

单差载波相位自主完好性监测算法

姚诗豪, 李晓明, 庞春雷

(空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077)

摘要 应用载波相位差分定位时, 由于多路径误差、卫星信号遮挡、卫星故障等原因, 易造成载波相位测量值发生偏差和周跳, 因此必须进行完好性监测。研究了利用单差载波相位测量值进行载波相位完好性监测的方法, 固定整周模糊度值之后, 利用最小二乘残差构造检验统计量, 根据虚警概率和观测到卫星个数设定门限值, 对单差载波相位测量值进行监测。分析了垂直保护级和漏警概率、卫星个数的关系。实验结果表明, 虚警概率取为 10^{-7} /历元时, 算法能有效检测测量偏差, 对小至 0.4 周的偏差, 比原有算法检测能力较强; 漏警概率取为 10^{-6} /历元, 垂直告警限值取为 1.1 m 时算法满足可用性要求, 增加 1 颗观测卫星能使垂直保护级降低约 2 cm。

关键词 载波相位; 完好性检测; 最小二乘残差; 垂直保护级

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.05.014

中图分类号 P228.43 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)05-0080-06

An Autonomous Integrity Monitoring Algorithm for Single Differential Carrier Phase

YAO Shihao, LI Xiaoming, PANG Chunlei

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: Aimed at the problem that Bias and cycle slips of Carrier Phase measurements will occur because of multipath error, satellite signals blockage, satellite failure and other factors in utilizing differential carrier phase positioning, this paper proposes an integrity monitoring necessarily. The carrier phase integrity monitoring algorithm is researched based on single differential carrier phase measurements. After carrier phase inter ambiguities are determined, test statistic is constructed by using the method of least squares and threshold set according to the false alarm probability and number of observed satellites to test carrier phase measurements. Relationship between vertical protection level, satellite geometry and miss detection probability is analyzed. The experiment results indicate that when the false alarm probability is 10^{-7} , the algorithm in this paper can detect measure bias effectively, and is more effective when the bias is as small as 0.4 cycle. When the missing alarm rate is 10^{-6} and the vertical protection level is 1.1 m, the algorithm meets the requirements of availability, and the addition of 1 observation satellites can reduce the vertical protection level by about 2 cm.

Key words: carrier phase; integrity monitoring; least square residual; vertical protection level

收稿日期: 2016-11-07

基金项目: 国家自然科学基金(61601506)

作者简介: 姚诗豪(1992—), 男, 河北石家庄人, 硕士生, 主要从事卫星导航与定位研究。E-mail: buaayaoshihao@163.com

引用格式: 姚诗豪, 李晓明, 庞春雷. 单差载波相位自主完好性监测算法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(5): 80-85. YAO Shihao, LI Xiaoming, PANG Chunlei. An Autonomous Integrity Monitoring Algorithm for Single Differential Carrier Phase [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(5): 80-85.

载波相位差分定位是一种基于载波相位测量的高精度相对定位技术,在飞机的精密进近和载体姿态测量等方面具有广泛应用^[1-2]。应用载波相位差分定位时,由于多路径误差、卫星信号遮挡、卫星故障等原因,易造成载波相位测量值发生偏差和周跳,使得定位结果的误差较大、可信度较低,因此必须进行完好性监测^[3]。

完好性定义为“对导航系统所提供信息正确性的置信度的测量,也包括系统在无法用于导航时向用户发出告警的能力”^[4]。国内外很多学者对载波相位完好性监测进行了研究。文献[5~6]利用扩展卡尔曼滤波构造载波相位观测值的新息向量,以新息向量构造检验统计量进行完好性监测,算法可检测出超出完好性要求的故障,但对先验误差特性依赖性强,而实际误差特性很难准确预测,且基于卡尔曼滤波的 RAIM 算法反应速度较慢。文献[7~8]将当前时刻与参考时刻的载波相位测量值差分构造检验统计量进行完好性监测,这种方法消除了整周模糊度,但是参考时刻的测量值需 GNSS 完好性通道信息进行修正,且协方差矩阵的分析比较复杂,相应的保护级的确定更加困难。文献[9]提出了利用高斯和滤波器的基于载波相位的 RAIM 算法,该算法通过高斯分布的加权和构造载波相位误差的高斯混合模型,能检测更小的测量偏差,产生更小的保护级,但是这种方法需要较大的计算量,只能应用于参考站、监控站或大型客机。文献[10]利用载波相位双差进行完好性监测,但是双差观测值之间具有较强的相关性。

综合分析以上算法,结合接收机各通道之间的载波相位观测噪声相互独立的情况,本文采用基准站和用户机之间的单差载波相位观测模型,先固定单差整周模糊度值,再利用最小二乘残差构造检验统计量进行完好性监测。实验结果表明该方法能有效检测载波相位测量值偏差和周跳。

1 单差整周模糊度解算

要进行单差载波相位完好性监测,首先要求得单差载波相位观测模型中的整周模糊度。利用接收机各通道载波相位测量误差,构造加权矩阵对单差载波相位观测模型进行加权,由于双差整周模糊度较易求解,所以用 Householder 变换消除单差载波相位观测方程中的钟差项,再通过矩阵变换得到双差整周模糊度向量^[11],利用最小二乘求浮点解,再用 LAMBDA 算法固定整周模糊度,最后通过固定的双差整周模糊度求得单差整周模糊度。

1.1 基本模型

短基线的用户接收机 u 和基准站接收机 r 同时跟踪卫星 i ,可构造单差载波相位观测方程为:

$$\boldsymbol{\varphi}_{wr} = \mathbf{G} \cdot \mathbf{b}_w + \mathbf{e} \cdot f\delta t_w - \mathbf{N}_w + \boldsymbol{\varepsilon}_w \quad (1)$$

式中: $\boldsymbol{\varphi}_{wr} = [\varphi_w^{(1)}, \varphi_w^{(2)}, \dots, \varphi_w^{(m)}]^T$, $\varphi_w^{(i)}$ 为接收机 u 和 r 到卫星 i 的单差载波相位观测值; $\mathbf{G} = \lambda^{-1} [-(\mathbf{I}_r^{(1)})^T, -(\mathbf{I}_r^{(2)})^T, \dots, -(\mathbf{I}_r^{(m)})^T]^T$, 为基准站接收机到卫星的观测矩阵; \mathbf{b}_w 为基线向量; $\mathbf{e} = [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T$, f 为载波频率, δt_w 为两接收机钟差; $\mathbf{N}_w = [N_w^{(1)}, N_w^{(2)}, \dots, N_w^{(m)}]^T$ 为单差整周模糊度向量, $N_w^{(i)}$ 为待求的卫星 i 单差整周模糊度; $\boldsymbol{\varepsilon}_w = [\varepsilon_w^{(1)}, \varepsilon_w^{(2)}, \dots, \varepsilon_w^{(m)}]^T$, 为单差载波相位观测噪声,且 $\varepsilon_w^{(i)} \sim N(0, \sigma_w^{(i)2})$ 。 $\sigma_w^{(i)2}$ 为卫星 i 的单差载波相位观测噪声的方差。

1.2 载波相位观测噪声加权模型

在单差载波相位观测模型中,误差主要是接收机测量噪声。在实际情况中,接收机不同通道测量的载波相位精度有一定差别,取决于接收机相位锁定环路(PLL)的相位测量误差,其误差源主要包括相位抖动和动态应力误差^[12]。相位抖动的误差源包括热噪声和振荡器抖动。热噪声 σ_{PLL} 是相位的主要误差源,其均方差计算公式为:

$$\sigma_{PLL} = \frac{180^\circ}{\pi} \sqrt{\frac{B_L}{(C/N_0)}} \left(1 + \frac{1}{2T_C(C/N_0)}\right) \quad (2)$$

式中: B_L 为接收机噪声带宽; T_C 为相干积分时间; C/N_0 为接收机接收到卫星信号的载噪比。

σ_v : 用户运动和接收装置的机械颤动会引起接收机基准振荡频率的抖动,相应的相位抖动均方差大致在 2° 左右。

σ_A : 阿伦型晶体振荡频率漂移随着时间的积累也会引入相位抖动噪声,其均方差与衡量频率稳定度的阿伦均方差成正比^[13],即:

$$\sigma_A = 160 \frac{f\sigma_A(\tau)}{B_L} \quad (3)$$

式中: $\sigma_A(\tau)$ 为阿伦偏差。

相位抖动误差均方差可表示为:

$$\sigma^{(i)} = \sqrt{\sigma_{PLL}^2 + \sigma_v^2 + \sigma_A^2} \quad (4)$$

单差载波相位观测噪声均方差可以表示为:

$$\sigma_w^{(i)} = \sqrt{(\sigma_u^{(i)})^2 + (\sigma_r^{(i)})^2} \quad (5)$$

对单差载波相位观测方程进行加权,观测到 m 颗卫星时,权重矩阵 \mathbf{W} 为 m 阶对角矩阵:

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_w^{(1)}} & & & & \\ & \frac{1}{\sigma_w^{(2)}} & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & \frac{1}{\sigma_w^{(m)}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

加权后的单差载波相位观测方程为:

$$\mathbf{W} \cdot \boldsymbol{\varphi}_{w_r} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{b}_{w_r} + \mathbf{W} \cdot \mathbf{e} \cdot f\delta t_{w_r} - \mathbf{W} \cdot \mathbf{N}_{w_r} + \mathbf{W} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{w_r} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{W}\boldsymbol{\varepsilon}_{w_r} \sim N(0, \mathbf{I}_m)$ 。

1.3 单差整周模糊度求解

将加权后的单差载波相位观测方程利用 Householder 变换, 消除钟差项。定义:

$$\boldsymbol{\alpha} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{e} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_{w_r}^{(1)}} & \frac{1}{\sigma_{w_r}^{(2)}} & \cdots & \frac{1}{\sigma_{w_r}^{(m)}} \end{bmatrix}^T$$

则存在 Householder 矩阵 $\mathbf{H} \in \mathbf{R}^{m \times m}$, 满足:

$$\begin{cases} \mathbf{u} = \frac{\boldsymbol{\alpha} - |\boldsymbol{\alpha}| \mathbf{e}_1}{|\boldsymbol{\alpha} - |\boldsymbol{\alpha}| \mathbf{e}_1|} \\ \mathbf{H} = \mathbf{I} - 2\mathbf{u}\mathbf{u}^T \end{cases} \quad (8)$$

使得 $\mathbf{H}\boldsymbol{\alpha} = |\boldsymbol{\alpha}| \mathbf{e}_1$ 。式中, \mathbf{e}_1 为 m 维单位列向量, $\mathbf{e}_1 = [1 \ 0 \ \cdots \ 0]^T$, m 为观测到的卫星数量, 解得:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{1/|\sigma_1|}{|\boldsymbol{\alpha}|} & & & \frac{\boldsymbol{\alpha}_{m-1}^T}{|\boldsymbol{\alpha}|} \\ & \mathbf{I}_{m-1} & & -\frac{\boldsymbol{\alpha}_{m-1} \boldsymbol{\alpha}_{m-1}^T}{|\boldsymbol{\alpha}|^2 - \frac{1}{\sigma_1} |\boldsymbol{\alpha}|} \\ & & & \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 \\ \mathbf{H}_{(m-1)} \end{bmatrix}$$

$$\text{式中: } \boldsymbol{\alpha}_{m-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_{w_r}^{(2)}} & \frac{1}{\sigma_{w_r}^{(3)}} & \cdots & \frac{1}{\sigma_{w_r}^{(m)}} \end{bmatrix}^T; \mathbf{H}_{(m-1)} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\alpha}_{m-1} & \mathbf{I}_{m-1} - \frac{\boldsymbol{\alpha}_{m-1} \boldsymbol{\alpha}_{m-1}^T}{|\boldsymbol{\alpha}|^2 - \frac{1}{\sigma_1} |\boldsymbol{\alpha}|} \end{bmatrix}。$$

将式(7)两边同乘以 \mathbf{H} 矩阵, 即有:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 \times_m \mathbf{W} \boldsymbol{\varphi}_{w_r} \\ \mathbf{H}_{(m-1)} \times_m \mathbf{W} \boldsymbol{\varphi}_{w_r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 \mathbf{W} \mathbf{G} \\ \mathbf{H}_{(m-1)} \mathbf{W} \mathbf{G} \end{bmatrix} \mathbf{b}_{w_r} + |\boldsymbol{\alpha}| \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} f\delta t_{w_r} - \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 \mathbf{W} \\ \mathbf{H}_{(m-1)} \mathbf{W} \end{bmatrix} \mathbf{N}_{w_r} + \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 \mathbf{W} \\ \mathbf{H}_{(m-1)} \mathbf{W} \end{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{w_r} \quad (9)$$

方程组中只有第 1 个方程含有钟差项, 不含钟差项的方程组表示为:

$$\mathbf{H}_{(m-1)} \mathbf{W} \boldsymbol{\varphi}_{w_r} = \mathbf{H}_{(m-1)} \mathbf{W} \mathbf{G} \mathbf{b}_{w_r} - \mathbf{H}_{(m-1)} \mathbf{W} \mathbf{N}_{w_r} + \mathbf{H}_{(m-1)} \mathbf{W} \boldsymbol{\varepsilon}_{w_r} + \mathbf{H}_{(m-1)} \mathbf{W} \boldsymbol{\varepsilon}_{w_r} \quad (10)$$

对 $\mathbf{H}_{(m-1)}$ 矩阵进行分解, 得到: $\mathbf{H}_{(m-1)} = \mathbf{F} \mathbf{J}$

式中:

$$\begin{cases} \mathbf{F} = \mathbf{I}_{m-1} - \frac{\boldsymbol{\alpha}_{m-1} \boldsymbol{\alpha}_{m-1}^T}{|\boldsymbol{\alpha}|^2 - \frac{1}{\sigma_1} |\boldsymbol{\alpha}|} \\ \mathbf{J} = [-\sigma_1 \boldsymbol{\alpha}_{m-1}, \mathbf{I}_{m-1}] \end{cases} \quad (11)$$

选取仰角最高的卫星为参考星时:

$$\mathbf{N}_{DD} = [N_{w_r}^{(2)} - N_{w_r}^{(1)}, N_{w_r}^{(3)} - N_{w_r}^{(1)}, \dots, N_{w_r}^{(m)} - N_{w_r}^{(1)}]^T, \text{ 可得:}$$

$$\mathbf{H}_{(m-1)} \mathbf{W} \mathbf{N}_{w_r} = \mathbf{F} \mathbf{J} \mathbf{W} \mathbf{N}_{w_r} = \mathbf{F} \mathbf{W}_{(m-1)} \mathbf{N}_{DD}$$

其中:

$$\mathbf{W}_{(m-1)} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_{w_r}^{(2)}} \\ \frac{1}{\sigma_{w_r}^{(3)}} \\ \vdots \\ \frac{1}{\sigma_{w_r}^{(m)}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

则式(10)变换为:

$$\mathbf{H}_{(m-1)} \mathbf{W} \boldsymbol{\varphi}_{w_r} = \mathbf{H}_{(m-1)} \mathbf{W} \mathbf{G} \mathbf{b}_{w_r} - \mathbf{F} \mathbf{W}_{(m-1)} \mathbf{N}_{DD} + \mathbf{H}_{(m-1)} \mathbf{W} \boldsymbol{\varepsilon}_{w_r} \quad (13)$$

利用最小二乘求解(13)式可得双差整周模糊度 \mathbf{N}_{DD} 的浮点解, 用 LAMBDA 算法搜索固定双差整周模糊度后^[14], 设参考星单差整周模糊度为 0, 即 $N_{w_r}^{(1)} = 0$, 则其余卫星的单差整周模糊度可由双差整周模糊度求得, 即 $N_{w_r}^{(i)} = N_{DD}^i, i=2, 3, \dots, m$ 。^[15]

2 单差载波相位完好性监测

将单差整周模糊度代入单差载波相位观测模型, 利用最小二乘法求解单差载波相位测量值定位后残余向量, 根据虚警率和观测到卫星个数确定检测门限, 进行故障检测; 利用漏警率、检测门限和卫星个数确定垂直保护级, 判断完好性监测算法的可用性。

2.1 基本模型

解得单差整周模糊度后, 加权单差载波相位观测矩阵方程式可以写为:

$$\mathbf{W} \mathbf{y} = \mathbf{W} \mathbf{G} \mathbf{x} + \mathbf{W} \boldsymbol{\varepsilon} \quad (14)$$

式中: \mathbf{y} 是 m 维的单差载波相位观测值与整周模糊度的和矢量; \mathbf{x} 为基线向量及接收机钟差; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为载波相位单差观测噪声矢量。加权最小二乘解为^[16]:

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{G}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{y} \quad (15)$$

矩阵 \mathbf{A} 定义为:

$$\mathbf{A} = (\mathbf{G}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \quad (16)$$

由 $\hat{\mathbf{x}}$ 估计观测矢量值为:

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{G} \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{G} (\mathbf{G}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{y}$$

单差载波相位残差向量为:

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}} = [\mathbf{I}_m - \mathbf{G} (\mathbf{G}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W}] \mathbf{y}$$

定义矩阵 \mathbf{S} 为:

$$\mathbf{S} = \mathbf{I}_m - \mathbf{G} (\mathbf{G}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \quad (17)$$

残差平方加权和定义为:

$$\text{SSE} = (\mathbf{W} \boldsymbol{\omega})^T (\mathbf{W} \boldsymbol{\omega}) = \boldsymbol{\omega}^T \mathbf{C} \boldsymbol{\omega} \quad (18)$$

式中: $\mathbf{C} = \mathbf{W}^T \mathbf{W}$ 。

SSE 包含了单差载波相位观测误差信息, 所以用 SSE 作检验统计量判断各个观测值之间的一致性, 若 SSE 大于一个门限值 T_{SSE} , 则这些测量值相互之间不一致, 即某些测量值是错误的。

单差载波相位观测误差向量 $\boldsymbol{\varepsilon}_{wr}$ 各个分量之间相互独立,并且呈均值为零的正态分布,则无故障时 SSE 呈 χ^2 分布,由于加权最小二乘法基线向量求解中有 4 个独立有效的控制方程,所以 χ^2 的自由度为 $m-4$ 。无故障时系统处于正常检测状态,如果出现告警,则为虚警,给定虚警率 P_{FA} ,可得概率等式:

$$P(SSE < T_{SSE}) = \int_0^T f_{\chi^2(m-4)}(t) dt = 1 - P_{FA} \quad (19)$$

通过此式计算检测门限 T_{SSE} ^[17]。导航解算时,将 SSE 与 T_{SSE} 比较,若 $SSE > T_{SSE}$,则表示有故障。

2.2 垂直保护级计算

在进行最小二乘残差监测之前,首先要对完好性监测算法的可用性进行判断。判断方法为根据漏警概率计算水平保护级(HPL)或垂直保护级(VPL),将其和水平告警门限(HAL)或垂直告警门限(VAL)进行比较,若保护级不超过告警门限,则说明完好性监测算法可用^[18]。

有故障时检验统计量 SSE 服从非中心参数为 λ ,自由度为 $m-4$ 的 χ^2 分布,此状态下 SSE 应大于 T_{SSE} ,否则为漏警^[19],给定漏警概率 P_{MD} ,可得概率等式:

$$P(SSE < T_{SSE}) = \int_0^T f_{\chi^2(m-4,\lambda)}(t) dt = P_{MD} \quad (20)$$

通过概率等式计算非中心参数 λ 。

假设卫星 i 有故障,偏差为 δy_i ,则非中心参数可表示为:

$$\lambda = E(SSE) = \frac{\delta y_i^2 \mathbf{S}_i^2}{(\sigma_{wr}^{(i)})^2}$$

引起的垂直偏差为 $VPE_i = \sqrt{\mathbf{A}_{3i}^2 \delta y_i}$ 。

定义卫星引起的定位偏差和距离残差之比为该卫星的斜率:

$$V_{slopei} = \frac{VPE_i}{\sqrt{SSE}} = \frac{VPE_i}{\sqrt{\lambda}} = \sigma_{wr}^{(i)} \sqrt{\frac{\mathbf{A}_{3i}^2}{\mathbf{S}_i^2}} \quad (21)$$

则垂直保护级 VPL 为:

$$VPL = VPE_{MAX} = V_{slopeMAX} \sqrt{\lambda}$$

$$\text{MAX} \left\{ \sigma_{wr}^{(i)} \sqrt{\frac{\mathbf{A}_{3i}^2}{\mathbf{S}_i^2}} \right\} \sqrt{\lambda} \quad (22)$$

同理可得水平保护级 HPL 为

$$HPL = \text{MAX} \left\{ \frac{\sigma_{wr}^{(i)} \sqrt{\mathbf{A}_{1i}^2 + \mathbf{A}_{2i}^2}}{\mathbf{S}_i} \right\} \sqrt{\lambda} \quad (23)$$

将 VPL 和 VAL 进行比较,若 $VPL < VAL$,说明完好性监测算法可用。

3 试验结果分析

为了验证载波相位完好性监测算法的有效性,于 2016 年 1 月 10 日进行了 GPS 相对定位实验,基

站和用户站均采用司南 OEM 板卡采集数据,其噪声带宽 $B_L = 18$ Hz,相干积分时间为 $T = 1$ ms,采样频率为 1 Hz,共采集 2 613 个历元的数据。在 III 类精密进近着陆中,虚警概率取为 10^{-7} /历元^[20],表 1 为实验过程中不同历元观测卫星个数及检测门限的对应情况。图 1 为检验统计量与检测门限随历元变化图。

表 1 卫星个数和 T_{SSE} 对应情况

Table 1 The correspondence between the number of satellite and threshold

观测历元	卫星个数	检测门限
1~1 375	7	35.405 8
1 376~1 781	6	32.236 2
1 781~2 613	7	35.405 8

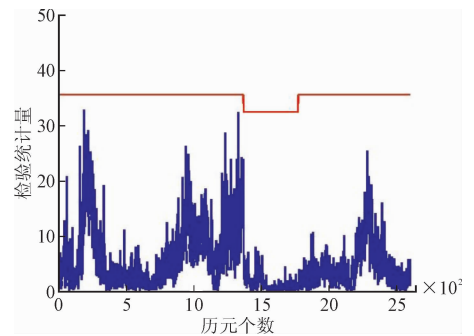


图 1 检验统计量与检测门限图

Fig. 1 Test statistic and threshold

由图 1 可知,实验过程中检验统计量均处于检测门限之下,载波相位测量值未出现故障。

为测试本文方法检测载波相位故障的性能,对载波相位测量值人为添加偏差。正确固定整周模糊度后,每隔 50 个历元从观测到卫星中随机选取一颗卫星,在载波相位测量值中添加 0.4 周的偏差,总共为 51 个历元添加了故障,双差载波相位完好性监测算法和本文算法构造的检验统计量与检测门限随历元变化情况见图 2、图 3。

由图 2、图 3 可以看出,在加入 0.4 周偏差情况下,双差监测算法有 3 个故障未检测出,本文算法检测出了所有 51 个故障,虚警概率和漏警概率均为 0。本文算法能有效进行故障检测且对较小偏差的检测能力较强。

在飞机精密进近着陆中,对垂直方向上的精度比水平方向精度要求要高,因此用垂直保护级来判断完好性监测算法的可用性。漏警概率取为 10^{-6} /历元,垂直告警限值取为 1.1 m。垂直保护级 VPL 随历元变化情况见图 3。

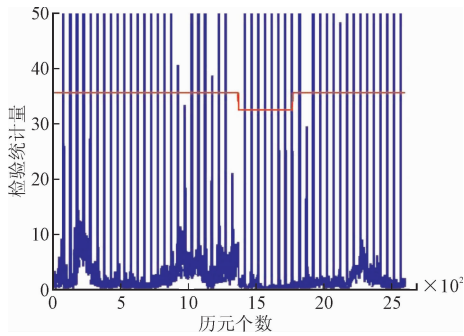


图2 原有算法检验统计量与检测门限图

Fig. 2 Test statistic and detection threshold of existing algorithms

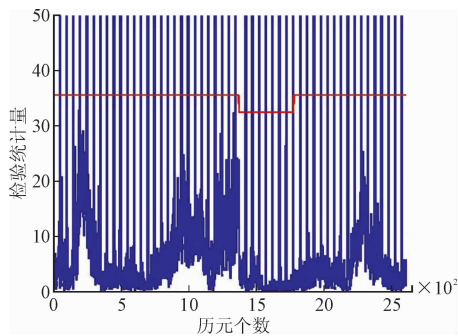


图3 本文算法检验统计量与检测门限图

Fig. 3 Test statistic and detection threshold of this paper

从图4可以看出,实验过程中垂直保护级小于垂直告警限值,完好性监测算法能满足可用性的要求。还可以看出观测到卫星个数少时,垂直保护级较高,因此,为了提高监测算法的可用性,应增加观测卫星个数。

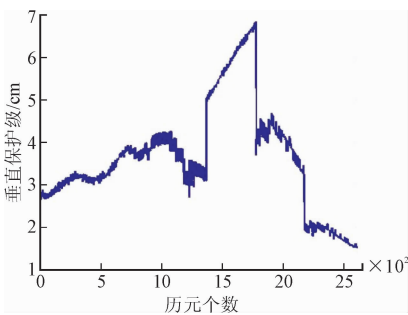


图4 垂直保护级

Fig. 4 Vertical protection level

3 结语

本文利用基准站和用户机之间的单差载波相位观测值构造检验统计量进行完好性监测,单差载波相位观测值之间无相关性,协方差矩阵分析较为简单。利用实时测得的载噪比计算载波相位测量误差标准差 $\sigma_w^{(i)}$,由此构造的检验统计量进行故障检测达到的漏警率和虚警率均较低且对小偏差检测能力较

强;利用 $\sigma_w^{(i)}$ 和卫星观测几何结构共同确定卫星斜率,更加可靠的确定了保护级,有助于提供系统连续输出正确观测值的能力。

参考文献(References):

- [1] WANG G L, CUI X W, LU M Q. The Analysis of Availability and Integrity for Beidou-Based High Precision KINRTK [C] // Springer Science + Business Media. Singapore, 2016: 189-198.
- [2] 窦婧婧. GPS姿态测量完好性技术[D]. 上海:上海交通大学, 2011.
DOU J J. Integrity Technique Based on Attitude Determination [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [3] 孟领坡, 吴杰. 基于载波相位的完整性监测及其优化方法[J]. 遥测遥控, 2010, 31(5): 7-11.
MENG L P, WU J. Research on RAIM Design Based on Carrier Phase [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2010, 31(5): 7-11. (in Chinese)
- [4] SU X L, ZHAN X Q, FANG H. Receiver Autonomous Integrity Monitoring for GPS Attitude Determination with Carrier Phase FD/FDE algorithms [C] // 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. Portland, OR, 2010: 2168-2181.
- [5] FENG S J, OCHIENG W, MOORE T, et al. Carrier Phase-based Integrity Monitoring for High-accuracy Positioning [J]. GPS Solutions, 2009, 13(1): 13-22.
- [6] RIPPL M, Schlötzer S, HENKEL P. High Integrity Carrier Phase Based Positioning for Precision Landing Using a Robust Nonlinear Filter [C] // International Technical Meeting. 2010: 577-590.
- [7] GRATTON L, JOERGER M, PERVAN B. Carrier Phase Relative RAIM Algorithms and Protection Level Derivation [J]. Journal of Navigation, 2010, 63(2): 215-231.
- [8] KIRKKO-JAANKOLA M, TRAUOGOTT J, ODIJK D, et al. A RAIM Approach to GNSS Outlier and Cycle Slip Detection Using L1 Carrier Phase Time-differences [C] // IEEE Workshop on Signal Processing System. 2009: 273-278.
- [9] YUN H. Carrier Phase-Based RAIM Using a Gaussian Sum Filter [J]. Journal of Navigation, 2011, 64(1): 75-90.
- [10] 孟领坡, 吴杰, 袁义双. 载波相位差分接收机自主完好性监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(3): 271-275.
MENG L P, WU J, YUAN Y S. Receiver Autonomous Integrity Monitoring Based on Differential Car-

- rier Phase [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(3): 271-275. (in Chinese)
- [11] 金天, 原青, 郑光辉, 等. 载噪比加权的 GPS 单频单历元定姿算法 [J]. 测绘学报, 2014, 43(10): 1032-1038.
JIN T, YUAN Q, ZHENG G H, et al. Carrier to Noise Ratio Weighted Algorithm in GPS Single Epoch Single Frequency Attitude Determination [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(10): 1032-1038. (in Chinese)
- [12] 谢钢. GPS 原理与接收机设计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
XIE G. Principles of GPS and Receiver Design [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009. (in Chinese)
- [13] KAPLAN E D, HEGARTY C J. GPS 原理与应用 [M]. 第 2 版. 寇艳红, 译. 北京: 电子工业出版社, 2007.
KAPLAN E D, HEGARTY C J. Understanding GPS Principles and Applications [M]. 2nd Edition. KOU Y H, Translated. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007. (in Chinese)
- [14] FENG S J, OCHIENG W, SAMSON J, et al. Integrity Monitoring for Carrier Phase Ambiguities [J]. Journal of Navigation, 2012, 65(1): 41-58.
- [15] HUANG J D, GRASS F V, A DGNSS Single Frequency Carrier Phase Batch Processor with High Integrity [C]//ION 63rd Annual Meeting, Cambridge, Massassetts, 2007: 305-320.
- [16] MENG F C, WANG S, ZHU B C. Satellite Selection and RAIM for GNSS Reliability Enhancement in Multi-constellation [J]. Journal of Psychopathology & Behavioral Assessment, 2014, 25(1): 75-76.
- [17] PANAGIOTAKOPOULOS D, MAJUMDAR A, OCHIENG W Y. Extreme Value Theory-based Integrity Monitoring of Global Navigation Satellite Systems [J]. GPS Solutions, 2014, 18(1): 133-145.
- [18] 苏先礼. GNSS 完好性监测体系及辅助性能增强技术研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
SU X L. The Research on GNSS Integrity Monitoring Theory and Assisted Performance Enhancement Technique [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [19] 阎贝, 段可植. BDS 系统下 RAIM 算法可用性及其结果分析 [J]. 现代导航, 2014(2): 95-102.
YAN B, DUAN K Z. RAIM Availability and Results Analysis Under BDS [J]. Modern Navigation, 2014(2): 95-102. (in Chinese)
- [20] HEO M B, PERVAN B, PULLEN S, et al. Airborne Autonomous Fault Detection for Shipboard Landing Navigation using Carrier Phase DGPS [C]//Proceedings of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation, 2003: 441-453.

(编辑: 徐楠楠)