

※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※

G P S 定 位 指 南

※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※

第 二 分 册

武 汉 测 绘 科 技 大 学

一 九 八 八 年 四 月

翻 译 说 明

我校为了进一步深入开展 GPS 定位技术的研究,同时也为了给从事测绘、导航和其它有关 GPS 定位各部门的技术人员提供一个学习和了解国外在这个领域内的最新进展,利用世界银行的贷款,邀请国际著名卫星大地测量学家,加拿大新布伦瑞克大学 D. E. Wells 教授前来我校讲学,并开展学术讨论。Wells 教授主持编著的《GPS 定位指南》一书是他讲编的一部分,我们提前将她翻译出来并印刷出版,供听课同志使用。

翻译主要依据的版本为 1987 年 5 月的修订稿,她同 1986 年 12 月第一版相比,许多章节都有较为明显的变动,反映了作者们的新认识,以及 GPS 定位技术的新进展。参加为本书撰稿的还有,国际大地测量学界久负盛名的学者如 Vanicek, Schwarz, Krakiwsky 等一批教授,以及加拿大 GPS 协会里的许多专家,从而使得本书在当前学术界享有很高的权威性。

本书由十五章正文和四个附录所组成,共六百页左右,包含各种图表近三百幅,可谓内容丰富详尽,文字深入浅出,适合各类人员自学、参考,也可供各类 GPS 定位技术培训稿作教材或教学参考书。

由于本书篇幅较大,为了方便读者使用和携带,也为了便于稿订、出版和发行,我们将她分成五个分册出版。第一分册从前言至第四章,第二分册为五至七章,第三分册八至十一章,第四分册十二至十五章,第五分册则把四个附录集中在一起,方便读者的查阅。

全书是由我组李征航同志在加拿大进修期间翻译的,并由组内成员在短期内缮校定稿并付印。由于我们的水平和能力有限,对本书译校和出版中存在的问题,欢迎随时来信指正,在此谨表由衷的感谢!

武汉测绘科技大学 大地系 空间室 GPS 组

第五章 轨道的描述、确定及其传播

§5.0 轨道的描述、确定及其传播

在这一章中我们将介绍轨道信息在GPS定位中的作用。在下列四个与GPS定位过程有关的主要工作中都需要轨道信息：确定接收机的位置，制订计划，辅助接收机的搜索和选择卫星。第一项工作要求精确的轨道信息，后三项工作仅需近似的轨道信息。

卫星的轨道特性依赖于开普勒三大定律，我们将分别加以讨论。在本章中还将介绍开普勒轨道的应用：在协议地球坐标系中计算卫星的位置。然而开普勒定律没有顾及作用在卫星上的各种摄动力，如地球赤道隆起的影响，太阳和月亮的万有引力，太阳的光压和大气阻力等。对每种摄动的影响也将加以介绍。

轨道信息有两种：预报轨道和事后计算的轨道。本章将介绍每种类型的轨道的计算方法、资料来源和精度。尤其是对GPS卫星广播的轨道信息将进行详细介绍。

建议进一步阅读：

Broughton, D.W., R.I. Esai and P.J. Farrow (1984)

Brouwer, D., and G.M. Clemence (1961)

Buffett, B.A. (1985)

Delikaraoglou, D. and R.R. Steeves (1985)

Steeves, R.R., Delikaraoglou, D., and N. Beck (1986)

Henriksen, S. W. (Ed.) (1977)

Kaula, W M (1966)

Mertikas, P., D. Delikaracglu and R. Sontterre (1986)

Nakiboglu, S. M., B. Buffet, K. P. Schwarz, E. J. Krakiwsky, B.

Wanless (1984)

O Toole, J. W. (1976)

Remondi, B. W. (1985)

Russell, S. S. and J. H. Schsibly (1978)

Swift, E. R. (1985)

van Dierendonk, A. J., S. S. Russell, E. R. Kepitzke and M

Birnbaum (1978)

5.00

轨道的描述确定及其传播

需要

- 精确的信息
- 近似的信息
- 卫星的选择

轨道描述——理想情况

- 坐标系统
- 作用于卫星上的力
- 开普勒定律
- 开普勒轨道数据

- 位置和速度

轨道描述——现实情况

- 非中心地球重力场
- 三体问题、潮汐、太阳光压和大气阻力

定轨

- 星历预报
- #### 事后处理的星历
- 自主控制系统的概念

轨道信息的发布

广播星历

- 轨道的描述
- 坐标计算

§5.1 对精密轨道信息的要求

精密的轨道资料对于处理的GPS接收机所收集到的观测值以获得用户的位置是不可少的，用户的位置通常被认为是定位工作的最终产品。在进行单点定位时，对精密的轨道信息的要求虽然应最为严格，因为星历中的任何误差都将直接转化为等效的距离误差，从而对最后的位置产生系统性的影响。

在相对定位中，星历误差对最后结果的影响多少要小些，这是因为基线长度对于卫星高度20000万公里来说要小得多，卫星轨

道误差可以被消去。基线矢量 b 的误差矢量 db 可以用测定基线 b 的第 i 颗卫星的位置误差矢量 dr_i 的函数来定义，其方程为：

$$db \cdot e_i \rho_i = b \cdot \Sigma_i dr_i$$

式中 ρ_i 为至第 i 颗卫星的距离， e_i 为至第 i 颗卫星方向的单位矢量。显然 db 不仅取决于 ρ ， b 和 dr 的大小，而且也和它们的方向有关。同样基线的解也取决于在一个持续长的时间段内从几颗卫星所获得的测量值。一般说来，所涉及的几颗卫星的位置误差 dr 也将是不同的。某一颗卫星轨道误差的影响，避如 dr_k ，也由下式给出：

$$db \cdot e_k \cdot \rho_k = b \cdot dr_k$$

取方程中各矢量的大小，我们就得到图中给出的经验公式，该公式给出了作为星历误差的函数的基线误差的数值 $\|db\|$ 的上限。显然，对于几十公里长的基线轨道误差的影响很小，采用目前的技术精度可达几个厘米。对于几百公里量级的较长的基线而言，其影响较大足以成为目前利用 GPS 进行精密大地定位和地球动力应用中的一个主要障碍。

相对精度	卫星位置误差	基线长度	基线误差
db/b	dr (米)	b (公里)	db (厘米)
1 PPM	20	10	1
		100	10
		1000	100

0.1 PPM	2	10	0.1
		100	1
		1000	10

* 上表根据经验公式导出——译注。

§ 5.2 对近似轨道信息的要求

实际计算GPS接收机的位置时需要精确的轨道信息。与GPS有关的一些其它任务也需要了解卫星的位置，但精度可低得多——可能只需要几百公里的精度。下面为其中的两项任务：

(1) 制订GPS的使用计划：要知道何时（一天中的什么时候）可使用GPS接收机就需要轨道信息。在目前非完全覆盖的情况下每天只有在一个很短的时间段内（被称为“窗口”）才能看见卫星这一点就显得格外重要。

(2) 信号的捕获：任何一台GPS接收机必须做的第一件事就是捕获信号。如果对于要跟踪的卫星一无所知，那么接收机必须进行“冷启动”（Cold start）并进行“全天空搜索”。这样做就需要在32种可能的C/A码中——进行选择，并且对每个信号要在整个可能的多普勒频移范围进行搜索，以便锁住每一个信号。如果至少有一颗卫星可见，则这样搜索可能要花费长达30分钟的时间。假如接收机已经知道了哪些卫星是可见的，那么搜索的时间就

可大大的缩短。因为这样在 32 种码中只需搜索几种码就可以了。如果卫星的位置也是知道的，那么多普勒频移就能预先求出，用以限制必须搜索的频率范围。采用这种方法，搜索时间可减少到几分钟以内。

一旦一颗 GPS 卫星的信号被捕获，来自该卫星的电文就能向接收机提供所有其它的 GPS 卫星的概略位置（“历书”数据），这样就能非常迅速地捕获它们的信号。

这种为了制定计划或帮助接收机捕获卫星信号而计算的概略的卫星位置被称为“卫星预报”。为了制订计划这一目的，可以采用几种有用的图解表示法。

(a) 为每颗卫星绘制一幅高度角的方位角对时间的线性图（相对于某一确定的位置）

(b) 极坐标图，在这幅图中每颗卫星相对于某一确定位置的高度角和方位角作为时间的函数被预先求出并画在图上。

(c) 轨迹图：卫星的星下点（卫星和地心的连线与地球表面的交点）被画在此图上。

(d) 可见性图，这是从一确定的位置上可以被看见的卫星数目对一天中的时间的关系图，或者是在某一确定的地方每颗卫星的可以被看见的时间段的图（见图 5.2）。

(e) 图形强度因子 (DOP) 图：这是在一天的不同时刻中，可见卫星星座的几何强度的变化图（见图 5.2）。也可不用在某一特定

时刻 DOP 的等值线区域图。

§5.3 卫星的选择

利用目前 7 颗卫星 GPS 星座，同时有 6 颗卫星位于观测者的地平线以上（可以看见）是可能的。采用完全投入运行后的 GPS 星座可以同时看见多达 10 颗卫星，多数 GPS 接收机不具有跟踪全部可见卫星的能力。在许多情况下，只能同时跟踪 4 颗卫星。

这样就产生一个问题：如何选择最佳的卫星来观测？通常采用的标准是选择能最精确地确定 GPS 接收机位置的那些卫星来观测。观测将要被确定的位置有多精确的一种标准就是图形强度因子 DOP。于是选择卫星的问题就化为寻找提供最小的 DOP 值的那一组卫星。

使用 GPS 测量最直接的当的方法是四维单点定位（经度、纬度、高程和时间）。在这种情况下合适的 DOP 为几何图形强度因子 GDOP。在接收机可以同时跟踪 4 颗卫星的情况下，GDOP 和由接收机至 4 颗卫星的单位矢量所构成四棱锥体的体积 V 有关：

GDOP 与体积 V 成反比，因此要选择能构成体积最大的四棱锥体即具有最小的 GDOP 值的卫星。这就提供了一种选择最佳卫星的简单算法。这种算法简单到可以放在接收机本身的软件中去。

然而对于可跟踪 4 颗以上的卫星，但又不能跟踪全部可见卫星的接收机来说，上述方法就不再适用了。同样如果对于某些 GPS 应用来讲（例如进行二维水平定位或授时等应用），最合适的 DOP

并不是GDP,那么这一简单的算法所选择的卫星也不一定是最佳的卫星。最后对于相对定位和网定位来讲选择最佳卫星的问题也更复杂。现已发现当基线不长时,为单点定位所选择的最佳卫星同样也是进行相对定位的最佳卫星。然而对于长基线来讲(譬如讲5000公里长的基线),就不再是这样了。

最佳卫星的选择是随时间而变化的,随着卫星的升起和降落,它们所组成的四棱锥体的形状也在变化。一种办法是不管什么时候一旦出现了更好的卫星图形时,立刻改为跟踪新的卫星。然而还有其它一些可能是更重要的准则,例如在一个较长的时间段内应保持跟踪同一组卫星。在这种情况下,卫星的选择问题尚未解决。

§5.4 卫星围绕着理想的地球运动

为了研究卫星的运动,首先来看一下卫星围绕着理想的地球运动时所遵循的自然法则是适宜的。所谓理想的地球,即:

- 具有完善的中心重力场
- 无大气

5·04

卫星围绕着理想的地球运动

理想的地球:

完全地质的球形地球

- 无大气

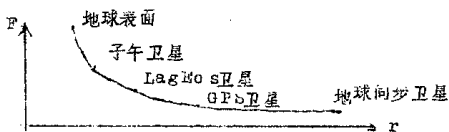
牛顿万有引力定律：

$$F = G(Mm)/r^2$$

M = 地球质量， m = 卫星质量

G = 万有引力常数， r = 卫星的地心距离

F = 万有引力



实际含义：

- 重力决不会变为零，虽然在深空地球的引力与其它天体的引力相比可能变得很小
- 重力对卫星发射有直接的影响

卫星被发射后，就开始围绕地球作自由旋转。这种在有重力场中的运动遵循牛顿万有引力定律：

$$F = GMm/r^2$$

式中 F 为万有引力， M 是地球质量， m 是卫星质量， r 是卫星至地心的距离， G 是万有引力常数。

牛顿万有引力定律的实际含义是重力永远不会是零，不管卫星在

于空间何处，总存在着一个把它拉回地球的力，虽然在深空地球引力和其它大体的引力相比可能变得很小。

§5.5 卫星的发射及进入轨道

重力对卫星发射有直接影响。为了把GPS卫星发射到一个圆形轨道上去，需要约8公里/秒的最小发射速度*。实际上，在地面发射时要获得一个真正的圆形轨道是较为困难的。所有的地球轨道卫星，包括GPS卫星在内，严格地讲都在椭圆轨道上。

原计划所有的GPS卫星都从航天飞机上进行发射，其方法是先把卫星的它们的Delta级的有效负载助推器PAM-DII放到一个低高度的初始圆形轨道中。然后有效负载助推器PAM-D再把卫星推入一个几乎是圆形偏置轨道中去。通过速度的增加，卫星上的推进器将把卫星推进到最后的工作轨道上。

由于航天飞机“挑战者号”的失事，部分发射工作又将用火箭来完成，把GPS和其它军事卫星送入轨道。至1986年10月止，航天飞机的飞行日程表仍未商定，若假设1986年1月火箭发射的准备工作能够完成，则GPS卫星的发射时间将如下表所示。如目前的原型卫星中有4颗仍能正常工作，那么到1989年11月就能在全球形成二维导航能力。只要那时还有2颗原型卫星仍能

* 卫星发射速度与卫星环绕速度是两个不同的概念，译文采用第一版的数值——校注。

正常工作的话，到1991年2月就能形成三维覆盖。

卫星号	发射工具	日期	卫星号	发射工具	日期
1	火箭	1989年2月	16·17	航天飞机	1991年2月3D
2	火箭	1989年5月	18	火箭	1991年2月
3·4	航天飞机	1989年6月	19	航天飞机	1991年4月
5	火箭	1989年8月	20	火箭	1991年5月
6·7	航天飞机	1989年9月	21	航天飞机	1991年6月
8	火箭	1989年11月2D	22	火箭	1991年8月
9	火箭	1990年2月	23	航天飞机	1991年9月
10	火箭	1990年3月	24	火箭	1991年11月
11	航天飞机	1990年5月	25	航天飞机	1992年5月
12	航天飞机	1990年5月	26	航天飞机	1992年11月
13	火箭	1990年8月	27	航天飞机	1992年2月
14	航天飞机	1990年10月	28	航天飞机	1994年5月
15	火箭	1990年11月			

§5.6 坐标系

卫星动力学是遵循牛顿运动定律的。该定律指出，一个自由物体质量中心的加速度和作用在它上面的力成正比。比例常数即为该物体的质量。位置、速度、加速度和作用力的各分量都是相对于一个惯性坐标系的。惯性坐标系是在空间静止不动的或作匀速运动（不存在加速度）的一个坐标系，当然这种说法是不严格的。因而描述卫星运动的首要任务是定义一个合适的惯性坐标系。根据惯例，我们采用赤经坐标系，它在一个短时期内可满足我们对参考框架提出的要求。赤经坐标系的定向相对于固定的恒星每年约变化一秒这是由于地球自转轴和赤道平面周期性的受力运动而引起的。然而这种被称之为岁差和章动的运动已被了解得十分清楚。因而赤经坐标系在不同瞬间的定向可以被反推出来。

赤经坐标系对于地面定位来讲，并不是一个方便的参考系。进行地面定位时需要一个固定在地球上的坐标系，这样地球上一个静止点的坐标就不随时间而变化。协议地球坐标系(CT)，也有人称之为平均地球坐标系，就是一个这样的坐标系，协议地球坐标系的第一根轴通过格林尼治子午线和赤道平面的交点，第三轴由国际协议原点(CIO)来规定，CIO是1900年~1905年间地球自转轴的平均位置。第二个轴垂直于第一和第三轴，赤经坐标系和协议地球坐标系之间的关系为：

$$R = R_z(-x_p)R_y(-y_p)R_z(\theta) \cdot r$$

式中 θ 为格林尼治视恒星时； x_P 和 y_P 为位移分量； ~~R_1 和 R_2~~ 分别为协议地球坐标系和赤经坐标系中的坐标向量； ~~R_1 ($i=1, 2, 3$) 为旋转~~ 矩阵。

直到 1985 年 7 月 G F S 广播星历所采用的协议地球坐标系仍为 1972 年世界大地坐标系 WGS-72，从 1985 年 7 月至 1986 年 2 月，所有的星历预报计算均采用 WGS-84 系统，但广播星历仍被转换到 WGS-72 中来。从 1987 年 1 月起完全使用 WGS-84 系统。

§5.7 作用在卫星上的力

一般说来，下面这些力将对卫星的运动产生影响：

- (a) 地球的重力
- (b) 太阳月亮和行星的引力（称为第三体影响）。
- (c) 大气阻力
- (d) 太阳的光压力，包括直接的及地球的漫反射。
- (e) 磁力
- (f) 由于潮汐和固体地球及海洋的其它形变而引起的地球重力场变化。

在上面这些力中，地球的重力起决定性的作用。它还可以进一步分解为两个部分：

- (a) 主要部分，称为中心部分，是有心重力场

(b) 其余的为非中心部分

重力场的中心部分比非中心部分和所有的其它作用力合起来还要大三个数量级。因此卫星运动的主要特征是由有心重力场决定的，而其余的力将会对卫星的运动产生一些小的变化。这些微小的变化称为扰动，引起这些变化的力被称为摄动力。

§ 5.3 开普勒第一定律

仅由地球有心重力场引起的理想的卫星运动被称为开普勒运动，它可以从牛顿运动定律和万有引力定律导出。注意开普勒定律对于任何有心力场，无论是引力场或其它场，均是有效的。开普勒运动的主要特征为：

(a) 相对于赤经坐标系而言，卫星在一个通过地球质心的静止的平面上运动。卫星的轨道是一个椭圆，该椭圆的一个焦点和地球质心（地心）相重合。这就是开普勒第一定律。

(b) 轨道上离地球质心最近的点和最远的点分别称为近地点和远地点，它们在惯性空间内是固定不动的。

(c) 椭圆轨道的大小和形状是固定的。

今天开普勒第一定律在确定从各个发射场地发射的卫星所能达到的轨道方面具有实际意义。要想直接发射一颗轨道倾角小于发射场纬度的卫星是不可能的。为了知道其原因，我们来看一下，直接朝发射场的东边或西边发射时的情况。因为卫星必定在一个通过地

心的轨道平面上运动（开普勒第一定律），因而这个轨道平面与地球表面的交线必为一个大圆，这个大圆上离赤道平面最远的点就是发射场。因而轨道平面和赤道平面的交角（轨道倾角）就等于发射场的纬度。略微朝北或朝南发射而不是直接向东或向西发射将意味着在这个大圆上的某些点离赤道将比发射场更远。因而倾角也将更大。注意如果发射卫星的方向上经过人口密集的地区那将是很危险的（助推器的陨落等等），这就将进一步限制了各个发射场地可供选择的发射方向，为了使得轨道倾角能小于发射场的纬度，必须首先把卫星发射到“驻留轨道”上，当它越过赤道时，利用一个附加的推进火箭进行“第二次发射”。这种二级发射法比直接发射进入轨道更为费钱。使用最多的发射场位置为：

	发射场	纬度	经度
欧洲空间局	Kourou	5° N	52° W
美 国	Canaveral	28° N	81° W
	Vanderberg	35° N	120° W
苏 联	Plesetsk	63° N	41° E
	Tyuratam	46° N	62° E
	Kapustin yar.	49° N	46° E
印 度	Sriharikota	14° N	80° E
中 国	双 城 子	41° N	100° E