

地球科学

利用三差法辅助卡尔曼快速检测周跳

刘少鹏 卢艳娥*

(空军工程大学 电讯工程学院, 西安 710077)

摘要 周跳的探测与修复是 GPS 高精度实时定位的关键问题。针对目前大部分方法对小周跳的探测与修复不灵敏、不适用于动态接收机的问题。首先用三差法将载波相位进行处理,减少待解的未知参量,而后用卡尔曼求解三差观测量的方差和修正数向量对周跳进行探测与修复。实测数据仿真和分析的结果表明,该方法适用于单频、高动态接收机,可以快速、准确地探测与修复周跳。

关键词 周跳 卡尔曼滤波 三差法

中图法分类号 P228.4; **文献标志码** A

利用载波相位进行定位时,要达到较高的定位精度,必须保证载波相位中无周跳出现。因此,周跳的探测与修复是载波相位数据处理中的一个重要问题。

目前用于检测周跳的方法主要有差分法、多普勒频移法、伪距相位组合法、电离层残差法和站间或站星间差分法等。但以上方法具有一定的局限性:差分法在放大周跳的同时也放大了噪声,因此差分法主要用于探测较大的周跳;多普勒频移探测周跳时,必须保证至少前四个历元的载波相位观测值没有周跳,继而用它们来探测和修复第五个历元的载波相位观测值的周跳;伪距相位组合法周跳的探测能力依赖于伪距观测量的精度,一般需要接收机能够输出 P 码伪距,对单频接收机不适用;电离层残差法是目前效果较好的周跳探测方法之一,但也不能应用于单频接收机。现采用三差法首先将电离层误差、对流层误差、卫星钟差、整周模糊度等

误差消除,大大减少了待解的未知参量,而后利用差分后的载波信息,用卡尔曼算法对周跳进行检测与修复,提高了检测与修复的效率与精度,并且可实现对周跳动态、实时、快速求解。仿真和实测数据的计算和结果显示,该方法可以检测到小周跳,适用于单频机并且不依赖于伪距观测精度,可快速地检测与修复动态周跳。

1 模型的建立

为了消除载波相位中电离层误差、对流层误差、卫星钟差、接收机钟差等误差,将载波相位进行双差。则载波相位双差观测方程为

$$\nabla\Delta\varphi^{j,k}(t) = \frac{1}{\lambda}[R_a^k(t) - R_b^k(t) - R_a^j(t) + R_b^j(t)] - \nabla\Delta N^{j,k} + V(t) \quad (1)$$

式(1)中: $\nabla\Delta\varphi$ 为双差载波相位观测量; $\nabla\Delta N$ 为整周模糊度; λ 为波长; R 为卫星到接收机的距离; a, b 为基线两端的接收机, a 为参考接收机; j, k 为被观测的 GPS 卫星; V 为残差向量。将其线性化得到

$$\nabla\Delta\varphi_{a,b}^{j,k}(t) = -\frac{1}{\lambda}[\nabla l_b^k(t) \quad \nabla m_b^k(t) \quad \nabla n_b^k(t)] \begin{bmatrix} \delta x(t) \\ \delta y(t) \\ \delta z(t) \end{bmatrix} -$$

$$\nabla\Delta N + \frac{1}{\lambda}[R_{b0}^k(t) - R_a^k(t) -$$

2010年7月27日收到

西省自然科学基金
(SJ08F11)项目资助

第一作者简介:刘少鹏(1986—),男,硕士研究生,研究方向:GPS/BD2 高精度定位理论与应用。

*通信作者简介:卢艳娥(1963—),女,副教授,硕士研究生导师,研究方向:卫星导航与信号处理理论与应用。

$$R_{b0}^j(t) + R_a^j(t)] + V(t) \quad (2)$$

式(2)中

$$\nabla l_b^k(t) = l_b^k(t) - l_b^j(t), \nabla m_b^k(t) = m_b^k(t) - m_b^j(t),$$

$$\nabla n_b^k(t) = n_b^k(t) - n_b^j(t), l_b^k(t) = \frac{1}{R_b^k(t)}[x^k(t) - x_b],$$

$$m_b^k(t) = \frac{1}{R_b^k(t)}[y^k(t) - y_b], n_b^k(t) = \frac{1}{R_b^k(t)}[z^k(t) - z_b]。$$

$x^k(t), y^k(t), z^k(t)$ 是卫星 k 在历元 t 时刻的 x, y, z 的坐标; $\delta x(t), \delta y(t), \delta z(t)$ 分别为 t 时刻接收机 x, y, z 坐标的修正改变量。

暂时不考虑残差,为了消除整周模糊度,进一步将双差观测方程的 t 时刻与 $t+1$ 时刻做差,得到三差观测方程为

$$\delta \nabla \Delta \varphi(t) = \frac{1}{\lambda} H(t) \delta X(t) + \nabla h(t) - \frac{1}{\lambda} H(t+1) \delta X(t+1) \quad (3)$$

式(3)中

$$H(t) = [\nabla l_b^k(t) \quad \nabla m_b^k(t) \quad \nabla n_b^k(t)],$$

$$\delta X(t) = [\delta x(t) \quad \delta y(t) \quad \delta z(t)],$$

$$\nabla h(t) = \frac{1}{\lambda} [R_{b0}^k(t+1) - R_a^k(t+1) - R_{b0}^j(t+1) \times$$

$$R_a^j(t+1)] + \frac{1}{\lambda} [-R_{b0}^k(t) + R_a^k(t) +$$

$$R_{b0}^j(t) - R_a^j(t)]。$$

将 $\delta x(t+1)$ 在 t 时刻泰勒展开

$$\delta x(t+1) = \delta x(t) + \frac{\delta x'(t)}{1!} + \frac{\delta x''(t)}{2!} + \dots + \frac{\delta x^n(t)}{n!}。$$

假设接收机为匀速运动,则 $\frac{\delta x''(t)}{2!} + \dots + \frac{\delta x^n(t)}{n!}$ 为一个可以忽略的小量,则有

$$\delta x(t+1) = \delta x(t) + \delta x'(t)。$$

同理

$$\delta y(t+1) = \delta y(t) + \delta y'(t),$$

$$\delta z(t+1) = \delta z(t) + \delta z'(t)。$$

将 $\delta x(t+1), \delta y(t+1), \delta z(t+1)$ 其带入(3)式,得到量测方程为

$$\nabla L(t) = A(t+1) \delta X(t) - B(t) \delta X(t) + \nabla V(t) = C(t) \delta X(t) + \nabla V(t) \quad (4)$$

式(4)中

$$A(t+1) = [\nabla l_b^k(t+1) \quad \nabla m_b^k(t+1) \quad \nabla n_b^k(t+1)$$

$$\nabla m_b^k(t+1) \quad \nabla n_b^k(t+1) \quad \nabla n_b^k(t+1)],$$

$$\delta X(t) = [\delta x(t) \quad \delta x'(t) \quad \delta y(t) \quad \delta y'(t) \quad \delta z(t) \quad \delta z'(t)],$$

$$B(t) = [\nabla l_b^k(t) \quad 0 \quad \nabla m_b^k(t) \quad 0 \quad \nabla n_b^k(t) \quad 0],$$

$$C(t) = [a(t+1) \quad \nabla l_b^k(t+1) \quad b(t+1) \quad \nabla m_b^k(t+1) \quad c(t+1) \quad \nabla n_b^k(t+1)],$$

$$a(t+1) = \nabla l_b^k(t+1) - \nabla l_b^k(t),$$

$$b(t+1) = \nabla m_b^k(t+1) - \nabla m_b^k(t),$$

$$c(t+1) = \nabla n_b^k(t+1) - \nabla n_b^k(t),$$

$$\nabla L(t) = \delta \nabla \Delta \varphi(t) - \nabla h(t), \nabla V \text{ 为残差。}$$

若接收机为匀速运动,可知状态方程为

$$\delta X(t+1) = \Phi_{k,k+1} \delta X(t) + \Gamma_{k+1} W_{k+1} \quad (5)$$

式(5)中

$$\Phi_{k,k+1} = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\Gamma_{k+1} = \begin{bmatrix} \frac{T^2}{2} & T & \frac{T^2}{2} & T & \frac{T^2}{2} & T \end{bmatrix}^T,$$

T 为采样周期。

由上述卡尔曼模型,可得出修正量向量 $\delta X(t)$ 的值。将 $\delta X(t)$ 代入方程(4),得出 $\nabla V(t)$,根据平差测量原理,观测量的方差为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\nabla V^T Q^{-1} \nabla V}{n-3}} \quad (6)$$

给出一个设定的门限,当观测量的方差小于设定的门限时,认为无周跳,相反则认为发生了周跳。

2 周跳的修复

利用上述检测周跳的方法检测出四颗不存在周跳的卫星,用 LAMBDA 算法解算出整周模糊度。

双差观测方程为

$$\Phi(t) = H(t) \nabla B(t) - \nabla \Delta N + \nabla V(t) \quad (7)$$

式(7)中

$$\Phi(t) = \nabla \Delta \varphi_{a,b}^{j,k}(t) -$$

$$\frac{1}{\lambda} [R_{b0}^k(t) - R_a^k(t) - R_{b0}^i(t) + R_a^i(t)],$$

$$\nabla B(t) = \begin{bmatrix} \delta x(t) \\ \delta y(t) \\ \delta z(t) \end{bmatrix},$$

$$H(t) = -\frac{1}{\lambda} [\nabla l_b^k(t) \quad \nabla m_b^k(t) \quad \nabla n_b^k(t)]$$

∇B 为接收机修正数向量; $\nabla V(t)$ 为残差; $\nabla \Delta N$ 整周模糊度; 通过最小二乘法求出修正数向量 $\nabla B(t)$ 为

$$\nabla B(t) = (H^T(t)H(t))^{-1}H^T(t)(\Phi(t) - \nabla \Delta N) \quad (8)$$

将 $\nabla B(t)$ 代入由其它卫星组成的双差观测方程组中, 解算出新的整周模糊度, 替代原先的整周模糊度, 从而修复周跳。

3 仿真结果及分析

仿真数据由两台 NovAtel 接收机采集, 共观测 8 颗卫星, 采样率为 1s。在设定门限值的时候, 根据假设检验中当置信度取 99% 时, 可取门限值为 2.5σ 。

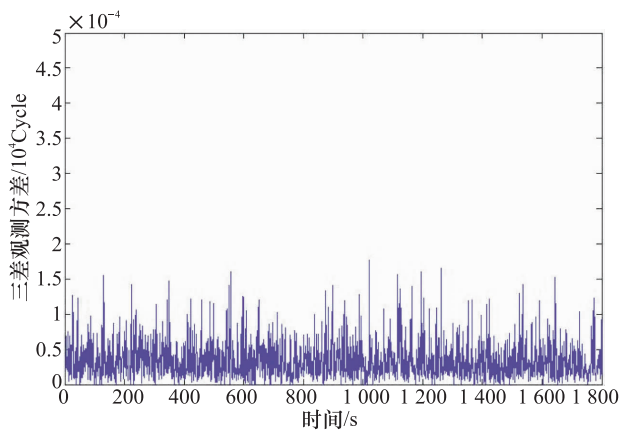


图1 加入周跳前三差观测量的方差

图1中三差观测量的方差均小于门限值, 说明没有出现周跳。

而后在历元 300 s, 600 s, 700 s, 1000 s, 1400 s 分别加入周跳, 其大小依次为: 1 周、1 周、2 周、-2 周、1 周。

从图2可以看出在加入周跳时刻的三差观测方

差出现明显的跳变, 远远大于门限值, 成功地检测出周跳。

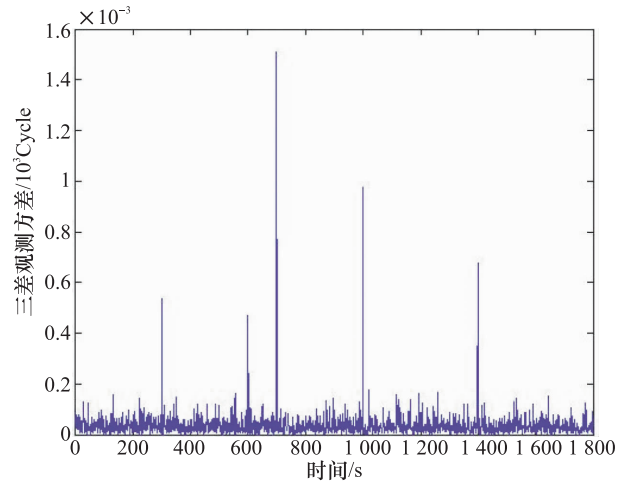


图2 加入周跳后的三差观测量的方差

在修复周跳的过程中, 利用修正数向量模的误差来判断周跳的修复情况。图3是加入周跳后的修正数向量模的误差, 可以看出当有周跳出现的时刻, 误差远远的超出了门限值。

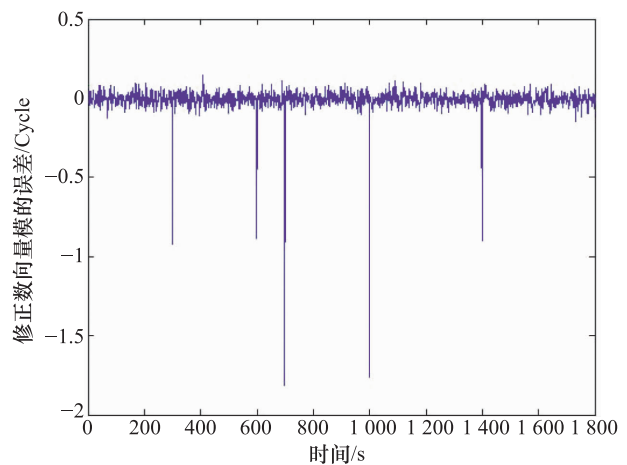


图3 有周跳时修正数向量模的误差

图4是通过修正数向量修正周跳后, 新的修正数向量模的误差。可以看到其误差已近小于门限值, 修复了周跳。

从仿真结果中可以看出, 这种周跳的检测与修复方法可以检测出1—2周的小周跳, 可以实施动态的检测与修复, 并且当多颗卫星同时出现周跳时, 可以一次修复多颗卫星的周跳。

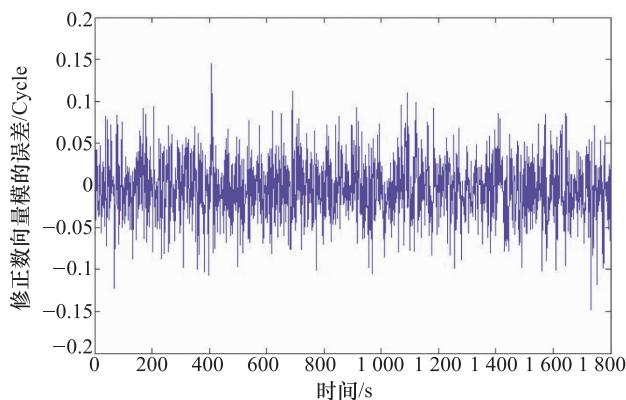


图4 修复周跳后修正数向量模的误差

4 结论

由以上仿真可以看出,利用三差法辅助卡尔曼可以很好的解决周跳问题。通过这种方法可以确定1周的小周跳;在多颗卫星同时发生周跳的时候能一次将其全部修复;对于连续的周跳,该方法也能有效地探测与修复。该算法效率高,实用性强。但也存在一些不足之处:主要是要求相邻历元内至少有4颗卫星的载波相位观测量不发生周跳,否则

只能检测到周跳而无法修复周跳。也没有过多地考虑到多路径效应,会影响解的精度。为了满足高动态物体实时测量的需要,应当研究实时性更高、精度更好的周跳检测与修复算法。

参 考 文 献

- 1 Hofmann-Wellenhof B, Lichtenegger H, Collins J. Global positioning system theory and practice. New York: Springer-Verlag Wien, 1992:210
- 2 Collin F, Wamat R. Application of the wavelet transform for GPS cycle slip correction and comparison with Kalman filter. Manuscript Geodetica, 1995;20(3):161—172
- 3 Liz Gao Y. Cycle slip detection and ambiguity resolution algorithm for dual-frequency GPS data processing. Marine Geodesy, 1999,22(4):169—181
- 4 Lechner W, Baumann S. Global navigation satellite systems. Computers and Electronics in Agriculture, 2000;25:67—85
- 5 Bell T. Automatic tractor guidance using carrierphase differential GPS. Computers and Electronics in Agriculture, 2000;25:53—66
- 6 刘震昆. 分布式 SAR 卫星姿态和相对轨道确定及相关问题研究. 成都:电子科技大学学位论文, 2008
- 7 范胜林, 秦 岭. GPS 姿态系统中周跳的检测及修复方法. 数据采集与处理, 2002;17(1)

A Quick Method for Cycle Slip Detection with Kalman Filter Assisted by Triple Difference Algorithm

LIU Shao-peng, LU Yan-e *

(Air Force Engineering University Telecommunication Engineering Institute, Xi'an 710077, P. R. China)

[Abstract] Detection and reparation about cycle slip are the key problems of GPS high precision and real time positioning. Aimed at the most method that is not sensitivity for detection and reparation about small cycle slip and not applicability to the dynamic receiver. Firstly, carrier wave phase is treated with the triple difference algorithm to reduce the unknown parameter, then, the detection and reparation about cycle slip is done with the variance and reparation vector of triple difference observation, which are calculated with Kalman filter method. At last, the method is analyzed with the real data, and simulated with the Matlab. As can be seen from the simulation result, this method is applicable to the single frequency and high dynamic receiver, and can be used to detect and repair the cycle slip quickly and accurately.

[Key words] cycle slip Kalman filter triple difference algorithm