



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 108181632 B

(45)授权公告日 2019.09.10

(21)申请号 201711483195.X

审查员 王冰

(22)申请日 2017.12.29

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 108181632 A

(43)申请公布日 2018.06.19

(73)专利权人 武汉大学

地址 430072 湖北省武汉市武昌区珞珈山
武汉大学

(72)发明人 姜卫平 陈渠森 陈华 鞠博晓

(74)专利代理机构 武汉科皓知识产权代理事务
所(特殊普通合伙) 42222

代理人 张火春

(51)Int.Cl.

G01S 19/23(2010.01)

G01S 19/37(2010.01)

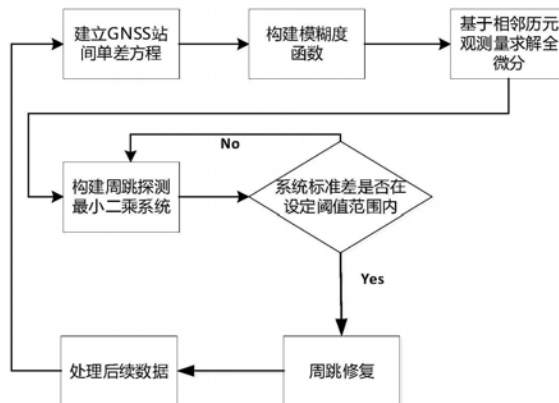
权利要求书1页 说明书5页 附图2页

(54)发明名称

基于模糊度全微分的GNSS单频数据周跳探测与修复方法

(57)摘要

本发明公开了基于模糊度全微分的GNSS单频数据周跳探测与修复方法,包括:基于GNSS站间的单差观测方程构建模糊度函数;基于相邻两个历元的GNSS站间单差载波相位观测值,在时间域上对模糊度函数求解全微分,全微分函数周跳量函数;基于周跳量函数,构建周跳探测的最小二乘系统,基于最小二乘系统的标准差变化来探测周跳;当探测到发生周跳时;利用所有共视卫星的GNSS站间单差载波相位观测值及其理论值修复周跳。本发明解决了现有单频GNSS周跳探测与修复方法难以可靠处理载体运动规律复杂、周跳数值较小等情况的问题,具有理论严密、模型简单、易于实现、扩展性强、精度高等特点,可广泛应用于GNSS大规模市场。



1. 基于模糊度全微分的GNSS单频数据周跳探测与修复方法,其特征是,包括:

S100 基于GNSS站间的单差观测方程构建模糊度函数 $N = (B \cdot X + A - \lambda \cdot \varphi + \varepsilon) / \lambda$,其中,N表示载波相位模糊度;B表示单差观测方程线性化后的系数矩阵;X为待估参数,包含接收机的位置和钟差的矩阵;A表示大气残差; λ 表示载波相位波长; φ 表示单差观测方程线性化后GNSS站间单差载波相位观测值; ε 表示载波相位观测噪声;

S200 基于相邻两个历元k、k-1的GNSS站间单差载波相位观测值,在时间域上对模糊度函数求解全微分,全微分函数即历元k对应的周跳量函数;

S300 基于周跳量函数,构建周跳探测的最小二乘系统 $\lambda \cdot \Delta \varphi_k = B_k \cdot \Delta X_k + \Delta \varepsilon_k$,基于最小二乘系统的标准差变化来探测周跳;当探测到发生周跳时,执行步骤S400;其中, $\Delta \varphi_k$ 表示对历元k下线性化后的GNSS站间单差载波相位观测值 φ_k 求微分; B_k 表示历元k下单差观测方程线性化后的系数矩阵; ΔX_k 表示对历元k下的待估参数 X_k 求微分; $\Delta \varepsilon_k$ 表示对历元k下的载波相位观测噪声 ε_k 求微分;

S400 利用未发生周跳的共视卫星的GNSS站间单差载波相位观测值构建观测方程,并解算接收机的位置和钟差,利用接收机的位置和钟差反求所有共视卫星的GNSS站间单差载波相位观测值的理论值,基于所有共视卫星的GNSS站间单差载波相位观测值及其理论值修复周跳;

步骤S300中基于最小二乘系统的标准差变化来探测周跳,具体为:

判断最小二乘系统的标准差 $\hat{\sigma}_0$ 是否大于预设的阈值,若大于,则判定发生周跳,否则认为没有周跳;

步骤S400中基于所有共视卫星的GNSS站间单差载波相位观测值及其理论值修复周跳,具体为:使周跳 $CS_k = Int(\Delta \varphi_k^* - \Delta \varphi_k)$,其中, $\Delta \varphi_k$ 和 $\Delta \varphi_k^*$ 分别表示GNSS站间单差载波相位的观测值和理论值。

基于模糊度全微分的GNSS单频数据周跳探测与修复方法

技术领域

[0001] 本发明属于卫星导航技术领域,具体涉及基于模糊度全微分的GNSS单频数据周跳探测与修复方法。

背景技术

[0002] 近年来,单频GNSS定位技术由于其低廉的硬件成本,在无人机系统、基于位置的服务、智能网联汽车等领域的应用日益广泛。理论上来说,在中短基线(即基线长度不大于20公里)应用中,当模糊度固定以后,仅使用单频GNSS数据即可获得高精度的基线解算结果。

[0003] 周跳是影响GNSS定位性能的重要因素之一,它是GNSS卫星信号在受到周围建筑物遮挡、或活跃电离层干扰等时载波相位观测量产生的整周跳变。若周跳无法被正确的探测和修复,则GNSS定位时的载波相位观测量会产生较大偏差,定位结果的准确性和可靠性将受到严重的影响。

[0004] 目前较为常用的周跳探测和修复的方法多基于双频或三频数据,通过不同频率不同类型观测值的线性组合来消除接收机位置参数的影响,进而构建周跳探测变量;通过周跳探测变量数值上的异常变化来进行周跳探测及修复。然而,对于单频数据而言,无法通过不同频率的线性组合来消除接收机位置参数的影响。针对此问题,有学者提出了利用伪距-载波相位组合、多普勒-载波相位组合等来消除位置参数的影响,或使用数值模拟方法来模拟推估位置参数等。这些方法在载体运动规律简单、周跳数值较大的情况下可取得一定效果,但在载体运动规律复杂、周跳数值较小(例如1周或者0.5周)的情况下效果较差。

[0005] 因此,发展一种在载体运动规律复杂、周跳数值较小等情况下仍具有高可靠性的单频GNSS数据周跳探测与修复方法,对进一步拓展单频GNSS大规模市场的应用,满足实际生产生活中对于高精度低成本高可靠性GNSS定位服务的需求具有重要意义。

发明内容

[0006] 本发明的目的是提供基于模糊度全微分的GNSS单频数据周跳探测与修复方法及系统,该方法及系统在载体运动规律复杂、周跳数值较小的情况下,仍能进行高可靠性的周跳探测与修复。

[0007] 本发明提供的基于模糊度全微分的GNSS单频数据周跳探测与修复方法,包括:

[0008] S100基于GNSS站间的单差观测方程构建模糊度函数 $N = (B \cdot X + A - \lambda \cdot \varphi + \varepsilon) / \lambda$,其中,N表示载波相位模糊度;B表示单差观测方程线性化后的系数矩阵;X为待估参数,包含接收机的位置和钟差的矩阵;A表示大气残差; λ 表示载波相位波长; φ 表示线性化后的GNSS站间单差载波相位观测量; ε 表示载波相位观测噪声;

[0009] S200基于相邻两个历元k、k-1的GNSS站间单差载波相位观测量,在时间域上对模糊度函数求解全微分,全微分函数即历元k对应的周跳量函数;

[0010] S300基于周跳量函数,构建周跳探测的最小二乘系统 $\lambda \cdot \Delta \varphi_k = B_k \cdot \Delta X_k + \Delta \varepsilon_k$,基于

最小二乘系统的标准差变化来探测周跳；当探测到发生周跳时，执行步骤S400；其中， $\Delta\varphi_k$ 表示对历元k下线性化后的GNSS站间单差载波相位观测值 φ_k 求微分； B_k 表示历元k下单差观测方程线性化后的系数矩阵； ΔX_k 表示对历元k下的待估参数 X_k 求微分； $\Delta\varepsilon_k$ 表示对历元k下的载波相位观测噪声 ε_k 求微分；

[0011] S400利用未发生周跳的共视卫星的GNSS站间单差载波相位观测值构建观测方程，并解算接收机的位置和钟差，利用接收机的位置和钟差反求所有共视卫星的GNSS站间单差载波相位观测值的理论值，基于所有共视卫星的GNSS站间单差载波相位观测值及其理论值修复周跳。

[0012] 进一步的，历元k对应的全微分函数 dN_k 为：

$$[0013] \quad dN_k = (B_k \cdot \Delta X_k + \Delta B_k \cdot X_{k-1} + \Delta A_k - \lambda \cdot \Delta\varphi_k + \Delta\varepsilon_k) / \lambda$$

[0014] 其中， B_k 表示历元k下单差观测方程线性化后的系数矩阵； X_{k-1} 表示历元k-1下的待估参数； ΔX_k 表示对历元k下的待估参数 X_k 求微分； ΔB_k 表示对 B_k 求微分； ΔA_k 表示对历元k下的大气残差 A_k 求微分； $\Delta\varphi_k$ 表示对历元k下线性化后的GNSS站间单差载波相位观测值 φ_k 求微分； $\Delta\varepsilon_k$ 表示对历元k下的载波相位观测噪声求微分。

[0015] 进一步的，步骤S300中基于最小二乘系统的标准差变化来探测周跳，具体为：

[0016] 判断最小二乘系统的标准差 $\hat{\sigma}_0$ 是否大于预设的阈值，若大于，则判定发生周跳。

[0017] 进一步的，步骤S400中基于所有共视卫星的GNSS站间单差载波相位观测值及其理论值修复周跳，具体为：使周跳 $CS_k = Int(\Delta\varphi_k^* - \Delta\varphi_k)$ ，其中， $\Delta\varphi_k$ 和 $\Delta\varphi_k^*$ 分别表示GNSS站间单差载波相位的观测值和理论值。

[0018] 本发明提供的基于模糊度全微分的GNSS单频数据周跳探测与修复系统，包括：

[0019] 第一模块，用来基于GNSS站间的单差观测方程构建模糊度函数 $N = (B \cdot X + A - \lambda \cdot \varphi + \varepsilon) / \lambda$ ，其中，N表示载波相位模糊度；B表示单差观测方程线性化后的系数矩阵；X为待估参数，包含接收机的位置和钟差的矩阵；A表示大气残差； λ 表示载波相位波长； φ 表示线性化后的GNSS站间单差载波相位观测值； ε 表示载波相位观测噪声；

[0020] 第二模块，用来基于相邻两个历元k、k-1的GNSS站间单差载波相位观测值，在时间域上对模糊度函数求解全微分，全微分函数即历元k对应的周跳量函数；

[0021] 第三模块，用来基于周跳量函数，构建周跳探测的最小二乘系统 $\lambda \cdot \Delta\varphi_k = B_k \cdot \Delta X_k + \Delta\varepsilon_k$ ，基于最小二乘系统的标准差变化来探测周跳；当探测到发生周跳时，执行步骤S400；其中， $\Delta\varphi_k$ 表示对历元k下线性化后的GNSS站间单差载波相位观测值 φ_k 求微分； B_k 表示历元k下单差观测方程线性化后的系数矩阵； ΔX_k 表示对历元k下的待估参数 X_k 求微分； $\Delta\varepsilon_k$ 表示对历元k下的载波相位观测噪声 ε_k 求微分；

[0022] 第四模块，用来利用未发生周跳的共视卫星的GNSS站间单差载波相位观测值构建观测方程，并解算接收机的位置和钟差，利用接收机的位置和钟差反求所有共视卫星的GNSS站间单差载波相位观测值的理论值，基于所有共视卫星的的GNSS站间单差载波相位观测值及其理论值修复周跳。

[0023] 和现有技术相比，本发明具有如下优点和有益效果：

[0024] 本发明基于站间单差观测值构建关于模糊度的观测方程，通过对观测方程求微分

从而构建周跳量,再结合最小二乘估计法,通过系统标准差来进行周跳探测以及后续周跳修复。本发明解决了现有单频GNSS周跳探测与修复方法难以可靠处理载体运动规律复杂、周跳数值较小等情况的问题,具有理论严密、模型简单、易于实现、扩展性强、精度高等特点,可广泛应用于智能网联汽车、大型建筑物变形监测等GNSS大规模市场。

附图说明

[0025] 图1是本发明方法的具体流程图;

[0026] 图2是无周跳情况下最小二乘系统标准差数值情况;

[0027] 图3是添加周跳后最小二乘系统标准差变化情况;

[0028] 图4是周跳修复过程所得周跳浮点解,均分布在0.8~1.2周范围内,符合周跳取整要求。

具体实施方式

[0029] 为了更清楚地说明本发明和/或现有技术中的技术方案,下面将对照附图说明本发明的具体实施方式。显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图,并获得其他的实施方式。

[0030] 参见图1,本发明方法的具体步骤如下:

[0031] S100基于GNSS站间的单差观测方程构建模糊度函数。

[0032] 所述GNSS站间的单差观测方程见式(1):

$$[0033] \quad \varphi_{ij}^l = \frac{\Delta\rho_{ij}^l}{\lambda} + f \cdot \Delta t_{ij} + \frac{\Delta\rho_{ij,ion}^l}{\lambda} + \frac{\Delta\rho_{ij,trop}^l}{\lambda} + \Delta N_{ij}^l + \varepsilon \quad (1)$$

[0034] 式(1)中:

[0035] φ_{ij}^l 表示GNSS接收机i、j对卫星l的GNSS站间单差载波相位观测值;

[0036] λ 表示载波相位波长;

[0037] f 表示载波频率;

[0038] $\Delta\rho_{ij}^l$ 表示GNSS接收机i、j对卫星l的站星几何距离之差, $\Delta\rho_{ij}^l = \rho_j^l - \rho_i^l$, ρ_i^l 和 ρ_j^l 分别表示GNSS接收机i、j对卫星l的站星几何距离;

[0039] Δt_{ij} 表示GNSS接收机i、j的钟差之差, $\Delta t_{ij} = \delta t_j - \delta t_i$, δt_i 和 δt_j 分别表示GNSS接收机i、j的钟差;

[0040] $\Delta\rho_{ij,ion}^l$ 表示GNSS接收机i、j对卫星l的电离层延迟改正之差, $\Delta\rho_{ij,ion}^l = \delta\rho_{j,ion}^l - \delta\rho_{i,ion}^l$, $\delta\rho_{i,ion}^l$ 和 $\delta\rho_{j,ion}^l$ 分别表示GNSS接收机i、j对卫星l的电离层延迟改正;

[0041] $\Delta\rho_{ij,trop}^l$ 表示GNSS接收机i、j对卫星l的对流层延迟改正之差, $\Delta\rho_{ij,trop}^l = \delta\rho_{j,trop}^l - \delta\rho_{i,trop}^l$, $\delta\rho_{i,trop}^l$ 和 $\delta\rho_{j,trop}^l$ 分别表示GNSS接收机i、j对卫星l的对流层延迟改正;

[0042] ΔN_{ij}^l 表示GNSS接收机i、j对卫星l的初始整周未知数之差, $\Delta N_{ij}^l = N_j^l - N_i^l$, N_i^l 和 N_j^l 分别表示GNSS接收机i、j对卫星l的初始整周未知数;

[0043] ε 表示载波相位观测噪声。

[0044] 基于GNSS站间单差观测方程所构建的模糊度函数见式(2)：

$$[0045] \quad N = (B \cdot X + A - \lambda \cdot \varphi + \varepsilon) / \lambda \quad (2)$$

[0046] 式(2)中：

[0047] N表示载波相位模糊度；

[0048] B表示单差观测方程线性化后的系数矩阵，简记为线性化系数矩阵；

[0049] X表示待估参数，包括GNSS接收机的位置和钟差；

[0050] A表示大气残差，包括对流层延迟和电离层误差；

[0051] φ 表示单差观测方程线性化后GNSS站间单差载波相位观测值。

[0052] S200基于相邻两个历元的GNSS站间单差载波相位观测值，对模糊度函数在时间域上求解全微分，全微分函数即周跳量函数。

[0053] 假设两个相邻的观测历元记为历元k和历元k-1，对模糊度函数求全微分 dN_k ：

$$[0054] \quad CS_k = dN_k = (B_k \cdot \Delta X_k + \Delta B_k \cdot X_{k-1} + \Delta A_k - \lambda \cdot \Delta \varphi_k + \Delta \varepsilon_k) / \lambda \quad (3)$$

[0055] 式(3)中：

[0056] Δ 表示对变量求微分， ΔX_k 、 ΔB_k 、 ΔA_k 、 $\Delta \varphi_k$ 、 $\Delta \varepsilon_k$ 分别表示对历元k下的X、B、A、 φ 、 ε 求微分；

[0057] B_k 表示历元k下的线性化系数矩阵；

[0058] X_{k-1} 表示历元k-1下的待估参数。

[0059] 载波相位模糊度在时间域上的全微分即可看作历元k对应的周跳 CS_k ，正常情况下，载波相位模糊度在时间域上数值恒定，即周跳为零；反之，若载波相位模糊度在时间域上不为0的整数，即认为发生了周跳。

[0060] S300构建周跳探测最小二乘系统，并基于最小二乘系统的标准差变化来探测周跳。

[0061] 式(3)中周跳 CS_k 受线性化误差 $\Delta B_k \cdot X_{k-1}$ 以及差分大气残差的影响。目前实际应用中均采用较高的采样率，假设采样率为1Hz，研究表明，即使在电离层活动剧烈情况下，1s采样间隔造成的大气残差变化仍可以忽略。以GPS卫星为例，对于线性化误差，卫星速度约为4km/s，一般伪距单点定位误差设为10m，可使用公式(4)进行近似计算线性化误差：

$$[0062] \quad \Delta B_k \cdot X_{k-1} \leq |\Delta B_k| \cdot |X_{k-1}| \approx \frac{4km/s \times 1s \times 10m}{20200km} \approx 0.002m \approx 0.01cycle \quad (4)$$

[0063] 由式(4)可看出，线性化造成的误差量级与观测噪声水平相当，在高频应用时可以忽略，此时，若系统周跳为0，则可建立周跳探测的最小二乘系统：

$$[0064] \quad \lambda \cdot \Delta \varphi_k = B_k \cdot \Delta X_k + \Delta \varepsilon_k \quad (5)$$

[0065] 最小二乘系统的标准差 $\hat{\sigma}_0$ 可表述为：

$$[0066] \quad \hat{\sigma}_0 = \sqrt{\frac{V^T \cdot P \cdot V}{n-m-3}} \quad (6)$$

[0067] 式(6)中：

[0068] V表示待估参数残差；

[0069] P表示权系数矩阵,本实施例中使用等权模型,即P为单位矩阵;

[0070] n表示观测方程数;

[0071] m表示观测GNSS系统数,对应吸收了接收机硬件延迟等影响后的接收机钟差参数数量。

[0072] 理论上,在无周跳发生时,残差V一般为几个毫米,所得标准差 $\hat{\sigma}_0$ 约几个毫米。然而,若有周跳发生,假设发生一周误差,GPS L1波长为19cm,即式(5)所示的最小二乘系统中某一组观测方程会出现19cm的偏差,此时最终解算的到的残差V将显著增大,并造成标准差 $\hat{\sigma}_0$ 显著增大。现设置标准差 $\hat{\sigma}_0$ 探测周跳的阈值为 σ_0 ,即最小二乘系统的标准差 $\hat{\sigma}_0$ 大于 σ_0 时,认为系统产生周跳,进行后续的周跳修复;反之,则认为未发生周跳。

[0073] 本实施例使用289公里场基线的1Hz GPS数据,其无周跳和添加以后对应的系统标准差的变化见图2~3所示。

[0074] 步骤4,周跳修复。

[0075] 假设有m个GNSS系统的n颗共视卫星,历元k和k-1共同观测到的卫星称为共视卫星,其中,t颗卫星无周跳, $t \geq m+4$,则使用该t颗卫星的观测值构建最小二乘系统方程:

$$[0076] \quad \lambda \cdot \Delta \varphi_k' = B_k' \cdot \Delta X_k' + \Delta \varepsilon_k' \quad (7)$$

[0077] 式(7)中:

[0078] $\Delta \varphi_k'$ 、 B_k' 、 $\Delta X_k'$ 、 $\Delta \varepsilon_k'$ 分别表示无周跳卫星对应的 $\Delta \varphi_k'$ 、 B_k' 、 $\Delta X_k'$ 、 $\Delta \varepsilon_k'$ 。

[0079] 此时,解算出待估参数 $\Delta X_k'$,即可反求所有n颗共视卫星载波相位观测量的理论值 $\Delta \varphi_k''$ 为:

$$[0080] \quad \Delta \varphi_k'' = B_k' \cdot \Delta X_k' / \lambda \quad (8)$$

[0081] 则周跳可表示为:

$$[0082] \quad CS_k = \text{Int}(\Delta \varphi_k'' - \Delta \varphi_k') \quad (9)$$

[0083] 式(9)中,Int表示取整运算。

[0084] 本实施例中,修复后的周跳 $\Delta \varphi_k'' - \Delta \varphi_k'$ 的浮点数值见图4,均在0.8-1.2周范围内,满足取整条件,将浮点数值按照式(9)取整,即得整数周跳。

[0085] 应当理解的是,本说明书未详细阐述的部分均属于现有技术。

[0086] 应当理解的是,上述针对较佳实施例的描述较为详细,并不能因此而认为是对本发明保护范围的限制,本领域的普通技术人员在本发明的启示下,在不脱离本发明权利要求所保护的范围情况下,还可以做出替换或变形,均落入本发明的保护范围之内,本发明的请求保护范围应以所附权利要求为准。

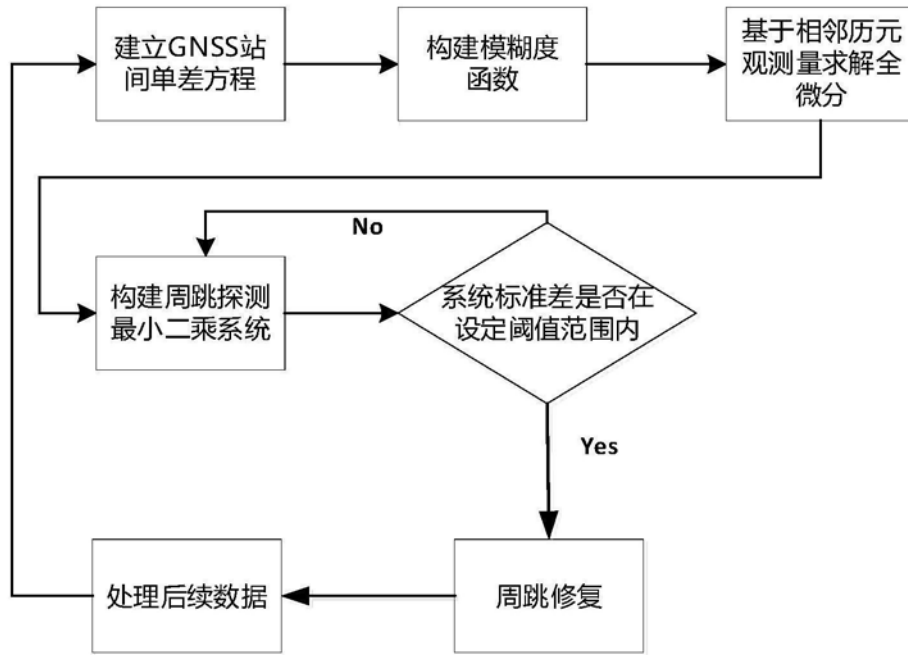


图1

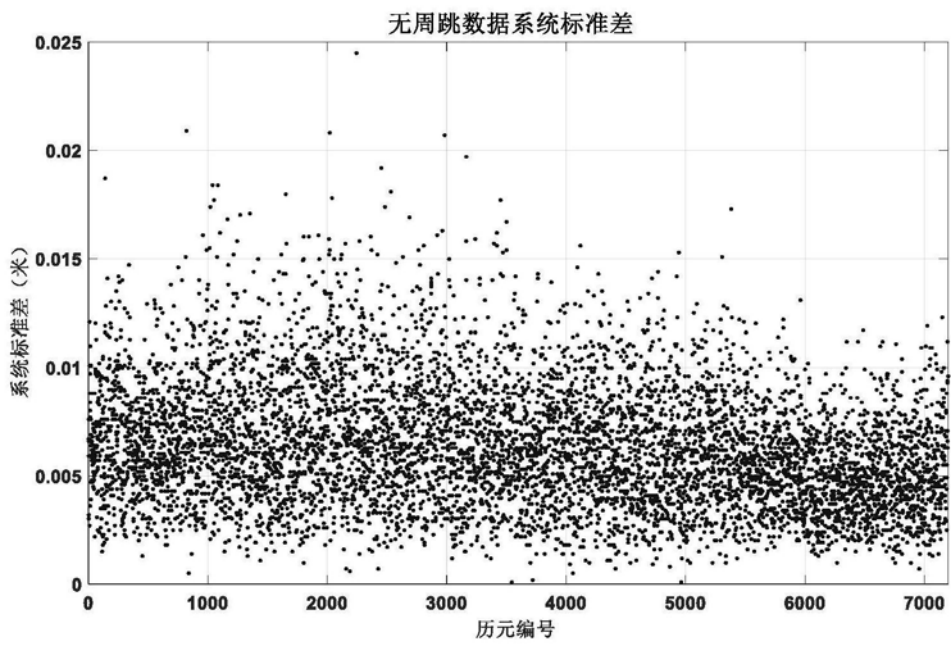


图2

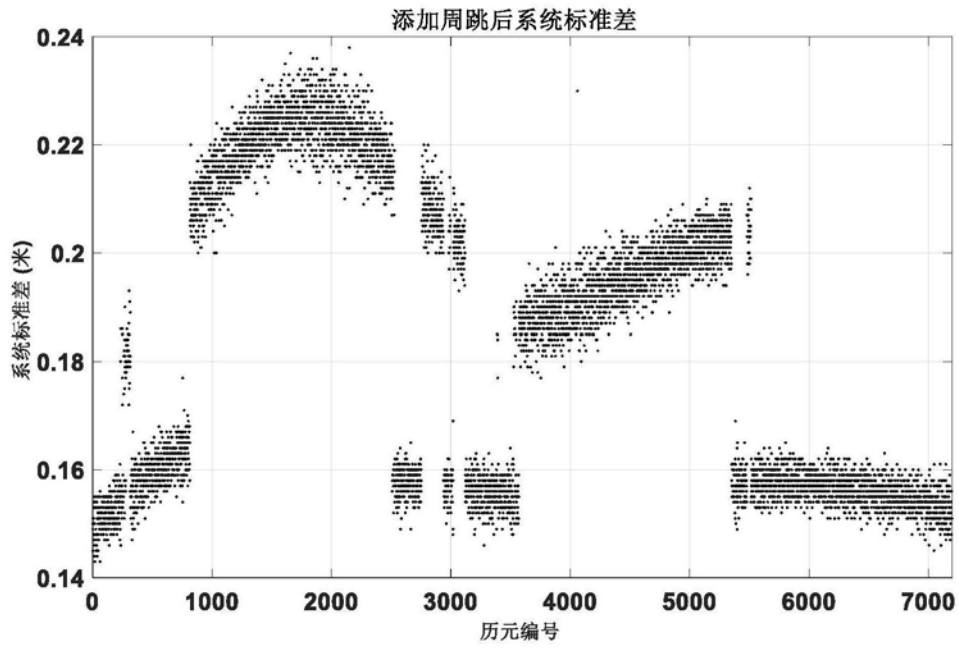


图3

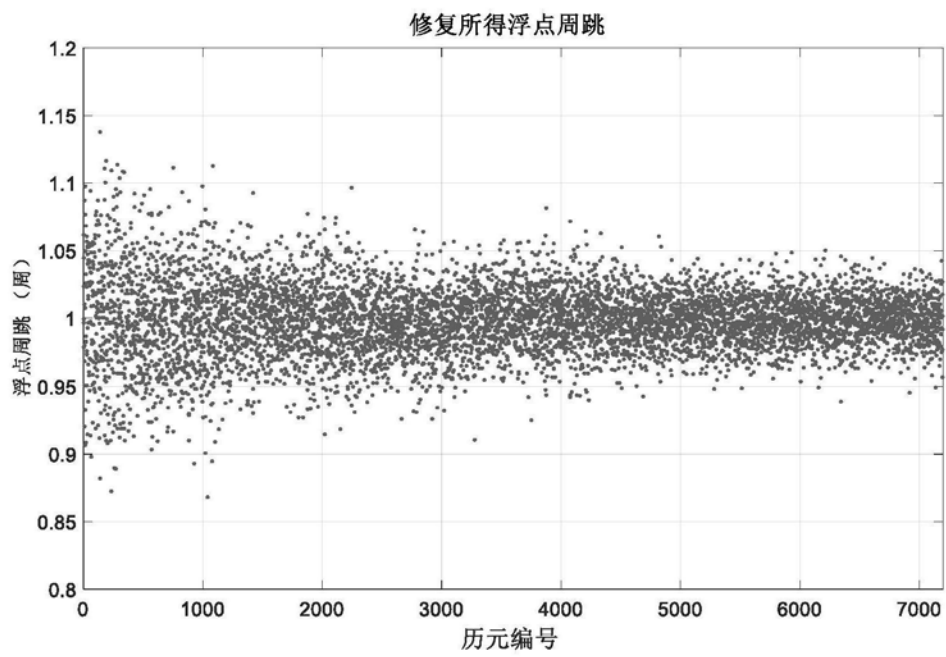


图4