

GPS 的气象应用

毛节泰

(北京大学地球物理系)

摘要 文中介绍了 GPS 系统的原理和大气层对定位的影响,并探讨了利用 GPS 监测水汽的可能性。

GPS(Global Positioning System)是由美国研制并投入实际应用的利用卫星的全球定位系统,其主要目的是为飞机或船舶导航定位。但这一系统也可用于其它多种目的,尤其是当采用高精度的 GPS 接收机进行测量时,其定位精度可达 1cm,因此具有极大的应用潜力。另一方面, GPS 的测量精度受到大气的影响,包括电离层和对流层大气。因此,对大气影响的订正成为控制 GPS 测量精度的关键,尤其是对对流层大气中水汽的影响,更是 GPS 误差处理中最困难的部分,这同时也提供了一种监测大气中水汽含量的手段。本文的目的是介绍 GPS 系统的基本原理和大气层对定位的影响,并讨论利用 GPS 监测水汽的可能性。

1 GPS 系统

GPS 系统是 70 年代开始由美国军方主持研究的空间技术应用项目,号称美国第三大空间技术(前两项为登月和航天飞机)。整个系统包括在离地面二万公里上空以适当间隔部署的 18 颗卫星(另加 3 颗备用星),地面控制跟踪系统和 GPS 接收机。这 18 颗卫星分别部署在升交点经度不同的 6 条轨道上,每条轨道分别部署 3 颗卫星,轨道倾角为 50 度,周期为 0.5 恒星日。这样部署的目的是要保证在地球上任何位置任何时刻都能见到 4 颗以上的卫星,这里的“见”当然是广义的,指在电波视线传播的条件下能接收到 4 颗以上

卫星的信号。

每颗卫星都以 1575.42MHz(约 1.5 GHz,称 L_1 频带)和 1227.6MHz(约 1.2GHz,称 L_2 频带)发送信号,包括每颗卫星的识别码、轨道参数和发射时间。这些信息都以伪随机码调制,因此尽管这 18 颗卫星都以相同的频率发射,但地面接收机却可以通过解码识别系统加以区分。

每颗卫星都安装有稳定度极高的铷、铯等原子频率标准(原子钟),并由地面监控跟踪中心负责保持,因此 GPS 卫星时刻都能保持准确的 GPS 时间。GPS 时间类似国际原子时,它和我们日常使用的时间有整分整秒的时间差,这一点在使用时需加以注意。

在 GPS 发送的信号中,以两种不同速率的码对信息加以调制,一种称为 C/A 码,其比特率为 1.023Mbps,另一种称为 P 码,比特率为 10.23Mbps,C/A 码的定位精度优于 100m,而 P 码的定位精度优于 16m。在 GPS 卫星发射的 L_1, L_2 两个频道中, L_1 频道同时加载 C/A 码和 P 码,而 L_2 频道只加载 P 码,因此,高精度的 GPS 接收机就要能接收这两个频率,并对 P 码进行解码。双频接收可以对电离层的延迟进行精确的订正,以取得高的定位精度,而一般单频的接收机仅接收 L_1 信号,并且对 C/A 码解码,因此只能用于低精度的定位,但即使如此,若利用 2 台 GPS 接收机进行相对定位,或者在无法对 P 码解码时也接收 L_1, L_2 这两个频率的信号,并对

电离层的影响加以改正,也能得到较高的精度。

2 GPS 定位的基本原理

利用 GPS 系统进行定位,需要用地面测站的 GPS 接收机接收 4 颗以上卫星所发射的信号,并解译包含在 C/A 码或 P 码信号中各颗卫星的轨道参数和时间信息,据此计算接收机自身的位置,其原理如下:

利用各颗卫星的轨道参数和时间信息,可以算出卫星的空间位置。在以地心为原点的坐标系中,设这 4 颗卫星的位置为

$$(x_i, y_i, z_i) \quad i = 1, 4$$

另外,根据 GPS 接收机内部的时钟可记录信号的接收时间,从接收时间和每颗卫星信号中所携带的信号发送时间,可算出信号从卫星传输到接收机所花的时间,并进一步算出这 4 颗卫星离接收机的距离

$$l_i = C_0(t_i' - t_i) \quad i = 1, 4 \quad (1)$$

这里 C_0 为真空中的光速, t_i' 为接收机收到第 i 颗星信号的时间, t_i 为第 i 颗星发送信号的时间。可以看出,这样算出的距离是不准确的,这一方面是波在实际大气中传播的速度并非 C_0 ,另一方面 GPS 接收机中的时钟也未必准确(一般 GPS 接收机中用石英钟,准确度只到分钟),而且在上面计算中也没有考虑到由于射线弯曲而引起的几何路程增加,因此从(1)式算出的距离被称为“伪距”。但利用伪距可以粗略地计算一下接收机的位置,设接收机坐标为 (x, y, z) , 并设接收机时钟有一个时间差 Δt , 通过求解下列方程组

$$\begin{aligned} & [(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2]^{1/2} \\ & = C_0(t_i' - \Delta t - t_i) \quad i = 1, 4 \quad (2) \end{aligned}$$

即可算出 x, y, z 和 Δt , 因此,在 GPS 接收机接收一组信号后,不仅可算出接收机的位置,而且可对 GPS 接收机中的时钟进行订正,使它也达到 GPS 时间的精度(0.1 μ s),当然这样算出的位置尚包含有大气影响所导致的误差,故仍需做进一步订正。

3 大气订正

大气对 GPS 观测的影响是使电波从卫星到达接收机所花的时间增加,这种增加来自两种因素,一是电波在大气中并非按直线传播,因而其几何路径比直线加长(弯曲效应);二是电波在大气中的传播速度小于真空中的数值,也使电波传播的时间增加,即出现信号的延迟。对流层和电离层都对延迟有贡献,但限于本文的目的,主要将讨论对流层大气所引起的延迟,而对电离层的延迟只做简单的介绍。

电波的延迟或相应的路径增长是由于射线弯曲和波速变慢所引起的。若已知卫星到接收机的直线距离为 G , 则路径增长可写为

$$\Delta L = C_0 \int \frac{ds}{C} - G \quad (3)$$

这里 C 是真实波速,积分对弯曲的路径进行,根据折射率的定义,(3)式不难改为

$$\begin{aligned} \Delta L &= \int n(s) ds - G \\ &= \int [n(s) - 1] ds + (s - G) \quad (4) \end{aligned}$$

(4)式中 $(s - G)$ 为由于折射引起几何路径的增长,计算表明,其值一般小于 1cm,可略去不计,因此有

$$\begin{aligned} \Delta L &= \int [n(s) - 1] ds \\ &= 10^{-6} \int N(s) ds \quad (5) \end{aligned}$$

其中 $N(s) = [n(s) - 1] \times 10^6$ 。

在对流层大气中,

$$N = 77.6(P/T) + 3.73 \times 10^5 (P_e/T^2) \quad (6)$$

这里 P 为大气压(hPa), P_e 为水汽分压(hPa), T 为大气温度(K)。这一关系式对大部分大气条件可提供 0.5% 的精度。Thayer (1974) 提出一个更精确的大气折射率公式

$$\begin{aligned} N &= k_1 (P_d/T) Z_d^{-1} + k_2 (P_e/T) Z_e^{-1} \\ &+ k_3 (P_e/T^2) Z_e^{-1} \quad (7) \end{aligned}$$

其中, $k_1 = 77.604 \pm 0.014 \text{ KhPa}^{-1}$,

$$k_2 = 64.79 \pm 0.08 \text{ KhPa}^{-1},$$

$$k_3 = (3.776 \pm 0.004) \times 10^6 \text{ K}^2 \text{hPa}^{-1},$$

P_d 为干空气分压,

Z_d, Z_w 为干空气和水汽的可压缩系数。

(7)式的精度约为 0.02%。

从上面的折射率公式中可知,对流层大气的延迟可分为两项,一项为静力学延迟,它与(6)式右边第一项相关,另一项为湿项,它与(6)式右边第二项相关。有些文献中把静力学延迟称为干项,但这一说法不太确切,因为这一项与总压力有关,它也包括了水汽的分压。更准确地说,这一项中包含了水汽分子的非极性成分对折射率的贡献,而湿项反映了水汽分子的极性成分对折射率的贡献,从数值上来看,前一项远大于后一项。前一项的量级约 10^3mm ,而后一项仅 10^1mm ,但前一项较为容易估算。Elgered 等(1991)建议对沿垂直路径的传播,静力学延迟可用下列经验关系

$$\Delta L_s^0 = \text{ZHD} = (2.2779 \pm 0.0024) \cdot P_s / f(\lambda, H) \quad (8)$$

这里, ΔL_s^0 的单位为 mm, ZHD 意为 Zenith hydrostatic delay, P_s 为地面气压(hPa), $f(\lambda, H)$ 为与纬度与高度有关的函数,反映了重力加速度值变化的影响,有

$$f(\lambda, H) = (1 - 0.00266 \cos 2\lambda - 0.00028H)$$

其中 λ 为纬度, H 为测站高度(km)。

对湿项,其天顶方向的延迟可写为

$$\Delta L_w^0 = \text{ZWD} = 10^{-6} [k_2 \int (P_w/T) dz + k_3 \int (P_w/T^2) dz] \quad (9)$$

(9)式中 ΔL_w^0 的单位与积分时 z 的单位相同, k_2, k_3 (17 ± 10) KhPa^{-1} 。有时也可用下列近似关系

$$\Delta L_w^0 = (0.382 \pm 0.004) \int (P_w/T) dz \quad (10)$$

如果在 GPS 观测的同时,用探空测出 T 和 P_s 的垂直分布,则可利用(8)—(10)式算出

对流层的延迟订正值,湿项订正值主要是由低层大气所引起的。

对于倾斜路径,还需要有斜程订正值

$$\Delta L = \Delta L_s^0 \cdot M_s(\theta) + \Delta L_w^0 \cdot M_w(\theta) \quad (11)$$

已有不少工作研究了 $M_s(\theta)$ 和 $M_w(\theta)$ 与气象因子之间的关系(Black 和 Eisner, 1984; Davis 等, 1985),这些因子包括地面温度、压力、相对湿度、对流层顶高度、对流层温度递减率等,但当卫星天顶距小于 $75-80^\circ$ 时,所有计算方法的结果很一致。这也是很少用天顶距大于 $75-80^\circ$ 的卫星做定位的原因。有关斜程订正值的计算,请参阅相应的文献。所有这些计算都是在球面分层大气的假定下进行的,根据长基线测量研究表明,当仰角为 15° 时,球面分层大气假定所引起的误差均方值为 7mm,而在最不利的情况下,例如当路径通过剧烈的锋区,那里有剧烈的温度和气压梯度,这种误差大致为 35mm。

4 电离层延迟的修正

在电离层,折射率与电子浓度有关,与中性大气不同,折射率还与电磁波的频率有关

$$n - 1 = 40.3 \frac{N_e}{f^2} \quad (12)$$

式中 N_e 为电子浓度 (m^{-3}), f 为电磁波频率(Hz),将(12)式代入(5)式积分,即可算出电离层的延迟。例如,对太阳活动极小期的夜间, $N_e \sim 5 \times 10^{10}$, 电离层主要部位厚度约 600km,取 $f = 1.2 \text{GHz}$,则 $\Delta L = 0.84 \text{m}$,在具体进行上述积分时,当然要知道 $N_e(z)$ 分布,这一般可用电离层模式来解决。

如果能对两个频率同时进行观测,则可精确地算出电离层的延迟,因为这时有

$$\begin{aligned} \delta(\Delta L) &= \frac{1}{f_1^2} \int_0^{\infty} KN_e dz - \frac{1}{f_2^2} \int_0^{\infty} KN_e dz \\ &= \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) \int_0^{\infty} KN_e dz \end{aligned} \quad (13)$$

用 L_1, L_2 两个频道测出 $\delta(\Delta L)$,即可算出积分值,这样做可使电离层延迟订正的精度达到 mm 量级。

5 利用 GPS 测量大气水汽含量

利用气象资料可以对 GPS 的观测结果进行订正,从而得到更高的定位精度,这是问题的一个方面,而本文更感兴趣的是其逆问题,即既然 GPS 定位误差主要是由气象因素(最主要的是由于水汽引起的,则当测站位置已知时,就可以用定位误差来反推水汽含量,这对许多大气科学问题,从中小尺度过程到全球变化,都有十分重要的意义。

为了从 GPS 的测距误差来决定整层大气的积分水量 (IWV, Integrated Water Vapor), Davis 等(1985)引入权重平均温度 T_w 的概念

$$T_w = \frac{\int (P_w / T) dz}{\int (P_w / T_w^2) dz} \quad (14)$$

利用水汽状态方程,可得

$$\int (P_w / T) dz = R_w \int \rho_w dz = R_w \cdot IWV \quad (15)$$

将(15)式代入(9)式即有

$$\begin{aligned} \Delta L_w^0 &= 10^{-8} \int \frac{P_w}{T} dz [k_2 + k_3 / T_w] \\ &= 10^{-8} R_w \cdot IWV \cdot [k_2 + k_3 / T_w] \end{aligned} \quad (16)$$

上式中 R_w 为水汽的气体常数,如果把 IWV 用液体水的厚度 PW 来计量,因为它和 ΔL_w^0 都有长度的因子,有

$$PW / \Delta L_w^0 = k / \rho \quad (17)$$

$$1/k = 10^{-6} (k_2 + k_3 / T_w) \quad (18)$$

其中 ρ 为水的密度,为了从 ΔL_w^0 推算 PW ,就要知道 k 值,或 T_w 值,这可以通过各地的历史气象资料进行计算和统计,找出其间的关系,这种关系可能是随地点季节而变的,Bevis 等(1992)利用美国纽约奥尔巴尼气象台 748 次探空资料计算了地面气温 (T_s) 与 $PW / \Delta L_w^0$ 之间的关系,其结果见图 1,从这组资料可统计得

$$T_w \approx 55.8 + 0.77T_s$$

其均方差为 4.4K,由此推算利用地面温度 T_s 推出 T_w ,再根据 ΔL_w^0 订出 PW ,其均方误差小于 2%。另一组统计资料是用全美国两年共 8718 组探空资料算出 $T_w \approx 70.2 + 0.72T_s$,其均方误差为 4.74K,由此推算出 PW 的均方误差小于 4%。

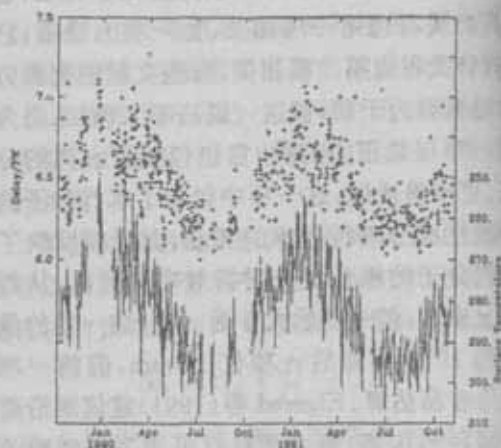


图 1 利用奥尔巴尼探空资料计算的 $\Delta L_w^0 / PW$ 与地面温度 T_s 之相关情况

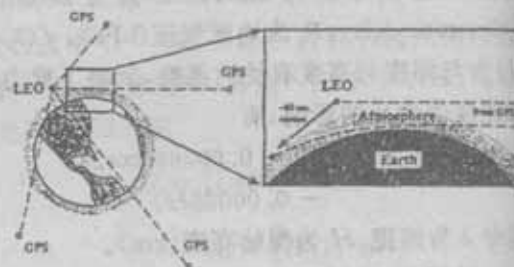


图 2 GPS 掩星法观测水汽分布示意图

Hardy 等(1992)提出另一种利用 GPS 测量大气中水汽分布的设想是利用低轨道卫星 (LEO) 携带 GPS 接收机,用掩星法测量通过不同高度大气层的信号延迟,其结构如图 2 所示。据估算,一颗低轨道卫星一天可取得 600 组掩星法的数据,每条射线通过近 200 公里的大气路径,利用它们可以反演出水汽随高度的分布,其垂直分辨率可望达到 1km,当然这种方法对测量较高层的大气 (8—45km)

更为有利。在对流层下部应用时,水汽廓线和温度廓线之间互相有影响,因此只能是知道一个去计算另一个。

6 讨论

GPS 系统的应用提出了大气订正问题,同时也提供了一种测量水汽总量的手段。目前国内已有不少 GPS 接收机在应用,主要用于大地测量,他们迫切地需要与气象部门合作解决水汽订正。实际上这一问题并不难解决,按国际上目前的做法,通过探空提供湿度廓线或用微波辐射计测量大气总水汽量,都可以用来为 GPS 测量提供订正,而这两种手段目前在国内都已经是成熟的。另一方面,随着 GPS 接收机的增加,利用湿项延迟误差来推算水汽总量的工作也逐渐有较好条件了,由于这种方法具有快速反应的特点(1秒钟可取得一组数据),因此有可能在中尺度天气研究中取得水汽含量的时空变化资料,其费用和设备的可维护性均优于微波辐射计,

是很有前途的。

参考文献

- 1 日本测地学会编著, GPS 人造卫星精密定位系统, 地震出版社, 1989.
- 2 Black, H. D., and A. Eisner (1984), Correcting satellite Doppler data for tropospheric effects, *J. Geophys. Res.*, 89, 2616-2626.
- 3 Bevis, M., et al. (1992), GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System, *J. Geophys. Res.*, 97, 15787 - 15801.
- 4 Davis, J. L., et al. (1985), Geodesy by radio interferometry, Effects of atmospheric errors on estimates of baseline length, *Radio Sci.*, 20, 1593-1607.
- 5 Dixon, T. (1991), An introduction to the Global Positioning System and some tectonic applications, *Rev. Geophys.*, 29, 249-276.
- 6 Elgered, G., et al. (1991), Geodesy by radio interferometry, Water vapor radiometry for estimation of the wet delay, *J. Geophys. Res.*, 96, 6541-6555.
- 7 Thayer, D. (1974), An improved equation for the radio refractive index of air, *Radio Sci.*, 9, 803-807.