

GLONASS 广播历书轨道计算方法研究

张永军 徐绍铨 张小红 李英冰

(武汉测绘科技大学地测学院, 武汉市珞瑜路 129 号, 430079)

摘要: GLONASS 与 GPS 观测数据联合处理引起了许多 GPS 用户的广泛关注。本文在简单介绍 GLONASS 系统的基础上, 阐述了常用的广播历书轨道积分模型, 并提出了一种新的积分方法。该方法具有编程简单, 运算速度快等优点。

关键词 GLONASS, 广播历书; 轨道积分; 龙格—库塔法则

1 引言

前苏联的全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, 简称 GLONASS) 于 1996 年初建成并投入运行。该系统由 24 颗卫星组成, 均匀分布在夹角为 120° 的三个轨道面内, 其轨道倾角为 64.8° 。GLONASS 建成并投入运行以来, 与 GPS 构成了组合定位系统, 受到了国内外有关专家和学者们的广泛关注。

GLONASS 同 GPS 在设计原理上很相似, 二者都工作在 L 波段上, 分别发射 C/A 码和 P 码。卫星的位置则通过卫星广播历书获取, 原始的码观测值和载波相位观测值可转换为卫星到接收机的距离, 然后通过距离交会法确定接收机的位置。但由于 GLONASS 所采用的时间基准和空间基准与 GPS 不同, 二者广播星历书的数据格式也不同, 而且 GLONASS 采用频分多址技术, 即每颗卫星都使用不同的工作频率发射信号, 这就使得现有 GPS 数据处理软件无法对 GLONASS 的观测数据进行联合处理。解决这一问题的常用方法是利用 GLONASS 的广播历书进行轨道积分, 计算出 GLONASS 卫星在 PZ-90 坐标系下的位置, 并将 GLONASS 的时间系统和坐标系统转换到 GPS 时统中, 这样 GLONASS 码观测数据就可以与 GPS 码观测数据进行联合处理。本文在阐述积分时间较短时的轨道积分模型的基础, 提出采用编程简单, 运算速度快的定步长四阶龙格—库塔方法进行轨道积分, 并分别对积分区间和积分步长的不同情况编程进行了计算和比较, 最后讨论了适合于实时定位和后处理定位的 GLONASS 卫星坐标的计算方法。

2 GLONASS 广播历书

GLONASS 广播历书每隔半小时更新一次, 历书中包含着与 GPS 广播历书相似的信息, 但其数据格式及内容并不相同。GLONASS 卫星的位置需要依据其广播历书通过积分计算得到, 另外, 与 GPS 卫星历书每小时更新一次并可向左右外推两小时所不同的是, GLONASS 卫星历书只有半小时的有效性。GLONASS 广播历书中与轨道有关的参数主要有参考时刻 t_b 、相对论效应改正、卫星钟差、卫星位置、卫星速度、太阳和月亮摄动加速度之和等, 其中 t_b 为广播历书的参考时间基准, 其余所有相关信息均以 t_b 为参考值。

值得指出是, GLONASS 的稳定性还有待进一步提高, 其广播历书偶尔可能会有某颗卫星的导航信息部分或全部置零, 致使接收机虽然观测到了该星的码和载波相位数据, 却因得不到卫星历书而无法参加计算。一般而言, GLONASS 广播历书中卫星的位置和速度的误差在沿轨道方向分别为 20m 和 0.05cm/s, 与轨道正交方向为 10m 和 0.1cm/s, 而径向则为 5m 和 0.3cm/s 左右。

3 轨道模型的数值积分

卫星在空间的运行轨道主要是由作用在其上的重力所决定的, 卫星的重力位可表示为

$$V = \frac{GM}{r} + U \quad (1)$$

其中 GM 为常量, U 为重力场的离心力位部分, r 为从地球几何中心到卫星质心的距离。将 U 用球谐函数展开并忽略地球重力场中非带谐部分和太阳辐射压等次要因素的影响, 可以得到如下的二阶导数表达式:

$$\begin{aligned} \frac{dV_x}{dt} &= -\frac{GM}{r^3}x + \frac{3}{2}C_{20}\frac{GMa_r^2}{r^5}x \\ &\quad \left(1 - \frac{5z^2}{r^2}\right) + x_{1S} \\ \frac{dV_y}{dt} &= -\frac{GM}{r^3}y + \frac{3}{2}C_{20}\frac{GMa_r^2}{r^5}y \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left(1 - \frac{5z^2}{r^2}\right) + y_{LS}'' \quad (2) \\ \frac{dV_z}{dt} = & -\frac{GM}{r^3}z + \frac{3}{2}C_{20}\frac{GMa_e^2}{r^5}z \\ & \left(3 - \frac{5z^2}{r^2}\right) + z_{LS}'' \end{aligned}$$

其中, a_e 为地球赤道半径, G 为万有引力常量, M 为地球质量, r 为地心至卫星质心的距离, (x, y, z) 为卫星位置向量, $(x_{LS}'', y_{LS}'', z_{LS}'')$ 为日月摄动加速度之和, 而 C_{20} 为地球重力场常数。

我们知道, GLONASS 所采用的坐标基准 PZ-90 坐标系为地固系, 而轨道积分需在惯性系中进行, 因而积分前首先需要考虑从地固系到惯性系的转换, 然后在惯性系中进行积分, 并将积分结果转回到地固系中。从地固系转换到惯性系的转换公式为:

$$\bar{X} = P \cdot N \cdot S \cdot U \cdot X$$

其中 P 为岁差矩阵, N 为章动矩阵, S 为地球自转矩阵, U 为极移矩阵, X 为地固系中的卫星状态向量, \bar{X} 为惯性系中的卫星状态向量, 各矩阵的具体表达式参见参考文献 2。

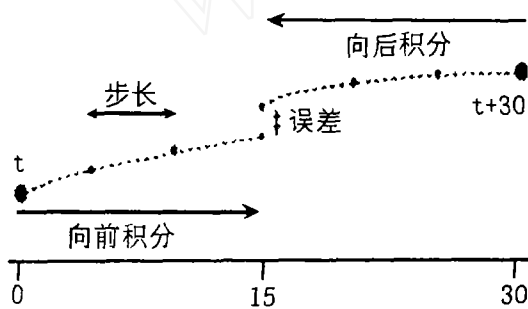


图 1 向前向后 15 分钟轨道积分误差图

进行轨道积分时, 以半小时间隔的参考时间分别向前和向后积分 15 分钟的积分原理见图 1; 以参考时间分别向前积分 30 分钟和 60 分钟的积分原理见图 2。为了求定上述轨道积分公式的精度, 我们根据 GLONASS 广播历书给出的信息, 采用定步长四阶龙格-库塔法则编程进行了轨道积分计算。相对于变步长方法 (详见参考文献 4) 而言, 该方法具有积分公式简单, 容易编程实现和运算速度快等优点, 有利于实现自动化处理。由于积分误差是累积的, 积

由于定位计算一般都在地固系中进行, 同时积分时间比较短, 这时只需考虑地球的旋转矩阵 (其他矩阵均代表长期变化的影响), 因而可以考虑在地固系中求解卫星轨道, 这时必须建立地固系中的卫星运动方程。考虑地球旋转的影响后, 公式 (2) 变为下式:

$$\begin{aligned} \frac{dV_x}{dt} = & -\frac{GM}{r^3}x + \frac{3}{2}C_{20}\frac{GMa_e^2}{r^5}x \\ & \left(1 - \frac{5z^2}{r^2}\right) + x_{LS}'' + \omega^2x + 2\omega V_y \\ \frac{dV_y}{dt} = & -\frac{GM}{r^3}y + \frac{3}{2}C_{20}\frac{GMa_e^2}{r^5}y \\ & \left(1 - \frac{5z^2}{r^2}\right) + y_{LS}'' + \omega^2y + 2\omega V_x \quad (3) \\ \frac{dV_z}{dt} = & -\frac{GM}{r^3}z + \frac{3}{2}C_{20}\frac{GMa_e^2}{r^5}z \\ & \left(3 - \frac{5z^2}{r^2}\right) + z_{LS}'' \end{aligned}$$

其中 ω 为地球自转角速度, 上式即为地固坐标系中轨道积分的最终表达式, 后续的数据分析表明, 该积分公式具有足够的精度。

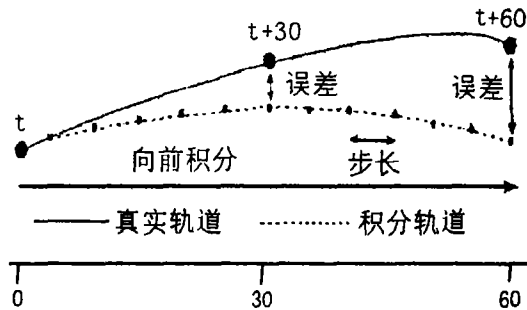


图 2 向前 30 和 60 分钟轨道积分误差图

分步长和积分区间的有效性是影响积分精度的主要因素, 为此, 我们对不同步长和不同积分区间的积分结果进行了比较。首先以 30 分钟的参考时间分别向前向后积分 15 分钟, 并对重合点的积分坐标进行比较 (积分原理如图 1); 然后以 30 分钟的参考时间分别向前积分 30 分钟、60 分钟和 90 分钟, 并将积分坐标与广播历书中的精确坐标进行比较 (积分原理如图 2), 以检验轨道积分公式 (3) 的精度。计算结果统计列于表 1 和表 2。

表 1 向前向后轨道积分结果差值统计表(m)

积分时间 (分)	步长(秒)	数据量	坐标分 量互差	最大值	最小值	平均值	中误差
15	0.1	28	X	1.220	-1.004	0.004	0.801
			Y	0.342	-2.158	-0.698	0.744
			Z	1.449	-1.220	0.469	0.955
15	1.0	28	X	1.220	-1.014	0.004	0.801
			Y	0.342	-2.158	-0.698	0.744
			Z	1.449	-1.243	0.469	0.955
15	30.0	28	X	1.220	-1.004	-0.126	0.855
			Y	0.342	-2.158	-0.634	0.706
			Z	1.457	-1.251	0.382	0.951

表 2 向前轨道积分结果与历书坐标差值统计表(m)

积分时间 (分)	步长(秒)	数据量	坐标分 量互差	最大值	最小值	平均值	中误差
30	0.1	24	X	2.957	-0.901	1.122	1.103
			Y	0.806	-3.952	-0.763	1.246
			Z	4.236	-3.096	1.633	2.120
30	1.0	24	X	2.957	-0.901	1.096	1.124
			Y	0.816	-3.952	-0.763	1.246
			Z	4.236	-3.096	1.400	2.256
30	30.0	24	X	2.957	-0.931	1.232	1.254
			Y	0.821	-3.952	-0.870	2.213
			Z	4.239	-3.107	1.632	2.490
60	0.1	20	X	6.727	-5.075	0.232	2.769
			Y	4.242	-3.187	0.908	2.128
			Z	7.153	-4.172	2.615	2.621
60	1.0	20	X	6.727	-5.075	0.538	2.907
			Y	4.242	-3.187	0.902	2.133
			Z	7.153	-4.172	2.870	2.815
60	30.0	20	X	6.727	-4.218	-0.664	2.934
			Y	4.242	-3.325	0.512	2.289
			Z	8.250	-4.213	2.533	3.401
90	0.1	15	X	16.370	-10.376	0.438	7.852
			Y	9.396	-8.489	3.509	5.184
			Z	19.886	-5.283	7.290	7.108
90	1.0	15	X	16.370	-11.292	0.137	7.950
			Y	9.396	-8.489	1.405	5.507
			Z	19.886	-9.985	7.345	7.165
90	30.0	15	X	16.370	-21.292	0.311	8.841
			Y	9.396	-8.489	1.181	5.764
			Z	24.531	-12.876	11.149	9.700

表1列出了以半小时的参考时间向前和向后积分15分钟时,重合点坐标之间差值的最大值、最小值、平均值和中误差。可以看出,坐标差值最大为2m左右,最小为0.3m左右,坐标分量的中误差均在1m以内,而且不同步长积分结果的精度非常接近。这说明轨道积分公式(3)具有足够的精度,而且对于15分钟的积分区间,不同的积分步长对积分结果的影响可以忽略,在实践中可以采用30秒的积分步长进行积分,从而大大减小计算工作量,有利于节省计算机时和实现自动化处理。

表2列出了以半小时的参考时间分别向前积分30、60和90分钟时,积分坐标与卫星历书中的精确坐标之间差值的最大值、最小值、平均值和中误差。从表2可看出,当积分区间为30分钟时,向前积分的计算结果和精确坐标间的最大差值为4m左右,坐标分量的中误差在1~3m之间。当积分区间为60分钟时,向前积分的计算结果和精确坐标间的最大差值为9m左右,坐标分量的中误差则为3m左右。当向前积分90分钟时,计算结果和精确坐标间的最大差值达25m,坐标分量的中误差最大则达到10m。同向前向后分别积分15分钟的计算结果类似,采用0.1秒和1秒的积分步长时,三种向前积分结果的精度水平相近,当积分步长为30秒时积分精度有不同程度的降低。

综合上述分析可知,相对于1秒的积分步长而言,采用0.1秒的积分步长对积分结果的精度并没有明显的提高,反而会增加计算量;采用30秒的积分步长,当积分区间小于30分钟时,积分结果的精度与采用1秒的积分步长时相当,而积分区间超过30分钟时精度会有较大的降低。另外,从统计结果还可以看出,当积分区间超过60分钟时,积分精度明显降低,所以在实践中,为保证积分坐标的有效性,最好将积分区间控制在60分钟之内。

在实时动态定位中,由于GLONASS广播历书每隔30分钟更新一次,因而当接收到新的卫星历书时,就采用上述定步长方法和1秒的积分步长向前积分60分钟,得出其后60分钟的卫星轨道,并代替原来的卫星轨道用于计算。在后处理定位中,整个观测期间的广播历书是已知的,可以采用30秒的积分步长,以半小时的参考时间分别向前和向后积分,对重合点的两个积分坐标取加权平均作为卫星坐标的精确值进行定位计算;也可以参考时间分别向前、向后积分15分钟,对积分坐标简单取算术平均值,然后利用多项式拟合的方法得出整个观测时间段内统

一的卫星轨道,再进行定位计算。

由于GLONASS系统与GPS系统采用不同的时间系统和坐标系统,因而必须将GLONASS观测数据的时间系统和坐标系统转换到GPS的时间系统和坐标系统中,才能实现GPS数据与GLONASS数据的联合处理。在后处理定位中,GLONASS系统和GPS系统的时间偏差可以从历书文件中获取,进行轨道的数值积分时,可以考虑直接在GPS时间系统中进行积分,然后将GLONASS卫星的位置由PZ-90坐标系转换至WGS-84坐标系(详见参考文献6、8),即可进行码观测值的联合处理。

4 结论

GLONASS与GPS不同,其卫星位置需要根据广播历书通过轨道积分求出。轨道积分时,应考虑地固系与惯性系的转换,当积分时间较短时,可直接在地固系中进行。

本文所采用的定步长四阶龙格-库塔方法,具有公式简单、容易编程实现且运算速度快等优点,为根据广播历书计算GLONASS卫星轨道探索了一条新的途径。

由积分结果可知,轨道积分公式(3)具有足够的精度。实践中,当积分区间小于30分钟时,可以采用30秒的积分步长进行轨道积分,积分区间超过30分钟时可采用1秒的积分步长进行积分。在实时动态定位中,当接收到新的卫星历书时,就采用1秒的积分步长预报60分钟的卫星轨道,并代替原来的卫星轨道用于计算。在后处理定位中,可以采用30秒的积分步长分别向前和向后积分,对重合点的两个积分坐标取加权平均作为卫星坐标的精确值,或以参考时间分别向前、向后积分15分钟,然后利用多项式拟合的方法得出整个观测时间段内统一的卫星轨道,再进行定位计算。

在后处理定位中,可以直接在GPS时间系统中进行轨道积分,并将GLONASS卫星的位置由PZ-90坐标系转换至WGS-84坐标系,即可进行码观测值的联合处理。

参 考 文 献

- [1] 徐绍铨等. GPS测量原理及其应用. 武汉测绘科技大学出版社, 1998.
- [2] 魏子卿等. GPS相对定位的数学模型. 北京: 测绘出版社, 1997. 12
- [3] 葛茂荣. GPS卫星精密定轨理论及软件研究

- [博士论文]. 武汉测绘科技大学, 1995
- [4] 高星伟等. GPS/GLONASS 单点定位的数据处理. 测绘通报, 1999. 4
- [5] 易大义等. 计算方法. 浙江大学出版社, 1997. 11
- [6] Yuri A. Bazlov. GLONASS to GPS; A New Coordinate Transformation. GPS World, 1999. 1
- [7] Richard B. Langley. GLONASS; Review and Update. GPS World, 1997. 7
- [8] Mike Stewart. GLONASS Broadcast Orbit Computation. GPS Solutions, 1998. 2