

GPS 精密定轨定位

王解先 著

同济大学出版社

内 容 提 要

全球定位系统 GPS(Global Positioning System)已于 1994 年全面建成投入使用,目前在短距离相对定位应用方面已较成熟,我国已出版了多本有关的专著,在实用上也已得到广泛采用,如城市或工程控制网的建立等。在长距离相对定位和轨道确定方面,我国也开展了一系列的研究应用,并在全国范围内建立了 A 级和 B 级 GPS 控制网,因而积累了一些经验,具备了撰写本书的条件。

本书第一章介绍 GPS 研究涉及到的坐标和时间系统及一些转换关系。第二章介绍定位定轨模型、广播星历计算、误差方程建立、误差源分析等。第三章介绍 GPS 卫星运动方程和状态转移矩阵的建立及其数值求解方法。第四章介绍改正模型、失周处理、整周模糊度求解、精密长距离定位和轨道确定中的有关问题。第五章介绍 GPS 长距离精密定轨定位后处理中的有关问题。书中将一些较长的参数表格及计算过程放在附录中。

本书结合最新的有关研究成果,并尽量能自成一体,以便使用者仅参考本书就能获取较全面的有关知识,并可应用。本书适合于大专院校的教师、研究生、科研机构有关人员等 GPS 研究层次较高的读者使用。

责任编辑 缪临平

封面设计 陈益平

GPS 精密定轨定位

王解先 著

同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号)

新华书店上海发行所发行

同济大学印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:7.25 字数:180 千字

1997 年 5 月第 1 版 1997 年 5 月第 1 次印刷

印数:1—500 定价:16.00 元

ISBN7-5608-1770-X/V·3

目 录

第一章 坐标与时间系统	(1)
§ 1.1 坐标系统概述	(1)
§ 1.1.1 地固参考系	(1)
§ 1.1.2 地心惯性参考系	(2)
§ 1.1.3 地固参考系与地心惯性参考系之间的转换关系	(2)
§ 1.1.4 研究 GPS 涉及到的其他一些坐标架	(4)
§ 1.2 时间系统概述	(6)
§ 1.2.1 动力学时	(6)
§ 1.2.2 原子时	(7)
§ 1.2.3 恒星时	(7)
§ 1.2.4 儒略日、儒略年	(8)
§ 1.3 常用的一些常数	(8)
第二章 GPS 定轨定位模型	(10)
§ 2.1 GPS 卫星定位原理概述	(10)
§ 2.1.1 GPS 卫星定位系统概述	(10)
§ 2.1.2 GPS 观测量	(11)
§ 2.1.3 由广播星历计算卫星位置	(17)
§ 2.2 GPS 相位观测方程	(19)
§ 2.3 GPS 相位观测方程分析	(23)
§ 2.3.1 站间单差	(23)
§ 2.3.2 星间单差	(24)
§ 2.3.3 双差	(24)
§ 2.3.4 历元间单差	(25)
§ 2.3.5 三差	(25)
§ 2.3.6 各种差分模型的等价性和差异	(25)
§ 2.4 GPS 相位观测误差分析	(27)
§ 2.4.1 仪器误差	(28)
§ 2.4.2 传播误差	(28)
§ 2.4.3 星历误差	(29)
第三章 GPS 卫星运动方程及其数值解	(30)
§ 3.1 卫星运动概述	(30)
§ 3.1.1 二体问题概述	(30)
§ 3.1.2 初轨计算	(32)

§ 3.1.3 摄动方程分析解概述	(34)
§ 3.2 GPS 卫星运动力模型	(36)
§ 3.2.1 质点效应引起卫星加速度 $\ddot{r}_n$	(36)
§ 3.2.2 地球非球形引力效应引起加速度 $\ddot{r}_e$	(37)
§ 3.2.3 太阳辐射压摄动引起加速度 $\ddot{r}_s$	(42)
§ 3.3 GPS 卫星运动方程的求解	(46)
§ 3.4 卫星运动方程的数值解	(48)
§ 3.4.1 数值积分一般原理	(48)
§ 3.4.2 GPS 卫星运动方程的数值积分	(51)
第四章 GPS 长基线定位和轨道确定模型	(56)
§ 4.1 GPS 长基线定位中的改正模型	(56)
§ 4.1.1 中性大气改正	(56)
§ 4.1.2 电离层改正	(57)
§ 4.1.3 接收机天线相位中心改正	(58)
§ 4.1.4 卫星天线相位中心改正	(58)
§ 4.1.5 潮汐引起的台站漂移	(59)
§ 4.1.6 板块运动引起的台站漂移	(61)
§ 4.1.7 相对论效应的影响	(61)
§ 4.2 GPS 观测方程和法方程的建立	(62)
§ 4.2.1 相位观测方程的线性化	(63)
§ 4.2.2 相位观测方程的建立	(68)
§ 4.2.3 法方程的组成	(70)
§ 4.3 GPS 长基线定轨定位解算	(72)
§ 4.3.1 先验限制条件	(72)
§ 4.3.2 整周模糊度参数的解算	(73)
§ 4.3.3 失周处理	(76)
§ 4.4 定轨定位解算中的一些问题	(83)
§ 4.4.1 关于大气改正参数	(83)
§ 4.4.2 关于太阳光压摄动参数	(84)
§ 4.4.3 关于整周模糊度的归整	(84)
§ 4.4.4 定轨对观测数据的要求	(85)
§ 4.4.5 GPS 长基线定位定轨的计算流程	(85)
第五章 GPS 定轨定位解的后处理	(86)
§ 5.1 各测段解算结果的综合计算模型	(86)
§ 5.1.1 平差模型	(86)
§ 5.1.2 精度评定	(88)
§ 5.2 各测段解算结果的评价	(88)

§ 5.2.1 坐标结果的评价	(88)
§ 5.2.2 基线结果的评价	(89)
§ 5.2.3 轨道结果的评价	(89)
§ 5.2.4 地球自转参数结果的评价	(90)
§ 5.2.5 地球几何中心结果的评价	(90)
§ 5.3 多测段综合轨道的获取	(90)
§ 5.4 区域网的地壳形变参数获取	(91)
§ 5.5 基线解的网平差	(94)
§ 5.5.1 平差模型	(94)
§ 5.5.2 空间坐标对高斯坐标偏导数的数值求取	(96)
§ 5.5.3 模型分析	(96)
结束语	(98)
附录	(99)
附录 1 106 阶 1980IAU 章动序列表	(99)
附录 2 海潮负载改正模型系数	(103)
附录 3 开普勒根数与地心惯性参考系内的坐标和速度的关系与偏导	(104)

第一章 坐标与时间系统

在卫星测量研究中,要用到两个必不可少的参考系,一个是与地球固连的地固参考系 CTS(Conventional Terrestrial System),它用于表示台站的坐标;另一个是地心惯性参考系 CIS(Conventional Inertial System,也称为天球参考系),即空间固连坐标系,它用于表示卫星运动方程,因为牛顿万有引力定律在惯性坐标系中才成立,而卫星运动方程是以牛顿万有引力定律作为出发点推导的。要根据卫星测量观测值定位或定轨,就必须涉及到地固参考系与地心惯性参考系之间的转换。另外,由于全球定位系统 GPS(Global Positioning System)测量的观测值是以接收机和卫星的天线相位中心为准的,而台站坐标以标石中心为准,卫星位置以质量中心为准,因而还要涉及到当地切平面坐标架和卫星固联坐标架。

在卫星测量研究中,时间也是很重要的一个部分,本章也将简要介绍实用中涉及的一些时间概念。第三节讲述一些常用的常数。

§ 1.1 坐标系统概述

GPS 观测模型和台站坐标的解算取决于精确的坐标系定义,观测值的获取和分析都是在一定的坐标系下进行的,本节将介绍用以表示台站坐标的地球固连参考系和用以表示卫星运动方程的地心惯性参考系,及其转换关系的数学表达式,另外还将介绍一些 GPS 数据分析中涉及到的其它坐标架。

§ 1.1.1 地固参考系

在天文、大地测量和地球物理研究中,经常会用到参考系、参考架、坐标系、坐标架这些术语,它们在不同的学科内有不同的含义和理解,在这些学科的交叉领域,如 GPS 用于天文地球动力学研究中,就会出现一些混乱,为此,国内外的一些学者都曾给出过一些定义,但互不完全相同,在我们理解 GPS 研究中用到的地固参考系前,先对这些术语给予以下含义:

坐标架(Coordinate Frame):是一个由三个互相垂直的坐标轴或其他几何结构构成的框架,相对于它,可以标定一个点的位置。它只标定坐标采用形式,如直角坐标、球坐标、椭球坐标等。

坐标系(Coordinate System):是一个坐标架和相对于该坐标架确定某一点位置方法的总称。不同的坐标架对应于不同的坐标系。

参考架(Reference Frame):是一组用于定义或实现一个特定坐标系的参考点及其它采用坐标的集合。考虑坐标变化时,还需要一个时间历元,故时间尺度也是参考架的一部分。如对于动力学参考架而言,该集合是由用于定义该框架的大地测量卫星、行星或其它天体的星历构成。在该参考架下,其他点的坐标可以通过其相对于这些参考点位置的观测量来确定。

参考系(Reference System):是一个参考架和一组用于在一定观测时间内由特定类型观测量推导该参考架中点位坐标的理论、方法、以及采用模型和常数的总称。一个参考系包

括:(1) 一组模型和常数;(2) 一套理论和数据处理方法;(3) 一个参考架。例如天文地球动力学研究中常采用的 IERS(International Earth Rotation Service)参考系包括:1) IERS 参考架,即 IERS Notes 中列出的台站坐标和漂移速度;2) 确定该参考架所采用的一组模型和常数,即 IERS 规范;3) 确定该参考架坐标的一套理论和数据处理方法。

GPS 研究必须涉及到地固参考系,它应具有以下特点:

① 原点位于整个地球(含海洋和大气)的质心;② 尺度是广义相对论意义下一局部地球框架的尺度;③ 定向由某一历元的地球自转参数 ERP(Earth Rotation Parameter)定义,ERP 由 IERS 每两个星期公布一次,采用 GPS 技术也可以求解这些参数;④ 随时演变遵循 Tisserand 条件,即在整个地球积分区间 Γ 内,对积分点质量 dm 相对于外部框架的位置 r 和速度 v 满足下式:

$$\begin{cases} \int_{\Gamma} v dm = 0 \\ \int_{\Gamma} r \times v dm = 0 \end{cases} \quad (1.1.1)$$

由于以上条件实际上是不可能严格实现的,目前采用的地固参考系是国际上根据各资料分析中心通过各种空间大地测量技术得到的结果综合而得的,这些空间技术包括:多普勒(Doppler)卫星定位、GPS、甚长基线干涉测量 VLBI(Very Long Baseline Interferometry)、激光卫星测距 SLR(Satellite Laser Ranging)、激光测月 LLR(Lunar Laser Ranging)等,因此是协议地固参考系。

在 GPS 等空间大地测量和天文地球动力学研究中,常用的地球参考系有 WGS84(World Geodetic System, 1984), ITRF 系列(International Terrestrial Reference Frame)等。

1. WGS84 是一个三维地心坐标系,通常采用空间直角坐标的形式,但它也定义了它的椭圆,其长半轴 a 和扁率 f 为:

$$\begin{cases} a = 6378137.0 \\ f = 1/298.257222101 \end{cases}$$

因此也可将点位表示成经纬度的形式,它还带有一个引力场模型,其坐标精度为 mm 级至 cm 级。

2. ITRF92 是一个四维地心坐标系,除了空间直角坐标形式的坐标外,还给出了台站的漂移速度,其坐标精度为 mm 级至 cm 级。可在 IERS Notes 中查取。

§ 1.1.2 地心惯性参考系

在用 GPS 观测值确定卫星运动轨道时,需要考虑卫星在力作用下的运动方程,因此,要涉及到惯性参考系,因为我们采用的牛顿定律在惯性参考系下才成立。

目前采用的协议地心惯性参考系历元是 J2000.0,原点为地球质量中心,参考平而是 J2000.0 平赤道,Z 轴向北指向平赤道面北极,X 轴指向 J2000.0 平春分点(地球赤道面与地球绕太阳公转轨道而的交点),Y 轴与 X 和 Z 轴组成直角右手系。

§ 1.1.3 地固参考系与地心惯性参考系之间的转换关系

以 r 表示某点在历元 J2000.0 对应的协议地心惯性坐标系(CIS)中的坐标, R 表示该点

在协议地球参考系(CTS)中的坐标,则有:

$$r = PNB_2B_1R \quad (1.1.2)$$

式中 P 为岁差矩阵,它将测瞬平天球坐标系转换到 J2000.0CIS; N 为章动矩阵,它将真天球坐标系转换到测瞬平天球坐标系; B_2 为地球周日自转矩阵,它将瞬时极地球坐标系转换到真天球坐标系; B_1 为极移矩阵,它将历元平地球坐标系(CTS)转换到瞬时极地球坐标系。有关详细的说明可参阅 IERS 规范《IERS STANDARDS(Draft),1995》。

1. 岁差矩阵 P

$$P = P_Z(\zeta_A)R_Y(-\theta_A)R_Z(Z_A) \quad (1.1.3)$$

式中的 $R_i(\alpha)$ 表示绕 i 轴旋转 α 角,本书中下同。

$$\begin{aligned} R_X(\alpha) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \\ R_Y(\alpha) &= \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & 0 & \sin(\alpha) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \\ R_Z(\alpha) &= \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \begin{cases} \zeta_A = 2306''.2181t + 0''.30188t^2 + 0''.017988t^3 \\ \theta_A = 2004''.3109t - 0''.042665t^2 - 0''.041833t^3 \\ Z_A = 2306''.2181t + 1''.09468t^2 + 0''.018203t^3 \end{cases} \end{aligned} \quad (1.1.4)$$

式中的 t 为从历元 J2000.0 算至观测瞬间 J_D (以儒略日计) 的儒略世纪数:

$$t = \frac{J_D - 2452545.0}{36525} \quad (1.1.5)$$

即 t 为观测瞬间的 TAI 与 2000 年 1 月 1 日原子时(TAI)12 时的时间差,化成天为单位,再除以 36525。

2. 章动矩阵 N

$$N = R_X(-\epsilon_A)R_Z(\Delta\psi)R_X(\epsilon_A + \Delta\epsilon) \quad (1.1.6)$$

式中的 ϵ_A 为观测瞬间的平黄赤交角,由下式计算:

$$\epsilon_A = 84381''.448 - 46''.8150t - 0''.00059t^2 + 0''.001813t^3 \quad (1.1.7)$$

式中的 t 与(1.1.5)式相同。

(1.1.6) 式中的交角章动 $\Delta\epsilon$ 和黄经章动 $\Delta\psi$ 由 1980IAU 章动理论来计算,作为该理论基础的模型地球是由一个固态内核、一个液态外核和一个弹性地幔组成。

$$\begin{cases} \Delta\psi = \sum_{i=1}^{106} [(A_i + A'_i t) \sin(\sum_{j=1}^5 K_{ji} \alpha_j(t))] \\ \Delta\epsilon = \sum_{i=1}^{106} [(B_i + B'_i t) \cos(\sum_{j=1}^5 K_{ji} \alpha_j(t))] \end{cases} \quad (1.1.8)$$

其中的 $A_i, A'_i, B_i, B'_i, K_{ji}$ 为 106 阶章动序列对应的值,列于附表 1 中, $\alpha_j(t)$ 的物理意义及其

计算公式为:

$$\text{月亮平近点角 } \alpha_1 = l$$

$$= 134^\circ 57' 46''.733 + (1325' + 198^\circ 52' 02''.633)t + 31''.310t^2 + 0''.064t^3$$

$$\text{太阳平近点角 } \alpha_2 = l'$$

$$= 357^\circ 31' 39''.804 + (99' + 359^\circ 03' 01''.244)t - 0''.577t^2 - 0''.012t^3$$

$$\text{月亮平交点距 } \alpha_3 = F$$

$$= 93^\circ 16' 18''.877 + (1342' + 82^\circ 01' 03''.137)t - 13''.257t^2 + 0''.011t^3$$

$$\text{月亮离开太阳的平径差 } \alpha_4 = D$$

$$= 297^\circ 51' 01''.307 + (1236' + 307^\circ 06' 41''.328)t - 6''.891t^2 + 0''.019t^3$$

$$\text{月亮平黄径 } \alpha_5 = \Omega$$

$$= 125^\circ 02' 40''.280 - (5' + 134^\circ 08' 10''.539)t + 7''.455t^2 + 0''.008t^3$$

3. 地球自转矩阵 B_2

$$B_2 = R_Z(-GST) \quad (1.1.9)$$

$$GST = GMST + \Delta\psi \cos \epsilon_A + 0''.00264 \sin \Omega + 0''.000063 \sin 2\Omega$$

式中的 $\Delta\psi$ 和 Ω 同上, $GMST$ 为观测瞬间的格林尼治视恒星时, 它由下式计算:

$$GMST = GMST_{0hUT1} + \gamma[(UT1 - UTC) + UTC]$$

其中的 γ 为世界时与恒星时的秒长比:

$$\gamma = 1.002737909350795 + 5.9005 \times 10^{-11} T'_u - 5.9 \times 10^{-15} T'^2_u$$

$GMST_{0hUT1}$ 是世界时 $(UT1)0^h$ 对应的格林尼治平恒星时:

$$GMST_{0hUT1} = 6^h 41^m 50''.54841 + 8640184''.812866 T'_u + 0''.093104 T'^2_u - 6''.2 \times 10^{-6} T'^3_u$$

这里的 T'_u 为:

$$T'_u = \frac{d'_u}{36525}$$

d'_u 是观测当天 $UT1$ 的 0 时与 2000 年 1 月 1 日 12 时 $UT1$ 相差的天数, 故其取值为 $\pm 0.5, \pm 1.5, \dots$ 。

4. 极移矩阵 B_1

$$B_1 = R_x(\gamma_p) R_y(x_p) \quad (1.1.10)$$

式中的 x_p 和 y_p 为极移值, 可以从 IERS Notes 中查取, 或仅取一近似值作为参数求解。因为 x_p 和 y_p 不大于 $0''.4$, 故取弧度为单位后可写为:

$$B_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -x_p \\ 0 & 1 & y_p \\ x_p & -y_p & 1 \end{pmatrix} \quad (1.1.11)$$

§ 1.1.4 研究 GPS 涉及到的其他一些坐标架

由于 GPS 接收机测得的相位和伪距观测值是以接收机和卫星的天线相位中心为准的, 而台站位置是以点位标石中心为准, 因此必须量测接收机天线相位中心与点位标石中心的相对位置, 量测值通常是向上(天线高)、向北和向东的偏移量, 量测值实际上表示在当地切

平面坐标架内;类似地,卫星位置是以其质量中心为准的,它与卫星天线相位中心的偏差表示在星固坐标架内。下面给出这两种坐标架的定义。

1. 当地切平面坐标架

在进行测量工作时,有很多工作是以铅垂线或水平面为准的,因为这种基准容易通过垂球或气泡来实现。在进行 GPS 测量时,我们通过吊垂球、或光学对中、或强制对中将接收机的天线相位中心安置在台站点位的上方,使得接收机的天线相位中心与台站点位处在一条铅垂线上,它们之间的距离即为野外量测的天线高。有时由于某些特殊原因,天线相位中心与台站点位不处在一条铅垂线上,除了量取天线相位中心到台站点位所在水平面的铅垂距离(天线高)外,还需量测天线相位中心在台站点位所在水平面上的投影点与台站点位在北向和东向上的差数。由于水准面是不规则的,难以用数学式子来表示,按测量中的通常做法,铅垂线被近似认为就是地球椭球的法线,其差别即垂线偏差,因为天线中心与台站点位不会相差太远,其误差是可以忽略的。

为了对天线相位中心与台站点位之差引起的观测量变化加改正,需定义站当地切平面坐标架,如图 1.1.1 所示,原点为台站标志中心,参考平面为站心处地球椭球的切面, E 轴位于参考平面内向东, N 轴位于参考平面内向北, H 沿大地垂线向上。图中的 B, L 是台站的大地经纬度。

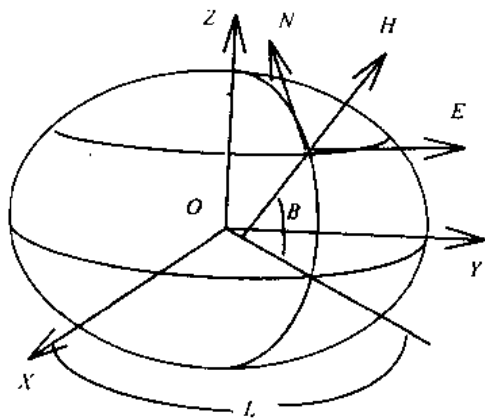


图 1.1.1 站当地切平面坐标架

2. 卫星固连坐标架

相对于地球,可以认为卫星是一个质点,而在卫星轨道确定中,正是这样认为的,所以确定出的轨道是以卫星的质量中心为准的。然而,接收机量测记录下来的相位和伪距值是以卫星天线的相位中心为起算点的,两者之间的距离为 1m 左右,目前轨道确定可达到 0.15m 左右的精度,故在精密定轨中不能忽略的该项影响。

定义卫星固连坐标架如下:原点为卫星质量中心, Z 轴指向地球中心, Y 轴为卫星方向与太阳至卫星方向的叉乘方向, X 轴与 Y, Z 轴组成右手系。由于 GPS 卫星两侧的太阳能翼板保持正对太阳,所以 Y 轴方向实际上总是处在太阳能翼板平面内, Y 轴的正负方向是当卫星处在地球阴影内时散热的方向,如图 1.1.2 所示。

在该坐标架下,BLOCK I 卫星(GPS 正式工作卫星上天以前的试验卫星,目前已全部退

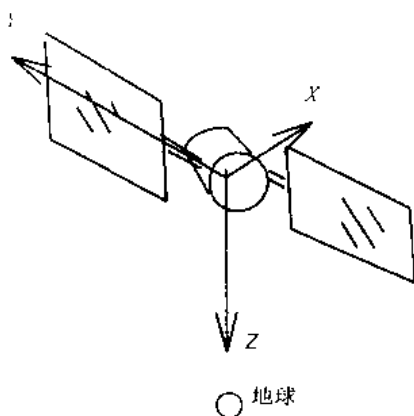


图 1.1.2 卫星固连坐标架

出工作状态)的天线相位中心的坐标为(单位:m):

$$\begin{cases} \Delta X_{SAT} = 0.210 \\ \Delta Y_{SAT} = 0.0 \\ \Delta Z_{SAT} = 0.854 \end{cases} \quad (1.1.12)$$

BLOCK II 卫星(GPS 正式工作卫星,目前正在使用)的天线相位中心的坐标为(单位:m):

$$\begin{cases} \Delta X_{SAT} = 0.279 \\ \Delta Y_{SAT} = 0.0 \\ \Delta Z_{SAT} = 0.9519 \end{cases} \quad (1.1.13)$$

§ 1.2 时间系统概述

在 GPS 研究中涉及到三种时间概念,一是动力学时,它是在一定引力理论(如牛顿定律或广义相对论)下,物体运动方程中的独立时间变量,我们在生成 GPS 星历时,实际上隐含使用了动力学时(TDT,TDB),它是一个秒长均匀的时间;二是原子时(TAI,UTC,GPST),它由原子钟量测,是地面上的均匀时间基准,秒长为国际协议确定的原子振荡频率倒数;三是恒星时(UT1),由地球自转确定。三种时间的关系可简要地用图 1.2.1 表示。

§ 1.2.1 动力学时

在一定参考架和某引力理论下(目前采用惯性坐标系和广义相对论),动力学时用于描述物体的运动方程,在以太阳系质心为坐标原点的惯性坐标系中量测的动力学时称为质心动力学时 TDB(Barycentric Dynamical Time),它是从历书时(ET)演化来的,相当于广义相对论中的坐标时。由于地球在太阳系中的运动,一个固连在地球上的钟,如果以 TDB 计,则会显示出约 $1.6 \times 10^{-3}s$ 的周期性抖动,在研究 GPS 等近地卫星时,我们不必使用 TDB,因为它对地球和卫星的影响是接近的,而可使用地球动力学时 TDT(Terrestrial Dynamical Time),它在地球引力场中是一个秒长均匀的时间,秒长与原子时相同。相对论效应引起的 TDB 与 TDT

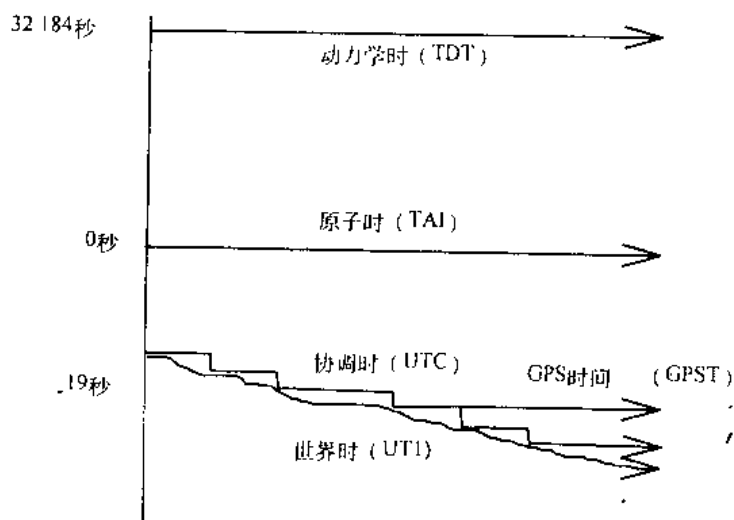


图 1.2.1 几种时间系统之间的关系

之间差别的最大项为:

$$1.658 \times 10^{-3} \sin E(S)$$

式中的 E 是地月系质心绕太阳旋转轨道的偏近点角。

§ 1.2.2 原子时(TAI,UTC,GPST)

原子时 TAI(International Atomic Time) 是地球上的时间基准,它由国际时间局从多个国家的原子钟分析得出,是一个连续的时间基准,可作为 TDT 的具体实现,它与 TDT 的关系是

$$TDT = TAI + 32.184(S) \quad (1.2.1)$$

原子时的秒长由铯原子在能级间的跃迁次数决定。

由于原子时是一个均匀的时间基准,在实用上会出现一个不可避免的问题:地球绕太阳的旋转不均匀地减慢,目前每年约减慢 1s,故它与太阳年将不同步。因此需引入协调时 UTC(Coordinated Universal Time),它与原子时的秒长相等,在需要的时候,选在 6 月或 12 月的最后一天加上 1 秒即跳秒,使得与 UT1 之差小于 0.9 秒。

为了 GPS 数据处理方便,又定义了 GPS 时间,GPST(GPS Time)。它使用 TAI 的秒长基准,而又避免 UTC 跳秒的麻烦。在 1980 年 1 月 6 日 0 时(星期六与星期日的子夜),GPST 被设置成与 UTC 完全一致,而其后 GPST 不受跳秒的影响,GPST 与 TAI 之差是一个常数(如图 1.2.1),GPS 卫星发布的时间信号是 GPST。

$$GPST + 19(S) = TAI \quad (1.2.2)$$

GPST 也是原子时,通常 GPST 以 GPS 星期和星期中的秒数的形式给出,也以年月日时分秒、或儒略日与日中的秒数等形式给出。GPST 与 TAI 之间相差常数 19s,它与 UTC 之间的差数将随着跳秒出现次数的增加而越来越大,但总是一个整数秒数。

§ 1.2.3 恒星时(UT1)

恒星时是通过观测某一地球上的经圈与春分点(地球赤道与其绕太阳公转轨道的交点)

之间的夹角来决定的,其一般形式就是 UT1(Universal Time),由于地球自转存在不规则部分,而且地球赤道和地球运动轨道相对于春分点都在变化,GPS 等天文地球动力学手段测定的日长变化参数就是其中难以模型化的部分,所以恒星时或 UT1 的严格定义是非常复杂的,这里不再进一步详细论述。

§ 1.2.4 儒略日、儒略年

除了以上讲述的几种时间外,在 GPS 研究中经常会遇到儒略日和儒略年的概念,一个儒略年的长度为 365.25 个平太阳日,儒略历元是年初,如历元 1950.0 指 1950 年 1 月 1 日 0 时,对应的儒略日(JD)为 2433282.5,在天文学研究中,经常会用到 1900.0,1950.0,2000.0 三个时间历元,它们对应的儒略日如下表:

表 1.2.1 几个主要的儒略历元对应的儒略日

儒略历元	儒略日	贝赛耳历元
1900.0	2415020.0	1899.99142
1950.0	2433282.5	1950.000210
2000.0	2451545.0	2000.001278

因此在 § 1.1.2 中的地心惯性参考系历元 J2000.0 实际上对应的儒略日是 2451545.0,表中的贝赛耳历元是指太阳平黄经为 280° 的时刻,对应的年长度称为贝赛耳年或假年,其长度为平回归年的长度,即 365.242198 个平太阳日,如贝赛耳历元 1950.0 对应的世界时时刻是 1949 年 12 月 31 日 22 时 9 分 42 秒,目前贝赛耳年已被儒略年代替。

为了使用方便,常采用修改的儒略日(MJD)

$$MJD = JD - 240000.5 \quad (1.2.4)$$

对于儒略历元 1950.0,修改的儒略日是 33282.0。

贝赛耳年和儒略年的长度对应的回归世纪和儒略世纪的长度分别为 36524.22 个平太阳日和 36525 个平太阳日。

在 GPS 研究中,我们常用修改的儒略日和日中的秒数来表示历元时刻。

§ 1.3 常用的一些常数

为使用方便,本节给出一些 IERS 最新常用常数的建议值(IERS STANDARDS,1995)。

表 1.3.1 IERS 最新常用常数建议值

常 数	建 议 值	中 误 差	说 明
C	$299792458(m/s)$	无(定义值)	光速
W_0	$62636857.5(m^2/s^2)$	$1.0(m^2/s^2)$	大地水准面上的正常重力位
τ_A	$499.00478642s$	$0.00000007s$	以秒计的天文单位长度

续表

常 数	建 议 值	中 误 差	说 明
α_u	149597871475m	30m	以米计的天文单位长度
α_E	6378136.55m	0.10m	地球椭球赤道半径
f	1/298.256421867		地球椭球扁率
J_2	1.0826359×10^{-3}	6.0×10^{-10}	地球引力场系数
G	$6.67259 \times 10^{-11}(\text{m}^3/\text{kg}/\text{s}^2)$	$8.54 \times 10^{-15}(\text{m}^3/\text{kg}/\text{s}^2)$	引力常数
GM	$3.986004415 \times 10^{14}(\text{m}^3/\text{s}^2)$	$8 \times 10^4(\text{m}^3/\text{s}^2)$	地球引力常数
M_m/M	0.012300034	3×10^{-9}	月亮与地球质量比
M_s/M	332946.045	0.02	太阳与地球质量比

第二章 GPS 定轨定位模型

§ 2.1 GPS 卫星定位原理概述

§ 2.1.1 GPS 卫星定位系统概述

GPS 系统是美国国防部自 1973 年提出的全球定位系统,经过方案论证和试验,已于 1994 年底全面建成投入使用。它的前身就是子午卫星导航系统(TRANSIT),GPS 系统开始是设计用来满足军方和民用实时导航需要的,由码信息来实现,每个 GPS 卫星在两个频率波段上发布独立的信号,两个波段 L1 和 L2 的频率分别为 1575.42MHz 和 1227.60MHz,相应的波长为 19cm 和 24cm,在卫星信号载波上调制有标准码 C/A 码,即 S 码(Standard Code)、精密 P 码(Precise Code)、卫星位置(广播星历)等有关系统信息。C/A 码主要用于民用,距离测量的精度约为 20m,采用 C/A 码的导航定位称为标准定位服务 SPS(Standard Positioning Service),P 码由军队和特许的民间用户使用,其距离测量精度约为 2m,采用 P 码的导航定位称为精密定位服务 PPS(Precise Positioning Service)。在测量应用中,可以使用这两种观测量,但更精确的方式是观测载波信号的相位,大地测量和地球动力学研究必须使用相位观测值。

GPS 系统的实时导航定位精度很高,美国在 1992 年起实行了所谓的 SA(Selective Availability)政策,即将低广播星历中卫星位置的精度,降低星钟改正数的精度,对卫星基准频率加上高频的抖动(使量测伪距和相位的精度降低),后又实行了 A-S(Anti-Spoofing)政策,即将 P 码改变为 Y 码,即对精密伪距测量进一步限制,而美国军方和特许用户不受这些政策的影响,但美国为了获得更大的商业利益,SA 政策终将关闭。

整个 GPS 系统由空间部分、地面控制部分和用户部分组成。

空间部分由 21 颗卫星加 3 颗备用卫星组成,均匀分布在 6 个轨道面上,离地面高度约为 20000 余公里,轨道面的倾角约为 55° ,轨道扁心率接近于零(即运动轨道接近于圆形),卫星运动周期接近于 12 小时,某时某地卫星在空中的分布情况将在第二天同时同地近似地再现(约提前 4 分钟)。这样分布的卫星使得地球上任何地点任何时刻均可观测到 4 颗以上卫星,最多时可达 9 颗。

地面控制部分由美国国防部负责,确定卫星位置,更新卫星发布的信息,对整个系统进行维护。

控制部分即用户部分,由于 GPS 是一种被动式的定位系统,GPS 卫星只发射而不接收来自用户的信号,系统不管理用户,故用户可以无限多,只要有 GPS 接收机,就可接收 GPS 卫星信号,而且与其它用户无关,具有很好的隐蔽性。目前已出现了很多型号的 GPS 接收机,在大地测量方面常见的有:ROGUE,TRIMBLE,ASHTECH 等。

GPS 定位系统的出现是对经典大地测量的一次革命,它将观测从地对地变成了地对空,测站间的互相通视已不再需要,只要对天通视即可,观测不再受气候条件的影响,白天和夜晚均可观测,甚至在夜晚观测因大气稳定面更有利。

GPS 定位系统在导航、大地测量、工程测量、授时、动态定位等方面已得到了非常广泛的应用。

§ 2.1.2 GPS 观测量

在介绍 GPS 观测量前先简要介绍 GPS 卫星信号的结构。

每个 GPS 卫星均发射可区分的信号,每个卫星的信息包含在两个 L 波段(L1 和 L2)的载波信号中,在载波上调制有 C/A 码和 P 码(L2 上不调制 C/A 码)以及卫星导航信息,卫星钟振荡器的基准频率是 $f_{base} = 10.23\text{MHz}$,卫星发射的载波和调制在载波上的码的频率都是由此基准频率产生的:

L1 载波频率为 $f_{L1} = 154 \times 10.23 = 1575.42\text{MHz}$,波长 19cm;

L2 载波频率为 $f_{L2} = 120 \times 10.23 = 1227.60\text{MHz}$,波长 24cm;

C/A 码的频率为 $f_{C/A} = 10.23 \div 10 = 1.023\text{MHz}$,波长约 300m;

P 码的频率为 $f_P = 10.23 \times 1 = 10.23\text{MHz}$,波长约 30m。

L1 和 L2 的载波均是正弦波,P 码的频率是 10.23MHz,其序列中一个元素的长度是 100ns($100 \times 10^{-9}\text{s}$),相应于 30m 的距离,无其它误差时对 P 码的量测可达到优于米级的精度,其周期为 267 天(即在 267 天内不会重复)。C/A 码要比 P 码简单得多,其码序列的频率是 1.023MHz,相应于 300m 的波长。由于 C/A 码的周期是 1ms,因此很快就能被接收机锁定,P 码接收机的工作程序也是先锁定 C/A 码,解出系统信息,再切换到 P 码精密伪距观测,当然这是实时完成的。

GPS 观测值可以针对载波相位或码。针对载波相位的量测可得相位观测值,在 L1 和 L2 上均存在,针对码的观测值称为伪距,它可以是 C/A 码伪距或 P 码伪距,C/A 码伪距只在 L1 上存在,它也用于接收机快速俘获(锁定)卫星,P 码伪距在 L1 和 L2 上均存在。另外有些接收机还可以记录多普勒频率变化量。

下面分别介绍这些观测量:

1、伪距观测值

它是对码的量测值,就是卫星到接收机的距离,由于含有接收机钟和卫星钟的误差,故称为伪距。

因为 C/A 码和 P 码均是由数学方法产生的两进制码,具有随机噪声的特性,因而也称为伪随机噪声,这些码相当于精密的时标,将卫星与接收机振荡器产生的码序列进行相关处理就可求卫星信号的传播时间,乘上光速便得到伪距。

若在一个历元同时测到 4 个卫星的伪距,就可以确定该时刻接收机的三维位置和接收机与卫星的钟差之差,相当于常规测量中的距离交会,其定位精度是接收机与卫星几何分布的相对关系的函数,最理想的情况是,4 颗卫星分处 4 个象限中,高度角是 $40^\circ \sim 70^\circ$,指示几何图形好坏的指数称为几何强度因子 GDOP,一般的 GPS 接收机面板上都显示该指数,它相当于当伪距测量的误差为 1 时的定位精度。伪距测量的精度要比相位测量精度低得多,在没有 SA 政策时,C/A 码伪距的精度约为 20m 左右,P 码伪距的精度为 2m 左右,也就是说当 GDOP 等于 3 时,利用 C/A 码伪距可期望获得 60m 的实时定位精度,利用 P 码伪距可期望获得 6m 的定位精度。当然,这只是估计,在实际应用中还要受到多路径误差等一些不确定因素的影响。

2、相位观测值

对收到的卫星信号,进行解码或采用其它技术,将调制在载波上的信息去掉(有相关技术和平方技术等方法)后,就可以恢复载波。严格而言,载波相位应被称为载波拍频相位,它是收到的受多普勒频移影响的卫星信号相位与接收机本机振荡产生信号相位之差。一般在接收机钟确定的历元时刻量测,保持对卫星信号的跟踪,就可记录下相位的变化值,但开始观测时的接收机和卫星振荡器的相位初值是不知道的,起始历元的相位整数也是不知道的,即整周模糊度,只能在数据处理中作为参数解算。

观测历元间隔通常应取为可以被 60s 整除的数,因为一般在 0 分 0 秒应有观测值。历元间隔最小为 1s,在长基线精密定位时,历元间隔可取为 30s 或 60s,相位观测量的精度要比伪距高得多,L1 和 L2 的波长分别是 19cm 和 24cm,因此最粗糙的量测也能达到厘米级的精度,一般接收机的相位量测精度可达 0.01 周,相当于毫米级。与电磁波测距仪一样,相位量测存在一个模糊度问题,相位测量只能测出距离的变化,求解出这个模糊度后(在后面讲述),就能知道卫星与接收机之间的精确距离。

3、多普勒频率变化观测值

由于卫星与接收机之间的相对运动,接收机收到的卫星信号的频率会发生变化,有些接收机可以记录频移值,这是 GPS 系统的前身多普勒导航定位系统的主要观测值。它在长距离精密定位定轨中,不能起大的作用,一般不为人们所重视,大部分的接收机也不记录该值。

接收机在观测相位和伪距数据的同时,还将广播星历和预报星历记录下来。

接收 GPS 信号还能获取纳秒级精度的时间基准信号。

由于接收机的型号很多,厂商设计的数据格式各不相同,国际上为了能统一使用来自不同接收机的数据,设计了一种与接收机无关的 RINEX(The Receiver Independent Exchange Format)格式,目前已使用 2 号版本。下面分别介绍 RINEX 2 格式的广播星历文件、观测数据文件、和地面气象数据文件。

RINEX 2 格式的 GPS 数据文件的命名规则为:

ssssdddf. yyt

其中:

ssss——以 4 个字符表示的台站名;

ddd——文件中第一组数据观测时间的年积日(例如:1 月 1 日为 001,2 月 2 日为 032);

f——该站该日收到的某类文件的顺序号,0 表示只有一个;

yy——以两位数表示的年(例如:96 表示 1996 年);

t——文件种类:

O——观测数据文件;

N——广播星历文件;

M——地面气象数据文件。

为了便于交流,RINEX 2 格式的 GPS 数据文件均以①无带标;②ASCII 码;③每个记录长度为 80 个字符,块大小为 8000,录制在磁带上,磁带上的第一个文件是全部文件的目录。但目前国际上的 IGS 等组织是通过通讯方式(Internet 网),来快速地提取全球 GPS 长年观测站数据的,并将数据存在大型计算机中,使用者可通过 Internet 网任意提取。

应注意,在 RINEX 2 格式的 GPS 数据中,时间均以 GPST 计,即与 UTC 要差一个整数跳