

GPS 卫星定位系统工作原理初探

赵 云, 钟生才

(云南省有色地质局三一二队, 云南省 昆明 650300)

摘 要: GPS 卫星定位系统是利用在空间飞行的卫星不断向地面广播发送某种频率并加载了某些特殊定位信息的无线电信号来实现定位测量的定位系统。本文将从两种定位方式上(绝对定位、相对定位)简单论述其原理和方法。

关键词: GPS; 原理方程; 卫星钟差; 误差; 伪距

1 概 述

GPS 卫星定位系统的出现是测量技术的一项技术性变革,它具有高精度、观测时间短、测站间不需要通视和全天候作业等特点,使得三维坐标测定变得简单。GPS 已经广泛应用到测绘领域的方方面面。

GPS 卫星定位系统一般包括三个部分。第一部分是空间运行的卫星星座。多个卫星组成的星座系统向地面发送某种时间信号、测距信号和卫星瞬时的坐标位置信号。第二部分是地面控制部分。它通过接收上述信号来精确测定卫星的轨道坐标、时钟差异,发现其运转是否正常,并向卫星注入新的卫星轨道坐标,进行必要的卫星轨道纠正等。第三部分是用户部分。它通过用户的卫星信号接收机接收卫星广播发送的多种信号并进行处理计算,最终确定用户的位置。用户接收机通常固连在地面某一确定目标上或固连在运载工具上,以实现定位和导航的目的。

GPS 卫星定位系统的空间部分:27~28 颗在轨卫星;高度为 20 200 km;轨道面 6 个(每个轨道面有至少 4 颗卫星);轨道倾角为 55° ;可见性为在地球上或近地空间任何时间至少见 4 颗,一般为 6~8 颗。卫星信号:载波频率 L_1 为 42 MHz, L_2 为 1 227.60 MHz。卫星识别:码分多址(CDMA),即根据调制码来区别卫星。测距码:C/A 码伪距(民用), P_1 、 P_2 码伪距(军用)。导航数据:卫星轨道坐标、卫星钟差方程式参数、电离层延迟改正。上述数据为广播星历,它相当于向用户提供了定位的已知参考点(卫星)的起算坐标和系统参考时间以及相关的信号传播误差修正。

GPS 卫星定位系统的控制部分:监控站(接收卫星下行信号数据并送至主控站,监控卫星导航运行和服务状态),主控站(卫星轨道估计、卫星控制、定位系统的运行管理),注入站(卫星轨道纠正信息、卫星钟差纠正信息、控制命令的上行注入卫星)。

GPS 卫星定位系统的用户部分:GPS 接收机由接收天线和信号处理运算显示两个部件组成。

2 GPS 绝对定位原理

2.1 绝对定位方法与概述

在实际工作中,我们把直接确定信息、事件和目标相对于参考坐标系统的坐标位置测量称为绝对定位,它也叫单点定位。

利用 GPS 进行绝对定位的基本原理,是以 GPS 卫星和用户接收机之间的距离(或距离差)观测量为基础,并根据已知的卫星瞬时坐标,来确定用户接收天线所对应点的点位,即观测站的位置。

GPS 绝对定位方法的实质就是测量学中的空间距离后方交会。为此,在 1 个观测站上,原则上 3 个独立的距离观测量就够了,这时观测站应位于以 3 颗卫星为球心,相应距离为半径的球与观测站所在平面交线的交点。

但是,由于 GPS 采用了单程测距原理,同时卫星钟与用户接收机钟又难以保持严格同步,所以,实际观测的测站至卫星之间的距离,均含有卫星钟和接收机钟同步差的影响(故习惯上称之为伪距)。关于卫星钟差,我们可以应用导航电文中所给出的有关钟差参数加以修正,而接收机的钟差,一般难以预先确定。所以,通常均把它作为一个未知参数,与观测站的坐标在数据处理中一并求解。因此,在一个观测站上,为了实时求解 4 个未知参数(3 个点坐标分量和一个钟差参数),便至少需要 4 个同步伪距值。也就是说,至少必须同时观测 4 颗卫星。

2.2 基本定位原理方程

2.2.1 基本定位原理方程

GPS 卫星的基本定位原理如图 1 和图 2 所示。

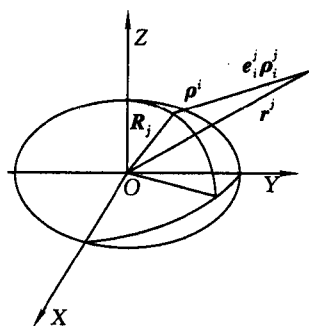


图 1 卫星坐标三维向量

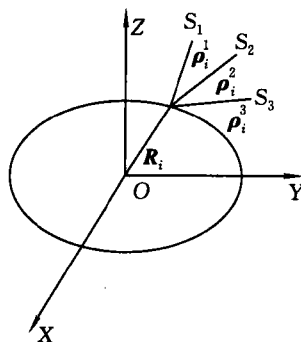


图 2 坐标计算原理

已知数据信号:如图 1 所示,卫星坐标三维向量 r^j ,由广播星历提供后计算出的向量形式为 $r^j = (x^j \ y^j \ z^j)$;

观测数据信号:卫星至测站距离 ρ_i^j ,其向量形式为 $e_i^j \rho_i^j$, e 是 ρ 方向单位向量(方向余弦);

待求量: R_i ,测站在地球上的三维位置向量为 $R_i = (x_i \ y_i \ z_i)$;

向量方程为: $R_i = r^j - e_i^j \rho_i^j$ (1)

R_i 中有三个未知数,但 ρ_i^j 只有一个观测量,不能解出三个未知数,因而从原理上说至少应有三个不同卫星的 ρ_i^j 才能解算出上述方程的三个未知数。

如图 2 所示,已知: r^1, r^2, r^3

观测: $\rho_i^1, \rho_i^2, \rho_i^3$

求: $R_i = (x_i \ y_i \ z_i)$

有方程式 $\|r^j - R_i\| = \rho_i^j, j = 1, 2, 3$

其中, $\|\cdot\|$ 表示求向量的模,即长度,亦即

$$\sqrt{(x^j - x_i)^2 + (y^j - y_i)^2 + (z^j - z_i)^2} = \rho_i^j, j = 1, 2, 3 \quad (2)$$

从上面分析看出,从原理上说,只要知道三个卫星至测站的距离,就可实现三维坐标的定位。

2.2.2 伪距观测值 ρ_i^j 特性

在实际中,我们不能直接观测到卫星到地面的几何距离,而是观测到包含了卫星和接收机时钟误差和时间延迟误差的伪距离 ρ_i^j ,称为伪距观测值,它实际上由下式表达出来:

$$\rho_i^j = c(T_i - T^j) = c[(T_T + T_{Ri} + T_{Ai} + \Delta T_u) - (T_T + \Delta T_{Si})] \quad (3)$$

其中, c 为光速;

T_i 为接收机收到信号时的钟面读数;

T^j 为卫星在该信号发射时的钟面读数;

T_T 为卫星信号发射时刻的 GPS 系统正确时间;

T_{Ri} 为信号在真空中运行时间 $=R/c$, R 为真空几何距离;

ΔT_u 为用户接收机钟与 GPS 系统确定时间的偏差;

ΔT_{Si} 为卫星钟与 GPS 系统正确时间的偏差。

我们对(3)式略加整理,可得到下式:

$$\rho_i^j = c[T_{Ri} + T_{Ai} + \Delta T_u - \Delta T_{Si}] = cT_{Ri} + cT_{Ai} - c(\Delta t_{us}^j) \quad (4)$$

$$\rho_i^j = R_i^j + c(\Delta t_{us}^j) + cT_{Ai}; \Delta t_{us}^j = \Delta T_u - \Delta T_{Si}, j = 1, 2, 3, 4 \quad (5)$$

由此可见,在卫星钟差为已知的前提下,伪距为真空几何距离加电离层延迟和对流层延迟,再加未知的卫星接收机钟差延迟,即

$$\rho_i^j = \sqrt{(x^j - x_i)^2 + (y^j - y_i)^2 + (z^j - z_i)^2} + c\Delta t_{us}^j + cT_{Ai}, j = 1, 2, 3, 4 \quad (6)$$

上式中, T_{Ai} 可以通过信号传播的电离层对流层的理论预先确定, ΔT_{Si} 可由广播星历的计算确定, Δt_{us}^j 可简写为 Δt_u 。

共有 x_i, y_i, z_i 和 Δt_u 四个未知数,观测 4 颗卫星的伪距可以解算出上述的四个未知数。

2.3 主要的误差来源

从上面的定位原理来看,用 GPS 技术可以同时实现三维定位与接收机时间的定时。一般来说,利用 C/A 码进行实时绝对定位,各坐标分量精度在 5~10 m,三维综合精度在 15~30 m;利用军用 P 码进行实时绝对定位,各坐标分量精度在 1~3 m,三维综合精度在 3~6 m;利用相位观测值进行绝对定位技术比较复杂,目前其实时或准实时各坐标分量的精度在 0.1~0.3 m,事后 24 小时连续定位三维精度可达到 2~3 cm。

由此看来绝对定位精度不高,这主要是由于在已知数据和观测数据中都含有大量误差的缘故。我们按照其主要误差来源可以分为以下三类。

2.3.1 与卫星相关的误差

(1)轨道误差:目前实时广播星历的轨道三维综合误差可达 10~20 m。

(2)卫星钟差:简单地说,卫星钟差就是 GPS 卫星钟的钟面时间同标准的 GPS 系统时间之差。对于 GPS,由广播星历的钟差方程计算出来的卫星钟误差一般可达 10~20 ns,引起等效距离误差的误差小于 6 m。

(3)卫星几何中心与相位中心偏差:可以事先确定或通过一定方法解算出来。

2.3.2 与接收机相关的误差

(1)接收机安置误差:即接收机相位中心与待测物体目标中心的偏差,一般可以事先确定。

(2)接收机钟差:接收机钟与标准的 GPS 系统时间之差。对于 GPS,一般可达 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ s。

(3)接收机信道误差:信号经过处理信道时引起的延时和附加的噪声误差。

(4)多路径误差:接收机周围环境产生信号的反射,构成同一信号的多个路径入射天线相位中心,可以用抑径板等方法减弱其影响。

(5)观测量误差:对于 GPS 而言,C/A 码伪距偶然误差约为 1~3 m;P 码伪距偶然误差约为 0.1~0.3 m;相位观测值的等效距离误差约为 1~2 mm。

2.3.3 与大气传输有关的误差

(1)电离层误差:50~1 000 km 的高空大气被太阳高能粒子轰击后电离,即产生大量自由电子,使 GPS 无线电信号产生传播延迟,一般白天强,夜晚弱,可导致载波天顶方向最大 50 m 左右的延迟量。误差与信号载波频率有关,故可用双频或多频率信号予以显著减弱。

(2)对流层误差:无线电信号在含水汽和干燥空气的大气介质中传播而引起的信号传播延时,其影响随卫星高度角、时间季节和地理位置的变化而变化,与信号频率无关,不能用双频载波予以消除,但可用模型减弱。

3 GPS 相对定位原理

3.1 相对定位方法与概述

我们把确定信息、事件和目标相对于坐标系统内另一已知或相关的信息、事件和目标的坐标位置关系称为相对定位。相对定位的最基本情况,是用两台 GPS 接收机,分别安置在基线的两端,并同步观测相同的 GPS 卫星,以确定基线端点在协议地球坐标系中的相对位置或基线向量。这种方法,一般可推广到多台接收机安置在若干条基线的端点,通过同步观测 GPS 卫星,以确定多条基线向量的情况。

3.2 相对定位原理

3.2.1 相对定位方法解析

在前面我们已经看到绝对定位的精度一般较低,是因为对于 GPS 卫星定位来说,主要是由于卫星轨道、卫星钟差、接收机钟差、电离层延迟、对流层延迟等误差的影响不易用物理或数学的方法加以消除的原因。但是相对定位是确定 P_j 点相对 P_i 点三维位置关系,利用 GPS 定位技术,只要 P_j 离 P_i 点不太远,例如小于 30 km,那么观测伪距 ρ_j^i 、 ρ_i^i ,大约通过相近的大气层,其电离层和对流层延迟误差几乎相同,利用 ρ_j^i 和 ρ_i^i 组成新的观测量,(差分观测量)。如下图 3 所示。

$$\Delta\rho_{ij}^{S_k} = \rho_j^{S_k} - \rho_i^{S_k}, \quad k=1,2,3,4 \quad (7)$$

它不仅可以大大消除电离层对流层的影响,还可以大大削弱卫星 S_k 的轨道误差影响,几乎完全消除 S_k 的卫星钟差的影响。

又如组成另一类新的差分观测量:

$$\Delta\rho_i^{S_k S_q} = \rho_i^{S_q} - \rho_i^{S_k} \quad (8)$$

它可以消除接收机的钟差并削弱其通道误差影响。在差分观测量的基础上还可组成二次差分观测量:

$$\Delta\Delta\rho_{ij}^{S_k S_q} = \Delta\rho_j^{S_k S_q} - \Delta\rho_i^{S_k S_q} = \rho_j^{S_q} - \rho_j^{S_k} - \rho_i^{S_q} + \rho_i^{S_k} \quad (9)$$

这种二次差分观测量被称为双差观测量,可以大大削弱卫星轨道误差、电离层、对流层延迟误差的影响,几乎可以完全消除卫星钟差和接收机钟差的影响。用它们进行相对定位,精度就可以大大地提高。

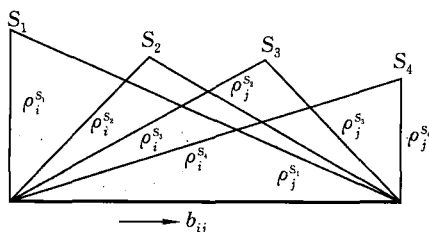


图 3 GPS 相对定位原理

3.2.2 相对定位的原理方程

已知量: $R_{S_k} (k=1,2,3,4)$, 即卫星某时刻的轨道坐标

$$R_{S_k} = (X^{S_k} \quad Y^{S_k} \quad Z^{S_k})^T \quad (10)$$

观测量: $\rho_i^k, \rho_j^k (k=1,2,3,4)$

待求量: $b_{ij} = (\Delta x_{ij} \quad \Delta y_{ij} \quad \Delta z_{ij})^T$

观测方程如下:

对于伪距差分: $b_{ij} = f(r_{S_k} * \Delta\rho_{ij}^{S_k}), (k=1,2,3,4)$

对于相位差分: $b_{ij} = f(r_{S_k} * \Delta\Delta\Phi_{ij}^{S_k S_q}), (k=1, q=2,3,4)$

这里的 f 是表示某种函数关系的符号,也就是说,相对的三维位置是双差观测量和卫星坐标的函数。

3.2.3 相对定位的精度分析

GPS 相对定位精度对于 C/A 码伪距测量可以达到 0.5~5 m,相对定位的两点之间距离可以为 5 m~200 km。

对于载波相位测量,可以达到厘米乃至毫米级的精度,相对定位的两点之间距离可以从几米到几千千米。

如果用平均误差量与两点间的长度相比的相对精度来衡量,GPS 相位相对定位的方法的相对定位精

度一般可打 10^{-6} (1 ppm),最高可接近 10^{-9} (1ppb)。

目前 GPS 相对定位方式及精度如表 1 所示。

表 1 GPS 相对定位方式及精度

名称	简写	相对定位距离	观测值	采用星历	误差修正方式	精度
常规伪距差分	CDGPS	<200 km	C/A 码伪距	广播星历	综合伪距误差	1~5 m
广域差分系统	WADGPS	<2 000 km	C/A 码伪距	精密星历	卫星钟差改正、电离层改正	1~5 m
广域增强系统	WAAS	全球	C/A 码伪距	精密星历	卫星钟差改正、电离层改正	1~5 m
局域增强系统	LAAS	<10 km	C/A 码伪距	广播星历和地基伪卫星固定星历	卫星钟差改正、电离层改正	0.1~0.5 m

在上面的这些定位方式中,由于使用的观测值是精度不高的码伪距观测值,所以定位结果的精度都不是很高。下面我们看看基于相位观测值的相对定位方式的精度,如表 2 所示。

表 2 基于相位观测值的相对定位方式的精度

名称	简写	相对定位距离	观测值	采用星历	误差修正方式	精度
双差静态定位	DDΦ	0.005~3 000 km	双差相位 $\Delta\Delta\rho_{ij}^{StSq}$	广播星历或精密星历	数学模型解算	$10^{-6}\sim10^{-7}$ $10^{-8}\sim10^{-9}$
实时双差动态定位	RTK	0.005~10 km	双差相位 $\Delta\Delta\rho_{ij}^{StSq}$	广播星历	基准站相位误差修正	10^{-6}
网络动态实时定位	Network RTK	0.005~50 km	双差相位 $\Delta\Delta\rho_{ij}^{StSq}$	广播星历	网络相位误差修正	10^{-6}
全球动态定位	Global RTK	全球	相位	精密星历	卫星钟差、电离层对流层误差修正	0.1~0.4 m

可以清楚地看到使用观测值精度比较高的相位观测值得到的定位结果的精度很高。双差静态定位就是利用两台或两台以上的 GPS 接收机在两个或两个以上的观测站同步观测相同的卫星信号若干时间,然后用相应的解算软件处理这些数据,得到两个站之间的精确的坐标差分量;而实时双差动态定位只用单次(又称一个历元)的同步观测数据就可以实时求出流动站到基准站之间的坐标差分量。由这些分量达到高精度定位。网络 RTK 技术与全球动态定位技术在这里就不多加叙述了。

4 结 论

GPS 卫星定位系统工作原理是 GPS 技术的核心,是其他 GPS 技术应用的理论指导,利用本文浅入介绍的理论方程以及精度分析,使大家在接触这门高新技术时作为一个理论指导,从而更快、更准地熟悉和操作 GPS,提高工作效率,并有利于促进 GPS 应用的发展。不同的定位方式和定位方法,在实际工作中对于不同的精度要求,有着不同的选择。其各种原理在我们参考和选择时具有重要的理论意义。在这里我们就不多讨论 GPS 技术在各个方面的应用。

参考文献:(略)

作者简介:赵云,男,1979 年出生,工程师,研究方向为测绘技术管理。