

对流层延迟对 GPS 大地高的影响

沈 飞, 安艳辉

(江苏省测绘工程院 JSCORS 中心, 江苏 南京 210013)

摘 要 分析了对流层延迟的基本特性及常用的处理措施, 通过实例表明了不同对流层的处理方法对大地高精度有较大影响; 当基线两端高差较大时, 即使基线较短, 其气象条件也有所差异, 仅仅通过差分或模型改正仍不能消除对流层延迟的影响, 残余的对流层延迟仍然影响大地高的解算精度, 通过对残余对流层延迟进行估计能够明显改善大地高的精度。

关键词 GPS 大地高 对流层 模型改正 参数估计

中图分类号: P228.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-4097(2011)03-0007-03

1 引言

利用 GPS 技术可以直接测定大地高, 其基准面为参考椭球面, 尽管 GPS 大地高是一个几何量, 但是在地震监测、城市地面沉降监测、变形监测以及地球动力学的研究领域中都有广阔的应用前景。近些年来, 利用大地高、水准测量数据、重力测量数据及地形数据进行的区域似大地水准面精化工作在全国范围内得到了广泛开展, 使大地高具有独特的应用价值, 因而对 GPS 大地高精度的要求也越来越高, 许多时候需要与平面位置相同的精度, 受诸多因素的制约, 目前大部分 GPS 基线解算软件在高程方向误差为平面位置的 1~3 倍。相对于平面坐标而言, 除了 GPS 星座自身的原因以外, 影响 GPS 大地高精度的误差主要来自于对流层折射影响, 本文讨论了对流层延迟的性质及相应的处理措施, 并通过实例分析了对流层处理方法对大地高精度的影响。

2 对流层延迟的性质

对流层延迟通常是泛指电磁波信号在通过高度在 50 km 以下的未被电离的中性大气层时所产生的信号延迟。中性大气层包括对流层和平流层, 由于折射的 80% 发生在对流层, 所以通常叫做对流层延迟。对流层大气对于直至大约 15GHz 的射电频率呈中性, 信号传播产生非色散延迟, 使电磁波传播路径比几何距离长。对流层延迟与卫星的高度角有关, 随着高度角的降低, GPS 信号穿越对流层大气的路径长度增加, 延迟逐渐增大。标准大气条件下, 在中纬度参考海平面, 天顶方向的对流层延迟引入的距离误差约为 2.3 m, 高度角为 15° 时, 对流层延迟可达 25 m。

对流层折射影响通常表示为天顶方向的对流

层折射量和同高度角相关的投影函数的乘积。对流层延迟主要与信号经过的大气的温度、气压和水分子密度有关, 对流层延迟的 90% 是由大气中干燥气体引起的, 称为干分量; 其余 10% 是由水汽引起的, 称为湿分量。因此, 对流层延迟可用天顶方向的干、湿分量延迟及其相应的投影函数表示:

$$\Delta\rho = f_d(z) \Delta\rho_d + f_w(z) \Delta\rho_w = \Delta\rho \quad (1)$$

式中, $\Delta\rho$ 为对流层总延迟, $\Delta\rho_d$ 为天顶方向对流层干分量延迟, $f_d(z)$ 为相应的对流层干分量投影函数, $\Delta\rho_w$ 为天顶方向对流层湿分量延迟, $f_w(z)$ 为相应的对流层湿分量投影函数。干分量相对比较稳定, 而湿分量在时间和空间上呈现出随机变化, 天顶方向上随时间变化量可达 6~8 cm/小时, 是干分量的 3~4 倍。由于大气的状态也随着地面的气候变化而变化, 特别是在距离地面 10 km 以内的水汽含量, 其时空分布很不规则, 变化无常, 这就使得 GPS 信号在对流层中传播时, 由大气折射引起的延迟量比较复杂。在精密 GPS 测量数据处理中, GPS 信号在对流层传播中的延迟被看成是影响其精度的主要误差源之一。

3 削弱对流层延迟的方法

电磁波在对流层的传播速度只与大气的折射频率及电磁波传播方向有关, 与电磁波频率无关, 因此无法通过不同频率的线性组合来消除, 目前削弱对流层延迟影响的方法主要有三类: (1) 经验模型改正法, 即利用对流层经验模型来预报对流层延迟; (2) 参数估计法, 即将对流层天顶延迟作为未知参数来进行估计; (3) 外部修正法, 即利用水汽辐射计的观测数据来获取对流层延迟量。由于水汽辐射计昂贵笨重, 工程测量中很少采用。

3.1 经验模型改正法

根据一些代表性的气象资料,用解析的方法,以地表面的气象参数近似反映中性大气对 GPS 信号的折射,产生出对流层延迟的经验模型,近似方法不同所导出的模型也各异。常用的对流层天顶延迟模型有 Saastamoinen 模型、Hopfield 模型、Chao 模型、Berman 模型、Black 模型,这些模型中 Saastamoinen 模型的精度最高等。Saastamoinen 模型可以表示为:

$$\Delta\rho_w = \frac{0.002277p}{f(B, h)} \quad (2)$$

$$\Delta\rho_w = \frac{e}{f(B, h)} \left[\frac{0.2789}{T} + 0.05 \right] \quad (3)$$

式中, p 为测站的大气压(以毫巴计), e 为水蒸气压(以毫巴计), T 为大气温度(以开计), 干分量延迟和湿分量延迟 $\Delta\rho_w$ 的单位都是以米计。 $f(B, h)$ 是纬度 B 和高程 h 的函数:

$$f(B, h) = 1 - 0.00266\cos(2B) - 0.00028h \quad (4)$$

其中表示测站高程。

由于水汽分布不均匀,而且随时间变化很快,很难准确预报对流层湿分量延迟。所以对流层湿分量延迟模型的精度较差,约为几厘米。Saastamoinen 湿分量延迟模型精度约 2 cm~5 cm,稍优于 Hopfield 湿分量模型。另外,对于温度误差的影响, Hopfield 湿分量模型比 Saastamoinen 湿分量模型更敏感,因为 Hopfield 湿分量模型中含有温度的平方项,而 Saastamoinen 湿分量模型中只有温度的一次项。经过总体比较分析,应用 Saastamoinen 模型改正的结果要好于 Hopfield 模型。通过投影函数可以将天顶对流层延迟投影为信号传播路径上的延迟量,常用的投影函数有 NMF、VMF1、GMF 等,研究结果表明不同映射函数模型对 GPS 基线解算质量的影响差别不大。

3.2 参数估计法

由于改正模型都是在假定大气层是处于流体静力平衡状态下的理想气体这个条件下近似导出的,另外测站气象元素并不能很好地表征传播路径上的气象条件,因而模型改正法不能完全消除对流层延迟的影响,不仅影响位置(特别是高程)的精度,甚至影响模糊度解算的可靠性,因此需要将残余对流层延迟作为未知参数来进行估计。在基线解算中对对流层延迟估计的常用方法有:单参数法、多参数法、随机过程法和分段线性法。

单参数方法假定在同一个时段,每个测站天顶方向的对流层折射的模型改正值与实际折射量之

间存在一常数偏差 ρ ,每个测站同一个时段只设定一个参数,当观测时段较长,或对流层变化较剧烈时,单参数法不能反映对流层折射随时间的变化,具有明显的缺陷。

多参数方法采用每隔一定的时间间隔 ΔT 增加一个天顶方向折射参数,如果 ΔT 等于观测数据的历元间隔,即每个测站每个历元上都引入一个天顶方向的折射参数。从理论上讲,这样可以精确的补偿改正模型的误差,但参数越多,整个解的强度越差,过多的附加参数可能会导致法方程的病态。此外,多参数法中的 ΔT 应适当选择, ΔT 过大,会造成折射参数太少,不能反应出折射估值随时间的变化趋势,从而影响解的精度。 ΔT 过小,又会造成折射参数太多,影响解的可靠性,解甚至失真,因此在实际工作中 ΔT 通常取 2 h~3 h。

随机过程法考虑了大气中的水气在时间和空间上的分布不均成随机变化。根据水汽辐射仪观测的湿分量的分析发现,天顶方向的湿分量折射可以用一个一阶高斯马尔可夫过程描述。实际计算表明,随机过程方法求出的天顶方向湿分量改正与水汽辐射仪观测结果相差小于 1 cm,是目前最理想的对流层折射估计方法。

分段线性方法每隔一定的历元间隔 K 取一个状态参数,并假定在这两个观测历元之间测站天顶方向的对流层折射随时间线性变化,这样可以用步长为 $K\Delta t$ 的离散随机过程表示对流层折射随时间的随机变化。

4 算例分析

以两个参考站连续 5 天的观测数据为例,每天观测数据长度为 5 h,采样间隔为 30 s。两个站的距离为 8.3 km,但高差达 425 m。为消除电离层延迟的影响,采用无电离层组合观测值 LC 进行基线解算,使用精密星历以消除轨道误差,而接收机钟差和卫星钟差消除可通过差分完全消,将解算结果所得的大地高与其已知值进行比较,计算其绝对误差大小,若绝对误差出现较大值,可认为是残余对流层延迟误差所致。

本次试验将采用三种不同的方案对对流层解算精度进行研究,方案 A 不对对流层作任何改正,方案 B 利用 Saastamoinen 模型估计对流层延迟,气象数据全部采用标准气象数据,即气压 1013.25 mbar,温度 20℃,相对湿度 50%,方案 C 用 Saastamoinen 模型估计对流层延迟,在此基础上每 2 个小时估计一个残余误差参数。每种方案分别在截止高度角为 20°、15°和 10°的情况

下分别计算, 各组结果中大地高的绝对误差大小 如表 1 所示。

表 1 不同处理方案所得大地高绝对误差/ m

时间	截止高度角 20°			截止高度角 15°			截止高度角 10°		
	方案 A	方案 B	方案 C	方案 A	方案 B	方案 C	方案 A	方案 B	方案 C
1	0.2320	0.0270	0.0328	0.2572	0.0287	0.0250	0.2750	0.0315	0.0114
2	0.2302	0.0284	0.0012	0.2513	0.0347	0.0077	0.2670	0.0380	0.0084
3	0.2253	0.0335	0.0012	0.2479	0.0383	0.0007	0.2658	0.0409	0.0088
4	0.2386	0.0199	0.0104	0.2648	0.0212	0.0117	0.2859	0.0225	0.0143
5	0.2234	0.0347	0.0023	0.2463	0.0401	0.0021	0.2627	0.0451	0.0054

由表 1 中方案 A 的结果可以看出, 由于对流层延迟没有施加改正, 测站大地高的绝对误差达到 20 多个厘米, 但随着截止高度角的增加, 其影响量逐渐减小, 这是因为随着高度角的增加, GPS 信号穿越对流层大气的路径长度减小, 延迟也逐渐减小。方案 B 采用 Saastamoinen 模型改正后, 对流层延迟的影响明显降低, 测站大地高的精度提高了一个数量级, 绝对误差在 2 cm~ 4 cm, 这说明 Saastamoinen 模型能够有效地改正对流层延迟, 但仍有一部分残余误差。方案 C 在模型改正的基础上进行残余误差估计, 大地高精度进一步提高, 除了第一天的绝对误差比较大以外, 绝对误差大部分在毫米级, 这有可能是第一天中有比较特殊的气象条件, 如下雨等。

由上述分析可知, 尽管两个测站的距离比较短, 但是由于高差比较大, 致使基线两端气象条件差别较大, 仅仅通过差分或模型改正仍不能消除对流层延迟的影响, 残余的对流层延迟仍然影响大地高的解算精度, 通过对残余对流层延迟进行估计能够明显改善大地高的精度。此外, 截止高度角的选择对大地高精度影响很大, 在天气状况不好的情况下, 应该适当提高高度角, 比如到 20 度, 但是在距离比较长的大网中, 高度角不应太高, 这会删掉很多有用观测值, 公共卫星数变少, 使几何结构变弱, 反而令精度降低。

5 结 论

对流层延迟是影响 GPS 大地高精度的主要因素, 目前对流层延迟模型基本上都不能很好的模拟湿分量延迟, 而该误差大部分分配到高程方向上, 严重影响高程精度, 尤其是在基线两端气象条件差别较大, 如高差比较大的情况下, 即使是短基线, 也应该考虑残余对流层延迟的影响。目前的随机商用 GPS 解算软件对对流层折射影响的处理主要是模型化改正, 并且利用双差来削弱对流层折射延迟模型改正后的残差, 这样解算在距离比较短, 大气状况比较好的情况下, 精度还比较好, 但当距离比较远, 大气状况不好, 精度就比较差, 这是在实际工作中容易忽略的要素。通过模型改正和残余对流层的估计, 可以有效地提高大地高的精度。

参考文献

- 葛茂荣, 刘经南. GPS 定位中对流层折射估计研究[J]. 测绘学报, 1996, 25(4): 285-291.
- 殷海涛, 熊永良, 黄丁发. 消弱对流层延迟对 GPS 精密定位影响的方法研究[J]. 工程勘察, 2005, (1): 43-46.
- 田泽海. 提高 GPS 高程方向精度的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2003.
- 薛志宏. GPS 随机软件中的对流层模型及对基线处理的影响[J]. 全球定位系统, 2007, 6: 18-20.

The Effect of Troposphere to GPS Geodetic Height

Shen Fei, An Yan-hui

(Jiangsu Province Surveying & Mapping Engineering Institute, Nanjing Jiangsu 210013, China)

Abstract The basic characteristics of tropospheric delay and its commonly used treatment measures were analyzed in this paper. It had shown that the different pairs stratospheric high precision approach had a greater impact on the geodetic height by examples. When the large height difference across the baseline, even the short baseline, the weather conditions was different, the effects for tropospheric delays could not eliminate only by difference or Model correction in this condition, and the residual tropospheric delays was still affecting the Earth's Solution of high precision. It was proved that the accuracy of geodetic height was improved significantly by estimating the residual tropospheric delay.

Key words GPS; Geodetic Height; Troposphere; Model Correction; Parameters Estimation