

接收机时钟辅助 RAIM 算法研究

陈小平, 滕云龙, 徐红兵

(电子科技大学电子科学技术研究院, 成都 610054)

摘 要: 首先根据时间序列分析理论证明了接收机钟差残差的一阶差分序列是平稳过程, 提出了基于“滑动窗”结合 U-C 算法的参数实时更新的接收机钟差预测模型, 同时把基于该模型的钟差预测值引入到卫星导航中进行辅助自主完好性监测。仿真结果表明, 本方法不仅改善了钟差预测的精度, 而且提高了故障检测和识别的效率, 检测的最小故障偏差下降到 16m。这一算法在某型号接收机上取得了很好的效果。

关键词: 时间序列分析; 平稳过程; 钟差模型; 自主完好性; 滑动窗

中图分类号: P228.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1328(2009)01-0271-05

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2009.00.048

0 引言

导航接收机自主完好性监测(RAIM)是指当系统不能用于导航服务时及时向用户提供报警的能力。当系统不具备这种能力时,会导致导航服务可靠性下降,严重时会产生重大安全事故。

RAIM方法受可见卫星数和卫星几何分布的影响,在部分时空点 RAIM方法不可用。为了提高 RAIM的可用性,通常采用气压高度表、INS 或者钟差预测模型等方法辅助。在以上方法中,钟差辅助不需要外部信息,使用灵活;但如何提高钟差预测精度以增强辅助效果一直是国内外研究的重点和难点。

文献[3]分析了把钟差预测引入到 RAIM算法中的可行性,文献[4-5]从不同角度研究了采用钟差辅助下的 RAIM算法的可用性。但目前的钟差预测模型都建立在多项式基础上^[4-6],还未见其它形式的预测模型。

本文根据时间序列分析理论证明了钟差残差序列的一阶差分是平稳过程,提出了“滑动窗”(Coasting Window)结合 U-C 算法的参数实时更新的钟差预测模型(以下简称 CWUC 模型),并提出了解决预测误差的新方法;同时对 CWUC 模型辅助 RAIM 算法的性能进行了分析。仿真结果反映了 CWUC 模型的性能以及相对于以往模型的优势。

1 基于 CWUC 的钟差预测模型

本节根据时间序列分析理论,将钟差看作时间序列,对其残差的一阶差分序列进行平稳性检验,总结出接收机钟差随时间的变化规律,建立了参数实时更新的 CWUC 钟差预测模型,最后给出了模型的算法流程。

1.1 残差一阶差分序列的平稳性检验

根据 GPS 接收机进行定点定位数据采集,记录钟差数据并剔除野值,得到样本序列 $\{Z_i\}$ 。再用 $\{Z_i\}$ 减去其平均值,得残差序列 $\{W_i\}$, 残差序列如图 1 所示。

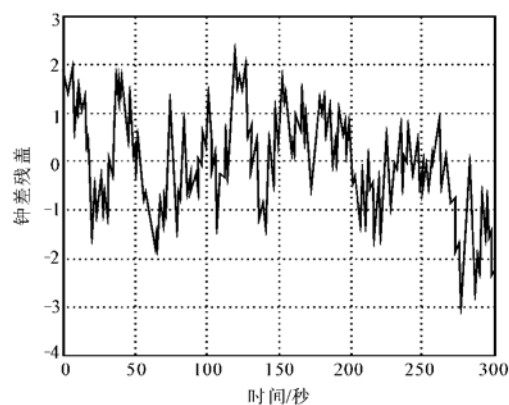


图 1 残差曲线

Fig. 1 Clock bias error curve

检验一个时间序列是否平稳可采用分段检验法、逆序检验法或 r_k 检验法^[7,8]。从图 1 中可粗略看出 $\{W_i\}$ 不具有单调趋势,因此不能采用逆序检验法。采用分段检验法和 r_k 检验法对 $\{W_i\}$ 进行平稳性检验,结果表明残差序列不具备平稳性。

根据时间序列分析理论,对非平稳序列进行一阶或多阶差分,得到的差分序列可能是平稳的。通过对 $\{W_i\}$ 进行一阶差分得到增量序列 $\{\nabla W_i\}$,如图 2 所示。根据上述检验方法,对 $\{\nabla W_i\}$ 进行平稳性检验,结果表明 $\{\nabla W_i\}$ 是平稳序列,简单记作 $\{x_i\}$ 。

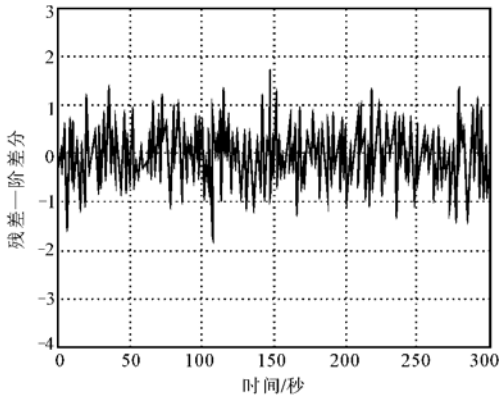


图 2 残差曲线一阶差分
Fig.2 Clock bias error first-diff curve

1.2 模型类型和阶数的判别

对于平稳时间序列,可根据自相关函数 ρ_k 和偏相关函数 ϕ_{kk} 的拖尾与截尾特性来确定模型的类别和阶数^[7]。 $\hat{\gamma}_k$ 表示自协方差函数, ρ_k 表示自相关函数,估计公式如下:

$$\begin{cases} \hat{\rho}_k = \frac{\hat{\gamma}_k}{\hat{\gamma}_0} & k = 0, 1, 2 \dots K (K < n) \\ \hat{\gamma}_k = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n-k} x_j x_{j+k} & k = 0, 1, 2 \dots K (K < n) \end{cases} \quad (1)$$

偏相关函数 ϕ_{kk} 可按式(2)估算,

$$\begin{pmatrix} \hat{\phi}_{k1} \\ \hat{\phi}_{k2} \\ \vdots \\ \hat{\phi}_{kk} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \hat{\rho}_1 & \hat{\rho}_2 & \dots & \hat{\rho}_{k-1} \\ \hat{\rho}_1 & 1 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \hat{\rho}_1 \\ \hat{\rho}_{k-1} & \dots & \hat{\rho}_2 & \hat{\rho}_2 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \hat{\rho}_1 \\ \hat{\rho}_2 \\ \vdots \\ \hat{\rho}_k \end{pmatrix} \quad (2)$$

残差的一阶差分序列 $\{x_i\}$ 的自相关函数和偏

相关函数如下图 3 和 4 所示。

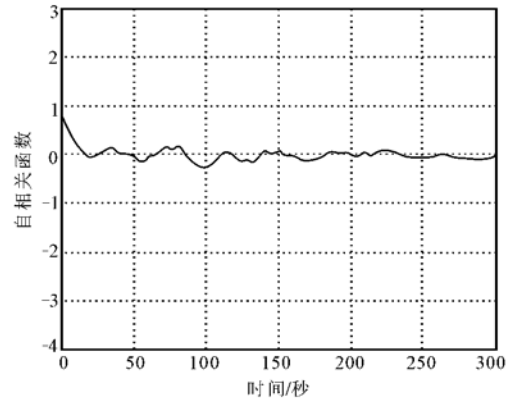


图 3 自相关函数

Fig.3 Error auto correlation

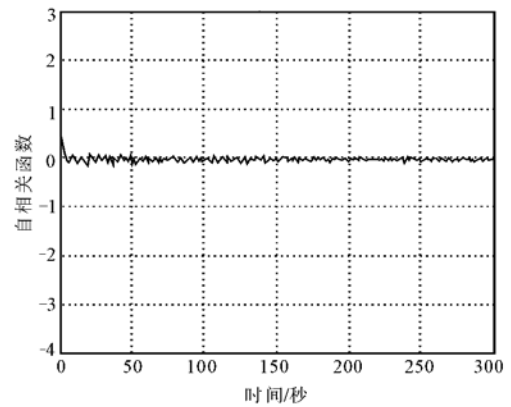


图 4 偏相关函数

Fig.4 Error partial correlation

根据图 3 和图 4,利用时间序列分析理论中自相关函数拖尾和截尾的判断方法,可知 $\{x_i\}$ 的自相关函数拖尾,偏相关函数截尾。进一步根据判断准则,可知钟差的残差一阶差分序列可拟合成 AR(3) 模型。

1.3 CWUC 算法流程

根据上节的分析可知,钟差残差的一阶差分序列可拟合成 AR(3) 模型,根据时间序列分析理论对钟差进行预测。在建立 AR 模型时,通常采用最小二乘法、U-C 算法或 Burg 算法对模型中的参数进行估计,其中 U-C 算法是目前估计精度最高的方法。

根据 U-C 算法建立钟差预测模型时,由于在预测过程中其参数固定不变,导致预测误差随时间逐渐变大。本文在 U-C 算法的基础上引入了“滑动窗”的思想,提出了 CWUC 钟差预测模型;对现有的钟差数据设置一定的长度,同时把最新解算出的

钟差数据引入预测模型,并剔除“最旧数据”,然后重新估计模型参数,这样就建立了参数实时更新的钟差预测模型。CWUC 模型的具体算法是:

- (1) 设定滑动窗的长度 $Length$;
- (2) 初始化 $Length$ 个钟差解算值: $Clock(1)$ 、 $Clock(2)$, ..., $Clock(Length)$;
- (3) 模型参数估计:对上述钟差残差的一阶差分序列建立 $AR(3)$ 模型,采用 U-C 算法对模型中的参数进行估计;
- (4) 接收机钟差预测:根据估计出的模型参数预测第 $Length + 1$ 时刻的钟差 T ,利用 T 进行辅助完好性监测;
- (5) 模型更新:根据第 $Length + 1$ 时刻解算出的钟差 B 对钟差序列进行更新,步骤如下:

$$\begin{cases} Clock(1) = Clock(2) \\ Clock(2) = Clock(3) \\ \dots\dots \\ Clock(Length - 1) = Clock(Length) \\ Clock(Length) = B \end{cases}$$

(6) 重复步骤(2)~(5),实现参数实时更新的接收机钟差预测模型。

1.4 模型的误差分析

CWUC 模型的预测误差包括:(1)钟差的预测值与解算值的误差 $\sigma_{predict}$;(2)钟差的解算值与真实值的误差 σ_{clock} 。综合考虑以上两个方面,模型预测误差的均方根 σ_b 可以用下式来计算:

$$\sigma_b^2 = \sigma_{clock}^2 + \sigma_{predict}^2 \quad (3)$$

上式中, $\sigma_{clock} = \sigma \cdot TDOP$, 其中 σ 表示伪距测量误差均方根, $TDOP$ 是时间几何精度因子; $\sigma_{predict}$ 可根据 AR 模型的误差计算方法得到。

2 CWUC 模型辅助 RAIM 算法

钟差辅助 RAIM 算法主要包括扩展观测方程、故障检测、故障识别等部分。

2.1 扩展观测方程

以 GPS 为例,线性化之后的系统观测方程可表示如下:

$$y = GX + \epsilon \quad (4)$$

上式中 G 表示几何观测矩阵; y 表示伪距差向量; $X = [\delta_x \ \delta_y \ \delta_z \ b]$ 表示接收机的位置残差和钟差; ϵ 表示伪距测量等效误差,用 σ 表示伪距测

量误差均方根。

当引入钟差辅助 RAIM 时,可将下式(5)扩充到(4)中:

$$T = [0 \ 0 \ 0 \ 1][\delta_x \ \delta_y \ \delta_z \ b]' + \epsilon_{clock} \quad (5)$$

在(5)中, T 表示钟差的预测值, ϵ_{clock} 表示钟差的预测误差。在应用最小二乘法进行自主完好性监测时,要求所有的误差相互独立同分布,因此对(5)做如下变换:

$$\frac{\sigma \cdot T}{\sigma_b} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{\sigma}{\sigma_b} \end{bmatrix} [\delta_x \ \delta_y \ \delta_z \ b]' + \frac{\sigma \cdot \epsilon_{clock}}{\sigma_b} \quad (6)$$

将式(6)扩充到(4)中,得到改进的线性化观测方程如下:

$$\begin{bmatrix} y \\ \frac{\sigma \cdot T}{\sigma_b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G \\ 0 \ 0 \ 0 \ \frac{\sigma}{\sigma_b} \end{bmatrix} [\delta_x \ \delta_y \ \delta_z \ b]' + \begin{bmatrix} \epsilon \\ \frac{\sigma \cdot \epsilon_{clock}}{\sigma_b} \end{bmatrix} \quad (7)$$

将式(7)整理得到式(8):

$$y' = G'X + \epsilon' \quad (8)$$

2.2 故障检测

根据已经扩展的线性化观测方程(8),得到向量 X 的最小二乘解为:

$$\hat{X}_{LS} = ((G')^T G')^{-1} (G')^T y' \quad (9)$$

估计残差向量 ω 可表示为:

$$\begin{aligned} \omega &= y' - G' \hat{X}_{LS} \\ &= [I - G'((G')^T G')^{-1} (G')^T] y' \\ &= S y' \end{aligned} \quad (10)$$

定义 $SSE = \omega^T \omega$, 它表示各个卫星伪距残差的平方和,服从自由度为 $N - 3$ 的 χ^2 分布, N 代表卫星数。在实际应用中,通常采用 $T_X = \sqrt{\frac{SSE}{N - 3}}$ 作为检验统计量。在每次故障检测时,将 T_X 与监测门限 T_D 进行比较:如果 $T_X \geq T_D$, 则故障卫星存在;否则无故障卫星。在故障检测阶段,重点是检测门限 T_D 的确定。确定检测门限 T_D 的算法如下:

- (1) 根据卫星数 N 得到自由度为 $N - 3$ 的 χ^2 分布的概率密度函数 $f(x)$;
- (2) 根据 $f(x)$ 和给定的误警率 P_{FA} 计算积分

上限 a 的值,其中 a 满足条件

$$\int_0^a f(x) dx = 1 - P_{FA} \quad (11)$$

(3) 检测门限 T_D 根据下式链确定:

$$T_D = \sqrt{\frac{a \cdot \sigma^2}{(N-3)}} \quad (12)$$

2.3 故障识别

当故障卫星存在时,根据极大似然估计法找出故障卫星。定义检验统计量

$$d(i) = \frac{\omega(i)}{S_{ii}} \quad (13)$$

如果某一颗卫星的统计检测测量值达到最大,则判断此星是故障卫星。

根据上述分析可知:本文提出的 CWUC 模型在仅有 4 颗卫星可以自主完好性监测,仅需要 5 颗卫星就可成功识别故障源,可以有效降低 RAIM 算法对卫星数目的依赖,提高算法可用性。同时,引入 CWUC 模型,对观测矩阵进行扩充,相当于增加了一颗可见星,降低了几何精度因子^[9-10],提高了定位精度。

3 仿真分析

为了验证 CWUC 模型在钟差预测方面的准确性和辅助 RAIM 算法的有效性,利用某高精度 OEM 板输出的广播星历和实测数据来分析改进模型的性能。在 GPS 取消 SA 措施之后,伪距测量噪声均方根 $\sigma = 6m$ ^[9]。以下仿真分析都基于这些数据。

3.1 与其它钟差预测模型比较

下图 5 给出了分别采用多项式模型、文献[2]的模型、CWUC 模型预测钟差的变化曲线。分别采用一段观测时间的数据来预测后面十个历元的钟差。下表 1 为上述三种情况下预测残差的统计数据。

从图 5 的曲线可以看出,CWUC 模型相对于另外两种模型都有较大的改进。CWUC 模型预测的钟差值与解算出的钟差趋势相同,预测残差的方差最小,预测精度较高。表 1 为钟差预测的统计数据。

表 1 钟差预测统计数据

Table 1 Statistical data of forecasting error

残差	多项式	文献[2]	CWUC
max	2.5300	2.3247	0.4295
min	-0.640	-0.939	-0.637
均方根	1.3499	1.2699	0.1129

这种预测精度的提高可以增强钟差辅助 RAIM 算

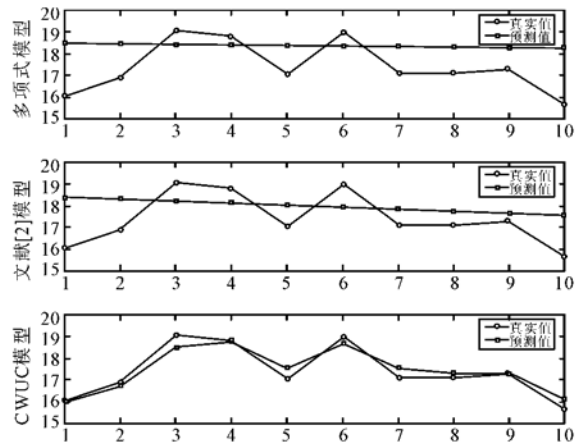


图 5 钟差预测模型原理图

Fig.5 An overview of the clock bias model

法中故障卫星检测和识别的正确率,如下面的分析。

3.2 CWUC 模型对钟差辅助 RAIM 算法性能的影响

为了验证本文 CWUC 模型在辅助 RAIM 算法的有效性,我们在某颗观测卫星的伪距加上故障偏差作为故障卫星。偏差值从 0m 递增到 100m,步长为 1m。下图 6 表示分别采用多项式模型、文献[2]的模型、CWUC 模型辅助下 RAIM 算法的故障检测率。

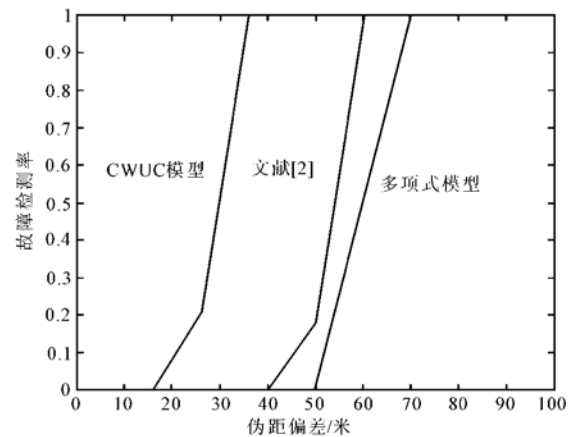


图 6 故障检测率

Fig.6 Rate of fault detection

从上图可以看出,当故障偏差超过 16m 时可以被检测到。而文献[2]的模型则需要 40m,采用多项式模型需要 50m。通过以上的分析可以看出与传统模型相比,CWUC 模型可以有效提高辅助完好性监测的性能。

4 结论

针对多项式方法预测钟差的不足,本文首先根据时间序列分析理论证明了接收机钟差残差的一阶

差分序列是平稳过程,提出了基于“滑动窗”结合 U-C 算法的参数实时更新的接收机钟差预测改进模型,该模型反映了钟差预测的准确性。同时,针对改进模型将钟差引入到观测方程可以辅助进行自主完好性监测,仿真结果反映了这种辅助方式的优越性以及改进模型相对于以往模型的优势所在。

参考文献:

- [1] Elliott D, Kaplan(著), 邱致和等(译). GPS 原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2002:195 - 204. [Elliott D, Kaplan (original author), QIU Zhi-he(translator). Understanding GPS Principles and Application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,2002:195 - 204.]
- [2] 王永超,黄智刚. 时钟改进模型辅助 RAIM 算法研究[J]. 电子学报, 2001, 35(6):1084 - 1088. [WANG Yong-chao, HUANG Zhi-zhang. Research on receiver autonomous integrity monitoring augmented with improved clock bias model[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 35(6):1084 - 1088(in Chinese).]
- [3] Brown A. Baseline GPS RAIM: Scheme and a note on the equivalence of three RAIM methods[J]. Journal of The Institute of Navigation, 1992, 39(3):301 - 316.
- [4] Young C LEE. RAIM availability for GPS augmented with barometric altimeter aiding and clock coasting[J]. Journal of the Institute of Navigation, 1993, 40(2):179 - 198.
- [5] 黄继勋,周丽弦,范跃祖. 时钟偏差辅助的 GPS 完整性监测算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(12):161 - 163. [HUANG Ji-xun, ZHOU Li-xian, FAN Yue-zu. General RAIM algorithm based on aiding of receiver clock bias[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001, 27(12):161 - 163 (in Chinese).]
- [6] 张守信. GPS 技术与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2004. 126 - 156. [ZHANG Shou-xin. GPS Technology and Application [M]. Beijing: Defence Industry Press, 2004: 126 - 156.]
- [7] 杨叔子,吴雅. 时间序列分析的工程应用[M]. 西安:西安交通大学出版社,1991:25 - 128. [YANG Shu-zi, Wu Ya. Engineering Application of Time Series Analysis[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1991:25 - 128.]
- [8] PrataP Misra, Per Enge. Global Positioning System Signals, Measurements and Performance[M]. USA: Ganga-Jamuna Press, 2001: 235 - 268.
- [9] Misra P N(著), 张卫东(译). 时钟在 GPS 接收机中的作用[J]. 飞行器测控技术, 1996, 3: 61 - 66. [Misra P N(original author), ZHANG Wei-dong(translator). Application of clock in GPS receiver[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 1996, 3: 61 - 66(in Chinese).]
- [10] 刘立龙,刘基余,韦其宁. 一种 GPS 快速定位技术研究[J]. 宇航学报,2005,26(1): 39 - 42. [LIU Li-long, LIU Ji-yu, WEI Qi-ning. The researchon GPS quickly positioning techniqu[J]. Journal of Astronauti, 2005, 26(1): 39 - 42.]

作者简介:陈小平(1975 -),男,现为电子科技大学自动化工程博士研究生,主要研究方向为卫星定位导航,飞行器可靠性智能控制等领域。
通讯地址:电子科技大学电科院(610054)
电话:13981971182
E-mail: xpchen@uestc.edu.cn

Research on Receiver Autonomous Integrity Monitoring Augmented with Clock Bias Model

CHEN Xiao-ping, TENG Yun-long, XU Hong-bing

(Research Institute of Electronic Science and Technology University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: In this paper, we prove theoretically that the first difference series of clock bias error are steady and introduce an improved receiver clock bias forecast model. This model based on “coasting window” and U-C algorithm, holds the real-time refresh parameters. This model is used to augment RAIM performance and a new algorithm for forecasting error is introduced. The simulation results prove that this method not only is effective in improving the forecasting accuracy, but improves the rates of fault detection and identification. The minimum fault that can be detected is 16 meters. The experimental results of this algorithm used in a certain type of receiver indicate that it is useful and effective.

Key words: Time series analysis; Steady process; Clock bias model; RAIM; Coasting window