



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104796142 B

(45)授权公告日 2019.04.12

(21)申请号 201510020193.1

(51)Int.CI.

(22)申请日 2015.01.15

H03L 7/26(2006.01)

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 104796142 A

(56)对比文件

(43)申请公布日 2015.07.22

US 5274545 A, 1993.12.28,

(30)优先权数据

CN 103363994 A, 2013.10.23,

61/927,860 2014.01.15 US
14/313,705 2014.06.24 US

CN 103424755 A, 2013.12.04,

US 4899117, 1990.02.06,

审查员 吴卿

(73)专利权人 波音公司

地址 美国伊利诺伊州

(72)发明人 R·李 K·卡西米

(74)专利代理机构 北京纪凯知识产权代理有限公司 11245

代理人 赵蓉民

权利要求书1页 说明书16页 附图15页

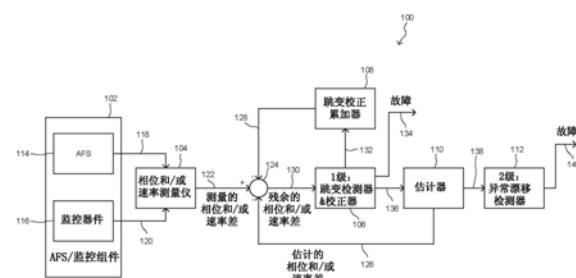
(54)发明名称

多级/多阈值/多持久性的GPS/GNSS原子钟

监控

(57)摘要

本发明涉及多级/多阈值/多持久性的GPS/GNSS原子钟监控。本发明公开了用于监控GPS/GNSS原子钟的方法和装置。示例方法包括建立原子频标(AFS)和监控器件之间的测量的差。该方法还包括对AFS和监控器件之间的估计的差进行建模，并且基于测量的差和估计的差分模型计算残余信号。此外，该方法包括由第一检测器在多个阈值处分析残余信号，每个阈值具有定义在指示相位跳变、速率跳变或者加速度误差中的一个或多个之前超过阈值的次数的相应的持久性。此外，该方法包括由第二检测器在多个阈值处分析估计的差分模型的参数，每个阈值具有定义在指示漂移之前超过漂移阈值的次数的相应的持久性。



1. 一种方法, 其包括:

建立原子频标 (AFS) 信号和监控器件信号之间的测量的差;

对所述原子频标 (AFS) 信号和所述监控器件信号之间的估计的差分模型进行建模;

基于所述测量的差和所述估计的差分模型计算残余信号;

由第一检测器在多个阈值处分析所述残余信号, 每个所述阈值具有相应的持久性, 该持久性定义在相位跳变、速率跳变或者加速度误差中的一个或多个被指示之前超过阈值的次数; 以及

由第二检测器在多个阈值处分析所述估计的差分模型的参数, 每个所述阈值具有相应的持久性, 该持久性定义在漂移被指示之前超过漂移阈值的次数。

2. 根据权利要求1所述的方法, 其进一步包括由投票体系结构确定跳变的源或者所述漂移的源。

3. 根据权利要求1所述的方法, 其中所述参数是速率偏差。

4. 根据权利要求1-3中的任一项所述的方法, 其中所述监控器件是独立时钟。

5. 根据权利要求4所述的方法, 其中所述独立时钟是压控振荡器或者数控振荡器。

6. 根据权利要求4所述的方法, 其中所述独立时钟是晶体振荡器和压控振荡器或者数控振荡器。

7. 根据权利要求4所述的方法, 其中所述独立时钟是晶体振荡器。

8. 根据权利要求7所述的方法, 其中所述监控器件信号是所述原子频标 (AFS) 的延迟的时钟信号。

9. 根据权利要求8所述的方法, 其中使用基于振荡器的延迟机制产生所述延迟的时钟信号。

10. 根据权利要求8所述的方法, 其中使用延迟线产生所述延迟的时钟信号。

11. 一种装置, 其包括:

测量仪, 其用于测量原子频标 (AFS) 信号和监控器件信号之间的差;

估计器, 其用于对所述原子频标 (AFS) 信号与所述监控器件信号之间的估计的差进行建模;

分析器, 其用于基于所述测量的差和所述估计的差计算残余信号;

第一检测器, 其用于分析在多个阈值处的所述残余信号, 每个所述阈值具有相应的持久性, 该持久性定义在相位跳变、速率跳变或者加速度误差中的一个或多个被指示之前超过阈值的次数; 以及

第二检测器, 其用于分析在多个阈值处的所述估计的差的参数, 每个所述阈值具有相应的持久性, 该持久性定义在漂移被指示之前超过漂移阈值的次数。

12. 根据权利要求11所述的装置, 其进一步包括用于确定跳变的源或者所述漂移的源的投票体系结构。

13. 根据权利要求11或12所述的装置, 其中所述参数是速率偏差。

14. 根据权利要求13所述的装置, 其中所述监控器件是独立时钟。

15. 根据权利要求14所述的装置, 其中所述监控器件信号是所述原子频标 (AFS) 的延迟的时钟信号。

多级/多阈值/多持久性的GPS/GNSS原子钟监控

技术领域

[0001] 本发明总体涉及全球定位系统 (GPS) 和全球导航卫星系统 (GNSS) ,更具体地,本发明涉及使用多级、多阈值以及多持久性分析的GPS/GNSS原子钟监控。

背景技术

[0002] 美国全球定位系统 (GPS) 是一类GNSS系统,其包括沿地球轨道运行以向GPS/GNSS接收机或者导航设备提供导航和定位信号的空间飞行器(例如,卫星)的星座。公众和政府机构使用能够接收和使用GPS/GNSS信号的数百万的GPS/GNSS接收机或者导航设备。

[0003] GPS/GNSS接收机通过精确定时由GPS/GNSS飞行器发送的信号来计算其自身位置。每个空间飞行器不断地传输包括以下内容的导航消息: (1) 消息被传输的时间和 (2) 在消息传输时刻空间飞行器的位置。接收机分析从最少四个GPS/GNSS空间飞行器接收的导航消息。接收机确定每个导航消息的传送时间,并且使用光速计算距离每个空间飞行器的各自的距离。已知从接收机到每个空间飞行器的距离和每个空间飞行器的相对位置,接收机以三个绝对空间坐标和一个绝对时间坐标确定自身位置。

[0004] 精确定时对GPS/GNSS系统中的高精度跟踪和导航是关键的。例如, GPS/GNSS空间飞行器使用高精度原子频标 (AFS) 用于定时,例如,铷原子钟。AFS可以表现各种时钟异常,该时钟异常如果在GPS/GNSS导航和跟踪中未被监测到会引入重大错误。

发明内容

[0005] 本文公开的示例方法包括建立原子频标 (AFS) 和监控器件之间的差。该方法还包括对AFS和监控器件之间的估计的差模型进行建模,并且基于测量的差和估计的差分模型计算残余信号。此外,该方法包括通过第一检测器在多个阈值处分析残余信号,每个阈值具有定义在指示相位跳变、速率跳变或者加速度误差中的一个或多个之前超过阈值的次数的相应的持久性。此外,该方法包括通过第二检测器在多个阈值处分析估计的差分模型的参数,每个阈值具有定义在指示漂移之前超过漂移阈值的次数的相应的持久性。

[0006] 本文公开的示例装置包括测量仪、估计器、分析器、第一检测器以及第二检测器。测量仪用于测量原子频标 (AFS) 和监控器件之间的差。估计器用于对AFS与监控器件之间的估计的差进行建模。分析器用于基于测量的差和估计的差计算残余信号。第一检测器用于在多个阈值处分析残余信号,每个阈值具有定义在指示相位跳变、速率跳变或者加速度误差中的一个或多个之前超过阈值的次数的相应的持久性。第二检测器用于在多个阈值处分析估计的差的参数,每个阈值具有定义在指示漂移之前超过漂移阈值的次数的相应的持久性。

[0007] 另一示例方法包括建立原子频标 (AFS) 和监控器件之间的测量的差,并且对AFS和监控器件之间的估计的差分模型进行建模。示例方法还包括如果估计的差分模型的参数超过相应的持久性处的阈值,则通过检测器检测漂移,其中持久性定义在指示漂移之前超过漂移阈值的次数。

[0008] 本发明可以包含一种方法,该方法可以包括建立原子频标(AFS) 和监控器件之间的测量的差;对AFS和监控器件之间的估计的差分模型进行建模;基于测量的差和估计的差分模型计算残余信号;通过第一检测器在多个阈值处分析残余信号,每个阈值具有定义在指示相位跳变、速率跳变或者加速度误差中的一个或多个之前超过阈值的次数的相应的持久性;以及通过第二检测器在多个阈值处分析估计的差分模型的参数,每个阈值具有定义在指示漂移之前超过漂移阈值的次数的相应的持久性。该方法还可以包括通过投票结构确定跳变源或者漂移源以改进性能。参数可以是速率偏差以提高效率。监控器件可以是独立时钟。独立时钟可以是压控振荡器或者数控振荡器。独立时钟可以是晶体振荡器和压控振荡器或者数控振荡器。独立时钟可以是晶体振荡器。监控器件可以是AFS的延迟的时钟信号。延迟的时钟信号使用基于振荡器的延迟机制产生。延迟的时钟信号可以使用延迟线产生以提高效率。

[0009] 本发明可以包含一种装置,该装置可以包括用于测量原子频标(AFS) 和监控器件之间的差的测量仪;用于建模AFS与监控器件之间的估计的差的估计器;用于基于测量的差和估计的差计算残余信号的分析器;第一检测器,其用于在多个阈值处分析残余信号,每个阈值具有定义在指示相位跳变、速率跳变或者加速度误差中的一个或多个之前超过阈值的次数的相应的持久性;以及第二检测器,其用于在多个阈值处分析估计的差的参数,每个阈值具有定义在指示漂移之前超过漂移阈值的次数的相应的持久性。该装置还可以包括用于确定跳变源或者漂移源的投票结构。参数可以是速率偏差。监控器件可以是独立时钟。监控器件可以是AFS的延迟的时钟信号。

[0010] 本发明可以是一种方法,该方法可以包括建立原子频标(AFS) 和监控器件之间的测量的差;建立AFS和监控器件之间的估计的差分模型;以及如果估计的差分模型的参数超过相应持久性处的阈值,则通过检测器检测漂移,其中持久性定义在指示漂移之前超过漂移阈值的次数。该方法还可以包括通过检测器在多个阈值处分析估计的差分模型的参数,每个阈值具有定义在指示漂移之前超过漂移阈值的次数的相应持久性。参数可以是速率偏差。监控器件可以是独立时钟。监控器件可以是AFS的延迟的时钟信号。这些选择中的每个可以提高本发明的性能和精确性。

[0011] 已经讨论的特征、功能以及优点可以在多种示例中独立地实现,或者可以在其他示例中被合并,其他示例的进一步的细节可以参考以下描述和附图而得知。

附图说明

- [0012] 图1示出示例原子钟监控系统的框图。
- [0013] 图2示出第二示例原子钟监控系统的框图。
- [0014] 图3示出包括独立基于时钟监控方法的示例原子钟监控系统。
- [0015] 图4示出包括基于延迟方法的示例原子钟监控系统。
- [0016] 图5示出使用压控晶体振荡器(VCXO)或者数控晶体振荡器(NCO)的独立基于时钟监控系统。
- [0017] 图6示出使用高性能晶体振荡器(CXO)连同相对低成本的VCXO或者NCO以形成锁相环的独立的基于时钟的监控系统。
- [0018] 图7示出使用高性能CXO而无需应用校正的独立的基于时钟的监控系统。

- [0019] 图8示出示例顶级投票体系结构。
- [0020] 图9示出代表用于实现时钟监控系统的示例方法的流程图。
- [0021] 图10示出原始的残余速率差曲线。
- [0022] 图11示出包括跳变校正的原始的残余速率差曲线。
- [0023] 图12示出估计的时钟偏差曲线。
- [0024] 图13示出包括跳变校正的估计的时钟偏差曲线。
- [0025] 图14示出残余速率差曲线。
- [0026] 图15示出来自2级检测器的结果。
- [0027] 图16是能够执行机器可读指令以实现图9的指令的示例处理平台的框图。
- [0028] 在适当的情况下,贯穿附图和随附的书面描述,同一附图标记将被用来指相同或者相似的部件。

具体实施方式

[0029] 全球定位系统(GPS)和全球导航卫星系统(GNSS)使用原子频标(AFS)例如铷原子钟来维持精确定时。AFS例如铷原子钟遭受各种异常,包括频率跳变、相位跳变、频率速率跳变以及异常频率漂移。诸如这些的异常如果不能够被正确检测并且处理,可能使得终端用户确定他们的位置、速率以及时间带有显著误差。

[0030] 时钟异常的监控、检测以及响应可以被执行在具有与每个位置关联的不同的性能特征的终端用户的GPS/GNSS接收机、GPS/GNSS地面控制部分或者GPS/GNSS空间飞行器(例如,卫星)处。

[0031] 本文公开的示例方法和装置使能对空间飞行器机载的GPS/GNSS原子钟异常的监控、检测以及响应。机载时钟监控提供最有效的及时报警(time-to-alert)、服务可用性以及连续性。通过识别产生时钟信号的机载的时钟异常,异常可以迅速被检测并且可以立刻传输警报。在某些示例中,时钟异常可以在错误信号被传送自空间飞行器之前被校正,由此避免传送误导性信息并且从而提高服务可用性和/或连续性。

[0032] 本文公开的示例方法和装置包括各种时钟监控体系结构。在某些示例中,利用现有部件以进行时钟监控,而不需要附加的硬件。例如,根据本文所述的示例可以利用现有的振荡器例如晶体振荡器(CXO)、压控晶体振荡器(VCXO)和/或数控晶体振荡器(NCO)来进行时钟监控。在某些示例中,诸如这些的部件可以被包括在系统中以进行各种功能,例如,上变频(frequency up-conversion)。通过利用现有部件进行时钟监控,可以以最小的附加成本来实现附加的能力。

[0033] 第一示例时钟监控体系结构通过将AFS信号的相位和/或速率与另一时钟诸如CXO的相位和/或速率进行比较来监控AFS。第二示例时钟监控体系结构通过比较固定延迟间隔期间的AFS信号的相位变化和/或速率变化来监控AFS。第一和第二示例时钟监控体系结构中的每个均包括处于各种级别的性能和成本的多种实施方式的变型。

[0034] 所公开的示例方法和装置利用创新的分析技术提供超过已知系统的能力的全面的原子钟监控能力。在高级别上,这些技术包括多级检测,该多级检测包括针对每个检测级别的多阈值和多持久性分析。

[0035] 多级检测提供处于各种级别的检测器以检测特定类型的异常。示例包括1级检测

器和2级检测器。1级检测器迅速地检测大异常,而2级检测器检测较长一段时间期间的小异常。在每个检测级上,多阈值和多持久性分析利用与每个阈值关联的持久性要求包括基于测量值的预定的阈值。持久性指特定阈值处的测量在检测或者指示异常之前必须被实现的次数(例如,测量满足或者超过阈值的次数)。

[0036] 在操作中,通过使用具有较小持久性的较大阈值迅速地检测和报告或者校正大的异常和明显的异常,从而在系统被污染之前检测和校正异常。此外,较小的或者较不明显的异常通过使用具有较多持久性的更严格的阈值在较长时间段期间被检测,从而在避免由例如噪声造成的虚假警报的同时,检测小的异常。

[0037] 一旦检测此类异常,相应异常对用户测距误差(URE)的影响被评估,这向终端用户提供操作决策和警告的基础。在某些示例中,警告和影响预测被包含在导航消息中。在其他示例中,异常(例如,跳变或者漂移)在空间飞行器上被校正以维持精确的性能,而不需要折中系统的可用性。

[0038] 与用于校正原子钟异常的已知方法相比,本文公开的示例方法和装置被设计成以低成本实现高性能GPS/GNSS原子钟监控,同时最小化虚假警报和遗漏检测的可能性。高性能时钟监控包括例如检测非常小的异常事件的能力(例如,小于 10^{-12} 秒/次的频率跳变)。

[0039] 转到图1,其示出示例原子钟监控系统100的框图。系统100包括原子频标(AFS)/监控组件102、测量仪104、1级检测器106、跳变校正累加器108、估计器110以及2级检测器112。

[0040] 示出的示例的AFS/监控组件102包括AFS 114和监控器件116。尽管如组件所示,AFS 114和监控器件116可以被实现为集成器件,或者AFS 114和监控器件116是单独器件。在某些示例中,AFS 114是铷时钟并且监控器件116是CXO。在其他示例中,监控器件116是VCXO、NCO或者CXO、VCXO和/或NCO中的一个或多个的组合。AFS 114产生AFS信号118,并且监控器件116产生监控器件信号120。

[0041] 在这个示例中,AFS信号118和监控器件信号120由测量仪104接收。测量仪104可以是测量AFS信号118和监控器件信号120之间的(多个)相位差和/或速率差的相位测量仪和/或速率测量仪。测量仪104输出AFS信号118和监控器件信号120之间的测量的(多个)相位差和/或速率差122。

[0042] 分析器124接收来自测量仪104的测量的(多个)相位差和/或速率差122、来自估计器110的估计的(多个)相位差和/或速率差126、以及来自跳变校正累加器108的累积的跳变校正128。分析器124从测量的(多个)相位差和/或速率差122减去估计的(多个)相位差和/或速率差126和累积的跳变校正128,以计算(多个)残余相位差和/或速率差130。

[0043] 示出的示例的1级检测器106将(多个)残余相位差和/或速率差130与阈值比较,以使用以上提到的多阈值和多持久性分析技术来检测和校正跳变。例如,为了正确地识别跳变同时避免由于噪声造成的假阳性,较低阈值可以要求较高的持久性(例如,在特定阈值处的测量在异常被检测或者指示之前必须被实现的次数)。残余的相位差可以被用于检测相位跳变(例如,1级相位检测器)。在示例中,如果残余的相位差高于预定迭代数目(例如,nP)的持久性处的预定阈值(例如,pTH),则相位跳变被检测。在进一步的示例中,如果残余的速率差高于预定迭代数目(例如,nR)的持久性处的预定阈值(例如,rTH),则速率跳变被检测。在某些示例中,一旦检测跳变,1级检测器106计算跳变校正132。跳变校正累加器108累积跳变校正132并且输出累积的跳变校正128到分析器124。此外,1级检测器106输出故障指示符

134以指示相位跳变或者速率跳变。在故障没有被自动校正的某些示例中,可以在导航消息中包括故障指示符134以向接收者报警时钟信号中的故障或者去除导航信号从而保护用户免受异常事件。在某些示例中,1级检测器106通过去除由累积的跳变128贡献的一部分(多个)残余相位差和/或速率差130,来额外地计算最近检测的跳变的校正的(多个)残余相位差和/或速率差136。

[0044] 示出的示例的估计器110对AFS信号118和监控器件信号120之间的估计的(多个)相位差和/或速率差126进行建模。在某些示例中,估计器110包括Kalman滤波器或者固定增益滤波器。以下详细讨论估计器110所利用的数学模型的具体参数。估计器110接收来自1级检测器106的校正的(多个)残余相位差和/或速率差130,估计器110利用该校正的(多个)残余相位差和/或速率差130来更新其模型。估计的(多个)相位差和/或速率差126被输出到分析器124。估计器110还将与估计的(多个)相位差和/或速率差126的模型关联的参数138输出到2级检测器112。在示例中,参数138是估计的速率偏差。

[0045] 2级检测器112接收参数138(例如,估计的速率偏差),分析该参数138以检测较慢的更细微的异常漂移。在示例中,如果在一时间段(例如,dt)期间的速率偏差估计的变化大于预定的迭代数目(例如,nDR)的持久性处的预定阈值(drTH),那么2级异常被检测。此外,2级检测器112输出故障指示符140以指示参数138的异常漂移(例如,估计的速率偏差)。在故障不被自动校正的某些示例中,可以在导航消息中包含故障指示符140以向接收者报警时钟信号中的故障,或者可以采取包括例如去除导航信号的其他行动来保护用户免受(多个)异常信号。

[0046] 转向图2,其示出另一示例原子钟监控系统200的框图。系统200是图1的系统100的替代性结构。图2的系统200绘出硬件回路闭合结构,而图1的系统100使用软件回路闭合结构。

[0047] 图2的系统200包括AFS/监控组件202、测量仪204、1级检测器206、跳变校正累加器208、估计器210以及2级检测器212。

[0048] AFS/监控组件202包括AFS 214和监控器件216。在某些示例中,AFS 214是铷时钟并且监控器件216是CXO。在其他示例中,监控器件216是VCXO、NCO或者CXO、VCXO和/或NCO中的一个或多个的组合。AFS 214产生AFS信号218。

[0049] 所示示例的AFS/监控组件202接收来自估计器210的估计的(多个)相位差和/或速率差220。这个结构不同于图1的系统100的结构,在图1的系统100中,估计的(多个)相位差和/或速率差126由分析器124接收。AFS/监控器件组件202的监控器件216接收估计的(多个)相位差和/或(多个)速率差220。监控器件216基于估计的(多个)相位差和/或速率差220产生跟踪的AFS信号222。

[0050] 测量仪204接收AFS信号218、跟踪的AFS信号222以及累积的跳变校正224。就相位和/或速率而言,测量仪204可以是包括累积的跳变校正224的测量AFS信号218和跟踪的AFS信号222之间的差的相位测量仪和/或速率测量仪。这种测量的结果是(多个)残余相位差和/或速率差226。

[0051] 图2的系统200的剩余的体系结构与图1的系统100的体系结构相似。因此,图2的系统200示出图1的系统100的替代性结构,其使用相对于基于软件的闭合回路控制系统的基于硬件的闭合回路控制系统来实现相同或者相似功能。

[0052] 现转向图3和图4,图1和图2的AFS/监控组件102和202的示例结构被示出,该示例结构提供时钟监控的不同方法。图3示出使用基于延迟的结构300的时钟监控,并且图4示出使用独立基于时钟的监控结构400的时钟监控。

[0053] 独立的基于时钟和基于延迟的结构中的每个均能够检测并校正相位跳变、检测并校正大于预定阈值的速率跳变,并且检测出乎预料的随时间的估计的速率偏差。然而,某些结构更适合于具体的应用。例如,不同的基于延迟的结构300和基于时钟的监控结构400就短期和长期稳定性、交换硬件的成本和能力、利用现有硬件的时机以及硬件的失败和/或故障机制(例如,是否需要投票机制)而言呈现出变化的性能。

[0054] 图3示出使用基于延迟的结构300的时钟监控。基于延迟的结构300包括示例AFS/监控组件302,该示例AFS/监控组件302包括AFS304(例如,铷时钟)和AFS 304的延迟信号306。根本上,这个结构便于比较相对延迟的时延期间的时钟相位和速率变化,这本质上操作为短期时钟。由已知值(例如,延迟值)补偿的相位差和速率差被用于检测故障。相位差本质上是速率的测试。相位跳变表现为间歇的尖峰,而速率跳变表现为阶梯。

[0055] 在某些示例中,Kalman滤波器或者固定增益滤波器被用于估计关于延迟的精确度的AFS速率偏差和/或关于延迟的精确度的AFS加速度误差。在某些示例中,可以量化延迟稳定性,从而允许提高估计的AFS速率偏差的精确度。

[0056] 各种结构可以被用于图3的基于延迟的方法。第一结构使用基于振荡器的延迟机制。第二结构包括延迟线。

[0057] 转向图4,其示出使用独立基于时钟的监控结构400的时钟监控。该独立的基于时钟的监控结构400包括示例AFS/监控组件402,该示例AFS/监控组件402包括AFS 404(例如铷时钟)和独立时钟406例如CX0。在其他示例中,独立时钟406是VCXO、NCO或者CX0、VCXO和/或NCO中的一个或多个的组合。

[0058] 各种结构可以被用于图4的独立的基于时钟的方法,例如,结合附图5-7示出和描述的那些结构。

[0059] 图5示出利用VCXO或NCO的示例性独立的基于时钟的监控系统500。在这个结构中,在VCXO或NCO中,现有时钟或者信号产生体系结构可以被用于执行故障检测、隔离和响应。这个结构通过使用现有部件提供关于替代性结构的成本节约。

[0060] 示例系统500包括AFS 502、相位和/或速率测量仪504、检测器和估计器506、独立时钟508以及跳变校正累加器510。AFS 502产生AFS信号512,该AFS信号512由相位和/或速率测量仪504接收。相位和/或速率测量仪504还接收来自独立时钟508的校正的跟踪的AFS信号514和来自跳变校正累加器510的累积的跳变校正516。

[0061] 检测器和估计器506对AFS 502和独立时钟508之间的估计的(多个)相位差和/或速率差进行建模。检测器和估计器506接收来自相位和/或速率测量仪504的(多个)残余相位差和/或速率差518,检测器和估计器506利用该校正的(多个)残余相位差和/或速率差130来更新其模型。检测器和估计器506输出估计的(多个)相位差和/或速率差520到独立时钟508。检测器和估计器506基于接收自相位和/或速率测量仪504的(多个)残余相位差和/或速率差518来检测相位和/或速率跳变。检测的相位和/或速率跳变522被输出到跳变校正累加器510。

[0062] 独立时钟508产生跟踪AFS时钟信号512的时钟信号。独立时钟508接着基于接收自

检测器和估计器506的估计的(多个)相位差和/或速率差520来调整其时钟信号(例如,跟踪的AFS信号)。因此,独立时钟508将校正的跟踪AFS信号514输出到相位和/或速率测量仪504。

[0063] 测量仪504接收AFS信号512、校正的跟踪AFS信号514以及累积的跳变校正516。就相位和/或速率而言,测量仪504可以是包括累积的跳变校正516的测量AFS信号512和校正的跟踪的AFS信号514之间的差的相位测量仪和/或速率测量仪。这种测量的结果是(多个)残余相位差和/或速率差518。

[0064] 图6示出使用高质量CX0连同相对低成本VCXO或者NCO以形成锁相环的示例独立的基于时钟的监控系统600。示例系统600包括AFS 602、作为独立时钟操作的CX0 604、相位和/或速率测量仪606、检测器和估计器608以及锁相环610。锁相环610包括相位测量仪和/或速率测量仪612、滤波器614(例如,Kalman或者固定增益滤波器)以及VCXO或者NCO 616。

[0065] 类似于以上描述的系统,检测器和估计器608输出相位和/或速率校正618。锁相环610接收相位和/或速率校正618和时钟信号620,该时钟信号620可以是AFS时钟信号或者CX0时钟信号。

[0066] 锁相环610在这个示例中被用于将相位和/或速率校正618实现为校正的时钟信号622。系统600的实施方式根据需要还包括数模转换器和模数转换器。

[0067] 图7示出使用高质量CX0而不施加校正的示例独立的基于时钟的监控系统700。示例系统700除了不包括锁相环610外,类似于图6的系统600。系统700可以被实现在要求时钟监控特征但硬件能力有限的应用中。系统700类似于上述描述的系统运行,并且提供相位和/或速率校正702。在某些示例中,相位和/或速率校正702可以被包括在导航数据消息中。附加地或者替代地,导航信号在超出限定的阈值时可以被去除以保护用户。

[0068] 对于上述的每个示例原子钟监控结构,异常源可以被识别,并且如果异常不能被校正,那么异常的源可以被隔离。某些示例使用重复、投票和/或其他机制来执行这些功能。在某些示例中,通过使用其他机制(例如,通过监控AFS遥测诸如工作(lamp)电压)来避免冗余。

[0069] 图8示出示例顶级投票结构800。示例投票结构800可以被实现在上述的任何示例中,以识别并隔离时钟异常的(多个)源。可以通过将附加的操作时钟添加到系统来实现示例投票体系结构800。通常,三个或更多个操作时钟被用于检测和隔离频率或者相位异常。

[0070] 在某些示例中,如果在相位和频率方面的时钟异常足够低,冗余和投票体系结构可以被省略。反而,由监控系统时钟跳变引起的检测可以被视为噪声。通过改变持久性值以控制虚假警报的概率而导致这种噪声。

[0071] 示例投票结构800包括第一时钟802、第二时钟804以及第三时钟806。第一、二、三时钟802、804、806可以是AFS(例如,铷时钟)和/或晶体振荡器(例如,CX0、VCXO和/或NCXO)的任何组合。在第一示例实施方式中,第一、二、三时钟802、804、806中的每个是AFS。在第二示例实施方式中,第一和第二时钟802、804是AFS,并且第三时钟806是CX0。在第三示例实施方式中,第一时钟802是AFS,并且第二和第三时钟804、806是CX0。第一时钟802输出第一时钟信号808,第二时钟804输出第二时钟信号810,并且第三时钟806输出第三时钟信号812。

[0072] 示例投票结构800还包括第一基于滤波器的检测器和校正器814、第二基于滤波器的检测器和校正器816以及第三基于滤波器的检测器和校正器818。第一、第二以及第三基

于滤波器的检测器和校正器814、816、818中的每个包括滤波器(例如,Kalman或者固定增益滤波器)以对两个时钟之间的估计的差进行建模,这被用于计算残余(例如,预测的时钟差和测量的时钟差之间的差),该残余被用于检测各种类型的跳变。在图8中所示的示例投票结构800中,每个基于滤波器的检测器和校正器均对应两个时钟。即,第一基于滤波器的检测器和校正器814接收第一时钟信号808和第二时钟信号810,第二基于滤波器的检测器和校正器816接收第二时钟信号810和第三时钟信号812,并且第三基于滤波器的检测器和校正器818接收第一时钟信号808和第三时钟信号812。

[0073] 一旦检测时钟异常,第一、第二以及第三基于滤波器的检测器和校正器814、816、818中的每个将隔离和投票信息传送到表决器和隔离器820。如果一个时钟表现异常,那么每个时钟将其相应的时钟信号传送到基于滤波器的检测器和校正器814、816、818中的两个。由此,三个基于滤波器的检测器和校正器814、816、818中的两个受异常影响。因此,被包括在受异常影响的基于滤波器的检测器和校正器814、816、818的两个中的时钟是异常源。例如,如果异常被第一和第二基于滤波器的检测器和校正器814、816检测,那么第二时钟802是错误的;如果异常被第二和第三基于滤波器的检测器和校正器816、818检测,那么第三时钟806是错误的;并且如果异常被第一和第三基于滤波器的检测器和校正器812、816检测,那么第一时钟802是错误的。

[0074] 一旦检测到异常并且识别出作为异常源的具体时钟,校正可以被应用到向由投票结构识别的错误时钟。

[0075] 尽管图9示出实现图1-7的示例时钟监控系统100、200、300、400、500、600以及700和图8的示例投票结构800的示例方式,但是图9示出的元件、过程和/或器件中的一个或多个可以被组合、分开、重排列、省略、消除和/或以任何其他方式实现。进一步,可用由硬件、软件、固件和/或硬件、软件和/或固件的任何组合来实现以下:示例AFS/监控组件102、202、302、402;示例测量仪104、204、504、606、612;示例1级检测器106、206;示例跳变校正累加器108、208、510;示例估计器110、210;示例2级检测器112、212;示例AFS 114、214、304、404、502、602;示例监控器件116、216、306、406;示例分析器124;示例检测器和估计器506、608;示例独立时钟508;示例CX0604;示例锁相环610;示例滤波器614;示例VCXO或者NCO 616;示例时钟802、804、806;示例基于滤波器的检测器和校正器814、816、818;示例表决器和隔离器820;和/或更一般地,图1-7的示例时钟监控系统100、200、300、400、500、600和700以及图8的示例投票结构800。因此,可以通过一个或多个模拟或(多个)数字电路、逻辑电路、(多个)可编程处理器、(多个)专用集成电路(ASIC)、(多个)可编程逻辑器件(PLD)和/或(多个)现场可编程逻辑器件(FPLD)来实现以下中的任何一个:例如,示例AFS/监控组件102、202、302、402;示例测量仪104、204、504、606、612;示例1级检测器106、206;示例跳变校正累加器108、208、510;示例估计器110、210;示例2级检测器112、212;示例AFS 114、214、304、404、502、602;示例监控器件116、216、306、406;示例分析器124;示例检测器和估计器506、608;示例独立时钟508;示例CX0 604;示例锁相环610;示例滤波器614;示例VCXO或者NCO 616;示例时钟802、804、806;示例基于滤波器的检测器和校正器814、816、818;示例表决器和隔离器820;和/或更一般地,图1-7的示例时钟监控系统100、200、300、400、500、600和700以及图8的示例投票结构800。当理解本发明的任何装置或者系统权利要求时以完全地覆盖软件和/或固件实施方式时,以下的至少一个示例由此被清楚地限定为包括存储软件和/或固件

的有形的计算机可读存储器件或者存储磁盘诸如存储器、数字通用光盘 (DVD)、光盘 (CD)、蓝光光盘等:AFS/监控组件102、202、302、402;示例测量仪104、204、504、606、612;示例1级检测器106、206;示例跳变校正累加器108、208、510;示例估计器110、210;示例2级检测器112、212;示例AFS 114、214、304、404、502、602;示例监控器件116、216、306、406;示例分析器124;示例检测器和估计器506、608;示例独立时钟508;示例CXO 604;示例锁相环610;示例滤波器614;示例VCXO或者NCO 616;示例时钟802、804、806;示例基于滤波器的检测器和校正器814、816、818;示例表决器和隔离器820。更进一步地,除了图9中所示的那些元件或者替代图9中所示的那些元件,图1-7的示例时钟监控系统100、200、300、400、500、600以及700和图8的示例投票结构800可以包括一个或多个元件、过程和/或器件,并且/或者包括任何或者全部的示出的元件、过程和器件中的一个以上。

[0076] 图9示出代表实现图1-7的时钟监控系统100、200、300、400、500、600以及700和图8的示例投票结构800的示例方法的流程图。在这个示例中,可以通过机器可读指令来实现方法,该机器可读指令包括由处理器例如以下结合图16所讨论的示例处理器平台1600中所示的处理器1612执行的程序。该程序可以被体现为软件,该软件被存储在有形的计算机可读存储介质例如CD-ROM、软盘、硬盘、数字多功能光盘 (DVD)、蓝光光盘或者与处理器1612关联的存储器上,而全部程序和/或其部分可以替代地由除了处理器1612的器件来执行和/或在固件或者专用硬件中体现。进一步,尽管参考图9所示的流程图,描述了示例程序,但是实现示例时钟监控系统100、200、300、400、500、600和700以及示例投票结构800的许多其他方法可以替代地被使用。例如,框的执行顺序可以被改变和/或所描述的某些框可以被改变、消除或者合并。

[0077] 如以上所提及的,可以利用存储在有形的计算机可读存储介质例如硬盘驱动器、闪速存储器、只读存储器 (ROM)、光盘 (CD)、数字通用光盘 (DVD)、高速缓冲存储器、随机存取存储器 (RAM) 和/或信息被存储在其中达任何持久时间(例如,永久地达延长的时间段,举简短的实例,用于暂时缓冲和/或用于信息的高速缓存)的任何其他存储器件或者存储盘上的编码指令(例如,计算机和/或机器可读指令)来实现图9的示例过程。如本文所使用的,术语有形的计算机可读存储介质被清楚地限定为包括任何类型的计算机可读存储器件和/或存储盘,并且被限定为排除传播信号并且排除传输介质。如本文所使用的,可互换地使用“有形的计算机可读存储介质”和“有形的机器可读存储介质”。附加地或者替代地,可以使用存储在非暂时性计算机和/或机器可读介质例如硬盘驱动器、闪速存储器、只读存储器、光盘、数字通用光盘、高速缓冲存储器、随机存取存储器和/或信息被存储在其中达任何持久时间(例如,永久地达延长的时间段,举简短的实例,用于暂时缓冲和/或用于信息的高速缓存)的任何其他存储器件或者存储盘上的编码指令(例如,计算机或者机器可读指令)来实现图9的示例过程。如本文所使用的,术语非暂时性计算机可读存储介质清楚地被限定为包括任何类型的计算机可读存储器件和/或存储盘,并且被限定为排除传播信号并且排除传输介质。如本文所使用的,当短语“至少”在权利要求的前述中被用作过渡术语时,它是开放式的,这与开放式的术语“包括”处于相同的方式。

[0078] 图9是代表示例方法900的流程图,用于使用多级、多阈值以及多持久性分析来监控原子钟信号。虽然针对图1的时钟监控系统100描述图9的流程图,但是可以使用图1-8的系统100、200、300、400、500、600、700和/或800中的任一个实现图9的流程图。

[0079] 在框902处,测量AFS和监控器件之间的差。例如,在图1的时钟监控系统100中,由测量仪104执行框902,测量仪104测量AFS信号118和监控器件信号120之间的(多个)相位差和/或速率差。

[0080] 在框904处,AFS和监控器件之间的估计的差被建模。在示例中,估计器110对估计的(多个)相位差和/或速率差126进行建模。估计器110基于接收自1级检测器106的校正的(多个)残余相位差和/或速率差来更新其模型。

[0081] 在框906处,计算残余信号。在示例中,分析器124接收测量的(多个)相位差和/或速率差122、估计的(多个)相位差和/或速率差126以及累积的跳变128,并且计算(多个)残余相位差和/或速率差130。

[0082] 在框908处,分析残余信号。在示例中,1级检测器106将(多个)残余相位差和/或速率差130与多个阈值比较,多个阈值中的每个具有相应的持久性,该持久性定义在检测到跳变或指示跳变之前超过阈值的次数。

[0083] 在框910处,如果(多个)残余相位差和/或速率差130超过与阈值相关的持久性处的阈值,则跳变被检测或者被指示。在示例中,由1级检测器106执行框910。此外,1级检测器106通过去除由跳变贡献的(多个)残余相位差和/或速率差130的一部分来输出校正的(多个)残余相位差和/或速率差136。

[0084] 如果在框910处检测或者指示跳变,跳变警报被指示在框912处。在示例中,由故障指示符134指示跳变警报。

[0085] 在框914处,跳变被累积。在示例中,跳变校正累加器108累积跳变,并且将累积的跳变128输出到分析器124。

[0086] 在框915处,累积的跳变被校正。由包括独立的基于时钟的监控系统例如系统500的系统可选地执行框915。在示例中,相位和/或速率测量仪504接收来自独立时钟508的校正的跟踪AFS信号514和来自跳变校正累加器510的累积的跳变校正516。

[0087] 在框916处,跳变源被确定。由包括投票体系结构800的系统可选地执行框916。在示例中,投票体系结构800确定为跳变源的具体时钟。

[0088] 在框918处,分析估计的差分模型的参数。在示例中,2级检测器112将估计的(多个)相位差分模型和/或速率差分模型126(例如,速率偏差)的参数与多个阈值比较,多个阈值中的每个具有定义在指示或检测漂移之前超过阈值(例如,漂移阈值)的次数的相应的持久性。

[0089] 在框920处,如果估计的(多个)相位差分模型和/或速率差分模型126的参数(例如,速率偏差)超过与阈值相关的持久性处的阈值,则漂移被检测。在示例中,由2级检测器112执行框920。

[0090] 如果漂移未在框920处被检测,那么示例方法900在框902处重复。如果漂移被检测在框920处,漂移警报被指示在框922处。在示例中,由故障指示符140指示漂移警报。

[0091] 在框924处,确定漂移源。在包括投票体系结构800的系统中可选地执行框924。在示例中,投票体系结构800确定为漂移源的具体时钟。在执行框924之后,示例方法900在框902处重复。

[0092] 以下描述了被用于对时钟操作和检测错误(例如,异常)进行建模的具体示例数学模型。在示例中,时钟误差被建模为三阶系统,由以下给出:

$$[0093] \quad \begin{bmatrix} \frac{d(\delta t(t))}{dt} \\ \frac{d(\delta b(k))}{dt} \\ \frac{d(\delta a(k))}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta t(t) \\ \delta b(t) \\ \delta a(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_{prw} \\ W_{rrw} \\ W_{arw} \end{bmatrix} \begin{array}{l} \text{速率白噪声.} \\ \text{加速度白噪声.} \\ \text{抖动白噪声.} \end{array} \quad (1)$$

[0094] 给出(1)的离散形式:

$$[0094] \quad \begin{bmatrix} \delta t(k) \\ \delta b(k) \\ \delta a(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{相位误差} \\ \text{速率误差} \\ \text{加速度误差} \end{bmatrix}$$

$$[0095] \quad \begin{bmatrix} \delta t(k) \\ \delta b(k) \\ \delta a(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & 0.5(\Delta t)^2 \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta t(k) \\ \delta b(k) \\ \delta a(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_{prw} \\ W_{rrw} \\ W_{arw} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$Q = \begin{bmatrix} \sigma_{prw}^2 \Delta t & & \\ & \sigma_{rrw}^2 \Delta t & \\ & & \sigma_{arw}^2 \Delta t \end{bmatrix}$$

[0096] AFS(例如, 铑时钟) 和 CXO 之间的相关误差模型被用于建立检测器滤波器。相关的误差模型表示为:

$$[0097] \quad \begin{bmatrix} \delta t(k) \\ \delta b(k) \\ \delta a(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{相关的相位误差} \\ \text{相关的速率误差} \\ \text{相关的加速度误差} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \delta t(k) \\ \delta b(k) \\ \delta a(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & 0.5(\Delta t)^2 \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta t(k) \\ \delta b(k) \\ \delta a(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} CXO W_{prw} - RBX W_{prw} \\ CXO W_{rrw} - RBX W_{rrw} \\ CXO W_{arw} - RBX W_{arw} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$Q = \begin{bmatrix} (_{cxo} \sigma_{prw}^2 + {}_{rbx} \sigma_{prw}^2) \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & \sigma (_{cxo} \sigma_{rrw}^2 + {}_{rbx} \sigma_{rrw}^2) \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & \sigma (_{cxo} \sigma_{arw}^2 + {}_{rbx} \sigma_{arw}^2) \Delta t \end{bmatrix}$$

[0098] 在包括三态滤波器的示例中, 频率(例如, 速率) 测量仪被建模。给出状态向量为:

$$[0099] \quad \begin{bmatrix} \delta t(k) \\ \delta b(k) \\ \delta a(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{相关的相位误差} \\ \text{相关的速率误差} \\ \text{相关的加速度误差} \end{bmatrix} \quad (4)$$

[0100] 相位测量仪输出为:

$$[0101] \quad y(k) = [0 \ 1 \ 0] \begin{bmatrix} \delta t(k) \\ \delta b(k) \\ \delta a(k) \end{bmatrix} + v(k) \quad (5)$$

[0102] 在(5)中, $v(k)$ 是时钟速率测量仪误差, 其是以下的组合: (i) CXO的相位随机游走噪声(例如, 时钟速率上的白噪声); (ii) AFS的相位随机游走噪声(例如, 时钟速率上的白噪声); 以及 (iii) 由频率(例如, 速率和/或相位)测量仪引入的速率测量噪声。示例频率测量仪设计使用相位测量仪输出的差除以 (dt) 。在这个设计中, 相位测量仪测量噪声乘以 $\text{sqrt}(2) / dt$, 从而得到:

$$[0103] \quad E(v(k)v(j)) = \sigma_{\text{速率}}^2 \delta_{k,j} \quad (6)$$

[0104] 使用各种参数来表征时钟性能。在示例中, Alan方差曲线或者Hadamard方差曲线的曲线拟合被用于推导有限维/因果滤波器可实现的模型的参数。因此, “闪变相位/频率/加速度”被近似为其他术语。更具体地, 在示例中, 所使用的参数包括: (i) 相位白噪声(q_0); (ii) 相位随机游走/频率白噪声(q_1); (iii) 频率随机游走/加速度白噪声(q_2); 以及 (iv) 加速度随机游走/抖动(jerk)白噪声(q_3)。

[0105] Alan方差和Hadamard方差通过以下被建模:

$$[0106] \quad \begin{aligned} \sigma_y^2(\tau) &= 3q_0\tau^{-2} + q_1\tau^{-1} + (1/3)q_2\tau + (1/20)q_3\tau^3 \\ {}_H\sigma_y^2(\tau) &= (10/3)q_0\tau^{-2} + q_1\tau^{-1} + (1/6)q_2\tau + (11/120)q_3\tau^3 \end{aligned} \quad (7)$$

[0107] 在(7)中, q_0 是白相位噪声的方差(例如, AV曲线上的-1斜率); q_1 是白频率噪声或者相位随机游走的方差(例如, -1/2斜率); q_2 是频率随机游走的方差(例如, 在加速度上的白噪声; +1/2斜率); 并且 q_3 是加速度随机游走的方差(例如, 抖动上的白噪声; 随机运行; +3/2斜率)。

[0108] 为了评估以上所提及的模型, 针对IIF规范、IIF典型性能以及Symmetricom 9500B恒温晶体振荡器(OCXO)进行曲线拟合。曲线拟合结果的第一版本被总结为下表。第一版本结果表明高达100秒以上的OCXO性能优于或者可比于铷原子钟。

[0109]		IIF 规范 曲线拟合	IIF 典型 曲线拟合	Symmetricom 9500 OCXO 曲线拟合
	σ 相位白噪声	4.23E-13	0	0
[0110]	σ 相位随机游走	2.90E-12	5.00E-13	1.36E-13
	σ 频率随机游走	2.70E-16	7.07E-17	7.20E-15
	σ 加速度随机游走	1.00E-22	1.00E-22	2.88E-17

[0111] 曲线拟合结果的第二版本被总结为下表。第二版本结果表明高达60秒的OCXO性能优于或者可比于铷原子钟。

	IIF 规范 曲线拟合	IIF 典型 曲线拟合	Symmetricom 9500 OCXO 曲线拟合
[0112]	σ 相位白噪声	4.23E-13	0
	σ 相位随机游走	2.90E-12	5.00E-13
	σ 频率随机游走	2.70E-16	7.07E-17
	σ 加速度随机游走	1.00E-22	2.88E-17

[0113] 相位和/或测量仪目标基于概率分析被识别。分析的结果表明误差大于 10^{-12} 秒和 10^{-12} 秒/次基本上劣化监控系统的性能。由于AFS和CXO的性能,误差小于 10^{-12} 秒不会显著改进性能。因此,AFS和CXO的改进将使得相位和/或速率测量仪的进一步改进更有意义。由此,相位测量误差的目标要求是 10^{-12} 秒,并且速率测量误差的目标要求是 10^{-12} 秒/次。

[0114] 对于所有的体系结构选项,大于相位测量仪噪声的相位跳变容易被检测并校正,并且大于速率测量仪噪声的速率跳变容易被检测和校正。

[0115] 使用以上确定的系统和模型进行各种仿真。对于独立的基于时钟的系统,速率测量仪噪声被假设处于 $\sigma=10^{-12}$ 秒/次的级别上。由1级和2级测试执行包括各种速率跳变级别的仿真情况用于进行检测。

[0116] 对于基于延迟的系统,相位测量仪噪声被假设处于 10^{-12} 秒的级别,并且所推导的测量噪声被假设处于1秒延迟的 10^{-12} 秒。由1级和2级测试执行包括各种速率跳变级别的仿真情况用于进行检测。

[0117] 此外,针对基于延迟的系统和独立的基于时钟的系统二者,对1级速率跳变执行概率分析。此外,对2级估计的基于速率偏差的检测执行概率分析。

[0118] 直接基于频率测量的检测被分析,其中VCXO被用于产生采样周期 mT 。采样周期 mT 自身具有以下表示的噪声:

$$mT = T + bT + \sigma_{prw} T^{1/2} w_1 + 1/3 \sigma_{rrw} T^{3/2} w_2 \quad (8)$$

[0119] 因此,时钟速率偏差大约为:

$$= (bT + \sigma_{prw} T^{1/2} w_1 + 1/3 \sigma_{rrw} T^{3/2} w_2) + \sigma_{pm} v_1 \quad (9)$$

[0120] 假设具有良好的校准,并且 $b=0$,1秒中的速率偏差是:

$$\sqrt{\sigma_{prw}^2 + (1/9)\sigma_{rrw}^2 + \sigma_{pm}^2}$$

[0121] 用于

$$\sigma_{prw} = 1e-13 \quad (10)$$

$$\sigma_{prw} = 1e-16$$

$$\sigma_{pm} = 1e-12$$

[0122] 因此,速率偏差通常是 10^{-12} 秒/次。对于6- σ 检测,可以检测到 6×10^{-12} 以上的变化,并且对于3- σ 检测,可以检测到 3×10^{-12} 以上的变化。

[0123] 数学模型在时钟速率更新方案中被开发用于时钟。以下给出状态模型:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \delta b(t) \\ \delta a(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \text{速率误差} \\ \text{加速度误差} \end{bmatrix} \\
 \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \delta b(t) \\ \delta a(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta b(t) \\ \delta a(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_{rrw} \\ w_{arw} \end{bmatrix} \\
 w(t) &= \begin{bmatrix} w_{rrw} \\ w_{arw} \end{bmatrix} \\
 E(w(t)w(s)^T) &= Q\delta(t-s) = \begin{bmatrix} \sigma_{rrw}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{arw}^2 \end{bmatrix} \delta(t-s)
 \end{aligned} \tag{11}$$

[0130] 两种测量策略被用于这种测量方法。第一,如果假设AFS具有误差,三个误差源被包括用于测量误差,这三个误差源包括CXO相位误差、AFS相位误差以及相位测量仪误差。第二,如果假设AFS是正确的,CXO从属于AFS并且将不包括AFS相位误差。

[0131] 识别和分析关键参数以决定优化参数的考虑。所识别的关键参数包括(1)频率/时钟速率测量的平均时间/输出频率;(2)检测阈值;以及(3)检测持久性。

[0132] 对于频率/时钟速率测量的平均时间/输出频率,发现较长的平均时间减少噪声。然而,5.2秒的检测时间和持久性限制了平均时间的值。

[0133] 对于检测阈值,发现较低的阈值便于检测,但是导致较多的虚假警报的情况。相反,较高阈值导致高概率的遗漏检测。因此,具有持久性的低阈值通常提供更好的解决方案。

[0134] 通过虚假警报要求发现从而驱动检测持久性。然而,5.2秒的检测时间仅提供有限的可用持久性。

[0135] 仿真和分析表明通过使用具有持久性的较低阈值改进检测的概率,具有持久性的较低阈值减少虚假警报。因此,持久性为四(例如,在异常被检测之前,必须实现处于具体阈值的四次测量)被选择用于仿真和分析。因此,假定频率跳变的幅度可以是无限的,平均时间在给定5.2秒检测时间要求时应当是约1秒。因此,1秒的值被选择用于仿真和分析。所以,阈值被选择处于残差的 $2 \times \sigma$,以帮助检测概率。

[0136] 检测概率和虚假警报被建模为:

$$P(|x| < \alpha\sigma) = \operatorname{erf}(\alpha/\sqrt{2}) \tag{12}$$

[0137] 在示例中,

$$P(|x| < 3\sigma) = \operatorname{erf}(3/\sqrt{2}) = 0.9973$$

$$P(|x| > \alpha\sigma) = 1 - P(|x| < \alpha\sigma) = 1 - \operatorname{erf}(\alpha/\sqrt{2}) \tag{13}$$

$$P(|x| > \alpha\sigma) = P(x > \alpha\sigma) + P(x < -\alpha\sigma) = 2P(x > \alpha\sigma) = 2P(x < -\alpha\sigma)$$

[0138] 由此,

$$P(x > \alpha\sigma) = P(x < -\alpha\sigma) = 0.5P(|x| > \alpha\sigma) = 0.5(1 - \operatorname{erf}(\alpha/\sqrt{2})) \tag{14}$$

[0139] 在(14)的应用中,

[0140] 对于 $\beta > \alpha$

$$[0145] P(x + \beta\sigma < \alpha\sigma) = P(x < -(\beta - \alpha)\sigma) = 0.5(1 - \text{erf}((\beta - \alpha)/\sqrt{2})) \quad (15)$$

[0146] 概率仿真的结果表明:如果异常连续四次被测量超过阈值,那么异常被检测到。给定样本超过阈值的概率是P,则检测概率是P⁴。因此,遗漏检测的概率是:

$$[0147] 1 - (1 - P^4)^n \quad (16)$$

[0148] 也就是说,针对进行的未被检测的异常,系统必须未在所有的“n”次尝试中检测异常。此外,只要异常还没有被校正,系统继续尝试检测异常。

[0149] 虚假警报和遗漏检测的影响被分析。在某些情况下,因为跳变同时被检测并被校正,所以虚假警报被有效地减少至虚假校正。因为由低级异常频率数据引起虚假警报,所以那些校正通常非常小并且一般是无害的。然而,在某些示例中,虚假的和/或大的相位和频率检测可能导致服务不可用。

[0150] 由于异常表现出非常小的频率跳变,该频率跳变的可区别的信号难于从滤波器(例如,Kalman滤波器)残差中识别,所以遗漏检测发生。然而,即使小的未检测的连续跳变随时间可以产生大的误差。因此,遗漏检测由于误差的累积通常不被期望。因此,可能期望通过允许较高的虚假警报概率来降低遗漏检测的概率。在“检测/校正”体系结构中,如以前所提及的,虚假警报在某些示例中可能是无害的。遗漏检测的概率根本上由频率测量仪的精确性和CX0的短期稳定性限制。

[0151] 图10-14示出由1级检测器检测的 3×10^{-12} 秒的时钟速率跳变。图10-14的曲线是系统100、200、500、600或者700的示例测量。转向图10,其示出原始残留的速率差曲线。针对图1的系统100,图10的原始残留的速率差代表未包括跳变校正128的残留速率差130。在大约3600秒处, 3×10^{-12} 秒的速率跳变被1级检测器检测。图11示出包括跳变校正128的残余速率差130。如图11所示,在实现跳变校正之后,残余得到显著地改进。

[0152] 图12和图13示出估计的时钟偏差。图12示出不包括跳变校正的估计的时钟偏差,并且图13示出包括跳变校正的估计的时钟偏差。如图13所示,估计的时钟偏差在实现跳变校正之后被显著地改进。

[0153] 图14示出随时间的残余速率差。图14包括 2σ 阈值1402。图14示出针对给定的阈值按照持久性分析信号有助于识别误差,同时减小虚假警报的概率。图14的示例使用是 2σ 阈值1402处的持久性4。大约3600秒处的尖峰被识别为异常,这是因为其第四次测量超过阈值1402。附加地或者替代地,在大约3600秒处的尖峰可以通过具有较低持久性的较高阈值来识别。

[0154] 图15示出未被1级检测器检测而由2级检测器检测的漂移所引起的时钟速率跳变。更具体地,图15示出在60秒的时间段期间的估计的速率偏差。在这个示例中,超过预定阈值的速率漂移引起的大约 10^{-12} 秒/次的跳变由此指示异常时钟漂移。因此,图15示出2级检测器能够检测未被1级检测器检测的某些小的异常。

[0155] 图16是能够执行图9的指令以实现时钟监控系统100、200、300、400、500、600和700以及图1-8的示例投票结构800的示例处理器平台1600的框图。处理器平台1600可以是,例如,计算机处理器、FPGA(现场可编程门阵列)或者ASIC(专用集成电路)服务器、个人计算机、移动设备(例如,手机、智能手机、平板电脑诸如iPadTM)、个人数字助理(PDA)、网络家电、DVD播放器、CD播放器、数字录像机、蓝光播放器、游戏机、个人录像机、机顶盒或者任何其他

类型的计算设备。

[0156] 示出的示例的处理器平台1600包括处理器1612。示出的示例的处理器1612是硬件。例如,处理器1612可以通过集成电路、逻辑电路、微处理器或者来自任何所需家庭或者制造商的控制器的一个或多个来实现。

[0157] 示出的示例的处理器1612包括本地存储器1613(例如,高速缓冲存储器)。示出的示例的处理器1612通过总线1618与包括易失性存储器1614和非易失性存储器1616的主存储器通信。易失性存储器1614可以通过同步动态随机存取存储器(SDRAM)、动态随机存取存储器(DRAM)、RAMBUS动态随机存取存储器(RDRAM)和/或其他任何类型的随机存取存储器器件来实现。非易失性存储器1616通过闪速存储器和/或任何其他期望类型的存储器器件来实现。访问主存储器1614、1616由存储器控制器控制。

[0158] 示出的示例的处理器平台1600还包括接口电路1620。该接口电路1620可以通过任何类型的接口标准例如以太网接口、通用串行接口(USB)和/或PCI快速接口来实现。

[0159] 在示出的示例中,一个或多个输入器件1622被连接到接口电路1620。输入器件1622允许用户输入数据和命令到处理器1612。输入器件可以通过例如音频传感器、麦克风、摄像机(静像或视频)、键盘、按钮、鼠标、触摸屏、轨迹板、轨迹球、指向柱(isopoint)和/或声音识别系统来实现。

[0160] 一个或多个输出器件1624也可以连接到示出的示例的接口电路1620。输出器件1624可以通过例如显示器件(例如,发光二级管(LED))、有机发光二级管(OLED)、液晶显示器、阴极射线管显示器(CRT)、触摸屏、视觉输出器件、发光二级管(LED)、打印机和/或扬声器)来实现。示出的示例的接口电路1620因此通过包括显卡驱动、显卡驱动芯片或者显卡驱动处理器。

[0161] 示出的示例的接口电路1620还包括通信器件例如发射器、接收器、收发器、调制解调器和/或网络接口卡,以方便通过网络1626(例如,以太网连接、数字用户线(DSL)、电话线、同轴电缆、蜂窝电话系统等)与外部机器(例如,任何类型的计算器件)交换数据。

[0162] 示出的示例的处理器平台1600还包括一个或多个用于存储软件和/或数据的大容量存储器件。这些大容量存储器件1628的示例包括软盘驱动器、硬盘驱动器、光盘驱动器、蓝光光盘驱动器、RAID系统以及数字多功能光盘(DVD)驱动器。

[0163] 图9的编码指令1632可以存储在大容量存储器件1628、易失性存储器1614、非易失性存储器1616中和/或可移动的有形计算机可读存储介质例如CD或DVD、PROM、闪速存储器或者EEPROM上。

[0164] 根据前述的,将理解的是,以上公开的方法、装置以及产品使用了创新的分析技术来提供超过已知系统的能力的综合的原子钟监控能力。通过对每个检测级使用多级检测以及多阈值和多持久性分析,以前在GNSS卫星上未能检测的原子钟异常能够在各级被检测和校正。

[0165] 虽然本文已经公开某些示例方法、装置以及产品,本发明覆盖的范围没有被限制在其中。相反,本发明覆盖完全落在本发明的权利要求的范围内的所有方法、装置和产品。

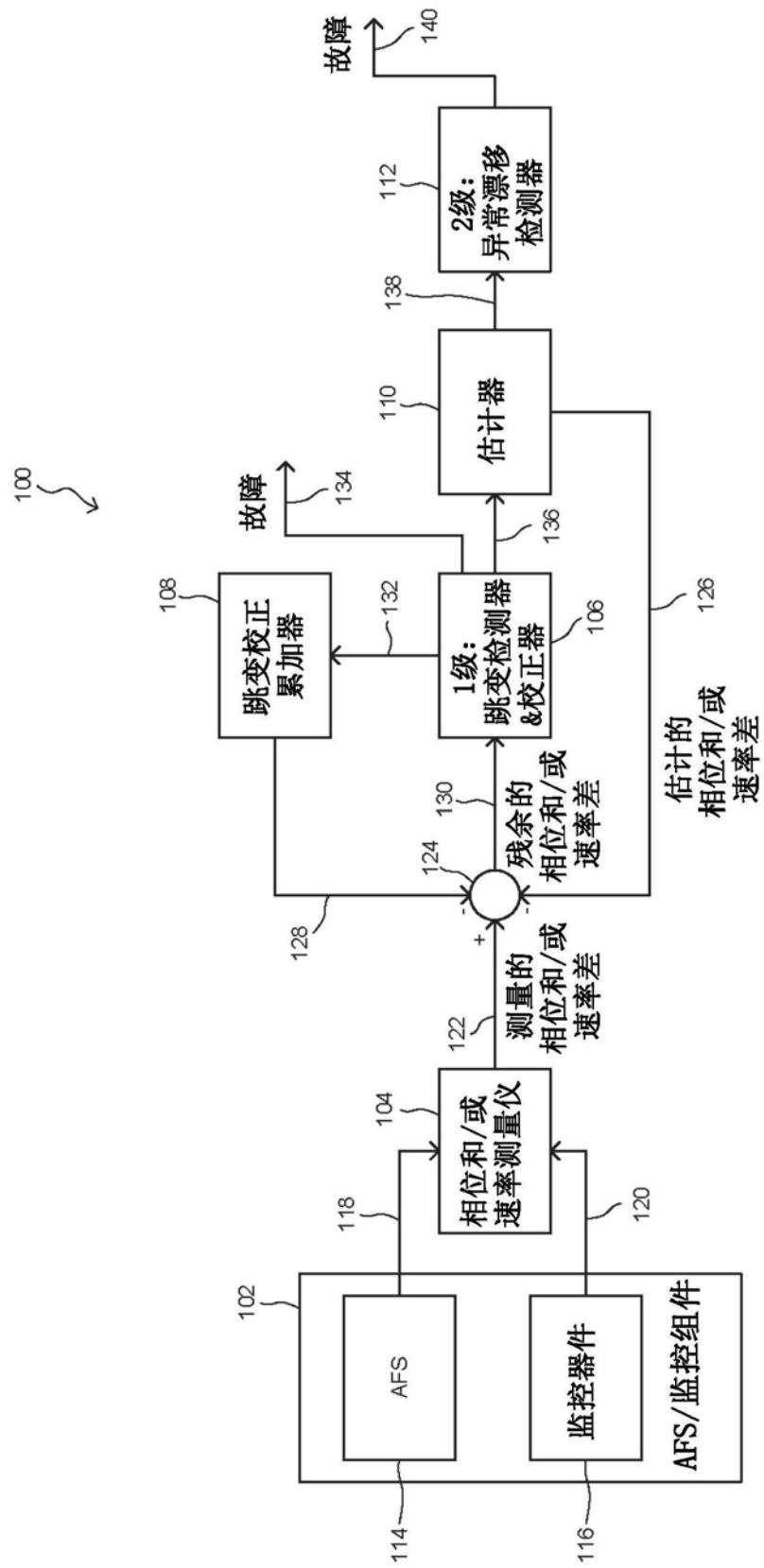


图1

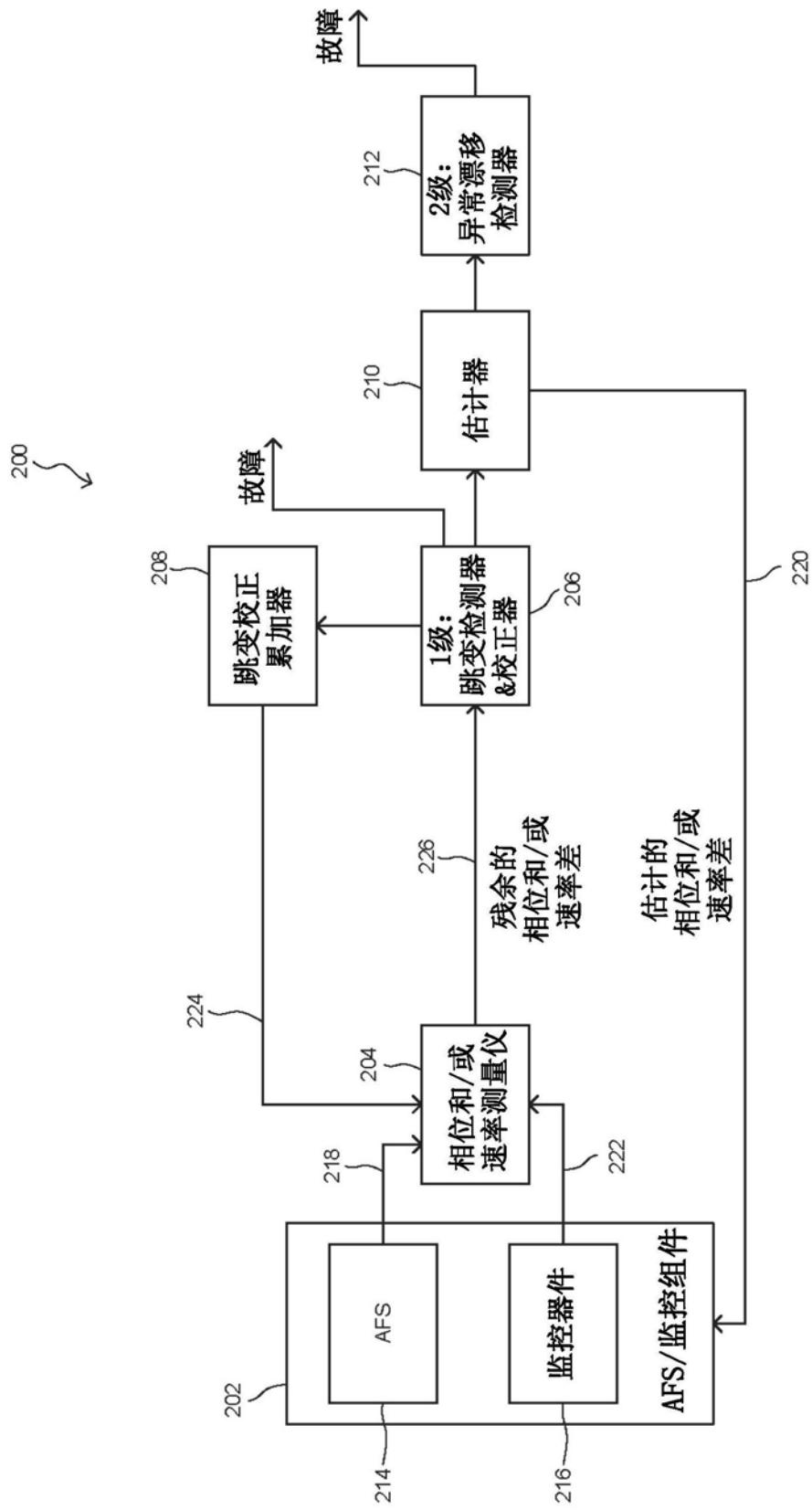


图2

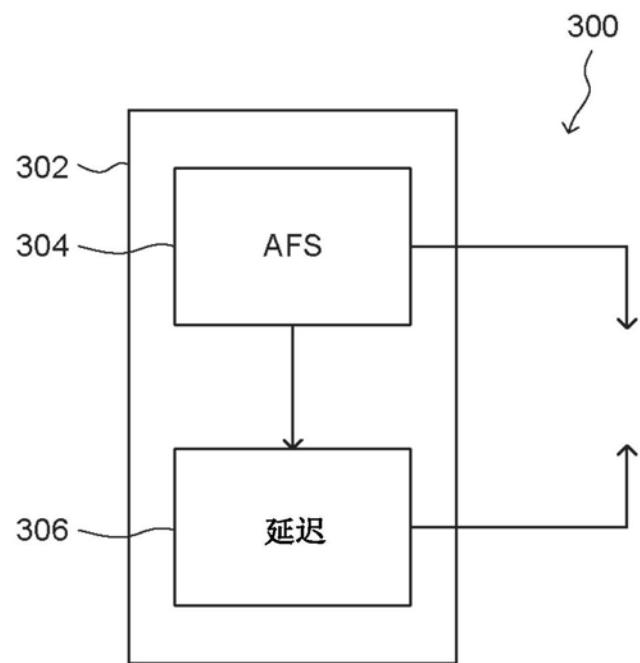


图3

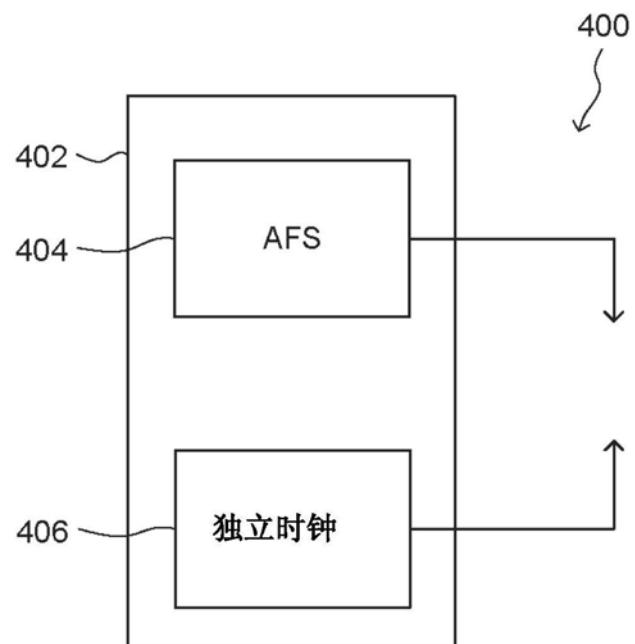


图4

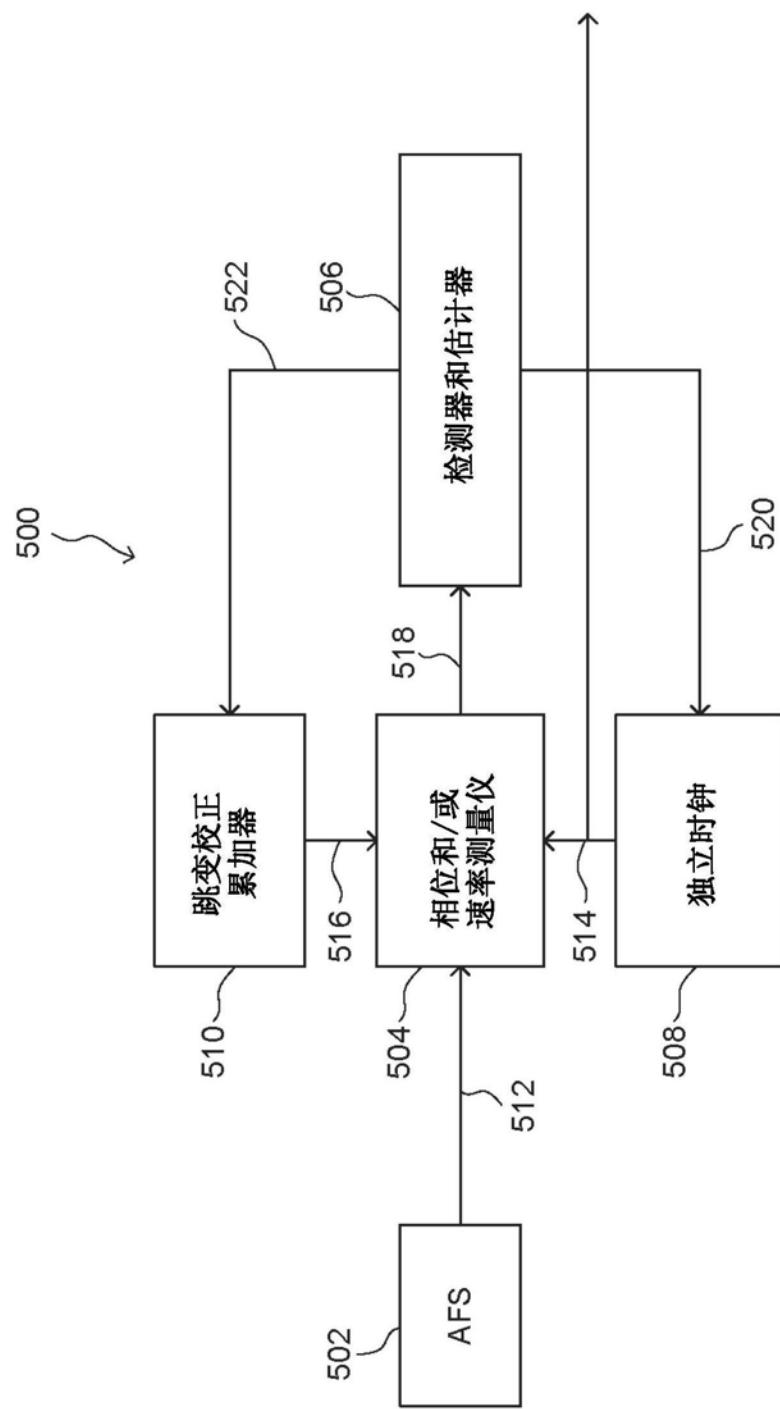


图5

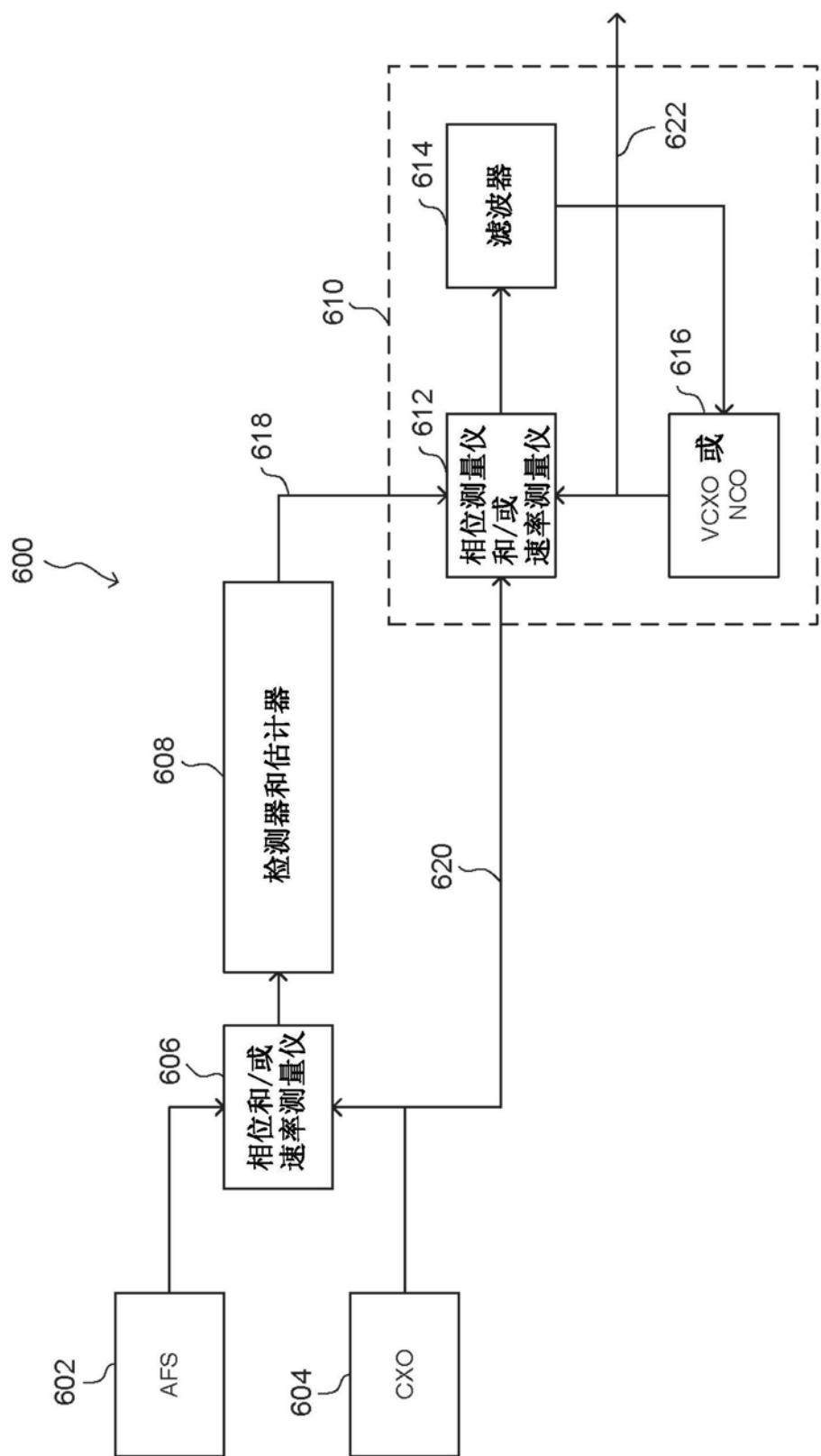


图6

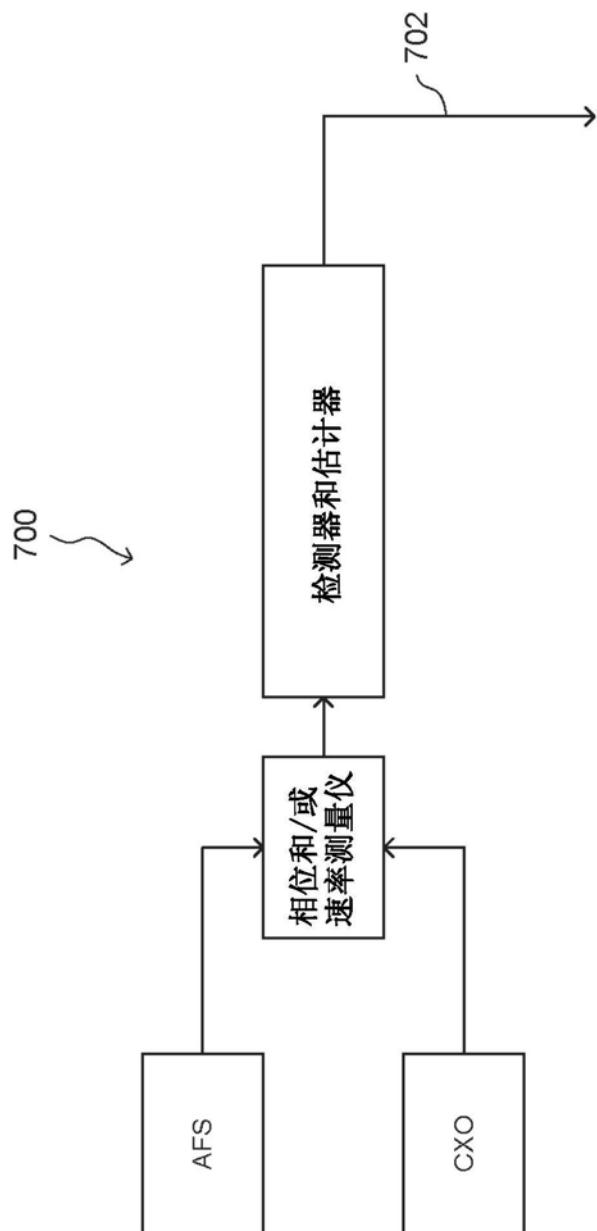


图7

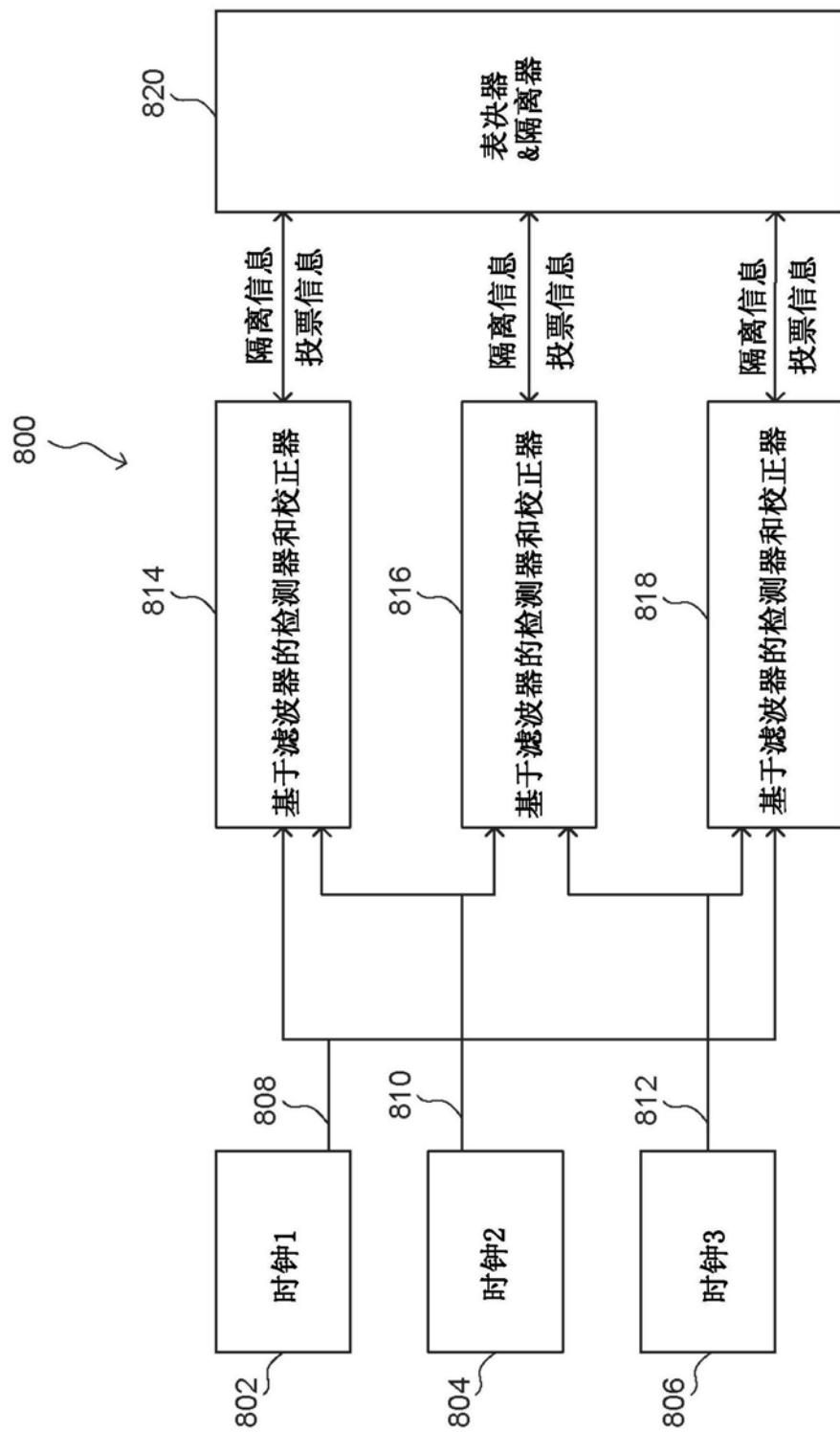


图8

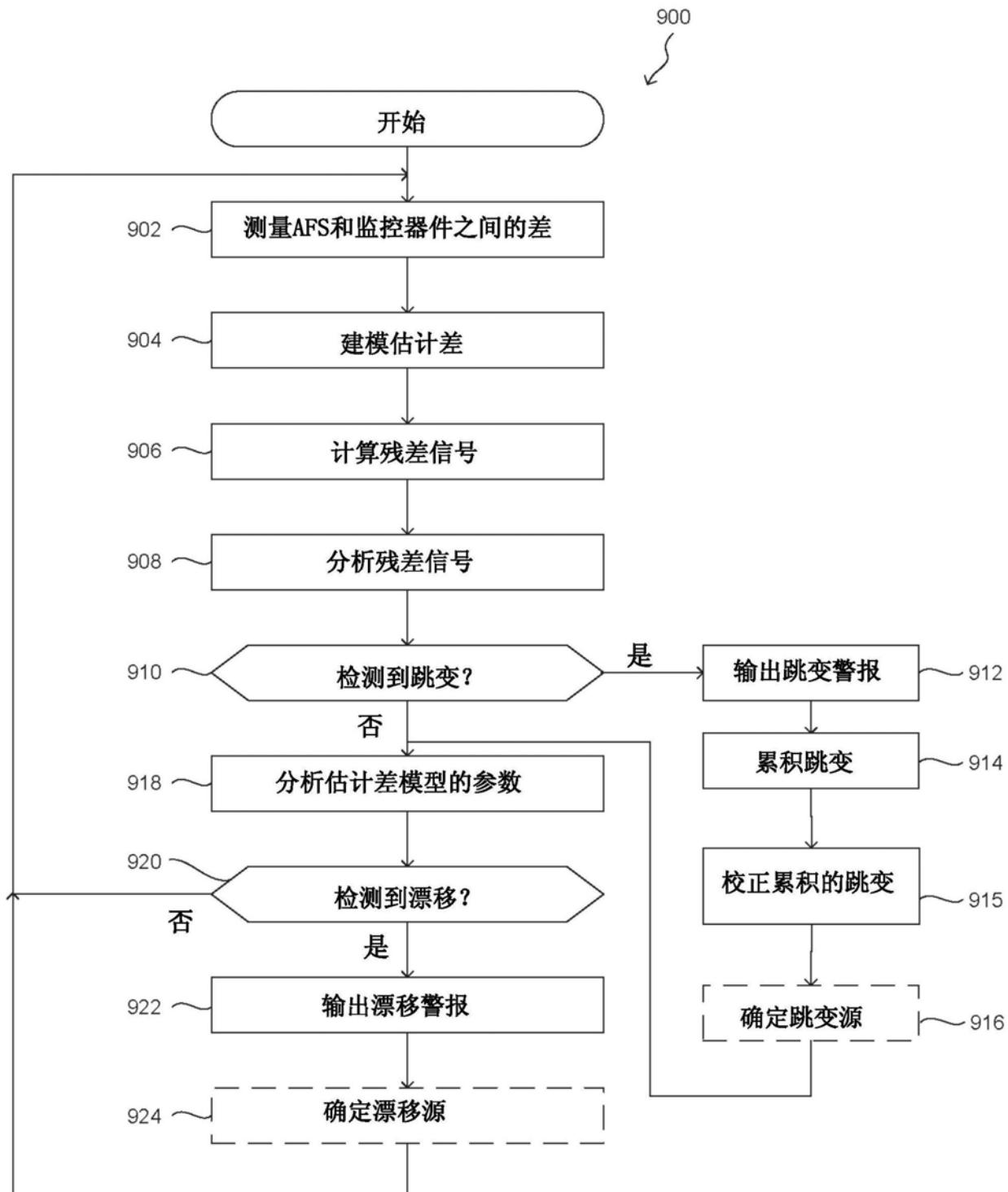


图9

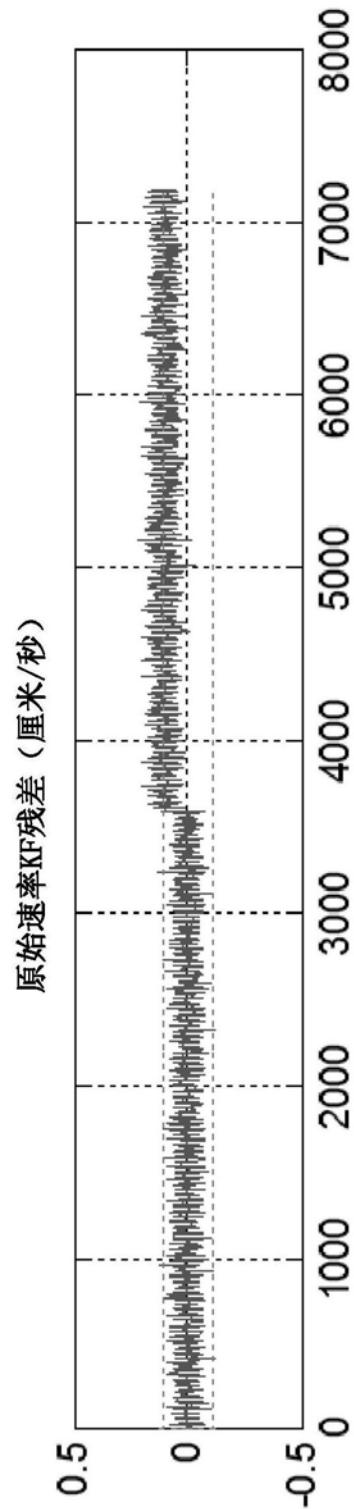


图10

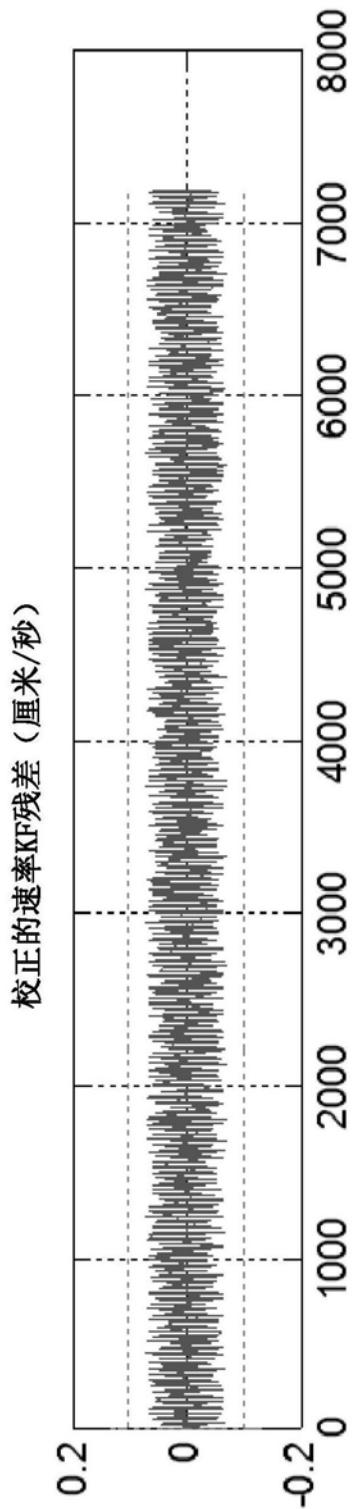


图11

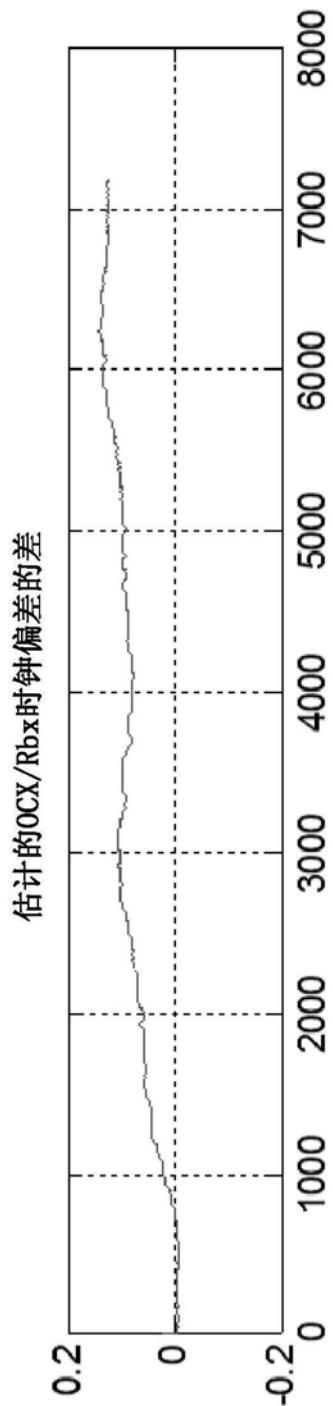


图12

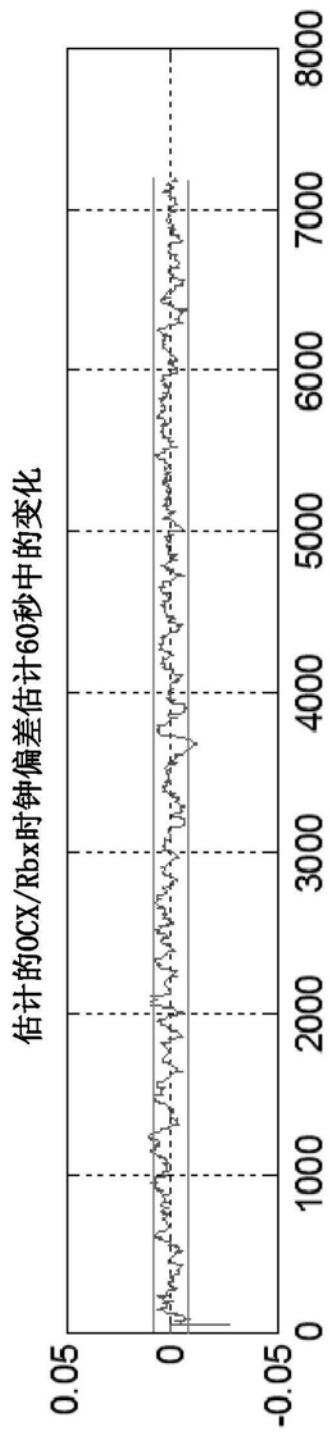


图13

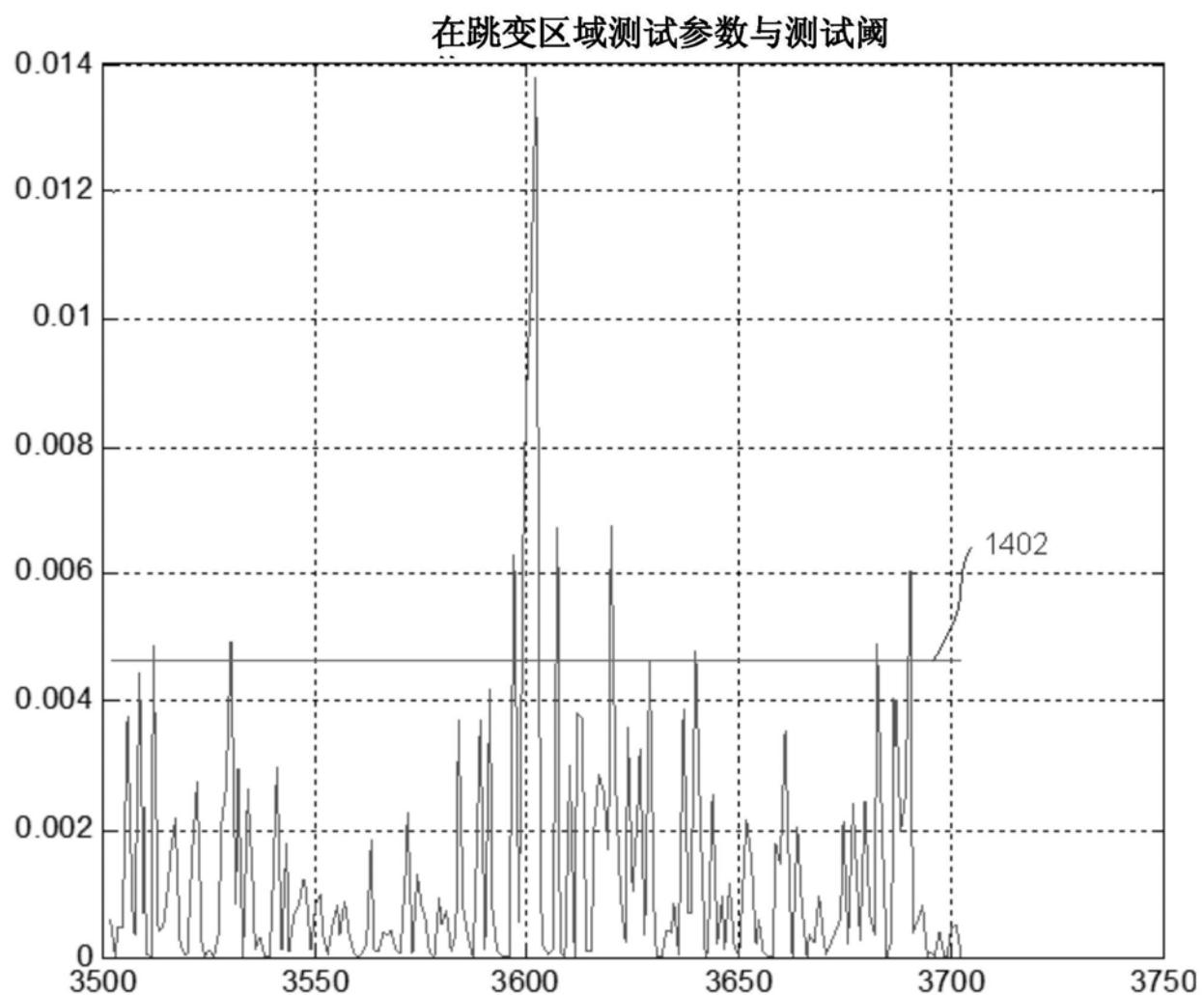


图14

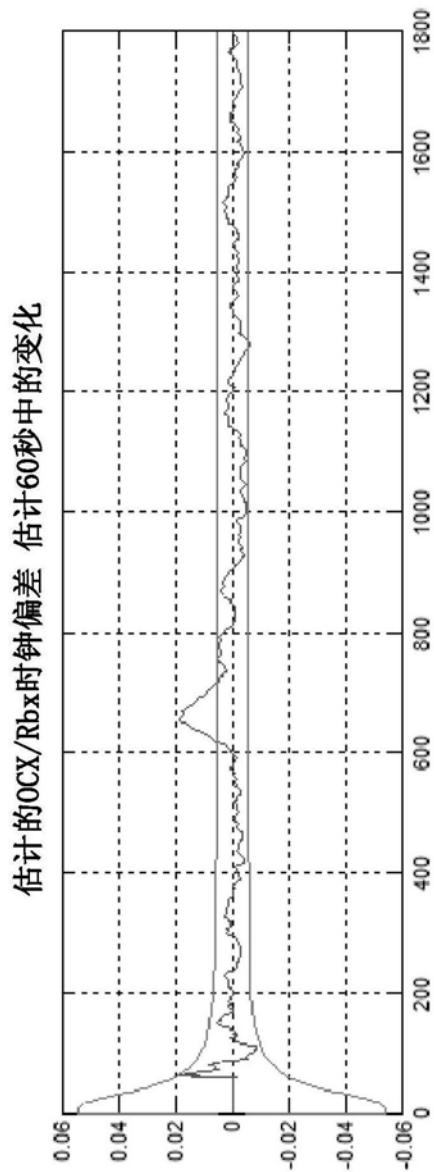


图15

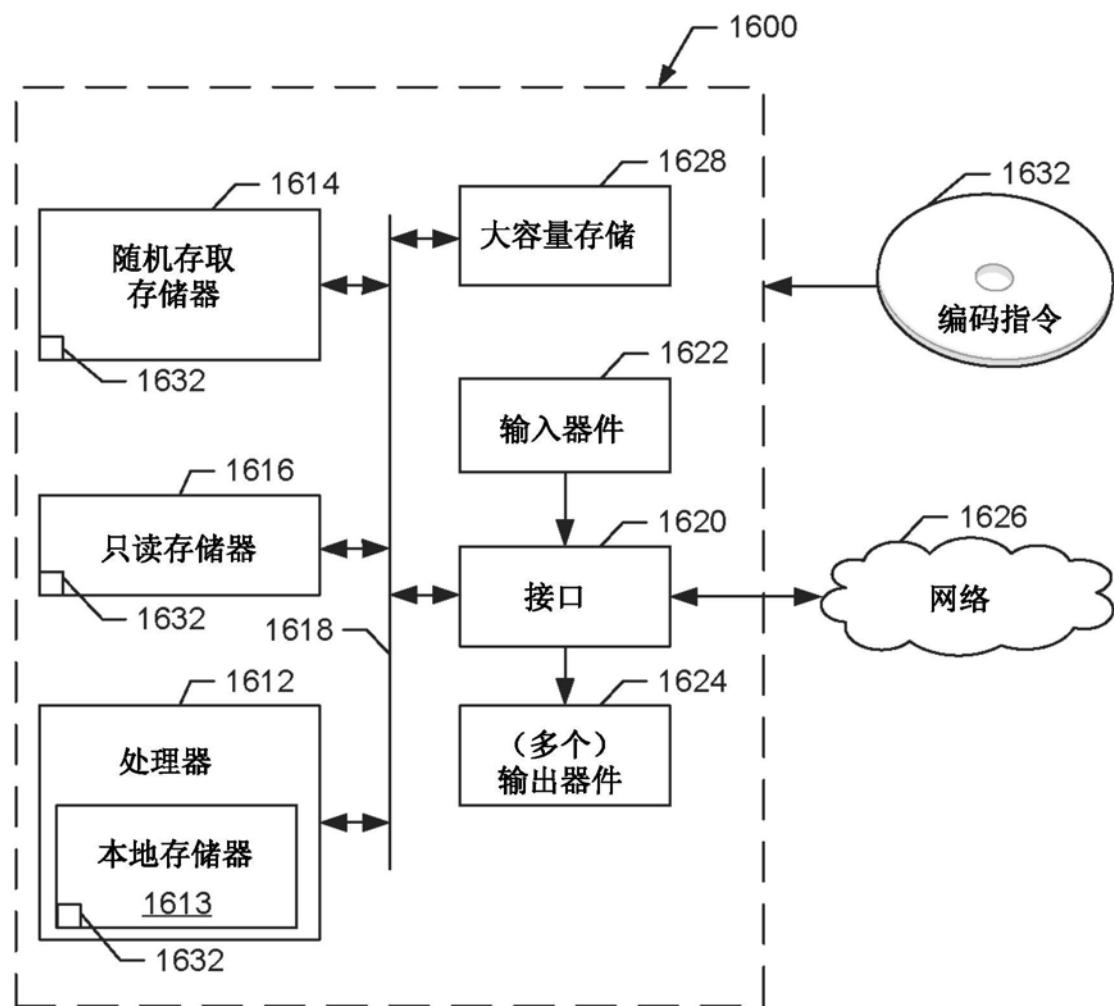


图16