

GPS 载波相位的周跳检测方法^{*}

廖向前^{**} 黄顺吉

(电子科技大学电子工程系 成都 610054)

【摘要】 讨论了 GPS 载波相位定位中出现的周跳问题及其解决途径, 将其分为静态和动态两种情况。在静态环境下根据卫星运动的特点采用最小二乘拟合的方法来检测, 在动态环境下利用卡尔曼滤波对载波相位残差进行统计检验, 并结合双频相位电离层残差组合进行两级周跳检测, 可以提高周跳的检测能力。利用实测的相位数据, 上述方法均得到了验证。

关键词 周跳; 多项式拟合; 电离层残差观测; 残差统计检验; 卡尔曼滤波

中图分类号 TN967.1

在某些情况下, GPS 载波相位精密定位中 GPS 载波相位跟踪环路失锁致使始后周数的记录失效, 载波相位观测值出现整周跳变, 也即产生周跳。周跳的原因可能是因为信号的遮掩、低信噪比、接收机机动, 或信号落在天线方向截止角内等因素, 在实际应用中无法避免。相位跳变会因接收机无法检测而带来精密定位上的严重误差, 因此周跳的检测一直是 GPS 载波相位精密定位技术的重要环节。

1 静态测后数据处理的周跳检测^[1]

在静态情况下, 载波相位观测值的变化是由卫星的运动变化引起的, 这种变化是平滑的、可预测的。GPS 卫星的径向速度最大可达 0.9 km/s, 每秒钟相位变化可达数千周, 一般的周跳难于直接观测到。由运动学规律可知, 如果将相邻的两个相位观测值求高阶差, 它便呈偶然误差特性。按此原理若对某颗卫星的 L_1 和 L_2 载波相位观测值 $\varphi(t_i)$, $i=0, 1, 2, \dots$, 进行连续地记录求差, 若相位观测值发生了周跳, 相位高阶差会发生较大跃变, 即对周跳有“放大”的作用。由表 1 可看出无周跳时相位观测值四次差已趋近于零。当 $i=10$ 时括号内的载波相位观测值发生周跳 5 周, 由相位四次差可以明显地看到由于周跳而发生的突然跃变。

为了计算机的处理方便, 常采用曲线拟合的方法, 即根据 n 个相位观测值拟合一个 m 阶多项式, 据此多项式来预估下一个观测值, 并与实测值比较, 从而发现并修正整周计数。由于四次差或五次差一般已呈偶然误差特性, 无法再用函数加以拟合, 所以用多项式拟合时通常也只需 4~5 阶即可。

对给定一组实验数据点 (x_i, y_i) ($i=0, 1, 2, \dots, n$), 要求构造一个 m 次多项式函数 $y=f(x)$ 逼近这些数据点, 并使得偏差的加权平方和最小^[2]。

1997年3月14日收稿

* 电子部预研基金资助项目

** 男 25岁 博士生

$$\text{讨论} \quad \begin{cases} \Gamma(a_0, a_1, \dots, a_m) = \sum_{i=0}^n \hat{\varphi}(f(x_i) - y_i)^2 \\ f(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_mx^m \quad m \leq n \end{cases} \quad (1)$$

即使得 $\Gamma(a_0, a_1, \dots, a_m)$ 取最小, 加权系数 $\hat{\varphi} > 0$, 本文中 $\hat{\varphi} = 1 (i=0, 1, 2, \dots, n)$ 。

按上述原理, 对表 1 中的相位观测值进行多项式拟合求出

$$\varphi(t) = 723\,791.308\,6 + 10\,683.233\,9t + 206.557\,3t^2 - 0.033\,2t^3 + 0.009\,3t^4 \quad (2)$$

由式(2)计算预测值 $\varphi'(10) = 851\,339.3$ 与实测值相差约 0.7 周, 表 1 括号内含 * 项为含周跳的相位观测值 $\varphi'(10) = 851\,343.583\,6$ 周, $\varphi(10) - \varphi(10) \approx 4.3$ 周, 即使由于测量误差的影响, 其误差也应该在 1 周之内, 因此可判断发生了周跳。

表 1 相位观测值及各次相位差

序号 i	相位观测值(周)	一次差	二次差	三次差	四次差
0	723 791.244 0				
1	734 681.239 9	10 889.995 9			
2	745 983.844 8	11 302.604 9	412.609 0		
3	757 699.778 1	11 715.933 3	413.328 4	0.719 4	
4	769 829.352 1	12 129.574 0	413.640 7	0.312 3	-0.407 1
5	782 373.193 7	12 543.841 6	414.267 6	0.626 9	0.314 6
6	795 331.774 4	12 958.580 7	414.739 1	0.471 5	-0.155 4
7	808 706.133 9	13 374.359 5	415.778 8	1.039 7	0.568 2
8	822 497.939 2	13 791.805 3	417.445 8	1.667 0	0.627 3
9	836 708.479 3	14 210.540 1	418.734 8	1.289 0	-0.378 0
10	851 338.583 6 (851 343.583 6) *	14 630.104 3 (14 635.104 3) *	419.564 2 (424.564 2) *	0.829 4 (5.829 4) *	-0.459 6 (4.540 4) *
11	866 390.014 6 (866 395.014 6) *	15 051.431 0	421.326 7 (416.326 7) *	1.762 5 (-8.237 5) *	0.933 1 (-14.066 9) *
12	881 863.818 3 (881 868.818 3) *	15 473.803 7	422.372 7	1.046 0 (6.046 0) *	-0.716 5 (14.283 5) *
13	897 762.150 0 (897 767.150 0) *	15 898.331 7	424.528 0	2.155 3	1.109 3 (-3.890 7) *
14	914 086.613 3 (914 091.613 3) *	16 324.463 3	426.131 6	1.603 6	-0.551 7

2 动态环境下的周跳检测

2.1 利用电离层残差观测量检测周跳

GPS 的 L_1 和 L_2 波段载波相位观测方程为^[3,4]

$$\lambda\varphi(t) = \rho(t) + \lambda N + c\Delta \delta(t) - \frac{A(t)}{f^2} + \lambda n \quad (3)$$

定义电离层残差观测量

$$I(t) = \varphi_1(t) - \frac{f_1}{f_2} \varphi_2(t) \quad (4)$$

在 t_1 时刻无周跳发生时, $n_1 = n_2 = 0$, 此时双频载波相位组合后电离层残差观测量为

$$I(t_1) = \varphi_1(t_1) - \frac{f_1}{f_2} \varphi_2(t_1) = (N_1 - \frac{f_1}{f_2} N_2) - \frac{A(t_1)}{\lambda_1 f_1^2} (1 - \frac{f_1^2}{f_2^2}) \quad (5)$$

式(5)右边仅第二项为电离层时变项, 在正常的电离层条件和短基线情况下, 其变化甚微可忽略不计。因此可视电离层残差观测量为常量。

假设在 t_2 时刻周跳发生时, 电离层残差观测量为

$$I(t_2) = \varphi_1(t_2) - \frac{f_1}{f_2} \varphi_2(t_2) = (N_1 - \frac{f_1}{f_2} N_2) - \frac{A(t_2)}{\lambda_1 f_1^2} (1 - \frac{f_1^2}{f_2^2}) + (n_1 - \frac{f_1}{f_2} n_2) \quad (6)$$

n_1, n_2 不同时为零, 从而使电离层残差观测量发生突然跳变, 由此根据两时刻电离层残差的变化大小来判断该时刻是否发生周跳。令 $s = I(t_2) - I(t_1)$, 由式(5)得到

$$s = [\varphi_1(t_2) - \frac{f_1}{f_2} \varphi_2(t_2)] - [\varphi_1(t_1) - \frac{f_1}{f_2} \varphi_2(t_1)] \quad (7)$$

对不同波段、不同卫星、不同时刻, 其相位观测值不相关, 根据误差传播原理, 有

$$\sigma_s = \sqrt{2} \sqrt{1 + (f_1/f_2)^2} \sigma_\varphi \approx 2.3 \sigma_\varphi \quad (8)$$

相位观测噪声的大小因接收机性能和使用环境而异, 根据应用经验取 $\sigma_\varphi = 0.1$ 周, 则 $\sigma_s = 0.23$ 周。如果电离层残差变化量 s 在 $3\sigma_s$ 约为 0.7 周范围内, 则认为无周跳发生, 否则判为有周跳发生, 即建立如下周跳检测函数

$$s \geq 0.7 \text{ 周: 周跳发生}; \quad s < 0.7 \text{ 周: 无周跳发生} \quad (9)$$

上述判断方法存在一个假设条件即是在 L_1 和 L_2 波段载波相位观测量不同时发生周跳, 一般情况是满足的, 在极少数情况下, n_1, n_2 的组合甚微, 在测量误差范围内将无法正确检测周跳, 需要结合其他方法。

2.2 利用卡尔曼滤波检测周跳

卡尔曼滤波方法对动态用户的运动状态建立正确的数学模型, 对用户的运动状态进行最优估计, 在 GPS 动态载波相位定位过程中, 可以大大提高定位精度。此方法已被广泛应用, 而利用卡尔曼滤波检测周跳算法采用递推估计, 用以前的测量数据, 去估计新的测量数据的合理性, 或用预测状态值来评估滤波状态值的合理性, 并作出判决。

考虑带周跳的载波相位定位的 kalman 滤波离散系统模型^[5]

$$\begin{cases} X(k) = F(k, k-1)X(k-1) + G(k-1)W(k-1) \\ Z(k) = H(k)X(k) + V(k) + l\tau(k, \varphi) \end{cases} \quad (10)$$

式中 l 为相位观测值整周跳变量。

$$l5 \quad \tau(k, \varphi) = \begin{cases} 1 & k \geq \varphi \\ 0 & k < \varphi \end{cases} \quad (11)$$

对每个采样时刻, 利用卡尔曼滤波递推估计用户运动状态, 其载波相位残差为

$$r(k) = Z(k) - H(k)X[k/(k-1)] \quad (12)$$

在无周跳发生时, 卡尔曼滤波器的残差 $r(k)$ 是零均值高斯白噪声, 其协方差矩阵为

$$A(k) = H(k)P[k/(k-1)]H^T(k) + R(k) \quad (13)$$

若观测相位存在整周跳变时, 残差 $r(k)$ 的均值不为零, 因此可通过对残差 $r(k)$ 的统计检验来确定相位观测值是否发生了周跳。

若把系统正常观测值无周跳作为零假设 H_0 , 而观测值出现周跳作为备选假设 H_1 , 有

$$\begin{aligned}
 H_0: E\{r(k)\} &= 0; E\{r(k)r^T(k)\} = A(k) \\
 H_1: E\{r(k)\} &= \mu; E\{[r(k) - \mu][r(k) - \mu]^T\} = A(k)
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

可以成立以下周跳检测函数

$$J(k) = r^T(k)A^{-1}(k)r(k) \tag{15}$$

其中 $J(k)$ 服从自由度为 m 的 χ^2 分布, 即 $J(k) \sim \chi^2(m)$, m 为相位观测值的维数。故可建立如下周跳检测准则

$$J(k) \geq T_D \quad \text{存在周跳}; \quad J(k) < T_D \quad \text{不存在周跳} \tag{16}$$

T_D 为预先设置的门限, 由误警率 P_{fa} 确定。令 $P_{fa} = \alpha$ 时, 可由下式求解门限 T_D

$$P[J(k) \geq T_D | H_0] = \alpha \tag{17}$$

2.3 双频时周跳检测的两级处理

利用载波相位双频观测值检验周跳, 概念比较清晰, 方法简单易行, 但仍存在一些无法检测的整周跳变组合, 在实际应用中, 可作为定位解算之前的预处理, 在进行卡尔曼滤波定位解算的同时利用相位观测值残差检测周跳作为第二级处理。两级周跳检测可以提高周跳的检测能力, 提高定位精度。

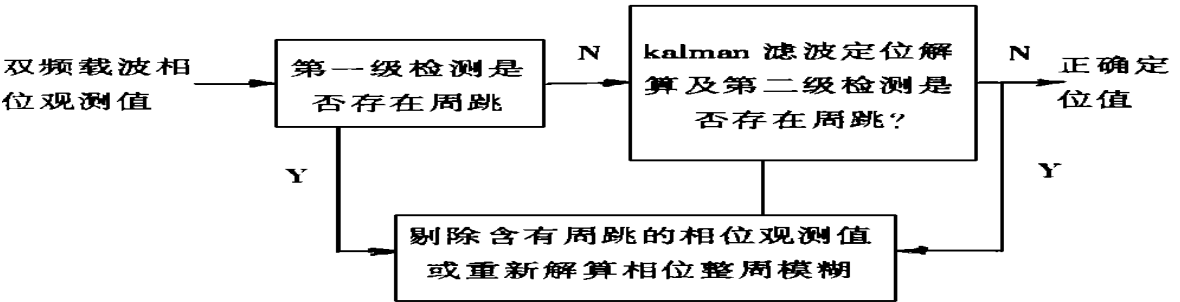


图 1 二级周跳检测流程图

我们对第一级周跳检测无法检测到的整周跳变值进行第二级卡尔曼滤波周跳检测模拟实验, 对在动态情况下收集的正确相位观测值在采样时刻 $k=50$ 时人为地加入周跳量, 相位模糊在初始化阶段已经完成, 系统处于正常的定位条件下, 卡尔曼滤波完成对四颗卫星的载波相位观测值的定位解算, 并对相位观测值的残差进行统计检验, $P_{fa} = 0.5\%$ 。图 2 给出了 L_1 载波具有周跳量为 9 周的对应卫星的相位观测残差值, 图 3 给出了统计检验函数值。未发生周跳时, 残差值处于误差范围内, 统计检验值在 95% 置信度的门限值内。在采样时刻 $k=50$ 时由于相位残差的跳变导致统计检验值发生跃变, 与正常条件下的统计规律不符, 可明显地检测到周跳的发生, 这样就可以剔出相位观测残差值出现跃变的对应卫星, 选择另一组无周跳的卫星进行精密定位。

3 结论

本文对 GPS 载波相位定位中出现的周跳问题在静态和动态环境下分别进行了讨论, 首先讨论了静态环境下对测后数据进行最小二乘多项式拟合的方法检测周跳的存在, 然后讨论了动态环境下用卡尔曼滤波利用残差信息进行统计检验来检测周跳。如果是双频相位接收机, 还可结合双频

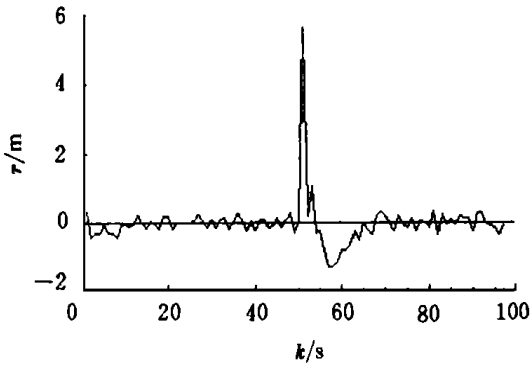


图2 相位观测残差

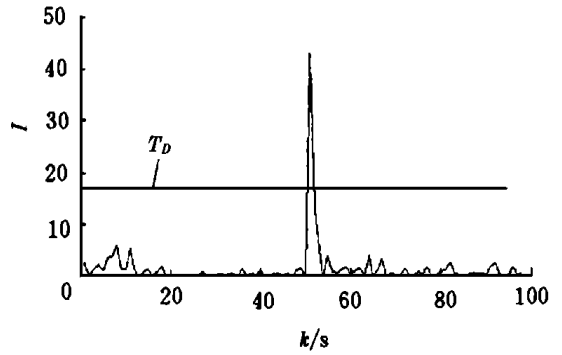


图3 周跳检测函数值

载波相位进行两级周跳检测。文中利用收集到的一组载波相位测量数据对上述方法进行了验证,证实了其周跳检测的有效性,这对载波相位定位技术中解决存在令人头痛的周跳问题提供了可选的途径。

参 考 文 献

- 1 刘基余,李征航,王跃虎等.全球定位系统原理及其应用.北京:测绘出版社,1993
- 2 罗笑南,王若海.计算机图形学.广州:中山大学出版社,1996
- 3 Hofmann-Wellenhof B, Lichtenegger H, Collins J. Global positioning system: theory and practice. New York: Springer-Verlag Wien, 1992
- 4 许其凤. GPS 卫星导航与精密定位.北京:解放军出版社,1989
- 5 袁 信,余济洋,陈 哲.导航系统.北京:航空工业出版社,1993

Cycle Slip Detection in GPS Carrier Phase Observables

Liao Xiangqian Huang Shunji

(Dept. of Electronic Eng., UEST of China Chengdu 610054)

Abstract This paper discusses cycle slip problem and its solving method in two different cases. In static case, a 4-order polynomial is produced using least square method, and it is used to predict the next epoch phase observable to find out cycle slip. In kinematic case, Kalman filter method is used to perform statistic test with phase residual, if dual phase observables are provided, the ionospheric residual is produced to perform two step cycle slip detection, thus to enhance its capability. All the above methods are verified with field phase data.

Key words cycle slip; polynomial fit; ionospheric residual observable; residual statistic test; kalman filtering

编辑 叶 红