3960
G04	BLOCK IIA	-9.0502	0.7856	-0.2487
G05	BLOCK IIR-M	-10.0000	0.0000	0.0000
G06	BLOCK IIA	-9.0354	0.7589	-0.3092
G07	BLOCK IIR-M	-10.0000	0.0000	0.0000
G08	BLOCK IIA	-9.3342	-1.8394	0.7143
G09	BLOCK IIA	-9.0317	0.7955	-0.3569
G10	BLOCK IIA	-8.9546	0.7819	-0.1772
G11	BLOCK IIR-A	-10.0000	0.0000	0.0000
G12	BLOCK IIR-M	-10.0000	0.0000	0.0000
G13	BLOCK IIR-A	-9.9599	0.2801	-1.6732
G14	BLOCK IIR-A	-10.0000	0.0000	0.0000
G15	BLOCK IIR-M	-10.0000	0.0000	0.0000

G16	BLOCK IIR-A	-10.0000	0.0000	0.0000
G17	BLOCK IIR-M	-10.0000	0.0000	0.0000
G18	BLOCK IIR-A	-10.0000	0.0000	0.0000
G19	BLOCK IIR-B	-10.0000	0.0000	0.0000
G20	BLOCK IIR-A	-10.0000	0.0000	0.0000
G21	BLOCK IIR-A	-10.0000	0.0000	0.0000
G22	BLOCK IIR-B	-10.0000	0.0000	0.0000
G23	BLOCK IIR-B	-10.0000	0.0000	0.0000
G24	BLOCK IIA	-9.1436	1.0537	-0.2214
G25	BLOCK IIF	-10.0000	0.0000	0.0000
G26	BLOCK IIA	-9.0377	0.9750	-0.4144
G27	BLOCK IIA	-9.0291	0.9482	-0.4224
G28	BLOCK IIR-A	-10.0000	0.0000	0.0000
G29	BLOCK IIR-M	-10.0000	0.0000	0.0000
G30	BLOCK IIA	-9.0455	0.8285	-0.5409
G31	BLOCK IIR-M	-10.0000	0.0000	0.0000
G32	BLOCK IIA	-7.8592	0.7440	-1.0843

附录 D

(资料性附录)

常数项定义

地心引力常数 = 398600.4415 km³/sec²

日心引力常数 = 132712442076.0 km³/sec²

地球赤道半径 = 6378.137

地球扁率 = 1/298.257

太阳地球质量比 = 332946.045

太阳水星质量比 = 6023600.0

太阳金星质量比 = 408523.71

太阳火星质量比 = 3098708.0

太阳木星质量比 = 1047.3486

太阳土星质量比 = 3497.898

太阳天王星质量比 = 22902.98

太阳海王星质量比 = 19412.24

太阳冥王星质量比 = 135200000.0

地球月球质量比 = 81.30056