

矢量GNSS接收机自主完好性监控性能研究

邹晓军* 廉保旺

(西北工业大学电子信息学院 西安 710072)

摘要: 在分析了矢量跟踪环路和标量跟踪环路故障检测方面差异的基础上, 该文指出全球导航卫星系统(GNSS)矢量接收机自主完好性监控(RAIM)技术所存在的问题, 即RAIM检测量受噪声影响导致检测故障不准确, 和故障信息在环路中的传播使得难以准确识别出故障源。针对上述问题, 对矢量接收机的结构进行了改进, 提出基于预滤波器的双环路跟踪结构。在新结构中, 通过基于容积卡尔曼滤波算法的预滤波器削弱噪声的影响, 并通过双环路切换的方法阻止故障信息的传播。仿真实验结果表明, 改进后的矢量接收机不仅RAIM检测统计量的均值和方差都显著减小, 而且识别故障的准确率有了明显的提高, RAIM性能较原来得到了有效提升。

关键词: 全球导航卫星系统; 矢量跟踪环路; 接收机自主完好性监控; 容积卡尔曼滤波

中图分类号: TN967

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)08-1966-08

DOI: 10.11999/JEIT180948

Research on Autonomous Integrity Monitoring Performance of Vector GNSS Receiver

ZOU Xiaojun LIAN Baowang

(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Based on the analysis on the difference between vector tracking loop and scalar tracking loop on fault detection, it is pointed out that in vector receiver of Global Navigation Satellite System (GNSS), the detection statistic of Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM) algorithm is inaccurate because of the influence of noise, and the propagation of fault information in the loop makes it difficult to identify the fault source. To solve the problems, a double loop tracking structure based on pre-filter is proposed after modifying the structure of vector receiver. In the new receiver, the influence of noise is reduced by pre-filter based on cubature Kalman filtering algorithm, and the fault information is prevented from propagating to each other by switching the loop. Finally, the method is verified by simulation. Simulation results show that the improved vector receiver not only greatly reduces the mean and variance of RAIM detection statistics, but also improves the accuracy of fault identification. Thus, the performance of RAIM is significantly improved.

Key words: Global Navigation Satellite System (GNSS); Vector tracking loop; Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM); Cubature Kalman filter

1 引言

现代社会生活中, 位置信息有着重要作用, 人们对导航定位的需求越来越多, 对全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)接收机的性能要求也越来越高, 而传统的标量接收技术却逐渐难以满足这一趋势的要求。矢量跟踪^[1]技

术是近些年兴起的一项接收技术, 通过软件算法深入挖掘和充分利用不同卫星信号之间存在的相关信息, 提高跟踪卫星信号的能力。与传统标量跟踪方法相比, 矢量跟踪具有可以跟踪更微弱的卫星信号、桥接被瞬时遮挡的卫星信号以及忍受用户的高动态等优势^[2,3]。因此, 国际上普遍认为矢量跟踪技术将会是下一代GNSS接收机的关键技术之一。但是, 矢量跟踪技术也有一个严重的缺陷, 它的共享型结构会使某一接收通道的故障信息传播到其余通道, 进而影响整个接收机的正常工作。所以, 及时发现和隔离故障对基于该技术的矢量接收机来说是至关重要的。

收稿日期: 2018-10-12; 改回日期: 2019-02-16; 网络出版: 2019-02-26

*通信作者: 邹晓军 smallarmy168@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61803310)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61803310)

接收机自主完好性监控(Receiver Autonomous Integrity Monitoring, RAIM)技术是在接收机中对卫星信号的完好性进行监控, 及时检测和识别出故障卫星, 是GNSS接收机中不可或缺的重要组成部分。RAIM算法有很多种, 但绝大多数都是针对标量接收机所提出的, 目前针对矢量接收机RAIM相关的研究比较少。在矢量接收机故障检测相关的文献中, 文献[4]通过比较载噪比是否小于预设门限, 判断卫星信号是否丢失。文献[5]通过监控跟踪环路带宽的异常变化, 识别信号被遮挡的卫星。文献[6]采用标量卡尔曼滤波器的输出为每颗卫星构建检测量, 逐一判断卫星信号是否被遮挡。上述文献主要是针对卫星信号功率异常进行检测, 没有涉及RAIM性能相关的研究。文献[7]将RAIM应用到多频矢量相位跟踪环路中, 通过计算伪距残差的均方误差的加权和(Weighted Sum of the Squared Errors, WSSE)来检测多径, 提升了矢量接收机的鲁棒性, 但是没有给出关于RAIM检测能力的详细分析。文献[8]仍然采用的是计算WSSE的方法, 使用鉴别器的输出构建RAIM的统计检测量, 取得了和标量RAIM算法相当的检测性能。但是, 为了减少鉴别器输出的噪声, 该方法采用了长时间的平均运算, 降低了检测效率。文献[9]在文献[8]的基础上, 进一步验证了文献[8]方法在低信噪比情况下的性能表现。然而, 和文献[8]一样, 研究对象仅仅是故障检测, 仍然没有涉及故障识别相关的内容。上述文献没有考虑矢量接收机和标量接收机在故障诊断方面的差异, 以及差异所导致的问题, 对矢量接收机RAIM的性能及其影响因素缺少研究。

本文首先分析了矢量GNSS接收机特殊的共享型结构的特点, 以及该结构对故障检测带来的不利影响, 在此基础上, 指出在矢量跟踪环路中采用基于卡尔曼滤波的RAIM检测方法所具有的优点和面临的问题, 然后针对问题, 提出基于预滤波器的双环路跟踪结构来进行改进, 最后仿真验证了本文方法的改进效果。

$$\hat{f}_{i,ca} = f_{IF} - \frac{f_{sa}}{c} [(\dot{x}_i - \dot{x}) \alpha_{x,i} + (\dot{y}_i - \dot{y}) \alpha_{y,i} + (\dot{z}_i - \dot{z}) \alpha_{z,i} - t_d] \quad (4)$$

$$\hat{f}_{i,co} = f_{co} - \frac{f_{co}}{c} [(\dot{x}_i - \dot{x}) \alpha_{x,i} + (\dot{y}_i - \dot{y}) \alpha_{y,i} + (\dot{z}_i - \dot{z}) \alpha_{z,i} - t_d] \quad (5)$$

$$\hat{\varphi}_{i,k+1} = \hat{\varphi}_{i,k} + [(\delta x_i - \delta x) \alpha_{x,i} + (\delta y_i - \delta y) \alpha_{y,i} + (\delta z_i - \delta z) \alpha_{z,i} + \delta t_b] / c \quad (6)$$

式中, f_{sa} 为卫星信号频率, f_{IF} 为中频, f_{co} 为伪码的标准频率。 \dot{x}_i , \dot{y}_i 和 \dot{z}_i 分别为第*i*颗卫星3维方向上的速度, \dot{x} , \dot{y} 和 \dot{z} 分别为接收机3维方向上的速度。

2 矢量接收机的RAIM性能分析

2.1 两种环路的差异分析

在采用标量跟踪技术的传统GNSS接收机中, 每颗卫星信号的载波频率和码相位都由一个独立的接收通道进行跟踪锁定, 各接收通道之间没有任何关联。矢量跟踪环路与之明显的区别是各个接收通道间的数据都会汇聚到导航滤波器中, 由导航滤波器统一再为各个接收通道生成本地预测的载波频率和码相位, 实现信号跟踪。也就是说, 每个接收通道数控振荡器(Numerically Controlled Oscillator, NCO)的配置参数是导航滤波器在综合运用了所有通道信息后输出的结果, 各个通道的信息在导航滤波器中实现了共享。

导航滤波器基于扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)算法, 为了方便建立滤波器模型, 选取接收机状态的误差信息作为EKF的状态变量 $\Delta \mathbf{X}$, 定义为

$$\Delta \mathbf{X} = [\Delta x, \Delta \dot{x}, \Delta y, \Delta \dot{y}, \Delta z, \Delta \dot{z}, \Delta t_b, \Delta t_d]^T \quad (1)$$

其中, Δx , Δy 和 Δz 分别为ECEF坐标系下XYZ方向的位置误差, $\Delta \dot{x}$, $\Delta \dot{y}$ 和 $\Delta \dot{z}$ 分别为ECEF坐标系下XYZ方向的速度误差, Δt_b 和 Δt_d 分别为接收机时钟偏差误差和时钟漂移误差。

导航滤波器以伪距误差 $\Delta \rho_i$ 和伪距率误差 $\Delta \dot{\rho}_i$ 作为观测量, 所以, 观测量 $\mathbf{Z}_k^{N_v} = [\Delta \rho_1, \Delta \dot{\rho}_1, \dots, \Delta \rho_N, \Delta \dot{\rho}_N]^T$, N 为可见卫星的颗数。但是, 导航滤波器输入的数据是第*i*个接收通道的码相位误差 $\Delta \tau_i$ 和载波频率误差 Δf_i , 为此, 需要对 $\Delta \tau_i$ 和 Δf_i 进行转换, 如式(2)和式(3)所示。

$$\Delta \rho_i = \frac{c}{f_{i,co}} \Delta \tau_i \quad (2)$$

$$\Delta \dot{\rho}_i = -\frac{c}{f_{i,ca}} \Delta f_i \quad (3)$$

式中, $f_{i,co}$ 为伪码频率, $f_{i,ca}$ 为载波频率, c 为光速。

EKF采用递推迭代的方法对系统状态进行最优估计, 得到最小均方意义下的最优解。然后结合星历信息, 可对第*i*颗卫星信号的载波频率、码频率和码相位进行预测, 如式(4)—式(6)所示,

$[\delta x_i, \delta y_i, \delta z_i]$ 和 $[\delta x, \delta y, \delta z]$ 分别为第*i*颗卫星和接收机从第*k*时刻到第*k*+1时刻的位置变化量。 t_d 为接收机的时钟漂移, δt_b 为接收机从第*k*时刻到第*k*+1时

刻的时钟偏差变化量。 $[\alpha_{x,i}, \alpha_{y,i}, \alpha_{z,i}]$ 为接收机相对于第*i*颗卫星视线方向上的单位向量。

矢量跟踪环路将信号跟踪和导航解算融合在一起,二者相互影响。当观测量 $\mathbf{Z}_k^{N_v}$ 包含的数据有异常时,由EKF的计算过程可知,会影响到状态量 $\Delta\mathbf{X}$ 的估值,即导航解算的结果会出现错误。由于导航解算所有可见卫星共用的,根据式(4)–式(6),错误的导航解算结果会导致预测的所有卫星信号的载波频率、码频率和码相位都会产生偏差。于是,无论是哪颗卫星发生异常,其错误都会扩散到其它的接收通道,影响对应卫星信号的接收。进一步,这些错误的信息又会继续相互扩散,随着误差的不断积累,最终导致接收机对所有卫星信号失去锁定,并输出错误的定位结果。对标量接收机来说,导航解算的结果不会反馈到跟踪环路中,所以,错误的导航解算结果不会干扰到信号的跟踪。而且,标量接收机的各接收通道是相互独立的,不会有故障传播的问题。这些差异决定了矢量接收机和标量接收机在故障检测能力上会有较大的差距。

2.2 RAIM性能分析

RAIM是建立在统计学基础上一种检测算法,主要包括故障检测和故障识别两个部分。

2.2.1 故障检测

常用的RAIM检测方法大致可以分为两类:快照法和卡尔曼滤波法。卡尔曼滤波法是以卡尔曼滤波或其改进算法为基础,使用其新息构造检测统计量,对异常的伪距偏差进行识别。卡尔曼滤波法不仅在检测卫星故障时的整体性能^[10]要优于快照法,而且,由于导航滤波器是基于扩展卡尔曼滤波器的实现的,所以,在矢量跟踪环路中,使用基于卡尔曼滤波的RAIM算法会更加易于实现。

基于卡尔曼滤波的RAIM检测算法使用新息构造检测统计量^[11],其表达式为

$$r_k = \mathbf{V}_k^T \mathbf{A}_k^{-1} \mathbf{V}_k \quad (7)$$

式(7)中, \mathbf{V}_k 和 \mathbf{A}_k 分别是新息和新息对应的协方差矩阵,计算公式为

$$\mathbf{V}_k = \mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \Delta \mathbf{X}_{k|k-1} \quad (8)$$

$$\mathbf{A}_k = E[\mathbf{V}_k \mathbf{V}_k^T] = \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R} \quad (9)$$

式中, $\mathbf{P}_{k|k-1}$ 表示系统状态误差的协方差矩阵, \mathbf{R} 表示测量噪声的协方差矩阵, \mathbf{H}_k 为测量关系矩阵,其系数为接收机相对于卫星视线方向的单位向量。下标*k*表示第*k*个时刻。

由于RAIM算法只对伪距偏差进行监控,所以

$$\mathbf{Z}_k = [\Delta\rho_1, \Delta\rho_2, \dots, \Delta\rho_N]^T \quad (10)$$

$$\Delta \mathbf{X}_{k|k-1} = [\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta t_b]^T |_{k|k-1} \quad (11)$$

由于在矢量跟踪环路中,故障信息会影响到信号的跟踪锁定,而观测量 \mathbf{Z}_k 是由跟踪误差转化而来的,所以故障信息会反应在观测量 \mathbf{Z}_k 上。当没有故障发生时, \mathbf{Z}_k 和 $\mathbf{H}_k \Delta \mathbf{X}_{k|k-1}$ 都是零均值的高斯白噪声,所以新息 \mathbf{V}_k 应该也是零均值的高斯白噪声,于是, r_k 应该服从中心参数为零、自由度为*N*的 χ^2 分布,*N*为可见卫星的颗数, $N \geq 4$ 。当有故障发生时,新息 \mathbf{V}_k 的均值不再为零, r_k 服从自由度为*N*的非中心 χ^2 分布。由于可见卫星的总个数为*N*,所以即使所有可见卫星都出现故障, r_k 仍然可以用于检测。但是,对于文献[8]中的WSSE算法来说,自由度只有*N*–4,当故障卫星的个数大于此值时,该算法的检测结果将不再准确。

设定故障门限为 T_d ,则故障判定准则为

$$\left. \begin{aligned} H_0: r_k > T_d, \text{有故障} \\ H_1: r_k \leq T_d, \text{无故障} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

定义误警率 $P_{fa} = P[r_k > T_d | H_1]$,漏警率 $P_{md} = P[r_k \leq T_d | H_0]$,当给定误警率 P_{fa} 和自由度*N*时, T_d 的值可由 P_{fa} 和*N*确定。

由式(7)和式(8)可知,RAIM算法实际的监控对象是伪距差。对于标量跟踪环路来说,伪距差 $\Delta\rho_{stl,i}$ 是完成码同步后,根据传播时间测得伪距,然后与导航滤波器预测的伪距相减得到的,相当于导航滤波器的输出。而矢量跟踪环路的伪距差 $\Delta\rho_{vtl,i}$ 是通过码相位误差 $\Delta\tau_i$ 直接转换而来的,是导航滤波器的输入,会包含较多的噪声,致使检测量 r_k 会受到噪声的严重干扰,影响故障判断的准确性。

2.2.2 故障识别

检测到出现故障后,接下来,还需要进一步识别出故障卫星。正常情况下,新息 \mathbf{V}_k 是零均值的高斯白噪声,其协方差矩阵为 \mathbf{A}_k ,所以,构建检测统计量:

$$w_{i,k} = -\mathbf{e}_i^T \mathbf{V}_k / \sqrt{\mathbf{e}_i^T \mathbf{A}_k \mathbf{e}_i} \quad (13)$$

其中, $\mathbf{e}_i = [0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0]^T$,表示其第*i*个分量的数值为1,其余为0。

于是, w_i 服从标准的正态分布。给定误警概率 P_{fa} ,如果

$$|w_i| > N_{1-P_{fa}/2}(0, 1) \quad (14)$$

则认为第*i*颗卫星存在故障,否则,认为其没有故障。

由上一小节的分析可知,在矢量跟踪环路中,各个接收通道之间的故障信息是相互传播的,其中一个通道中的错误会扩散到其余所有通道,致使各个通道的观测量 $Z_{i,k}$ 都会出现异常。而由式(8)和式

(13)可知, w_i 与 $Z_{i,k}$ 之间有直接联系, 如果每颗卫星的观测量 $Z_{i,k}$ 都包含有故障信息, 那么会使得对应的检测量 w_i 均会达到告警条件, 从而导致无法准确识别出故障卫星。

2.3 基于预滤波器的双环路跟踪结构

根据前文的分析可知, 矢量跟踪环路在RAIM检测故障方面主要存在两个问题, 即 r_k 受噪声影响检测故障不准确和 w_i 受故障信息传播影响难以区分故障卫星。标量跟踪环路不存在上述问题, 在故障检测方面更有优势, 而矢量跟踪环路接收信号的能力强于标量跟踪环路。所以, 为了取长补短, 综合^[2,13]运用两种结构的优点, 本文提出基于预滤波器的双环路跟踪结构, 如图1所示。

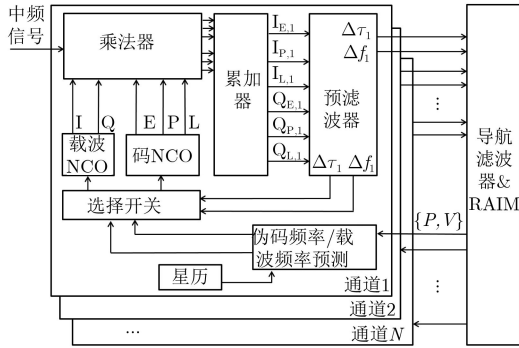


图1 基于预滤波器的双环路跟踪结构

从图1可以看出, 预滤波器取代了原矢量跟踪环路中的载波频率鉴别器和码相位鉴别器。而且, 预滤波器的输出除了送到导航滤波器以外, 还输送到NCO中, 形成两个跟踪环路。同时, 增加一个模式选择开关来控制标量跟踪环路和矢量跟踪环路的切换。该开关受RAIM检测量 r_k 的控制, 当检测到故障时, 切换到标量跟踪环路, 否则, 默认保持在矢量跟踪模式。切换到标量跟踪环路后, 各个接收通道间相互独立起来, 不再有故障信息的相互扩散, 此时就能够相对容易地识别出故障卫星, 并将其从环路中剔除。

当工作在矢量跟踪模式时, 预滤波器不仅可以规避鉴别器的非线性问题, 而且可以削弱噪声的影响, 使得输出的码相位误差和载频误差的方差均有所减小, 从而使得到的RAIM检测统计量更加稳定, 提高故障检测的准确性。当工作在标量跟踪模式时, 预滤波器的作用相当于标量跟踪环路中的鉴别器和环路滤波器, 维持信号的跟踪锁定。所以说, 预滤波器的设计是非常关键的。

预滤波器以各接收通道的I/Q支路数据作为输入, 经过处理后, 输出码相位误差和载波频率误差。由于输入与输出之间是非线性关系, 所以, 预

滤波器必须是能够处理非线性数据的滤波算法。当前主要的非线性滤波算法有EKF, 无迹卡尔曼滤波^[14] (Unscented Kalman Filter, UKF), 容积卡尔曼滤波^[15] (Cubature Kalman Filter, CKF), 粒子滤波^[16]等。CKF是近年来新提出的一种非线性滤波算法, 它基于3阶球面-相径容积规则, 能精确到泰勒展开的3阶精度。CKF避免了EKF的对非线性函数的线性化处理, 所以滤波精度更高。较UKF减少了一个采样点, 且采样点权值均为正, 具有更好的数值稳定性和计算效率。而粒子滤波存在粒子衰竭、高维模型计算量大等问题。因此, 采用CKF作为预滤波器的滤波算法。

每个接收通道均包含一个预滤波器, 对于任意一个预滤波器, 其状态量可定义为

$$\mathbf{X}^{\text{pr}} = [A, \Delta\tau, \Delta\theta, \Delta f, \Delta\dot{f}]^T \quad (15)$$

式中, A 为信号幅度, $\Delta\tau$ 为码相位误差, $\Delta\theta$ 为载波相位差, Δf 为载波频差, $\Delta\dot{f}$ 为载波频差的变化率。

鉴于载波频率、载波相位和码相位之间的关系, 预滤波器的状态方程可表示为

$$\mathbf{X}_{k+1}^{\text{pr}} = f(\mathbf{X}_k^{\text{pr}}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T f_{\text{co}}/f_{\text{sa}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 2\pi T & \pi T^2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{X}_k^{\text{pr}} + \mathbf{J}_k \quad (16)$$

式中, 函数 $f(\cdot)$ 表示状态量 \mathbf{X}_k^{pr} 更新过程的数学表达式, T 表示积分累加的时间, \mathbf{J}_k 为过程噪声向量。

以第 i 个接收通道为例, 6路I/Q数据的数学表达式可以表述为

$$\mathbf{I}_{E,i} = A_i R(\Delta\tau_i - \delta) D(n) \text{sinc}(\Delta f_i T) \cdot \cos(\pi \Delta f_i T + \Delta\theta_i) \quad (17)$$

$$\mathbf{I}_{P,i} = A_i R(\Delta\tau_i) D(n) \text{sinc}(\Delta f_i T) \cdot \cos(\pi \Delta f_i T + \Delta\theta_i) \quad (18)$$

$$\mathbf{I}_{L,i} = A_i R(\Delta\tau_i + \delta) D(n) \text{sinc}(\Delta f_i T) \cdot \cos(\pi \Delta f_i T + \Delta\theta_i) \quad (19)$$

$$\mathbf{Q}_{E,i} = A_i R(\Delta\tau_i - \delta) D(n) \text{sinc}(\Delta f_i T) \cdot \sin(\pi \Delta f_i T + \Delta\theta_i) \quad (20)$$

$$\mathbf{Q}_{P,i} = A_i R(\Delta\tau_i) D(n) \text{sinc}(\Delta f_i T) \cdot \sin(\pi \Delta f_i T + \Delta\theta_i) \quad (21)$$

$$\mathbf{Q}_{L,i} = A_i R(\Delta\tau_i + \delta) D(n) \text{sinc}(\Delta f_i T) \cdot \sin(\pi \Delta f_i T + \Delta\theta_i) \quad (22)$$

其中, A_i 表示信号幅度, $R(\Delta\tau_i + \delta)$ 表示伪码的自

相关函数, δ 表示本地伪码超前和滞后的间隔, 设置为1/2个码片长度, $D(n)$ 表示数据比特。

以I/Q数据作为观测量, 量测方程可表示为

$$\mathbf{Z}_k^{\text{pr}} = h(\mathbf{X}_k^{\text{pr}}) = [\mathbf{I}_{E,i}, \mathbf{I}_{P,i}, \mathbf{I}_{L,i}, \mathbf{Q}_{E,i}, \mathbf{Q}_{P,i}, \mathbf{Q}_{L,i}]^T + \mathbf{L}_k \quad (23)$$

式中, 函数 $h(\cdot)$ 表示观测量 \mathbf{Z}_k^{pr} 和状态量 \mathbf{X}_k^{pr} 之间的非线性关系, \mathbf{L}_k 为量测噪声向量。

明确状态方程和量测方程后, 就可以将其代入CKF算法进行滤波处理。

3 仿真及结果分析

3.1 实验设置

为了验证矢量GNSS接收机的RAIM性能, 采取事先收集卫星数据, 然后人为注入故障的方式进行实验。卫星数据为露天情况下采集的GPS L1频点上的真实数据。中频采集器的型号为NordNav R30。中频为4.02 MHz, 采样率为20 MHz。将中频采样数据送入基于Matlab平台的软件接收机进行处理, 输出各个接收通道的跟踪数据, 以及导航解算结果。设置相关积分累加的时间为20 ms, 导航解算结果的输出速率为50 Hz。码相位鉴别器采用非相干超前减滞后功率法^[17], 载波频率鉴别器采用四象限反正切叉积鉴频法^[17]。为了进一步滤除噪声, 对RAIM检测统计量累加10次后求平均值, 然后再进行 α 滤波, 调节系数 $\alpha = 0.2$, RAIM检测的时间间隔为200 ms。

设定RAIM检测的误警率为0.001, 参与导航解算的可见卫星为8颗, 对应的检测门限值为26.13。设定RAIM识别故障的误警率为0.02, 对应的告警门限为2.58。考虑到现实应用中多颗卫星同时故障的可能性极小, 而多颗卫星连续故障可转化为单颗卫星故障进行处理, 所以实验中只对一颗卫星注入故障。注入的故障分为两种类型, 一种是注入的故障值由小逐渐增大的缓变故障; 另一种是在某一时刻突然注入较大故障值的突变故障。

3.2 缓变故障

在12号卫星的伪距差上加入斜率为0.2 m/s的偏差, 模拟该卫星发生故障, 故障的起始注入时刻为第100 s。分别从故障传播、故障检测和故障识别3个方面进行测试。12号卫星对应于1号接收通道。

3.2.1 故障传播测试

该测试只在12号卫星的接收数据中加入错误, 检查其余卫星信号的接收是否会受此错误的影响。导航解算的结果如图2所示, 在故障注入前, 3维方向上的位置误差是正常的, 均值为零, 并保持在合理的误差范围内。但是, 当注入故障后, 3维方向

上的位置误差均发生了明显的偏移, 且随着时间的进行, 与正确位置之间的偏差越来越大。图3显示的是软件接收机的8个接收通道输出的码相位误差。12号卫星在注入故障后, 其对应的1号接收通道的输出, 逐渐产生了偏差, 均值不再为0。而且, 另外7个接收通道的输出也都同时产生了幅度不等的偏差。这个现象说明, 1号接收通道的故障信息, 在经过导航滤波器处理后, 扩散到了其余接收通道, 干扰了这些通道的接收。

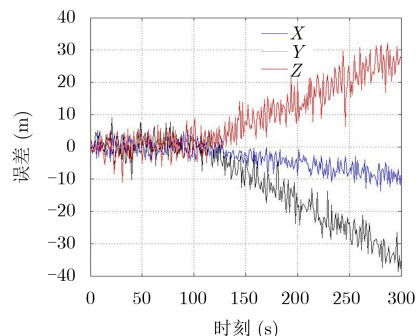


图2 3维方向上的位置误差

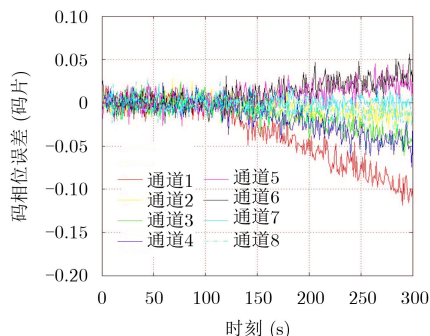


图3 8个接收通道输出的码相位误差

3.2.2 故障检测测试

以1号接收通道为例, 使用相同的卫星数据, 矢量接收机分别采用预滤波器和鉴别器获得码相位误差, 结果如图4所示。预滤波器输出的码相位误差主要集中在0.02个码片以内, 相对于鉴别器的输出, 幅度明显减小, 说明预滤波器能够降低噪声的影响, 提高了码相位的跟踪精度。

码相位误差经转换后成为伪距误差, 而伪距误差是RAIM算法的监控对象, 虽然8个接收通道的输出在故障注入后都含有偏差, 但是本文采用的是基于Kalman滤波的RAIM检测算法, 其自由度为8, 算法依然有效。使用相同的测试数据, 对矢量跟踪环路改进前后的RAIM检测统计量进行对比, 结果如图5所示。改进后, 预滤波器对应检测量的波动较小, 曲线更加平滑, 使得故障判断更加准确和可靠。而且, 在故障注入前, 预滤波器对应检测

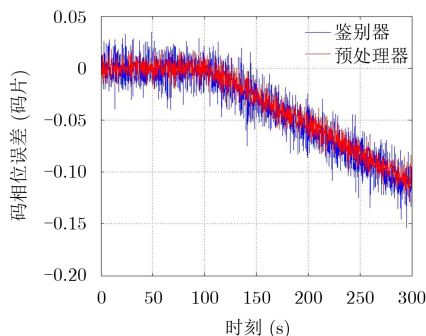


图4 1号接收通道输出的码相位误差

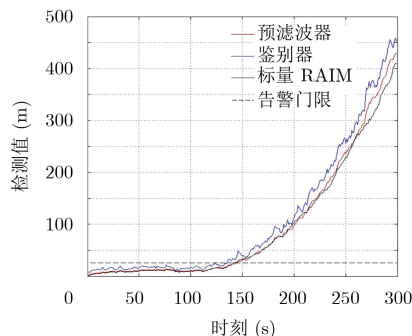


图5 RAIM检测统计量的曲线图

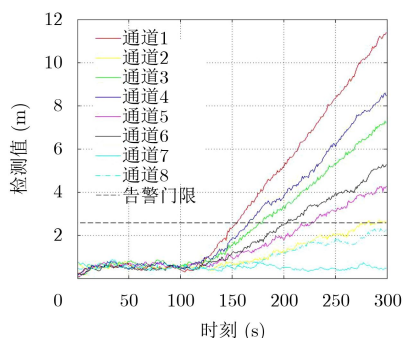


图6 矢量跟踪环路对应的故障识别检测量的曲线图

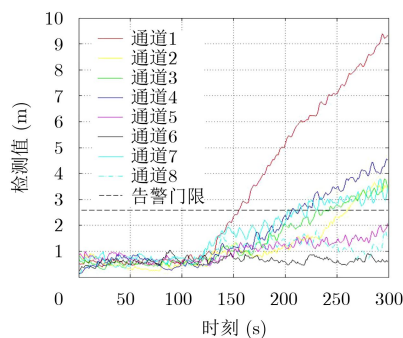


图7 标量跟踪环路对应的故障识别检测量的曲线图

量的平均值小于鉴别器时的平均值，降低了误告警的概率。为了进一步衡量二者的差异，采用50组数据进行蒙特卡洛测试。在未注入故障时，预滤波器对应的平均值只有13.76 m，小于鉴别器时的17.85 m。而且，鉴别器对应的检测值出现过两次偶尔超过门限的现象，造成了误告警。预滤波器对应的方差为2.29 m，远小于鉴别器时的方差5.81 m。图中标量RAIM曲线为标量跟踪环路对应的检测统计结果。

3.2.3 故障识别测试

检测到发生故障后，接下来需要进一步识别出故障的卫星。1颗卫星对应1个接收通道，8颗卫星对应的故障识别检测量如图6所示，可以看出，由于故障在接收通道间的传播，8颗卫星的检测值都不同程度地出现了异常。在150 s以后，有5颗卫星都先后超过了告警门限，且间隔的时间较近，增加了识别故障卫星的难度，也增加了误判的可能性。图7显示的是标量跟踪环路时8颗卫星对应的检测统计量。从图中可以看出，通道1对应的检测值在第158 s就超过了告警门限，而其余卫星至少间隔40 s后才超过门限。通道1对应的是12号卫星，从而能够很容易确认12号卫星为故障卫星。但是，对应用于标量跟踪环路的RAIM算法来说，各颗卫星的检测量之间存在一定的相关性^[18]，所以也会出现非故障卫星的检测值出现显著异常的情况，导致误判。使用50组数据进行蒙特卡洛测试，结果表明，标量环路时RAIM算法的识别正确率能够达到93.7%，

而相同测试情况下，矢量环路RAIM算法的正确率却只有75.1%。

3.3 突变故障

为了方便与缓变故障进行对比，同样只对12号卫星注入故障数据，注入方法为从第125 s开始在12号卫星的伪距差上持续加入30 m的偏差。12号卫星信号对应的接收通道仍然是通道1。

3.3.1 故障传播测试

图8为导航结算的结果。从图中可以看出，从第125 s开始注入故障后，3维方向上的位置误差立刻出现了较大的偏差，产生错误的定位结果。图9为8个接收通道输出的码相位误差，同样可以发现，在注入故障后，8个接收通道的码相位误差都出现了偏差。由于故障只是加注在12号卫星上，而当前所有的接收通道都出现了异常，这种现象再次证明了矢量接收机内部存在故障传播的问题。

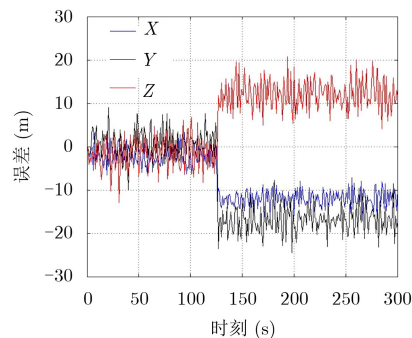


图8 突变故障注入后3维方向上的位置误差

3.3.2 故障检测测试

由伪距残差构建得到RAIM检测统计量, 矢量接收机分别采用预滤波器结构和鉴别器结构时得到的检测结果如图10所示。在第125 s开始故障注入后, 对应的检测值都产生了明显的陡升, 超过了告警门限, 准确地检测出故障。但是, 预滤波器结构时检测值的波动明显小于鉴别器结构时的波动, 显示出预滤波能够滤除噪声, 削弱噪声对检测值的影响。采用50组数据进行蒙特卡洛测试, 进一步衡量二者的差异。故障注入后, 预滤波器对应的均值和方差分别为125.11 m和3.32 m, 小于鉴别器时的131.63 m和6.08 m。由于此时鉴别器结构对应的均值远远大于门限值, 即便有较大的波动, 也没有造成漏告警。但是, 如果将注入的故障偏差值由30 m减小到8 m时, 受波动的影响, 将会出现检测值低于门限值的情况, 造成漏告警。

3.3.3 故障识别测试

8颗卫星对应的故障识别检测结果如图11所示。由于矢量跟踪环路中存在故障传播的问题, 所以, 在故障注入后, 所有卫星对应的检测值都不同程度地出现了异常。尤其是通道1、通道3和通道4的结果几乎在同一时间都超过了门限值, 给故障源识别造成了较大困难。标量跟踪环路时对应的故障识别检测量的曲线图如图12所示。从图中可以看出, 由于通道间不再存在故障传播的问题, 只有注

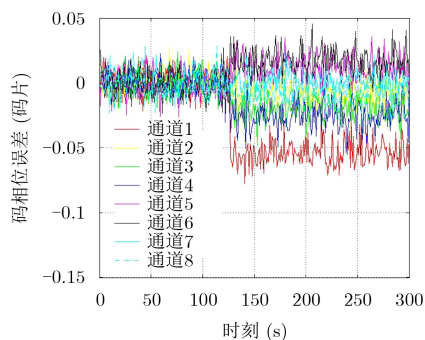


图9 突变故障注入后8个接收通道输出的码相位误差

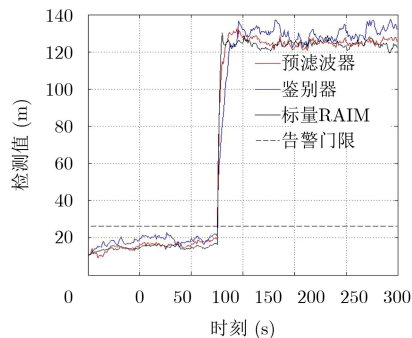


图10 突变故障对应的RAIM检测统计量的曲线图

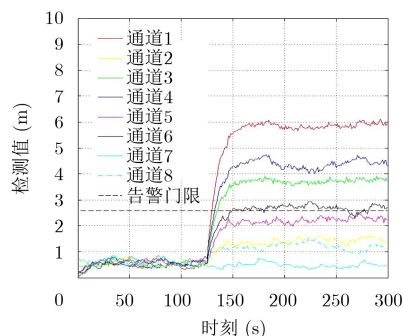


图11 矢量环路注入突变故障后识别检测量的曲线图

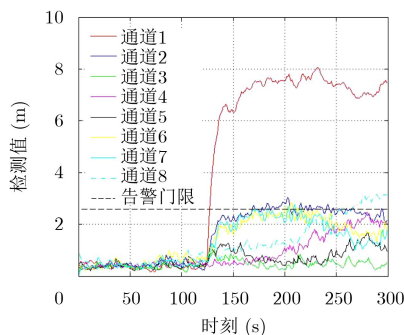


图12 标量环路注入突变故障后识别检测量的曲线图

入了故障的通道1的检测值迅速超过了检测门限, 而其余接收通道在故障注入后的约50 s内都保持在门限值以下, 所以能够很容易地识别出故障卫星, 大大减小了误判的可能性。进一步, 使用50组数据进行蒙特卡洛测试, 结果表明, 标量环路时RAIM算法的识别正确率能够达到96.3%, 而相同测试情况下, 矢量环路RAIM算法的正确率却只有70.8%。所以, 通过采用双环路切换的方法, 有效地提升了识别故障的正确率。

4 结束语

本文分析了矢量接收机和标量接收机在结构上的差异, 并着重分析了矢量接收机特殊的共享型结构给故障检测和故障识别带来的不利影响, 最后提出基于预滤波器的双环路跟踪结构来进行改进。通过注入故障的方式, 对矢量跟踪环路改进前后的RAIM检测能力进行了对比验证。实验结果表明, 改进后的矢量接收机, RAIM检测故障和识别故障的能力较原来均有了明显的提高。通过本文的研究, 能够对矢量跟踪技术的优缺点有进一步的认识, 促进矢量跟踪技术在接收机中的应用。

参考文献

- [1] LASHLEY M, BEVLY D M, and HUNG J Y. Performance analysis of vector tracking algorithms for weak GPS signals in high dynamics[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2009, 3(4): 661–673. doi: 10.1109/JSTSP.2009.2023341.

- [2] 朱珍珍. 卫星导航矢量跟踪关键技术研究[D]. [博士学位]. 国防科学技术大学, 2011: 3-6.
ZHU Zhenzhen. Research on key techniques of vector tracking for satellite navigation[D]. [Ph.D. dissertation]. National University of Defense Technology, 2011: 3-6.
- [3] ALAM N, TIAN JIN, and KHAN F A. Theoretical performance analysis and comparison of VDFLL and traditional FLL tracking loops[C]. 2018 European Navigation Conference, Gothenburg, 2018: 46-53. doi: [10.1109/EURONAV.2018.8433246](https://doi.org/10.1109/EURONAV.2018.8433246).
- [4] PENG Senlin, MORTON Yu, and DI Ruihui. A multiple-frequency GPS software receiver design based on a vector tracking loop[C]. The IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, Myrtle Beach, USA, 2012: 495-505. doi: [10.1109/PLANS.2012.6236919](https://doi.org/10.1109/PLANS.2012.6236919).
- [5] SUN Zhaoyan, WANG Xinlong, FENG Shaojun, *et al.* Design of an adaptive GPS vector tracking loop with the detection and isolation of contaminated channels[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(2): 701-713. doi: [10.1007/S10291-016-0558-5](https://doi.org/10.1007/S10291-016-0558-5).
- [6] WU Mouyan, DING Jicheng, LUO Zhibin, *et al.* The coherent vector tracking loop design with FDE algorithm for BDS signals[C]. 2016 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference, Xi'an, China, 2017: 835-840. doi: [10.1109/IMCEC.2016.7867327](https://doi.org/10.1109/IMCEC.2016.7867327).
- [7] HENKEL P, GIGER K, and GUNTHER C. Multifrequency, multisatellite vector phase-locked loop for robust carrier tracking[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2009, 3(4): 674-681. doi: [10.1109/JSTSP.2009.2025637](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2009.2025637).
- [8] BHATTACHARYYA S and GEBRE-EGZIABHER D. Integrity monitoring with vector GNSS receivers[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2014, 50(4): 2779-2793. doi: [10.1109/TAES.2014.120376](https://doi.org/10.1109/TAES.2014.120376).
- [9] BHATTACHARYYA S and GEBRE-EGZIABHER D. Vector loop RAIM in nominal and GNSS-stressed environments[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2014, 50(2): 1249-1268. doi: [10.1109/TAES.2013.120679](https://doi.org/10.1109/TAES.2013.120679).
- [10] 吴云. GNSS粗差检测的“快照”法与“滤波”法的比较研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2010, 35(6): 649-652, 704. doi: [10.13203/j.whugis2010.06.024](https://doi.org/10.13203/j.whugis2010.06.024).
WU Yun. GNSS fault detection and identification performance comparison of snapshot and filtering[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(6): 649-652, 704. doi: [10.13203/j.whugis2010.06.024](https://doi.org/10.13203/j.whugis2010.06.024).
- [11] 秦永元, 张洪钺, 汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 3版. 西安: 西北工业大学出版社, 2015: 297-301.
QIN Yongyuan, ZHANG Hongyue, and WANG Shuhua. Kalman Filtering and Principle of Integrated Navigation[M]. 3rd ed. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2015: 297-301.
- [12] AMANI E, DJOUANI K, DE BOER J R, *et al.* Adaptive and conjoint scalar-vector tracking loops for GNSS tracking robustness and positioning integrity[C]. 2017 European Navigation Conference, Lausanne, Switzerland, 2017: 1-13. doi: [10.1109/EURONAV.2017.7954168](https://doi.org/10.1109/EURONAV.2017.7954168).
- [13] 赵欣, 王仕成, 廖守亿, 等. 基于抗差自适应容积卡尔曼滤波的超紧耦合跟踪方法[J]. 自动化学报, 2014, 40(11): 2530-2540. doi: [10.3724/SP.J.1004.2014.02530](https://doi.org/10.3724/SP.J.1004.2014.02530).
ZHAO Xin, WANG Shicheng, LIAO Shouyi, *et al.* An ultra-tightly coupled tracking method based on robust adaptive cubature kalman filter[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(11): 2530-2540. doi: [10.3724/SP.J.1004.2014.02530](https://doi.org/10.3724/SP.J.1004.2014.02530).
- [14] JULIER S J and UHLMANN J K. Unscented filtering and nonlinear estimation[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2004, 92(3): 401-422. doi: [10.1109/JPROC.2003.823141](https://doi.org/10.1109/JPROC.2003.823141).
- [15] ARASARATNAM I and HAYKIN S. Cubature Kalman filters[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(6): 1254-1269. doi: [10.1109/TAC.2009.2019800](https://doi.org/10.1109/TAC.2009.2019800).
- [16] HUEMMER C, HOFMANN C, MAAS R, *et al.* Estimating parameters of nonlinear systems using the elitist particle filter based on evolutionary strategies[J]. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 2018, 26(3): 595-608. doi: [10.1109/TASLP.2017.2788183](https://doi.org/10.1109/TASLP.2017.2788183).
- [17] 朱灿. 高灵敏度卫星导航接收机同步技术的研究[D]. [博士学位]. 东南大学, 2017: 87-92.
ZHU Can. Research on the synchronization techniques of high sensitivity GNSS receivers[D]. [Ph.D. dissertation], Southeast University, 2017: 87-92.
- [18] HEWITSON S and WANG Jinling. GNSS receiver autonomous integrity monitoring with a dynamic model[J]. *The Journal of Navigation*, 2007, 60(2): 247-263. doi: [10.1017/S0373463307004134](https://doi.org/10.1017/S0373463307004134).
- 邹晓军: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为GNSS接收机矢量跟踪技术、RAIM等。
廉保旺: 男, 1962年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为卫星导航、通信信号处理等。