

时钟改进模型辅助 RAIM 算法研究

王永超, 黄智刚

(北京航空航天大学电子信息工程学院无线电导航教研室, 北京 100083)

摘 要: 提出采用/滑动窗0方式建立参数实时更新的接收机钟差改进模型,把基于该模型的钟差预测值引入到卫星导航中辅助进行自主完好性监测(RAIM).文中给出了相关流程图,并提出新的预测误差计算方法.基于GPS实测数据的验证分析表明,这种方法不仅可以提高RAIM算法的可用性,而且可以提高故障检测和识别效率,可检测的最小故障偏差从50米降到40米,可完全检测和识别的最小故障偏差从70米降到60米,并且系统的其它性能指标也有明显改善.

关键词: 完好性; RAIM; 钟差模型; 滑动窗

中图分类号: TN96 **文献标识码:** A **文章编号:** 03722112 (2007) 06108405

Research on Receiver Autonomous Integrity Monitoring Augmented with Improved Clock Bias Model

WANG Yongchao, HUANG Zhigang

(Radio Navigation Lab, School of Electronic and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The paper presents an improved receiver clock bias forecast model. The model built with /coasting window0 method, holds the realtime refresh parameters. The extrapolated future clock bias is used to augment RAIM performance. Relevant flow charts and a new algorithm for forecasting error are introduced. The data analysis proves that this method not only increases availability of RAIM, but improves the rates of fault detection and identification. The minimum fault that can be detected decreases from 50 meters to 40 meters; and the minimum fault that can be detected and identified completely dropped from 70 meters to 60 meters.

Key words: integrity; RAIM; clock bias model; coasting window

1 引言

卫星导航系统完好性是指/系统在不能用于导航服务时,及时向用户提供告警的能力^[1].当系统不具备这种能力时,会导致导航服务可靠性下降,严重时会发生重大安全事故.

目前有两种途径解决GPS完好性问题,一种是外部增强方式,如DGPS(差分GPS)和GIC(完好性通道)等;一种是内部自主监测方式,如RAIM(接收机自主完好性监测)和辅助RAIM(接收机辅助完好性监测).外部方式投资大,要求配套设施多,其作用范围会受布站及工作方式限制.内部自主监测方式无需外部配套设施,投资小,应用方便灵活;但RAIM方法受卫星数目和几何分布的影响,在部分时空点存在/RAIM空洞0.因此一般采用INS、气压高度表或接收机钟差预测模型等方法来辅助.而钟差模型辅助不需要接收机外部信息,其经济性和方便性显而易见,但如何提高模型预测精度以增

强辅助效果一直是国内外研究的重点和难点.

文献[2]分析了把接收机时钟预测钟差引入到RAIM算法中的可行性,并建立了二项式钟差预测模型,文献[3]和[4]分别从不同角度模拟研究了采用这种模型辅助下的RAIM可用性.但到目前为止,还未见有关于预测钟差辅助下故障检测和识别性能的研究文献.本文研究如何采用多项式拟合来建立参数实时更新的接收机时钟偏差改进模型,并提出新的预测钟差均方根计算方法;另外还就时钟改进模型辅助对RAIM算法性能的改善进行了分析,基于实测数据的验证表明了这种辅助方式的优异性能以及改进模型相对于原模型的优势所在.

2 卫星导航 RAIM 算法分析

2.1 基于最小二乘残差的故障星检测和识别原理

以GPS为例,线性化后的GPS观测方程表示如下:

$$Z = GX_u + E \quad (1)$$

式中: Z 为 $n \times 1$ 维向量, 它表示了实测伪距与估计值之差; G 为 $n \times 4$ 维观测几何矩阵, n 是观测方程的个数; X_u 是 4×1 维待估用户状态矢量, 包括 3 个位置分量和接收机时钟偏差; E 为 $n \times 1$ 维观测噪声矢量;

G 表示如下:

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} & -1 \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} & -1 \\ s & s & s & s \\ g_{n1} & g_{n2} & g_{n3} & -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

X_u 是 4×1 维待估用户状态矢量, 包括 3 个位置分量和接收机时钟偏差, 表示如下:

$$X_u = [x \quad y \quad z \quad \delta t]^T \quad (3)$$

E 为 $n \times 1$ 维观测噪声矢量

根据最小二乘法, X_u 的最小估值为:

$$\hat{X}_u = (G^T G)^{-1} G^T Z \quad (4)$$

伪距估计残差可以表示为:

$$X = [I_n - G(G^T G)^{-1} G^T] Z \quad (5)$$

定义统计检测量:

$$SSE = X^T X \quad (6)$$

在无故障星和有故障星存在时, SSE 呈现出不同的统计特性, 所以可以作为检测当前观测量中是否存在故障的依据。

根据虚警率和漏检率要求以及可见星的数目, 可以预先计算得到检测门限。比较当前 SSE 和相应的门限, 如果 SSE 小于门限, 我们认为没有故障存在, 否则认为有故障存在。检测到故障存在可以通过子集比较法来识别故障, 具体如下: 子集比较法是从当前的 n 颗卫星中依次剔除一颗卫星, 计算余下 $(n-1)$ 颗卫星构成的子集统计检测量, 因为共有 n 个这样的子集, 所以有 n 个故障统计检测量, 该算法认为统计检测量最小的子集所剔除的那颗卫星最有可能是故障源。

2.1.2 RAIM 算法可用性判断方法

在某些时空点, 卫星的数目少于 5 颗时, 没有足够的冗余信息进行故障检测; 或者卫星几何分布会影响完好性监测的有效性, 结果是 RAIM 算法不能同时满足虚警率和漏检率要求, 我们都称之为 RAIM 算法不可用。对于后者我们采用 DI_{max} 算法^[5] 来判断 RAIM 算法的可用性:

$$DI_{max} = \max_i \sqrt{HDOP^2(i) - HDOP^2} \quad (7)$$

式中 $HDOP$ 是全部可见星对应的 $HDOP$ 值, $HDOP(i)$ 是去掉第 i 颗星后余下可见星对应的 $HDOP$ 。根据不同导航阶段的定位要求和卫星数目, 可以预先计算得到满足漏检率的 DI_{max} 允许值。当 DI_{max} 小于相应允许值时认为 RAIM 可用, 否则认为不可用。

3 钟差改进模型的提出

3.1 建立钟差模型的基本方法

实验数据和飞行试验表明可以用二项式模型来拟合时钟偏差变化^[7]。文献[2, 4, 7]介绍了最小二乘估计方法来建立钟差二项式拟合模型的基本方法:

如果在 $t_0 \sim t$ 时间段内, GPS 工作正常, 接收机时钟的频率漂移稳定, 那么可以用这段时间内的时钟偏差变化来建立时钟偏差模型

$$b(t) = b_2(t - t_0)^2 + b_1(t - t_0) + b_0 \quad (8)$$

其中 b_0, b_1, b_2 可以根据这段时间内时钟偏差解算值, 用最小二乘估计的方法得到。由于时钟在一定时间内是稳定的, 我们可以基于该拟合模型预测一段时间内钟差变化。预测误差均方根为^[2, 4, 7]:

$$R_b = \frac{R_{clock}}{\sqrt{m-3}} \quad (9)$$

式中 m 为所有采样数据中统计上独立的抽样点个数; R_{clock} 为接收机钟差解算值的误差均方根:

$$R_{clock} = R \# TDOP \quad (10)$$

其中 R 为伪距测量误差均方根, $TDOP$ 为时间精度几何因子。

3.1.2 建立时钟改进模型

对于足够稳定的时钟(频偏小于 10^{-6}) 来说^[2], 2.1.1 中建立的钟差模型可以用来预测一段时间内的钟差(如 15 分钟^[2]), 但是由于在预测过程中其参数是固定的, 所以随着时间增长预测误差会逐渐变大。在本文中, 我们提出采用/滑动窗口的方式改进现有钟差模型, 即对拟合所用采样数据集设置一定长度, 同时把最新/健康0采样数据引入拟合模型, 并剔除/最旧数据0, 然后重新估计模型参数再用于预测, 这样就建立了参数实时更新的钟差模型。其原理如图 1。

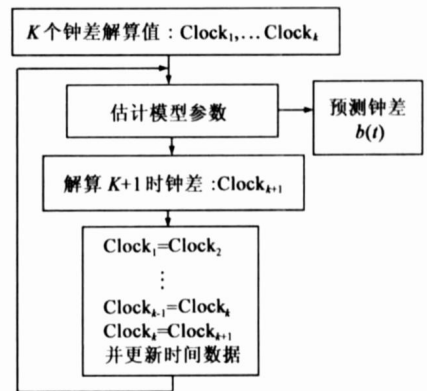


图 1 时钟改进模型参数更新原理

另外拟合预测模型的输入数据为钟差解算值, 利用该模型预测的是将来钟差解算值, 那么预测钟差和实际钟差之间的误差(R_b) 应由两部分组成:

¹ 实际钟差解算值与真实钟差间误差(R_{clock})

^o 模型预测值与实际钟差解算值间误差(R_{pre})

式(9)、(10)中预测误差均方根计算只与独立采样点数目(m)、测量噪声(R)及当前TDOP有关系. 那么当和m固定, 这种方法计算得到的均方根误差只与TDOP有关, 当误差^o事实上有变化时并不能在式(2)的结果中表现出来. 综合考虑¹和^o, 可以用下式来计算:

$$R_b^2 = R_{clock}^2 + R_{pre}^2 \quad (11)$$

R_{pre} 可以在二项式拟合外推中实时计算得到.

4 改进钟差模型辅助 RAIM 算法及特点分析

将由钟差改进模型得到的预测钟差扩充到式(1)中后, 重新表示式(1)为:

$$\begin{bmatrix} Z \\ Kb(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G \\ 0 \ 0 \ 0 \ K \end{bmatrix} X_u + \begin{bmatrix} E \\ Kb_b \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中K为GPS伪距测量误差和钟差预测误差的归一化参数:

$$K = -R/R_b \quad (13)$$

E_b 是以 R_b 为均方根的钟差预测误差.

以式(12)为基础应用RAIM算法即可实现钟差模型辅助的自主完好性监测. 为了尽量避免把预测误差代入到后面的拟合模型中, 式(12)仅应用于故障检测和识别; 检测并剔除故障星后, 用余下观测伪距解算/最新0钟差, 以更新时钟模型. 整个处理流程如图2.

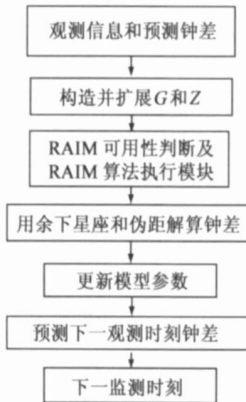


图2 辅助RAIM流程

改进钟差模型辅助的RAIM算法可以实现在仅有4颗可见星时进行自主完好性监测, 5颗时识别故障源. 不同的是改进模型对解算钟差预测精度更高, 预测误差的计算方法更合理, 用来辅助RAIM时可以得到更好的故障检测率和识别率.

钟差改进模型辅助RAIM算法和原来模型辅助时一样可降低单独RAIM算法对卫星数目的依赖, 使可见星仅为4颗时即有可能实现完好性自主监测, 仅有5颗时就可能成功识别故障源, 扩展RAIM算法应用环境. 另外引入预测钟差, 扩充观测矩阵后, 相当于增加一颗

可见星, 降低DOP值^[7], 改善整体几何分布性能, 从另一个角度提高了可用性. 另外在同样的故障环境下, 应用改进模型辅助比原模型的故障检测率和识别率更高.

不过这种方法要求接收机时钟频率有足够稳定性, 以保证时钟偏差是可预测的^[2]. 文献[2]研究表明目前各类时钟晶振中, 温补型(TCXO)稳定性较差, 回归曲线不规则, 起伏大不适合应用预测模型, 在应用中要加以注意.

5 数据验证结果分析

IGS(International GPS Service, 国际GPS服务)分布全球的部分GPS观测站可以提供卫星广播星历数据和观测历元间隔为1s的GPS实测数据. 本文利用位于美国加州的Wide Canyon观测站提供的共1小时的GPS实测数据和卫星广播星历来分析改进模型的性能. 考虑到GPS已取消SA措施, 文献[9]认为伪距测量噪声均方根R应为6m. 以下分析如没有特别说明都是基于这些数据.

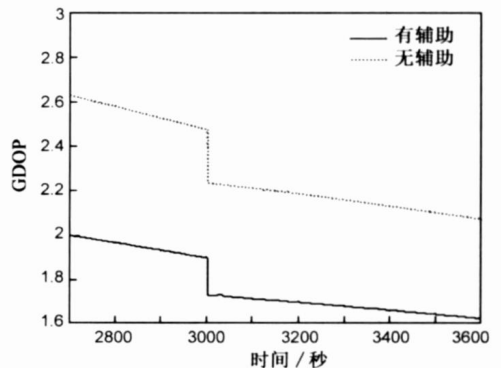


图3 GDOP值比较

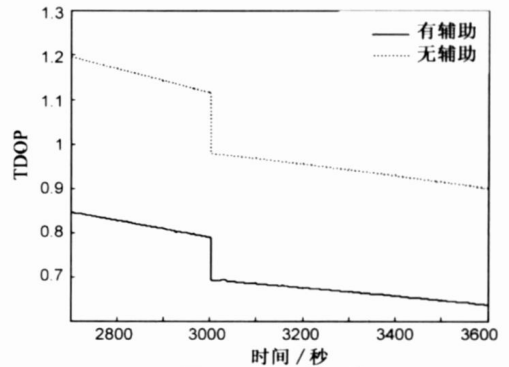


图4 TDOP值比较

5.1 引入预测钟差对DOP值的影响

我们比较分析了第2701秒~3600秒共900秒内GDOP和TDOP数据. 图3, 图4所示曲线表明引入预测钟差辅助RAIM时, GDOP和TDOP值有明显降低. 表1和2统计数据也说明有辅助时, GDOP和TDOP要优于

无辅助.

表 1 GDOP 统计分析

| GDOP | 无辅助 | 有辅助 |
|------|------|------|
| max | 2.63 | 2.00 |
| min | 2.07 | 1.62 |
| 均值 | 2.29 | 1.77 |
| 均方根 | 0.19 | 0.13 |

表 2 TDOP 统计分析

| TDOP | 无辅助 | 有辅助 |
|------|------|------|
| max | 1.20 | 0.85 |
| min | 0.90 | 0.64 |
| 均值 | 1.01 | 0.72 |
| 均方根 | 0.10 | 0.07 |

512 引入预测钟差对 RAIM 可用性的影响

我们分析了 6 小时的数据发现, 钟差辅助时作为评价 RAIM 可用性的一个依据, DI_{max} 确实有所降低. 表 3 统计数据也证明了这一点. 同时表 3 还分析了非精密进近阶段 RAIM 可用率变化, 可见引入预测钟差辅助后 RAIM 算法可用率提高到了 100%.

表 3 DI_{max} 分析

| DI_{max} | 无辅助 | 有辅助 |
|------------|-------|------|
| max | 88.0 | 69.9 |
| min | 0.6 | 0.5 |
| 均值 | 2.2 | 1.4 |
| 均方根 | 5.9 | 3.6 |
| 可用率 | 99.9% | 100% |

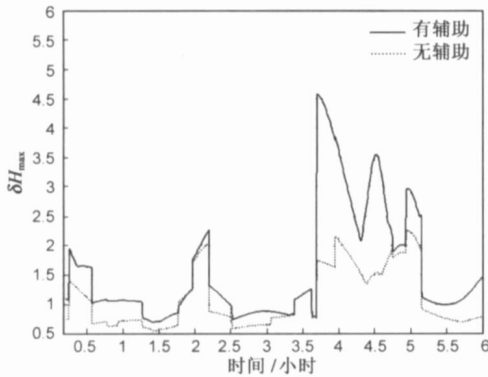


图 5 可用性评价参数

513 改进前后模型预测的准确性

图 6 分别给出了第 2701 秒~ 3600 秒, 900 秒内解算钟差、原模型预测钟差和改进模型预测钟差的变化曲线.

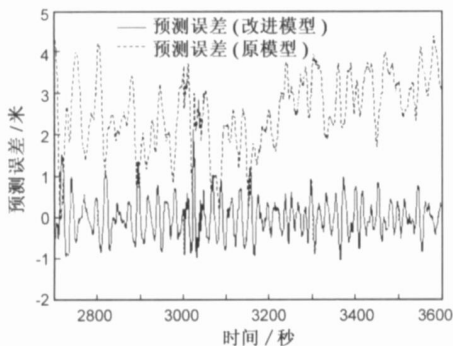


图 6 两种模型的预测误差

用原模型 900s(15min) 内对解算钟差的预测误差在 0101m~ 4142m, 均值为 2152m, 均方差为 0188m; 而改进模型对解算钟差的预测误差在 - 2110m~ 0198m 间变化, 均值为 0100m, 均方差为 0147m. 可见改进模型的预测精度要明显高于原模型, 这种精度上的提高可以增

强钟差辅助 RAIM 算法中故障检测和识别的正确率, 如下面的分析.

514 改进模型对钟差辅助 RAIM 算法性能的影响

为验证改进后钟差辅助 RAIM 算法的性能, 我们在某颗可见星对应实测伪距加上故障偏差作为故障源. 偏差值从 0m 递增到 300m, 步长为 10m.

图 7 和 8 分别比较改进前后钟差模型辅助下的故障检测率和识别率, 虚线表示用原模型辅助, 实线表示用改进模型辅助. 原模型辅助时, 当故障偏差大于等于 50m 时可以被检测到, 大于等于 70m 时可以完全检测到, 并成功识别故障源; 而改进模型这两项值分别为 40m 和 60m, 都降低了 10m. 另外同样大小的故障偏差, 改进模型的检测率和识别率要高于原模型, 比如故障偏差为 60m 时, 前者的检测率为 100%, 后者为 54%. 通过以上的分析可以看出和原模型相比, 改进模型可以大大提高辅助完好性监测的性能.

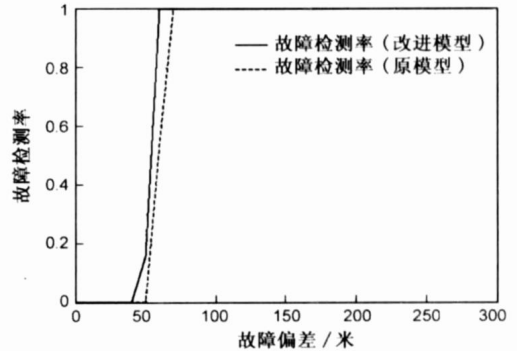


图 7 故障检测率

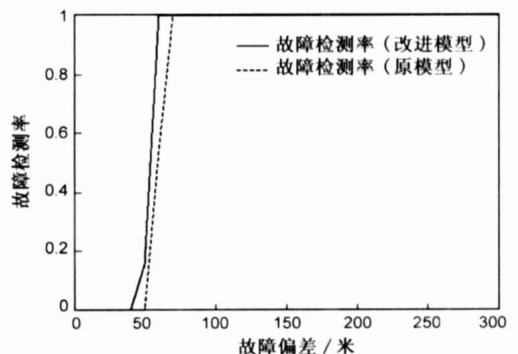


图 8 故障识别率

6 结论

对于足够稳定的接收机时钟^[2], 采用/ 滑动窗 0 的方式, 可以基于健康钟差解算值建立参数实时更新的时钟改进模型. 并且提出新的预测误差均方根计算方法, 该方法反映了预测模型的准确性. 把用该模型预测的钟差引入 GPS 观测方程可以辅助进行自主完好性监测. 基于 IGS 观测站的 GPS 实测数据验证分析表明辅助 RAIM 在算法可用性、DOP 值上都有明显改善. 并且在

改进模型辅助下, 故障检测率和识别率都要优于原模型辅助.

参考文献:

- [1] 袁建平, 方群, 郑谔. GPS 在飞行器定位导航中的应用 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2000. 288- 291.
YUAN Jianping, FANG Qun, ZHENG E. Application of GPS in Aircraft Positioning and Navigation [M]. Xi'an: Press of Northwest Polytechnical University, 2000. 288 - 291. (in Chinese)
- [2] P Misra, M Pratt, R Muclnik, B Manganis. A general RAIM algorithm based on receiver clock [J]. Proceeding of ION GPS Proceedings of the 1995 8th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 1995. 1941- 1947.
- [3] Young C LEE. RAIM availability for GPS augmented with barometric altimeter aiding and clock coasting [J]. Journal of the Institute of Navigation, 40(2), 1993: 179- 198.
- [4] 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 Jixun, ZHOU Lixian, FAN Yuezu. 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)
- [5] Brown R G. 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.
- [6] 廖向前, 黄顺吉. 奇偶矢量法用于 GPS 的故障检测与隔离 [J]. 电子科技大学学报, 1997, 26(3): 262- 266.
Liao Xianqian, Huang Shunji. GPS FDI with parity method [J]. Journal of UEST of China, 1997, 26(3): 262- 266. (in Chinese)

- [7] P N Misra (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.
P N Misra (original author), ZHANG Weidong (translator). Application of clock in GPS receiver [J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 1996, 3: 61- 66. (in Chinese)
- [8] 常青, 柳重堪, 张其善. GPS 的几何精度因子和定位解的递推算法 [J]. 通信学报, 1998, 19(12): 83- 88.
Chang Qing, Liu Zhongkan, Zhang Qishan. The recurrence algorithm for GDOP and positioning solution in GPS [J]. Journal of China Institute of Communications, 1998, 19(12): 83- 88. (in Chinese)
- [9] Pratap Misra, Per Enge. Global Positioning System Signals, Measurements, and Performance [M]. USA: Gangajamuna Press, 2001. 153- 155.

作者简介:



王永超 男, 1979 年 11 月出生于河北邢台, 2006 年获北京航空航天大学通信与信息系统硕士学位, 主要研究领域包括导航系统完好性监测、组合导航、星基导航增强系统和精密定位、伽利略中轨道搜救系统等, 目前正参与国内伽利略搜救系统 MEOLUT 地面站建设和前向链路端到端验证工作. E-mail: yongchaobuaa@163.com



黄智刚 男, 1962 年出生于河北邢台, 北京航空航天大学教授、博士生导师. 主要从事卫星导航、无线电导航、自动测试与控制、航空电子等方面的教学和科研工作. E-mail: baahzg@163.com