

GPS 工程测量中最小高度角的选取

周朝义¹, 许捍卫²

(1. 黄河水利委员会勘测规划设计研究院, 河南 郑州 450003; 2. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 从不同方面探讨了影响高度角选值的因素, 包括大气影响、星座几何强度要求、作业技术要求、卫星状况等, 指出最小高度角一般要大于 15° , 对快速静态和动态测量, 最小高度角应大于 20° 。

关键词: GPS 测量; 最小高度角; 卫星星历

中图分类号: P228.4

文献标识码: B

文章编号: 1006-7647(2001)07-0148-02

最小高度角, 又叫截止高度角, 对于天空中运行的 GPS 卫星, 只有在地平线以上的信号才能被 GPS 接收机捕捉, 而处于较小高度角的卫星, 其信号到达接收机的途中, 受各种因素的干扰比天顶附近方向来的信号要大。为了克服这种影响, 作业中给出的一定的角度, 例如 15° , 对 GPS 信号进行截止, 大于 15° 的卫星信号可被接收, 而小于 15° 的被屏蔽, 这一角度就叫最小高度角(见图 1)。

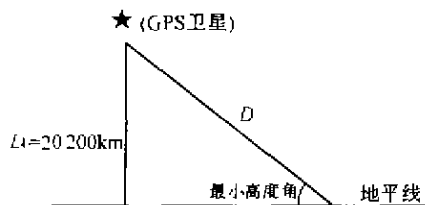


图1 最小高度角示意图

1 一定高度角的卫星信号到达接收机途中所受到的干扰

卫星信号到达接收机的途中, 外界的影响主要有大气影响(对流层和电离层)、多路径效应、潮汐影响、钟差、相对论效应, 而与高度角有关的是大气影响, 本文主要讨论这一影响。

我们知道, GPS 卫星分布于高出地面 20 200 km 的 6 个轨道面上, 对于地面上的接收机距某一卫星的几何距离 $D = D_0 / \sin \alpha = 20\,200 / \sin \alpha$, α 越大, D 越小, 特别地, 当 $\alpha = 90^\circ$ 时, $D = D_0$, 卫星处于天顶位置, 几何距离最小。

GPS 的电磁信号在真空中传播速度等于光速, 当进入地球大气层时, 由于大气层的干扰, 速度会被改变, 信号在大气层中的改变并不是呈线性变化的。

因为大气层自上而下分为电离层、自由层、对流层三层, 各层对电磁信号的折射率不同, 电离层 $n < 1$, 自由层 $n = 1$, 对流层 $n > 1$ 。在各层中的速率为 $C = C_0 / n$ (C_0 为光速), 见图 2。

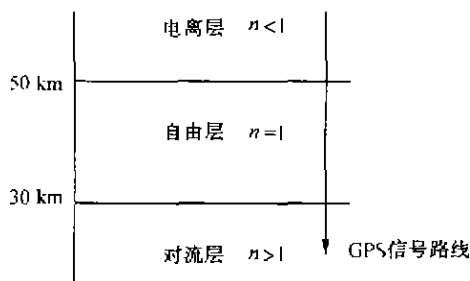


图2 大气层与折射率的关系

处于上面的电离层主要是由宇宙射线对空气电离作用而形成的带电等离子体组成的, 在不同时间内, 由于宇宙射线的强度不同, 各层的厚度不同, 有时某些层甚至会消失。电离层对 GPS 信号的影响主要是折射效应, 它使速度变大, 其它如电离层不均匀性引起的信号闪烁等很微小, 可以不必考虑。

在较理想的天气情况下, 天顶处的电子浓度为 0.5×10^{17} 电子数/ m^3 , 而低高度角处电子浓度可达 2.5×10^{18} 电子数/ m^3 。电离层群延迟公式为

$$\Delta E = 1.34 \times 10^{-7} N_e / f^2 \quad (1)$$

式中: N_e 为电子浓度, $N_e = \int N_e DS$ 为路径上的电子浓度; f 为信号频率。

从公式(1)可以看出, 低仰角的信号其延迟量要大得多。

自由层中 $N_e = 1$, 不作进一步的考虑。

对流层中 $N_e > 1$, 对信号传播影响较大是气体的密度、温度和水汽, 从大气湍流理论可知, 对流层

是由许多形状大小和密度均不相同的空气块组成,每一空气块本身如同一块胶质的透明体,其大小在3~70mm的范围内变动,在风力和浮力作用下,这些气块不断地穿过GPS卫星信号路径,导致路径上各点的折射率产生起伏。折射率的起伏引起路径的弯曲,同时也有幅度漂移、相位抖动等,使信号的传播速度变慢,信号延迟。对流层中的平均折射率 $N_{\text{平}}$ 可用式(2)表示:

$$N_{\text{平}} = \frac{1}{D} \int_0^D u dD \quad (2)$$

其中, $u = u(t, p, e, D)$, t 为温度, p 为气压, e 为湿度, D 为距离。

当 T, P, E 可以高精度地确定后, $U = U(D)$ 仅是路径的函数了,但由于路径上各点处的“空气块”不同,路径上各处所受的干扰无法用线性函数来精确确定。惟一实际的办法是缩短路径,所以提高卫星高度角是解决对流层延迟的有效方法。

2 最小高度角必须满足基本的星座几何图形强度要求

一般进行GPS测量要有4颗以上可见卫星,当卫星形成的空间多面体(4颗星时为四面体)的体积 V 最大,则其几何精度因子 $PDOP$ 值最小,这时处于最佳星座几何配置状态。

$$PDOP = 1/V$$

而 $GDOP = \sqrt{(PDOP^2 + TDOP^2)}$ (3) 这时接收机处于四面体的中心,用户对所有观测卫星的夹角 $\beta = 109.47^\circ$,也就是说,如果取高度角为 90° 的卫星 S_1 为顶卫星,那么 S_2, S_3, S_4 应分布在方位角互差 120° 方位上,且高度角为 -19.47° ,这时为最佳图形($PDOP$ 最小,为1.5811),实际上,这4颗卫星都处于地平线以下,用户无法观测。考虑到地表的起伏,高度角低于 5° 的卫星是不能观测的。当设置高度角为 5° 时, $GDOP = 1.7157$ 。

上面是对4颗卫星的基本配置来讨论的。当然,卫星个数增多,图形强度会更好。这时提高定位精度是有益的,一般地说,5颗卫星的定位精度比4颗卫星要提高50%,所以GPS测量,适当降低高度角,以捕捉更多GPS卫星发来的信号,有时有利于提高定位精度。

3 选择合适的高度角

从上面讨论发现,高度角低时可以收到更多来自不同GPS卫星发出的信号, $PDOP$ (或 $GDOP$)值较小,定位精度要好;而卫星高度角过低时,受大气干扰因素增大,又不利于测量精度的提高。对于选择最小高度角,一般建议要求为 15° ,也有要求 20° 的,笔者在几年的GPS作业中专门进行了研究,认为作业中最小高度角的限制要根据作业技术要求及当时的卫星状况而定,可在 $10^\circ \sim 40^\circ$ 之间选择。但是,能够满足 30° 以上且 $PDOP$ 合适的时段在每一天是很短的,而且不连续。

笔者曾取 $15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ 三个不同高度角进行卫星星历预报,发现当最小高度角设置为 15° 时,几乎整天都可以作为有效时段观测,而且80%的时间可以观测到6颗,90%的时间可观测到5颗;当为 20° 时一天会有几处最小卫星数小于4或者 $GDOP > 8$ 的时段,这种有效时段的断续对作长基线的静态测量是不利的;当最小高度角增大到 25° 时,每天不能作业的时段一般有5处以上,可见,一定的高度角会“筛掉”卫星,在视的卫星几何精度因子也会因此变化。那么某一时段内,以不同的高度角求解,哪种解算结果好呢?

表1给出了一组实测数据,这组数据是在黄河某工程GPS测量中观测的。环1和环2都是三边环。

对环1、环2进行分析可看出,因环1在取 20° 解算时, $GDOP < 8$,所以 20° 的闭合差比 15° 的小,而环2因 20° 时有 $GDOP > 8$ 的时段,闭合差明显提高。所以,建议根据不同作业模式,选择不同的最小高度角。对于静态测量,一般选择 15° 进行外业数据采集,为了进一步提高精度,也可以以 20° 进行星历预报,以 15° 进行测量,根据不同的作业环境,选用 $15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ 不同的高度角求解基线,然后进行重复性、同步环等检核,选取最好的一种作为最终结果。

对于快速静态测量,一般也可以以 15° 进行预报,但最好有5颗以上卫星、 $GDOP < 5$ 为好,也可以参照上面介绍的静态测量做法。

对于动态测量,一般要有 20° 以上的高度角作卫星预报,并且有5颗星以上、 $GDOP < 5$ 的时段作为有效时段。有时考虑到移动路径周围障碍物的遮挡,选择 25° 的高度角会更好。(下转第155页)

表1 不同高度角下闭合差

环号	最小高度角/(°)	边 长	W_x	W_y	W_z	W	$GDOP$ 值
环1	15	17233.3903, 5312.0130, 22234.8069	0.0919	-0.1387	0.0293	0.1689	<8
	20	17233.3893, 5312.0126, 22232.8087	0.0758	-0.0791	0.0705	0.1302	<8
环2	15	17233.4375, 5312.0251, 22232.7400	0.1331	-0.0575	-0.0235	0.1469	<8
	20	17233.4382, 5312.0248, 22232.7394	0.1726	-0.0897	-0.0215	0.1957	有时大于8

AP 的方程如下:

对于直线 EF 有

$$y - y_F = k_{EF}(x - x_F) \quad (1)$$

$$k_{EF} = \frac{y_F - y_E}{x_F - x_E} \quad (2)$$

对于直线 AP 有

$$y - y_A = k_{AP}(x - x_A) \quad (3)$$

$$k_{AP} = \frac{y_P - y_A}{x_P - x_A} \quad (4)$$

由式(1)、式(3)联立可解得 O 点的坐标:

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \frac{k_{EF}x_F - k_{AP}x_A + y_A - y_F}{k_{EF} - k_{AP}} \\ y_0 &= k_{EF}(x_0 - x_F) + y_F \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

或

$$y_0 = k_{AP}(x_0 - x_A) + y_A$$

先根据式(2)、式(4)计算出 k_{EF} 和 k_{AP} ,再由式(5)计算出 O 点的坐标 x_0, y_0 .

4 距离比较

通过距离比较确定棱镜移动的方向和长度:

①求 AO 的水平长度;②计算移动距离 $d = AP -$

AO. 当 $d > 0$ 时,往设站点方向移动长度 d ;当 $d = 0$ 时,点位正在剖面线上;当 $d < 0$ 时,往远离设站点的方向移动长度 d .

一般经过两三次实地趋近即可到达剖面线上或距离剖面线足够近,当满足一定要求时,就可以确定剖面线上的点了.

5 计算机辅助监控实施

待尺员将棱镜(或标尺)放在目标剖面线附近,观测员读取水平方向和平距,输入计算机,立即计算出移动距离 d ,根据 d 的三种情况,判断出移动方向,当 d 趋近于零时,表示点位已在剖面线上,即可定点,测出剖面线上的点的坐标和高程.

必须指出,这里棱镜移动的方向只是沿以当前棱镜位置到测站位置的大致直线上作前后移动,而并非严格在这条直线上的移动.因为手持棱镜的作业员还要看脚下的实地地形及地性线等特征,根据测站上的观测员报来的移动方向和移动距离 d 为参考,向着剖面线方向作符合实地情况的移动.

(收稿日期:2001-08-30 编辑:张志琴)

(上接第 149 页)

从表 1 可看出,不同高度角下,解算结果是不同的,但是一般情况下是相当的.有时增加高度角后,那些刚好处于最小高度角附近的卫星可能被“筛掉”,如果造成了 $GDOP > 8$ 或者卫星数小于 4 时,定位精度就会受到影响.但低仰角的卫星更容易受到大气层干扰,在进行快速静态测量时,如果在 5 颗卫星情况下,其中有 2 颗高度角偏低(低于 15°),这时虽然 $GDOP$ 尚可,解算结果也不好,这时需适当延长观测时间.

4 其他因素对高度角选择的影响

这里主要讨论测站障碍物的遮挡及不同型号天线对最小高度角的影响.

由于各测站的作业环境不同,各站点的高度角选择就有所不同,一般地要绘制测站环境平面图,卫星预报时,将该平面图编辑进去,那么再输出星历预报就比较适合作业了,当然,由于我们大多进行的是相对定位测量,预报时必须综合考虑基线两端点情况.

另外,由于不同型号的接收机天线设计和制作工艺不同,它们的天线方向截止角彼此是有差别的,TRIMBLE, Leica, Ashtech 等的方向截止角要求一般为 15° ,而 TECOM 401170 型的方向截止角小到 5° 亦可,可见不同的 GPS 接收机是有所不同的,作业中

必须根据不同的接收机型号灵活掌握.

5 结 论

a. 最小高度角的选取在 GPS 工程测量中是十分重要的,选取适当的最小高度角,降低大气层的影响,对“净化”观测数据有利.

b. 最小高度角一般要选择大于 15° ,为了解模糊值,或为了提高精度,有时增高最小高度角是有帮助的,但是,不同的高度角必须经过基线的重复性检验与环闭合差检验,才可以判断那种高度角下结果最好.

c. 对快速静态和动态测量,建议采用大于 20° 的最小高度角来进行卫星预报及解算,并有 5 颗以上卫星, $GDOP$ 值最好小于 5.

d. 高度角的选择还要根据测站的作业环境而定,同时,不同型号的接收机天线要求的最小截止高度角是不同的.

参考文献:

- [1] 周忠谟. GPS 卫星测量原理与应用[M]. 北京:测绘出版社,1997.
- [2] 国家测绘局. CH2001-92 全球定位系统(GPS)测量规范[M]. 北京:测绘出版社,1992.

(收稿日期:2001-08-30 编辑:熊水斌)