



# (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 115494527 B

(45) 授权公告日 2023. 10. 31

(21) 申请号 202210385475.1  
 (22) 申请日 2022.04.13  
 (65) 同一申请的已公布的文献号  
 申请公布号 CN 115494527 A  
 (43) 申请公布日 2022.12.20  
 (73) 专利权人 无锡奇芯科技有限公司  
 地址 214100 江苏省无锡市滨湖区建筑西路777号A1栋5层507  
 (72) 发明人 陈永刚 曾毅 巴晓辉  
 (74) 专利代理机构 无锡大鲲知识产权代理事务所(普通合伙) 32671  
 专利代理师 蒋愿真  
 (51) Int. Cl.  
 G01S 19/23 (2010.01)  
 G01S 19/37 (2010.01)  
 G06F 17/11 (2006.01)  
 (56) 对比文件  
 CN 105866812 A, 2016.08.17

CN 105487088 A, 2016.04.13  
 CN 106707304 A, 2017.05.24  
 CN 113093248 A, 2021.07.09  
 CN 102749633 A, 2012.10.24  
 CN 106154291 A, 2016.11.23  
 CN 1846147 A, 2006.10.11  
 CN 111596317 A, 2020.08.28  
 KR 101040053 B1, 2011.06.10  
 温黔伟. 一种简单有效的GPS接收机自主完好监测算法.《中国西部科技》.2009,第8卷(第20期),第45-46,65页.  
 Fanchen Meng等.GNSS reliability and positioning accuracy enhancement based on fast satellite selection algorithm and RAIM in multiconstellation.《IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine》.2015,第30卷(第10期),第14-27页.

审查员 陈章霖

权利要求书2页 说明书5页 附图3页

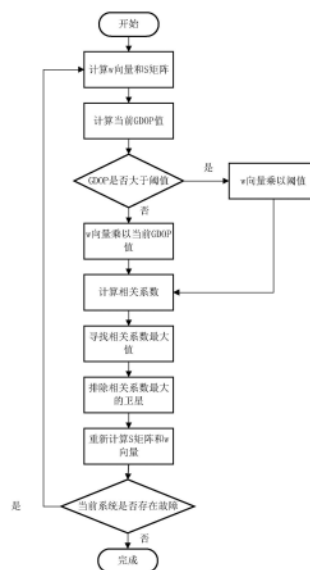
## (54) 发明名称

一种基于相关系数的卫星系统故障排除的方法

## (57) 摘要

本发明公开了一种基于相关系数卫星系统故障排除方法,通过计算 $\omega$ 向量和S矩阵,获取当前GDOP值,判断GDOP值是否在阈值内,采用不同的更新规则更新 $\omega$ 向量,进而计算 $\omega$ 向量与S矩阵的相关系数,根据相关系数排除相关系数最大的卫星,判断故障是否排除,如未排除,则对剩余卫星按上述步骤重新进行参数计算和判断。本发明的故障排除方法通过一次相关系数的计算,即可排除出存在故障卫星,相较于传统的最小二乘方法,存在多少颗卫星参与定位就进行多少次最小二乘计算。在同样执行效果的情况下大大节省了运算时间,对导航定位芯片资源的节约有一定积极的效果。

CN 115494527 B



1. 一种基于相关系数的卫星系统故障排除的方法,其特征在于,包括以下步骤:

S1: 计算  $\omega$  向量和S矩阵;

所述步骤S1中计算  $\omega$  向量计算方法如下:

计算线性化后的GNSS观测方程:

$$y = Hx + \varepsilon W$$

其中,  $y$  为观测伪距和计算伪距之差,  $H$  为观测矩阵,  $x$  为待求参数,  $W$  为观测伪距的权矩阵,  $W$  的选取如下式所示:

$$W = \begin{pmatrix} 1/\sigma_1^2 & & \\ & \ddots & \\ & & 1/\sigma_N^2 \end{pmatrix}$$

其中,  $\sigma_i^2$  ( $i=1\dots N$ ) 为各观测伪距噪声矢量  $\varepsilon$  的方差,  $N$  为可见卫星的个数;

用户状态的最小二乘解为:

$$\hat{x} = (H^T W H)^{-1} H^T W y = x + (H^T W H)^{-1} H^T W \varepsilon$$

由  $\hat{y} = H\hat{x}$  得伪距残差向量  $\omega$  为:

$$\omega = y - \hat{y} = (I - H (H^T W H)^{-1} H^T W) y$$

$$= (I - H (H^T W H)^{-1} H^T W) (Hx + \varepsilon)$$

$$= Hx - H (H^T W H)^{-1} H^T W Hx + (I - H (H^T W H)^{-1} H^T W) \varepsilon$$

$$= (I - H (H^T W H)^{-1} H^T W) \varepsilon;$$

S矩阵计算方法如下:

$$S = I - H (H^T W H)^{-1} H^T W;$$

S2: 计算当前GDOP值;

S3: 更新  $\omega$  向量, 具体为根据GDOP的值更新  $\omega$  向量;

所述步骤S3中包括: 判断GDOP值是否大于阈值R, 并根据判断结果对  $\omega$  向量进行更新;

$$\begin{cases} \omega' = \omega \times R & \text{GDOP} > R \\ \omega' = \omega \times \text{GDOP} & \text{GDOP} \leq R \end{cases}$$

其中,  $\omega'$  为更新后的  $\omega$  向量;

S4: 计算  $\omega$  向量与S矩阵的相关系数;

S5: 寻找计算得出的相关系数向量中相关系数最大的值;

S6: 排除相关系数最大的卫星, 重新计算S矩阵和  $\omega$  向量;

S7: 重新判断当前系统是否存在故障, 若是, 则返回步骤S1, 若否, 则完成判定, 输出结果。

2. 根据权利要求1所述的基于相关系数的卫星系统故障排除的方法,其特征在于,所述步骤S2中计算GDOP值的方法如下:

利用“用户-可见星”的方向余弦矩阵G可定义几何效应矩阵:

$$Q = (G^T G)^{-1}$$

$$G = \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & w_1 & 1 \\ u_2 & v_2 & w_2 & 1 \\ u_3 & v_3 & w_3 & 1 \\ u_4 & v_4 & w_4 & 1 \end{bmatrix}$$

$$u_i = \frac{x_0(t) - x_i(t)}{\rho_{i0}(t)}, v_i = \frac{y_0(t) - y_i(t)}{\rho_{i0}(t)}, w_i = \frac{z_0(t) - z_i(t)}{\rho_{i0}(t)}$$

其中,  $(x_0, y_0, z_0)(t)$ ,  $(x_i, y_i, z_i)(t)$  分别为  $t$  时刻的用户位置和第  $i$  颗可见卫星的位置,  $\rho_{i0}(t)$  为第  $t$  时刻第  $i$  颗可见卫星与用户之间的距离;

$$\text{GDOP} = \frac{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_b^2}}{\sigma_\rho} = \sqrt{\text{Tr}(G^T G)^{-1}}.$$

3. 根据权利要求2所述的基于相关系数的卫星系统故障排除的方法,其特征在于,阈值  $R$  为 3.5。

4. 根据权利要求1所述的基于相关系数的卫星系统故障排除的方法,其特征在于,所述步骤S4中包括:

将  $S$  矩阵分解为  $n$  个向量  $S_1, S_2, \dots, S_n$ , 将每个分解向量  $S_i$  分别与  $\omega$  向量计算两个向量之间的相关系数,计算公式如下:

$$r_i = \frac{\sum_{j=1}^m (\omega_j - \bar{\omega})(S_{ij} - \bar{S}_{ij})}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (\omega_j - \bar{\omega})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^m (S_{ij} - \bar{S}_{ij})^2}}$$

其中  $i = 1, 2, \dots, n$ ;

相关系数  $r_i$  对应第  $i$  个卫星对应的参数。

5. 根据权利要求1所述的基于相关系数的卫星系统故障排除的方法,其特征在于,所述步骤S5中包括:

通过排序算法对相关系数进行排序,寻找计算得出的相关系数向量中相关系数最大的值。

6. 根据权利要求5所述的基于相关系数的卫星系统故障排除的方法,其特征在于,所述步骤排序算法具体为:采用选择排序算法。

## 一种基于相关系数的卫星系统故障排除的方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及北斗卫星导航领域,尤其是一种基于相关系数的卫星系统故障排除的方法。

### 背景技术

[0002] 北斗卫星导航系统(以下简称北斗系统)是中国着眼于国家安全和经济社会发展需要,自主建设运行的全球卫星导航系统,是为全球用户提供全天候、全天时、高精度的定位、导航和授时服务的国家重要时空基础设施。

[0003] 北斗系统提供服务以来,已在交通运输、农林渔业、水文监测、气象测报、通信授时、电力调度、救灾减灾、公共安全等领域得到广泛应用,服务国家重要基础设施,产生了显著的经济效益和社会效益。基于北斗系统的导航服务已被电子商务、移动智能终端制造、位置服务等厂商采用,广泛进入中国大众消费、共享经济和民生领域,应用的新模式、新业态、新经济不断涌现,深刻改变着人们的生产生活方式。中国将持续推进北斗应用与产业化发展,服务国家现代化建设和百姓日常生活,为全球科技、经济和社会发展做出贡献。

[0004] 正因为北斗系统在各种领域中起着巨大的作用,对它的完善性要求就更加严格。系统完善性检测就是指当北斗接收机在执行任务过程中,可能会由于存在故障星或长时间假锁等各种原因而导致系统可靠性出现问题,如系统不能用于导航服务或导航精度超出给定范围,此时,导航系统应当具备及时发现故障并通知用户的能力,以便北斗用户消除故障源的影响,保证北斗用户导航的正常进行。

[0005] 现有技术中故障排除方法即最小二乘方法,是通过遍历的方法选择出故障卫星的,其步骤为:选择参与定位的一颗卫星。让不包含选择的那一颗卫星的其他卫星重新进行最小二乘计算。重新进行最小二乘计算的结果可通过上式进行故障检测,若检测出系统有故障,则遍历下一颗卫星当遍历到一颗卫星使系统无故障时,则判断出系统中存在故障的卫星为当前遍历的卫星。

[0006] 现有技术的方法存在的缺点为计算较为复杂,当故障卫星较多时,故障排除耗时较长,容易使导航定位软件产生其他错误。

### 发明内容

[0007] (一)解决的技术问题

[0008] 为了解决上述存在的技术问题,实现发明目的,本发明是通过以下技术方案实现的:通过计算 $\omega$ 向量和S矩阵,获取当前GDOP值,判断GDOP值是否在阈值内,采用不同的更新规则更新 $\omega$ 向量,进而计算 $\omega$ 向量与S矩阵的相关系数,根据相关系数排除相关系数最大的卫星,判断故障是否排除,如未排除,则对剩余卫星按上述步骤重新进行参数计算和判断。

[0009] (二)技术方案

[0010] S1:计算 $\omega$ 向量和S矩阵

[0011] 假设某一时刻共有N颗卫星可见,考虑权阵,则线性化后的GNSS观测方程为:

[0012]  $y = Hx + \varepsilon W$

[0013] 其中,  $y$  为观测伪距和计算伪距之差,  $H$  为观测矩阵,  $x$  为待求参数,  $W$  为观测伪距的权矩阵, 一般权阵  $W$  的选取如下式所示:

$$[0014] \quad W = \begin{matrix} 1/\sigma_1^2 & & \\ & \ddots & \\ & & 1/\sigma_N^2 \end{matrix}$$

[0015] 其中,  $\sigma_i^2$  ( $i=1\dots N$ ) 为各观测伪距噪声矢量  $\varepsilon$  的方差。

[0016] 由最小二乘原理, 可以得到用户状态的最小二乘解为:

$$[0017] \quad \hat{x} = (H^T W H)^{-1} H^T W y = x + (H^T W H)^{-1} H^T W \varepsilon$$

[0018] 由  $\hat{y} = H\hat{x}$  得伪距残差向量  $\omega$  为:

$$\begin{aligned} \omega &= y - \hat{y} = (I - H (H^T W H)^{-1} H^T W) y \\ &= (I - H (H^T W H)^{-1} H^T W) (Hx + \varepsilon) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [0019] \quad \omega &= Hx - H (H^T W H)^{-1} H^T W Hx + (I - H (H^T W H)^{-1} H^T W) \varepsilon \\ &= (I - H (H^T W H)^{-1} H^T W) \varepsilon = S\varepsilon \end{aligned}$$

[0020] 其中,  $S = I - H (H^T W H)^{-1} H^T W$

[0021] S2: 计算当前 GDOP 值, 并判断是否大于阈值, 具体为:

[0022] 通过对非线性定位观测方程进行线性化处理, 利用“用户—可见星”的方向余弦矩阵  $G$  可定义几何效应矩阵:

$$[0023] \quad Q = (G^T G)^{-1}$$

[0024] 以四颗可见卫星为例, 其中:

$$[0025] \quad G = \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & w_1 & 1 \\ u_2 & v_2 & w_2 & 1 \\ u_3 & v_3 & w_3 & 1 \\ u_4 & v_4 & w_4 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[0026] \quad u_i = \frac{x_0(t) - x_i(t)}{\rho_{i0}(t)}, \quad v_i = \frac{y_0(t) - y_i(t)}{\rho_{i0}(t)}, \quad w_i = \frac{z_0(t) - z_i(t)}{\rho_{i0}(t)}$$

[0027] 其中,  $(x_0, y_0, z_0)(t)$ ,  $(x_i, y_i, z_i)(t)$  分别为  $t$  时刻的用户位置和第  $i$  颗可见卫星的位置,  $\rho_{i0}(t)$  为第  $t$  时刻第  $i$  颗可见卫星与用户之间的距离, 因此, 矩阵  $Q$  与各可见卫星之间的几何结构有关。

$$[0028] \quad \text{GDOP} = \frac{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_b^2}}{\sigma_\rho} = \sqrt{\text{Tr}(G^T G)^{-1}}$$

[0029] 判断 GDOP 值是否大于阈值  $R$ , 并根据判断结果对  $\omega$  向量进行更新。

[0030] 进一步地,  $R$  取 3.5。

[0031] S3: 更新  $\omega$  向量

[0032] 根据 GDOP 的值更新  $\omega$  向量, 具体为:

$$[0033] \quad \begin{cases} \omega' = \omega \times R & \text{GDOP} > R \\ \omega' = \omega \times \text{GDOP} & \text{GDOP} \leq R \end{cases}$$

[0034] 其中,  $\omega'$  为更新后的  $\omega$  向量。

[0035] S4: 计算  $\omega$  向量与 S 矩阵的相关系数

[0036] 将 S 矩阵分解为 n 个向量  $S_1, S_2 \cdots S_n$ , 将每个分解向量  $S_i$  分别与  $\omega$  向量计算两个向量之间的相关系数, 计算公式如下:

$$[0037] \quad r_i = \frac{\sum_{j=1}^m (\omega_j - \bar{\omega})(S_{ij} - \bar{S}_{ij})}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (\omega_j - \bar{\omega})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^m (S_{ij} - \bar{S}_{ij})^2}}$$

[0038] 其中  $i=1, 2 \cdots n$ 。

[0039] 相关系数  $r_i$  对应第 i 个卫星对应的参数。

[0040] S5: 寻找计算得出的相关系数向量中相关系数最大的值

[0041] 基于步骤 S4 中计算得到的 n 个相关系数  $r_1, r_2 \cdots r_n$ , 通过选择排序算法获取相关系数最大值。

[0042] S6: 排除相关系数最大的卫星, 重新计算 S 矩阵和  $\omega$  向量。

[0043] S7: 重新判断当前系统是否存在故障, 若是, 则返回步骤 S1, 若否, 则完成判定, 输出结果。

[0044] (三) 有益效果

[0045] 本发明的故障排除方法通过一次相关系数的计算, 即可排除出存在故障卫星, 相较于传统的最小二乘方法, 存在多少颗卫星参与定位就进行多少次最小二乘计算。在同样执行效果的情况下大大节省了运算时间, 对导航定位芯片资源的节约有一定积极的效果。

## 附图说明

[0046] 此处所说明的附图用来提供对本申请的进一步理解, 构成本申请的一部分, 本申请的示意性实施例及其说明用于解释本申请, 并不构成对本申请的不当限定。在附图中:

[0047] 图1是根据本申请实施例的基于相关系数系统故障排除方法的流程图;

[0048] 图2是现有技术的卫星系统故障排除方法的定位结果;

[0049] 图3是现有技术的卫星系统故障排除方法的故障检测与排除耗时;

[0050] 图4是根据本申请实施例的基于相关系数系统故障排除方法的定位结果;

[0051] 图5是根据本申请实施例的基于相关系数系统故障排除方法的故障检测与排除耗时。

## 具体实施方式

[0052] 下面结合附图对本公开实施例进行详细描述。

[0053] 以下通过特定的具体实例说明本公开的实施方式, 本领域技术人员可由本说明书所揭露的内容轻易地了解本公开的其他优点与功效。显然, 所描述的实施例仅仅是本公开一部分实施例, 而不是全部的实施例。本公开还可以通过另外不同的具体实施方式加以实施或应用, 本说明书中的各项细节也可以基于不同观点与应用, 在没有背离本公开的精神下进行各种修饰或改变。需说明的是, 在不冲突的情况下, 以下实施例及实施例中的特征可

以相互组合。基于本公开中的实施例，本领域普通技术人员在没有作出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本公开保护的范围。

[0054] 还需要说明的是，以下实施例中所提供的图示仅以示意方式说明本公开的基本构想，图式中仅显示与本公开中有关的组件而非按照实际实施时的组件数目、形状及尺寸绘制，其实际实施时各组件的型态、数量及比例可为一种随意的改变，且其组件布局型态也可能更为复杂。

[0055] 参见图1，该方法包含以下步骤：

[0056] S1：计算 $\omega$ 向量和S矩阵

[0057] 假设某一时刻共有N颗卫星可见，考虑权阵，则线性化后的GNSS观测方程为：

$$[0058] \quad y = Hx + \varepsilon W$$

[0059] 其中， $y$ 为观测伪距和计算伪距之差， $H$ 为观测矩阵， $x$ 为待求参数， $W$ 为观测伪距的权矩阵，一般权阵 $W$ 的选取如下式所示：

$$[0060] \quad W = \begin{matrix} 1/\sigma_1^2 & & \\ & \ddots & \\ & & 1/\sigma_N^2 \end{matrix}$$

[0061] 其中， $\sigma_i^2$  ( $i=1\dots N$ )为各观测伪距噪声矢量 $\varepsilon$ 的方差。

[0062] 由最小二乘原理，可以得到用户状态的最小二乘解为：

$$[0063] \quad \hat{x} = (H^T W H)^{-1} H^T W y = x + (H^T W H)^{-1} H^T W \varepsilon$$

[0064] 由 $\hat{y} = H\hat{x}$ 得伪距残差向量 $\omega$ 为：

$$[0065] \quad \begin{aligned} \omega &= y - \hat{y} = (I - H (H^T W H)^{-1} H^T W) y \\ &= (I - H (H^T W H)^{-1} H^T W) (Hx + \varepsilon) \\ &= Hx - H (H^T W H)^{-1} H^T W Hx + (I - H (H^T W H)^{-1} H^T W) \varepsilon \\ &= (I - H (H^T W H)^{-1} H^T W) \varepsilon = S \varepsilon \end{aligned}$$

[0066] 其中， $S = I - H (H^T W H)^{-1} H^T W$

[0067] S2：计算当前GDOP值，并判断是否大于阈值，具体为：

[0068] 通过对非线性定位观测方程进行线性化处理，利用“用户—可见星”的方向余弦矩阵 $G$ 可定义几何效应矩阵：

$$[0069] \quad Q = (G^T G)^{-1}$$

[0070] 以四颗可见卫星为例，其中：

$$[0071] \quad G = \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & w_1 & 1 \\ u_2 & v_2 & w_2 & 1 \\ u_3 & v_3 & w_3 & 1 \\ u_4 & v_4 & w_4 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[0072] \quad u_i = \frac{x_0(t) - x_i(t)}{\rho_{i0}(t)}, \quad v_i = \frac{y_0(t) - y_i(t)}{\rho_{i0}(t)}, \quad w_i = \frac{z_0(t) - z_i(t)}{\rho_{i0}(t)}$$

[0073] 其中， $(x_0, y_0, z_0)(t)$ ， $(x_i, y_i, z_i)(t)$ 分别为 $t$ 时刻的用户位置和第 $i$ 颗可见卫星的

位置,  $\rho_{i_0}(t)$  为第  $t$  时刻第  $i$  颗可见卫星与用户之间的距离, 因此, 矩阵  $Q$  与各可见卫星之间的几何结构有关。

$$[0074] \quad GDOP = \frac{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_b^2}}{\sigma_\rho} = \sqrt{Tr(G^T G)^{-1}}$$

[0075] 判断GDOP值是否大于阈值R, 并根据判断结果对  $\omega$  向量进行更新。

[0076] 进一步地, R取3.5。

[0077] S3: 更新  $\omega$  向量

[0078] 根据GDOP的值更新  $\omega$  向量, 具体为:

$$[0079] \quad \begin{cases} \omega' = \omega \times R & GDOP > R \\ \omega' = \omega \times GDOP & GDOP \leq R \end{cases}$$

[0080] 其中,  $\omega'$  为更新后的  $\omega$  向量。

[0081] S4: 计算  $\omega$  向量与S矩阵的相关系数

[0082] 将S矩阵分解为  $n$  个向量  $S_1, S_2 \cdots S_n$ , 将每个分解向量  $S_i$  分别与  $\omega$  向量计算两个向量之间的相关系数, 计算公式如下:

$$[0083] \quad r_i = \frac{\sum_{j=1}^m (\omega_j - \bar{\omega})(S_{ij} - \bar{S}_{ij})}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (\omega_j - \bar{\omega})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^m (S_{ij} - \bar{S}_{ij})^2}}$$

[0084] 其中  $i=1, 2 \cdots n$ 。

[0085] 相关系数  $r_i$  对应第  $i$  个卫星对应的参数。

[0086] S5: 寻找计算得出的相关系数向量中相关系数最大的值

[0087] 基于步骤S4中计算得到的  $n$  个相关系数  $r_1, r_2 \cdots r_n$ , 通过选择排序算法对相关系数进行排序, 获取相关系数最大值。

[0088] S6: 排除相关系数最大的卫星, 重新计算S矩阵和  $\omega$  向量。

[0089] S7: 重新判断当前系统是否存在故障, 若是, 则返回步骤S1, 若否, 则完成判定, 输出结果。相关系数法通过一次相关系数的计算, 即可排除出存在故障卫星, 相较于传统的最小二乘方法, 存在多少颗卫星参与定位就进行多少次最小二乘计算。在同样执行效果的情况下大大节省了运算时间。对导航定位芯片资源的节约有一定的效果。

[0090] 发明人对现有技术的故障排除方法和本发明的故障排除方法分别进行结果测试并统计故障排除耗时, 使用matlab分析并画图像, 如图2-5分别为现有技术方法的定位结果、现有技术方法的故障检测与排除耗时、本发明方法的定位结果以及本发明的故障检测与排除耗时, 可以看到, 本发明的系统故障排除方法与现有技术的系统故障排除方法达到了一致的效果, 但耗时上有明显的缩减, 在时间复杂度上有优越性。

[0091] 以上所述的实施例仅是对本发明的优选实施方式进行描述, 并非对本发明的范围进行限定, 在不脱离本发明设计精神的前提下, 本领域普通技术人员对本发明的技术方案做出的各种变形和改进, 均应落入本发明权利要求书确定的保护范围内。



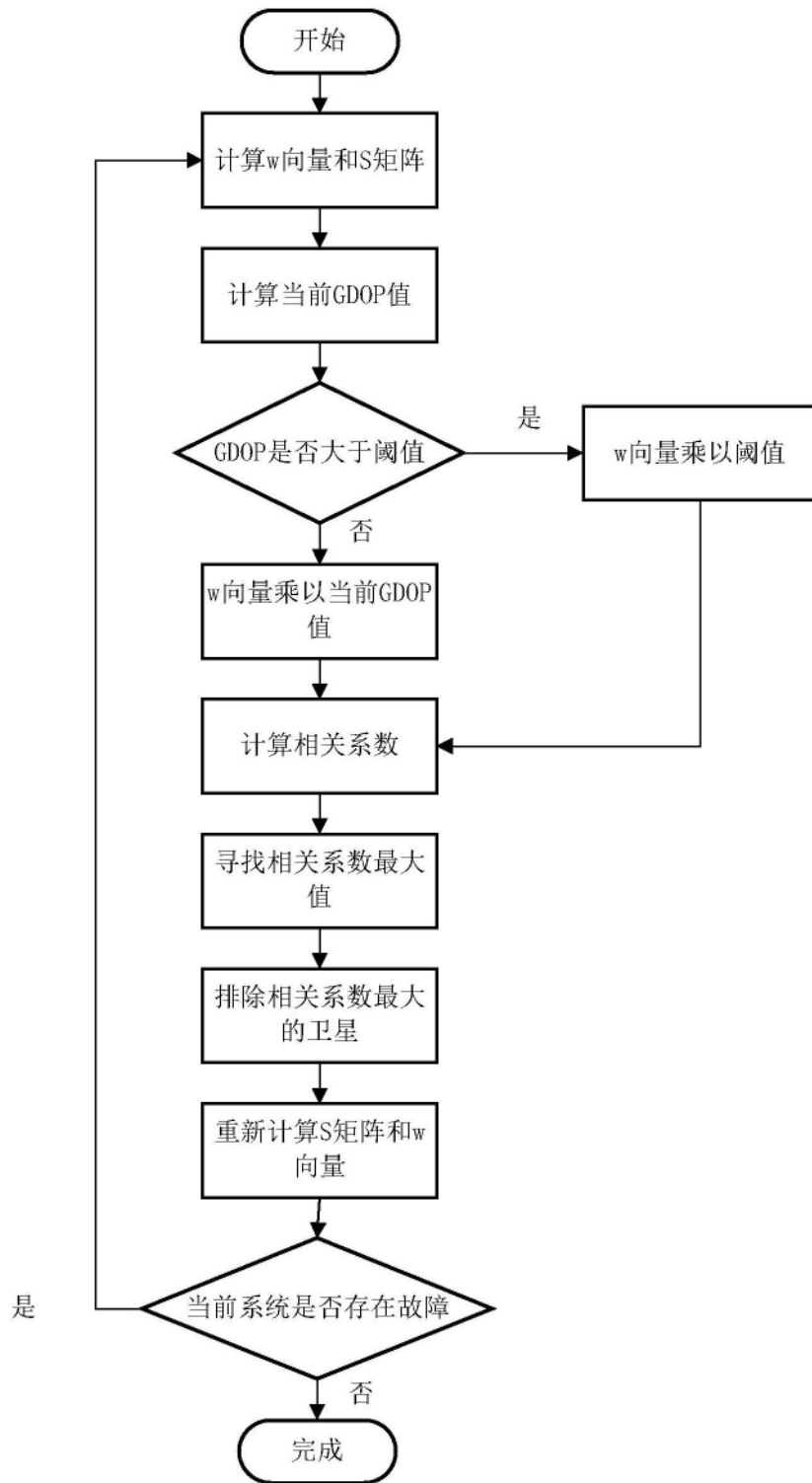


图1

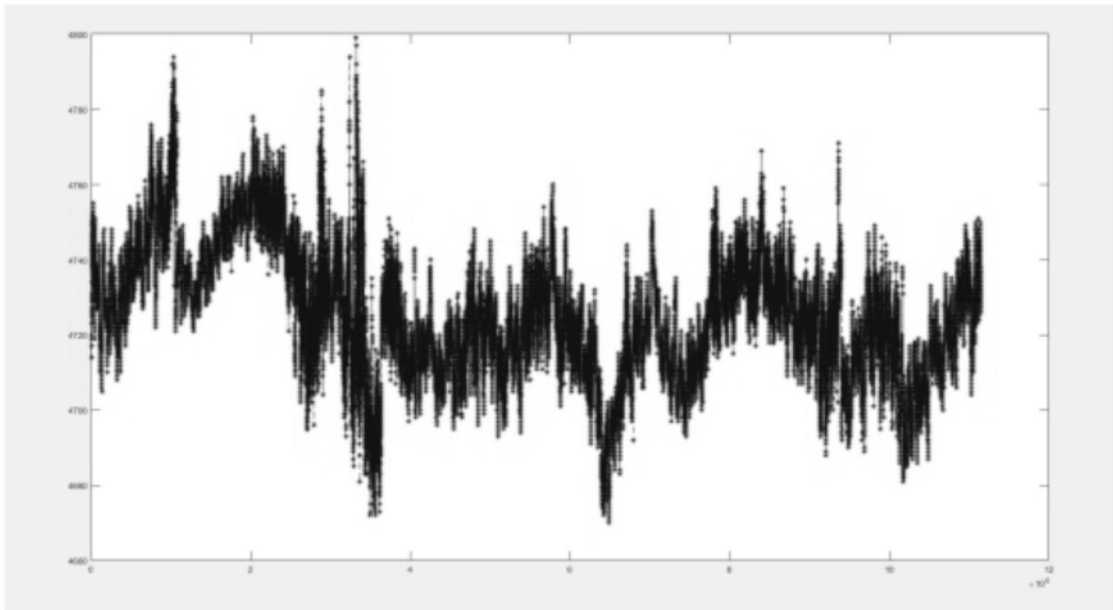


图2

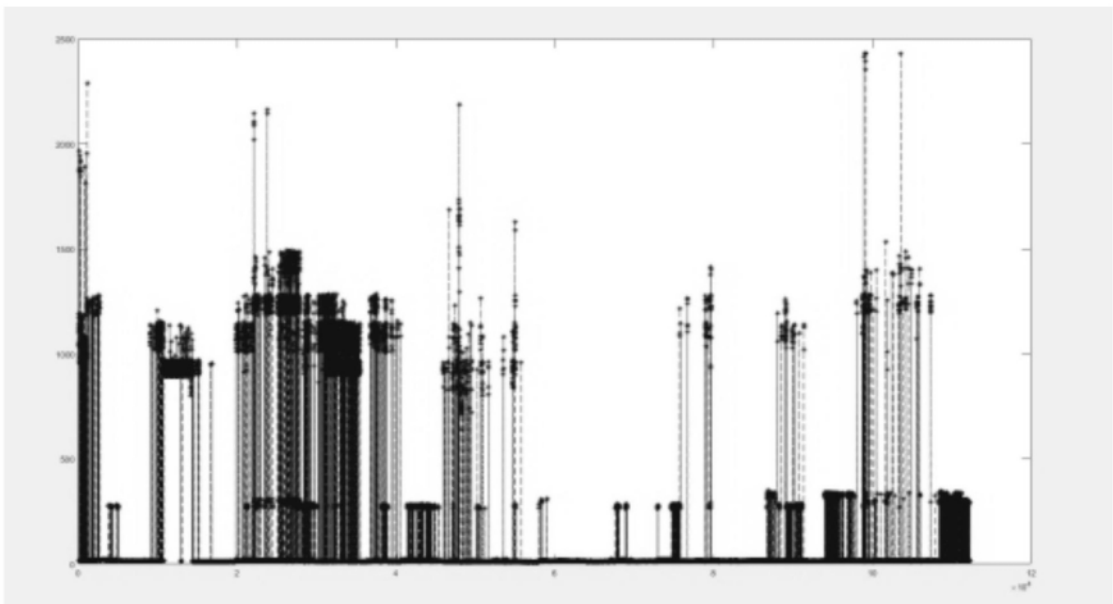


图3

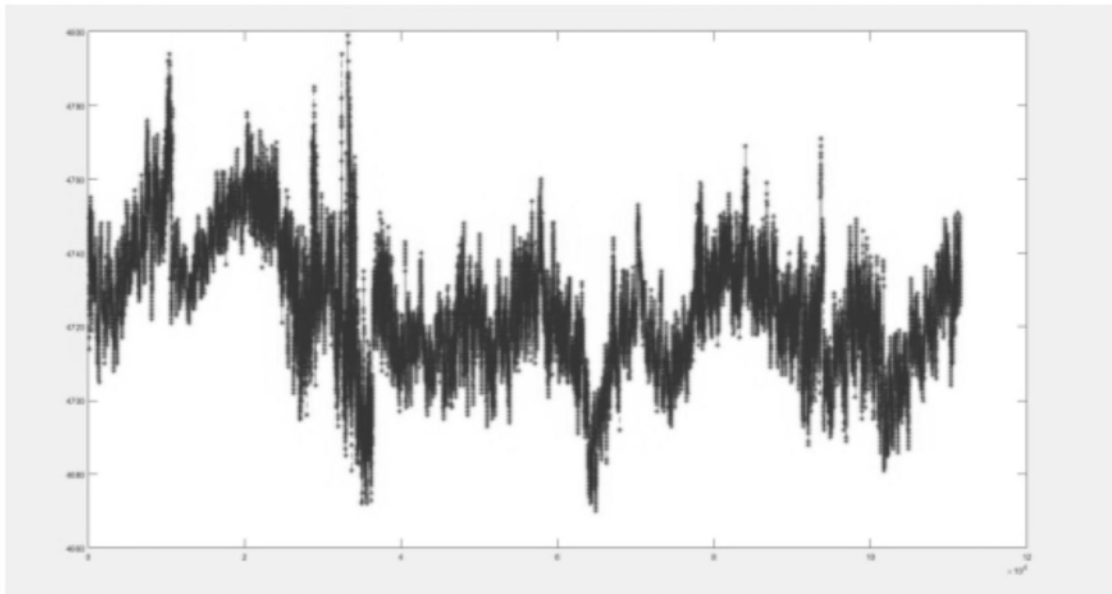


图4

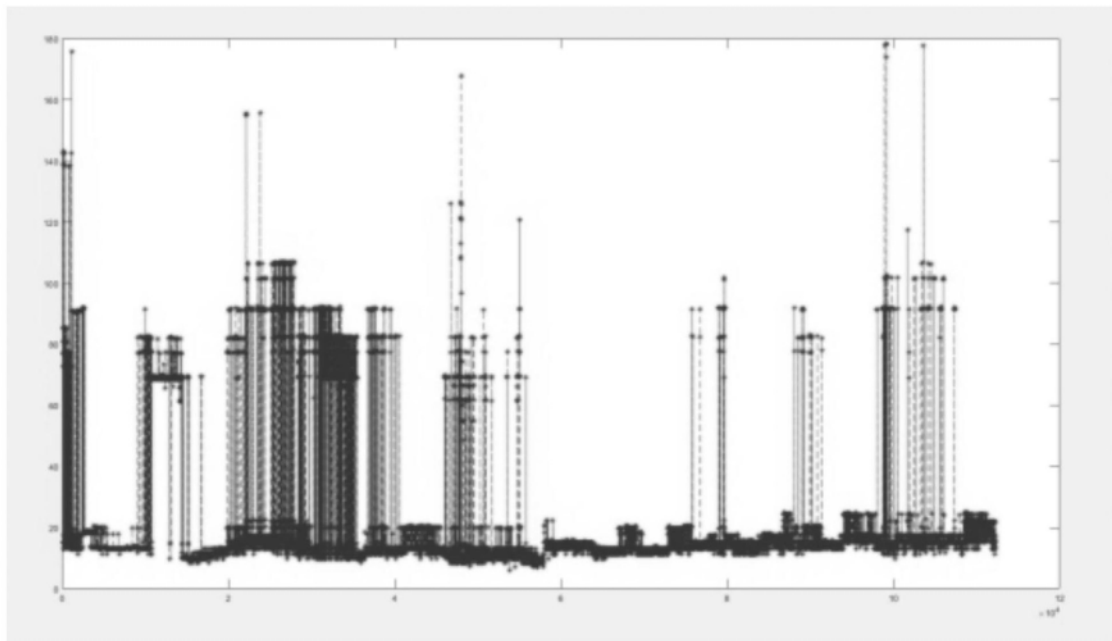


图5