



[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 200480025390.2

[43] 公开日 2006年10月11日

[11] 公开号 CN 1846147A

[22] 申请日 2004.8.19

[21] 申请号 200480025390.2

[30] 优先权

[32] 2003.9.5 [33] US [31] 10/656,956

[86] 国际申请 PCT/US2004/027344 2004.8.19

[87] 国际公布 WO2005/027283 英 2005.3.24

[85] 进入国家阶段日期 2006.3.3

[71] 申请人 纳夫科姆技术公司

地址 美国加利福尼亚州

[72] 发明人 R·R·哈奇 R·T·夏普

Y·杨

[74] 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

代理人 程天正 王勇

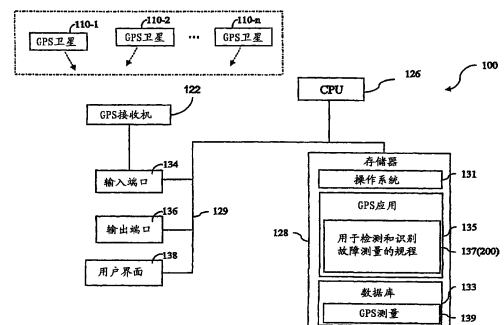
权利要求书 3 页 说明书 11 页 附图 7 页

[54] 发明名称

用于接收机自主的完整性监视和故障检测及消除的方法

[57] 摘要

一种用于在由一个 GPS 接收机相对于该 GPS 接收机所考虑的多个卫星而获得的多个 GPS 测量中检测和识别故障测量的方法，它确定该多个 GPS 测量是否包括故障测量。响应于该多个 GPS 测量包括故障测量的确定，该方法通过计算与该多个卫星中的每一个相关联的相关值、并且将与最高相关值相关联的卫星选择为促成故障测量的卫星，从而识别出促成故障测量的卫星。



1. 一种用于在多个测量中识别故障测量的方法，该多个测量被用来确定一离散时间受控过程的状态：

计算与该多个测量中的每一个相关联的相关值；以及
根据该相关值，将该多个测量中的一个测量选择为故障测量。

2. 根据权利要求1的方法，其中与多个测量中的每一个测量相关联的相关值表示：在该多个测量的残差和对应于该多个测量之一中改变的残差之间的相关性，而同时其余的多个测量不改变。

3. 根据权利要求1的方法，其中计算与多个测量中的每一个测量相关联的相关值包括：

计算残差灵敏度矩阵；
计算对应于该多个测量的残差；以及
根据该多个测量的残差和该残差灵敏度矩阵，计算与该多个测量之一相关联的相关系数。

4. 根据权利要求3的方法，其中计算对应于多个测量的残差包括：
获得该离散时间受控过程的状态的最小二乘解；
根据该最小二乘解，计算该多个测量的期望值；以及
计算在该多个测量和该多个测量的期望值之间的差值。

5. 根据权利要求3的方法，其中使用该残差灵敏度矩阵来计算对应于该多个测量的残差。

6. 根据权利要求1的方法，其中将多个测量中的一个测量选择为故障测量包括：

识别最高相关值；以及
将与该最高相关值相关联的测量选择为故障测量。

7. 根据权利要求6的方法，其中将与最高相关值相关联的测量选择为故障测量包括：

识别第二最高相关值；以及
当最高相关值和第二最高相关值之间的差值超过预定门限值时，
将与最高相关值相关联的测量选择为故障测量。

8. 根据权利要求6的方法，其中将与最高相关值相关联的测量选择为故障测量包括：

确定最高相关值超过第一预定门限值；

识别第二最高相关值；以及

确定第二最高相关值小于第一预定门限值并且第一预定门限值和第二最高相关值之间的差值超过第二预定门限值。

9. 根据权利要求1的方法，其中该离散时间受控过程的状态包括对GPS接收机的位置和时钟偏离的校正，并且该多个测量是由GPS接收机相对于多个卫星而获得的GPS测距测量，该多个测量中的每一个测量对应于多个卫星之一。

10. 根据权利要求9的方法，其中所述多个卫星的数目大于5。

11. 根据权利要求1的方法，还包括：

确定故障测量中的误差的大小。

12. 根据权利要求11的方法，其中确定故障测量中的误差的大小包括：

将所述多个测量的均方根残差除以对应于该多个测量之一中单位改变的均方根残差，而同时该多个测量中的其余测量不改变。

13. 根据权利要求11的方法，其中确定故障测量中的误差的大小包括：

将所述多个测量的均方根残差除以残差灵敏度矩阵中对应于故障测量的对角元素的平方根。

14. 一种用于在由GPS接收机相对于多个卫星而获得的多个GPS测量中检测和识别故障测量的方法，包括：

确定该多个GPS测量是否包括故障测量；以及

响应于该多个GPS测量包括故障测量的确定，通过以下步骤识别促成故障测量的卫星：

计算与该多个卫星中的每一个相关联的相关值；以及

根据该相关值，将该多个卫星中的一个卫星选择为促成故障测量的卫星。

15. 根据权利要求14的方法，其中确定GPS测量是否包含故障测量包括：

使用对应于该多个GPS测量的定后残差来计算检验统计量；以及确定该检验统计量是否超过故障门限。

16. 根据权利要求15的方法，其中故障门限是GPS接收机使用的导航模式的函数。

17. 根据权利要求 15 的方法, 还包括:

确定故障 GPS 测量中的误差的大小。

18. 根据权利要求 17 的方法, 还包括:

验证已经正确地识别出促成故障测量的卫星。

19. 根据权利要求 18 的方法, 其中验证已经正确地识别出促成故障测量的卫星包括:

根据该故障 GPS 测量中的误差的大小, 调整定后残差;

使用所述经调整的定后残差, 来计算检验统计量; 以及

验证该检验统计量没有超过故障门限。

20. 根据权利要求 14 的方法, 其中计算与一个卫星相关联的相关值包括:

计算残差灵敏度矩阵;

计算对应于所述多个 GPS 测量的残差; 以及

根据该残差和该残差灵敏度矩阵, 计算与该卫星相关联的相关系数。

21. 根据权利要求 14 的方法, 其中将多个卫星中的一个卫星选择为促成故障测量的卫星包括:

识别最高相关值; 以及

将与最高相关值相关联的卫星选择为促成故障测量的卫星。

22. 一种包含计算机可执行程序指令的计算机可读介质, 当执行该指令时, 导致数字处理系统履行一用于识别多个测量中的故障测量的方法, 其中所述多个测量用于确定一离散时间受控过程的状态, 该方法包括:

计算多个相关值, 每个相关值与所述多个测量之一相关联; 以及

将与该多个相关值中的最高相关值相关联的测量选择为故障测量。

23. 根据权利要求 22 的计算机可读介质, 其中该方法还包括:

确定故障测量中的误差的大小。

用于接收机自主的完整性监视和故障检测及消除的方法

技术领域

[0001]本发明总地涉及在离散时间受控过程中的故障检测及消除 (FDE)，并且具体地涉及用于在全球定位系统 (GPS) 中的接收机自主的完整性监视 (RAIM) 的方法。

背景技术

[0002]GPS 使用在空间的卫星来定位地球上的物体。利用 GPS，来自卫星的信号到达 GPS 接收机并且被用于确定 GPS 接收机的位置。目前，对应于带有锁定的 GPS 卫星信号的每个相关器信道的两种类型的 GPS 测量可用于民用 GPS 接收机。这两种类型的 GPS 测量是伪距离，和用于两个载波信号 L1 和 L2 的积分的载波相位，该载波信号的频率分别是 1.5754 GHz 和 1.2276 GHz，或者波长分别是 0.1903m 和 0.2442m。伪距离测量 (或代码测量) 是所有类型的 GPS 接收机都能够进行的、一种基本 GPS 可观察量。它利用调制到载波信号中的 C/A 或 P 代码。这种测量记录相关代码从卫星行进到接收机所花费的视时 (apparent time)，即信号到达接收机的时间 (根据接收机时钟) 减去信号离开卫星的时间 (根据卫星时钟)。当信号到达接收机时，通过积分该信号的重构载波来获得载波相位测量。因此，载波相位测量也是一种传输时间差的量度，该时间差由信号离开卫星的时间 (根据卫星时钟) 和信号到达接收机的时间 (根据接收机时钟) 确定。然而，因为当接收机开始跟踪信号的载波相位时，在卫星和接收机之间的传输中整周的初始数目通常是未知的，所以传输时间差可能是错了多个载波周期，即在载波相位测量中存在整周的模糊性。

[0003]利用可用的 GPS 测量，通过将信号的行进时间乘以光速来计算一个 GPS 接收机和多个卫星中每一个之间的测距或距离。这些测距通常称为伪距离 (假距离)，因为接收机时钟通常具有明显的时间误差，这导致在测量的测距中有常见的偏差。作为常规导航计算的一部分，这种由接收机时钟误差所致的常见偏差连同接收机的位置坐标一起被求出。各种其它因素也导致计算出的测距中的误差或噪声，包

括星历表误差、卫星时钟定时误差、大气效应、接收机噪声和多径误差。对于独立的 GPS 导航，其中具有 GPS 接收机的用户获得相对于被考虑的多个卫星的代码和/或载波相位测距而不用与任何基准站协商，用户用来减少测距中误差或噪声的方式十分有限。

[0004]为了消除或减少这些误差，通常将差分操作用于 GPS 应用。差分 GPS (DGPS) 操作通常牵涉到基本基准 (base reference) GPS 接收机、用户 GPS 接收机以及用户和基准接收机之间的通信机制。基准接收机被放在已知位置上，并且该已知位置用于产生与上述部分或全部误差因素相关联的校正。该校正被提供给用户接收机，并且用户接收机然后使用该校正来适当地校正其计算出的位置。该校正可以采用以下形式：校正在基准地点处确定的基准接收机位置，或者校正特定 GPS 卫星的时钟和/或轨道。对基准接收机位置的校正不如对 GPS 卫星时钟或轨道的校正灵活，因为为了最佳的精确度，它们需要用户接收机和基准接收机观察到相同的卫星。

[0005]差分 GPS (DGPS) 的基本概念是利用在 GPS 测量中固有的误差的空间和时间相关性来抵消由于这些误差因素而产生的伪距离和/或载波相位测量中的噪声因素。然而，当 GPS 卫星时钟定时误差（它表现为伪距离或载波相位测量上的偏差）在基准接收机和用户接收机之间完全相关时，大部分其它误差因素或者不相关，或者该相关性在广域应用（即当基准和用户接收机之间的距离变大时）中减少了。

[0006]为了克服在广域应用中 DGPS 系统的不精确性，已经开发了各种广域 DGPS (WADGPS) 技术。WADGPS 包括与计算中心或集线器通信的多基准站的网络。根据基准站的已知位置和由基准站进行的测量，在集线器上计算误差校正。然后，被计算出的误差校正经由诸如卫星、电话或无线电之类的通信链路被发送给用户。通过使用多基准站，WADGPS 对误差校正提供更多精确估计。

[0007]因此，具有 GPS 接收机的用户可以使用不同导航模式，即独立 GPS、DGPS、WADGPS、载波相位 DGPS 等。无论使用这些导航模式中的哪一种，总是有可能根据有的故障测量（例如，相对于失败的卫星的测量）来计算相对于卫星的测距。当这个测距用于确定用户位置时，将产生有误差的或错误的位置。因此，有故障的测量能够导致严重降低 GPS 系统的可靠性和完整性。因此，为了 GPS 系统中的故障检

测及消除 (FDE) 已经研发了各种完整性监视技术。接收机自主的完整性监视 (RAIM) 是 FAA 为 GPS 中使用冗余 GPS 卫星测量的完整性监视方法造出的名字。

[0008] RAIM 和 FDE 规程的文献是广泛的。然而, 在文献中的大多数规程涉及到航空用途并且试图将概率误差限制在位置域中。结果, 它们通常涉及量很大的计算。描述 RAIM 规程的最早的论文是 Brown 和 McBurney 的论文 “Self - Contained GPS Integrity Check Using Maximum Solution Separation (使用最大解分离的自包含 GPS 完整性检查)”, Navigation vol. 35, No. 1, 第 41 - 53 页。在这篇论文中, 作者提出: (1) 相对于被考虑的 n 个卫星获得 GPS 测量; (2) 对于 n 个卫星中的每一个, 根据相对于其它 $(n - 1)$ 个卫星的测量求出用户位置; (3) 在水平面中计算各解之间的所有可能距离, 并确定这些可能距离中的最大距离; 以及 (4) 使用该最大距离作为检验统计量, 并且当该最大距离超过门限时宣布失败。显然, 这个技术在计算上强度较大, 并且不将一特定的测量或卫星隔离为有故障的。

[0009] 另一早先的论文是 Parkinson 和 Axelrad 的 “Autonomous GPS Integrity Monitoring Using the Pseudorange Residual (使用伪距离残差的自主 GPS 完整性监视)”, Navigation, vol 35, No. 2, 第 255 - 271 页。在这篇论文中, 作者提出了一种基于伪距离测量残差的良好检验统计量, 但是当使用该检验统计量隔离失败的卫星时, 他们使用一种与 Brown 和 McBurney 所使用的类似的方案, 即对于多个卫星中的每一个, 它们计算一个检验统计量而省去相对于该卫星的测量。此外, 这个规程呈现过多的计算负担。

发明内容

[0010] 一种用于在由一个 GPS 接收机相对于该 GPS 接收机所考虑的多个卫星而获得的多个 GPS 测量中检测和识别有故障的测量的方法, 它确定该多个 GPS 测量是否包括有故障的测量。响应该多个 GPS 测量包括故障测量的确定, 该方法通过计算与该多个卫星中的每一个相关联的相关值、并且将与最高相关值相关联的卫星选择为促成该故障测量的卫星, 从而识别出促成该故障测量的卫星。在一个实施例中, 为了确保识别出正确的卫星, 当最高相关值超过预定门限值并且该预

定门限值充分大于第二最高相关值时，选择与最高相关值相关联的卫星。在一个可替换实施例中，当在最高相关值和第二最高相关值之间的差值超过预定门限时，选择与最高相关值相关联的卫星。

[0011] 在一些实施例中，通过使用对应于多个 GPS 测量的定后残差来计算检验统计量，并且将该检验统计量与门限残差值相比较（该门限残差值是基于 GPS 接收机使用的导航模式来选取的），从而确定该 GPS 测量是否包括故障测量。如果检验统计量超过门限残差值，则检测到故障测量。

[0012] 在一些实施例中，与一个卫星相关联的相关值是与该卫星相关联的相关系数的绝对值。根据对应于多个卫星的残差灵敏度矩阵以及包括对应于多个 GPS 测量的定后残差的残差向量，来计算该相关系数。

[0013] 在一些实施例中，根据对应于多个卫星的残差灵敏度矩阵和均方根残差，来确定故障 GPS 测量中的误差的大小。

附图说明

[0014] 图 1 是一个计算机系统的框图，该计算机系统可被用来执行一种用于检测和识别故障 GPS 测量或促成故障 GPS 测量的卫星的方法。

[0015] 图 2 是一个流程图，它说明了所述用于检测和识别故障 GPS 测量或促成故障 GPS 测量的卫星的方法。

[0016] 图 3 是一个流程图，它说明了一种用于确定多个 GPS 测量是否包括故障 GPS 测量的方法。

[0017] 图 4 是一个流程图，它说明了一种用于在多个 GPS 测量中识别故障 GPS 测量的方法。

[0018] 图 5A 是一个流程图，它说明了一种用于将具有最高相关值的卫星识别为促成故障 GPS 测量的卫星的方法。

[0019] 图 5B 是一个流程图，它说明了另一种用于将具有最高相关值的卫星识别为促成故障 GPS 测量的卫星的方法。

[0020] 图 6 是一个流程图，它说明了一种用于验证已正确识别出促成故障测量的卫星的方法。

具体实施方式

[0021]图 1 说明了一个计算机系统 100，该计算机系统可被用来执行用于在多个 GPS 测量中检测和识别故障 GPS 测量的方法。基于来自多个卫星 110-1, 110-2, ..., 110-n 之一的信号，由 GPS 接收机 122 进行该多个 GPS 测量中的每一个测量，其中 n 是 GPS 接收机 122 所考虑的卫星的数目。该多个卫星或这些卫星的任一个或多个在本文件的下文中往往称为卫星 110。在一些实施例中，GPS 接收机 122 和计算机系统 100 在单个外壳内被集成在单个设备中，例如是便携式、手持式或甚至可佩带式的位置跟踪设备，或者是安装在交通工具上的或否则为移动式的定位和/或导航系统。在其它实施例中，GPS 接收机 122 和计算机系统 100 不被集成在单个设备中。

[0022]如图 1 所示，计算机系统 100 包括中央处理器 (CPU) 126、存储器 128、输入端口 134、输出端口 136 和 (可任选的) 用户界面 138，它们通过一个或多个通信总线 129 被相互耦合。存储器 128 可包括高速随机存取存储器，并且可包括非易失性大容量存储器，例如一个或多个磁盘存储设备。存储器 128 优选地存储操作系统 131、数据库 133 和 GPS 应用规程 135。GPS 应用规程包括用于实现检测和识别故障 GPS 测量的方法的规程 137，正如下面更详细描述。存储在存储器 128 中的操作系统 131、应用程序和规程 135 和 137 是用于供计算机系统 124 的 CPU 126 来执行的。存储器 128 还优选地存储在执行 GPS 应用规程 135 和 137 (包括 GPS 伪距离和/或载波相位测量 139) 期间使用的数据结构，以及在本文件中讨论的其它数据结构。

[0023]输入端口 134 是用于接收来自 GPS 接收机 122 的数据，输出端口 136 是用于输出数据和/或计算结果。数据和计算结果还可在用户界面 138 的显示设备上示出。

[0024]图 2 说明了一种方法 200，用于在由 GPS 接收机 122 相对于多个卫星 110 而获得的多个 GPS 测量中检测和识别故障 GPS 测量。如图 2 所示，方法 200 包括步骤 210，用于确定多个 GPS 测量是否包括故障测量。响应于在步骤 210 中多个 GPS 测量包括故障测量的确定，方法 200 还包括步骤 220，在该步骤中在多个 GPS 测量中隔离或识别故障测量，或者在多个卫星中隔离或识别促成故障测量的卫星。利用被识别出的促成故障测量的卫星，方法 200 可包括可选步骤 230，在该

步骤中确定故障测量中的误差的大小，以及可选步骤 240，用于验证已经进行了正确的识别。

[0025]图 3 说明了一种用于在步骤 210 中确定 GPS 测量是否包括故障测量的方法 300 的一个实施例。如图 3 所示的，方法 300 包括：步骤 310，在该步骤中计算对应于多个 GPS 测量的定后残差 (post-fix residual)；以及步骤 320，在该步骤中使用定后残差形成检验统计量，并且将该检验统计量与门限相比较以确定该多个 GPS 测量是否包括故障测量。GPS 测量的残差表示在该 GPS 测量和该 GPS 测量的预测或期望值之间的不一致。在调整 GPS 接收机的位置和时钟偏离之前，残差通常称为定前残差 (pre-fix residual) 或者测量创新 (measurement innovation)。基于在一个 GPS 测量和对该 GPS 测量的理论预测之间的差值可以计算出测量创新。可替换地，对应于一个 GPS 测量的测量创新可以被计算为该 GPS 测量和从 GPS 接收机的初始估计状态计算出的该 GPS 测量期望值之间的差值，正如下面所讨论的。

[0026]无论导航模式如何，利用 GPS 的导航牵涉到由线性随机差分方程支配的离散时间受控过程：

$$Hx = z + n \quad (1)$$

其中 x 是离散时间受控过程的状态向量，并且在 GPS 的情况下， x 包括对 GPS 接收机的位置和时钟偏离的校正， H 是测量灵敏度矩阵，其包括从 GPS 接收机到 n 个卫星中每一个的状态向量或单位向量的方向余弦， z 是包括对应于多个 GPS 测量的测量创新的测量创新向量，以及 n 是测量噪声向量。在载波相位测量的情况下，状态向量可包括未知含混因数 (ambiguity factor)。

通常以两步处理过程来获得定后残差。首先，进行 x 的最小二乘解，即

$$\hat{x} = (H^T H)^{-1} H^T z \quad (2)$$

或

$$\hat{x} = (H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} z \quad (3)$$

对于加权最小二乘解，方程式 (4) 中 R 是测量协方差矩阵以及

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中 σ_i , $i=1, 2, \dots, n$ 表示 GPS 测量噪声相对于第 i 个卫星的标准偏差。用于计算 σ_i 的方法的例子可在以下文献中找到, Peter Bona 的 “Precision, Cross Correlation and Time Correlation of GPS Phase and Code Observations (GPS 相位和代码观察的精确度、互相关性和时间相关性)”, GPS Solution, Vol. 4, No. 2, Fall 2000, p. 3 - 13), 或者 Yang, Y. 的 “Tightly Integrated Attitude Determination Methods for Low-Cost Inertial Navigation: Two-Antenna GPS and GPS/Magnetometer (用于低成本惯性导航的紧密集成的空间方位角确定方法: 两天线 GPS 和 GPS/磁力计)”, Ph. D. Dissertation, Dept. of Electrical Engineering, University of California, Riverside, CA June 2001), 二者在此引入以供参考。

[0027] 根据下面的方程式, 对在方程式 (3) 或 (4) 中计算出的状态的校正被用于在方法 300 的步骤 310 中将测量创新 (定前残差) 变换为一组定后残差:

$$\Delta = Sz \quad (5)$$

其中 Δ 是残差向量, 包括作为其元素的、对应于多个 GPS 测量的定前残差, 并且 S 是残差灵敏度矩阵:

$$S = (I - H(H^T H)^{-1} H^T) \quad (5a)$$

或

$$S = (I - H(H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1}) \quad (5b)$$

[0028] S 被称为残差灵敏度矩阵, 因为它是一个这样的矩阵, 即其元素是对应于测量创新中单位改变 (unity change) 的残差。可以通过下面的讨论来对此进行解释。方程式 (1) 可以被解释为包括对应于一组任意测量创新向量的一组状态向量:

$$HX = Z \quad (6)$$

其中 X 包括对应于一组任意测量创新向量 $z_1, z_2 \dots z_n$ 的一组状态向

量 $x_1, x_2 \dots x_n$ 。那么，如果让 Z 是单位矩阵，则可以得到上述对应于一组测量创新向量的状态向量，每个状态向量表示多个卫星中各自不同的一个卫星的测量创新中的单个单位改变（例如，一米或任何任意的单位），同时其它卫星的测量创新保持不变，如下面方程式所示出的：

$$HX=I \quad (7)$$

X 的最小二乘解是：

$$\hat{X} = (H^T H)^{-1} H^T \quad (8)$$

对于加权最小二乘解，这变为：

$$\hat{X} = (H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} \quad (9)$$

[0029] 根据该最小二乘解，将方程式 (8) 乘以 H 得出关于每个卫星的测量创新的预测：

$$H\hat{X} = H(H^T H)^{-1} H^T \quad (10)$$

从修正输入值中减去这个预测，即该单位矩阵，可以获得一个包括测量创新中单位改变的残差的矩阵，该矩阵是方程式 (5a) 或 (5b) 中的残差灵敏度矩阵 S 。如方程式 (5) 所示， S 矩阵可以用于将定前残差（测量创新）直接映射到定后残差。

[0030] 因此， S 矩阵的每一列（或每一行）包括对应于多个卫星之一的测量创新中的单位改变的残差，同时多个卫星中的其它卫星的测量创新保持不变。 S 矩阵具有多个有趣的属性：它是对称的；它是等幂的，即 $S = S^2 = S^3 = \dots$ ；任一行或任一列的元素的和等于零；并且任一行或任一列的长度等于相关对角元素的平方根。因为对于大多数导航模式来说状态向量 x 具有四个元素，所以 S 的秩是 $n - 4$ ，其中 n 是卫星的数目。

[0031] 利用 S 矩阵，根据方程式 (5) 在步骤 310 中可以计算残差向量 Δ 中的定后残差。该定后残差可以被用于计算均方根残差 δ ， δ 是残差向量 Δ 除以测量数目 n 的范数值（或长度），即

$$\delta = \sqrt{\frac{\Delta^T \Delta}{n}} \quad (11)$$

[0032] 在步骤 310 中计算定后残差之后，方法 300 还包括步骤 320，在该步骤中定后残差或均方根残差被用于形成检验统计量，然后

将该检验统计量与故障门限相比较以确定多个 GPS 测量是否包括故障测量。检验统计量可以是均方根残差，或者它可以是用适当的归一化相对于卫星数目（例如 $(n-4)$ 的平方根）进行缩放的定后残差向量的长度，如在下面方程式中的：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\Delta^T \Delta}{(n-4)}} \quad (12)$$

可替换地，当不关心很小的误差时，故障门限可以被设置得足够大以便缩放相对不明显。因此，检验统计量 σ 可以简单地是定后残差向量的长度，即：

$$\sigma = \sqrt{\Delta^T \Delta} \quad (12a)$$

[0033] 当检验统计量大于故障门限时，则确定多个 GPS 测量包括故障测量。因为 GPS 接收机 122 的测量噪声电平（或位置精度）经常取决于 GPS 接收机工作的导航模式，所以在一些实施例中故障门限值被选择为符合于 GPS 接收机 122 使用的导航模式。

[0034] 图 4 说明了一种方法 400 的一个实施例，方法 400 用于在方法 200 的步骤 220 中识别故障测量或促成故障测量的卫星。如图 4 所示的，方法 400 包括步骤 410，在该步骤中计算与多个测量中的每一个相关联的相关值、或与多个卫星中的每一个相关联的相关值；以及包括步骤 420，在该步骤中将多个卫星 110 中一个与最高相关值相关联的卫星识别为促成故障测量的卫星，或者将相对于该与最高相关值相关联的卫星的该 GPS 测量识别为故障测量。

[0035] 在一些实施例中，根据与该卫星相关联的或者与相对于该卫星的多个 GPS 测量之一相关联的相关系数，来计算与多个卫星中的每一个卫星相关联的相关值。与一个卫星，例如第 j 个卫星（其中 $j = 1, 2, \dots, n$ ）相关联的相关系数表示在多个 GPS 测量的残差和对应相对于第 j 个卫星的测量创新中单位改变的残差之间的相关性，同时其它卫星的测量创新保持不变。因此，根据下面方程式使用 S 矩阵和残差向量 Δ 来计算与第 j 个卫星相关联的相关系数：

$$\rho_j = \frac{\sum \Delta_i \cdot s_j'}{|\Delta| s_j'} \quad (13)$$

其中 ρ'_j 是与第 j 个卫星相关联的相关系数, Δ_i 是残差向量 Δ 的第 i 个元素, s'_{ij} 是 S 矩阵的第 i 行第 j 列的元素, $|\Delta|$ 是残差向量 Δ 的范数值, s'_j 表示 S 矩阵的第 j 列、并且求和是遍及 Δ 的所有元素或 S 矩阵的第 j 列的所有元素。应该注意的是, s'_j 的长度 $|s'_j|$ 等于对角元素 s'_{ij} 的平方根。

[0036] 在一个实施例中, 与一个卫星相关联的相关值等于与该卫星相关联的相关系数的绝对值。利用被这样计算出来的相关值, 在与多个卫星相关联的相关值中, 最高相关值所关联的卫星在步骤 420 通常被识别为促成故障测量的卫星。然而, 可能需要额外的检查以确保识别出正确的卫星。

[0037] 当仅仅有 5 个卫星可供利用时, 与每个卫星相关联的相关系数应该大约是 1 (或 -1)。这是因为自由度仅仅是 1 (比状态向量中的未知者的数目多 1 个卫星)。仅仅利用对应于 5 个卫星的 5 个测量, S 矩阵中的每一列与残差向量完全相关, 只是列的长度不同。换句话说, 来自其中任一卫星的故障测量都会引起大的均方根残差, 该大的均方根残差在方法 200 的步骤 210 中指示故障。而且, 即使当卫星的数目大于 5 时, 对于退化几何也能发生类似现象。如果多于一个卫星与接近 1 或 -1 的相关系数相关联, 则指示这样一个退化几何。

[0038] 因此, 为了确保正确地识别促成故障测量的卫星, 在步骤 420 中可以使用分别如图 5A 或 5B 所示的方法 500A 或 500B。方法 500A 包括步骤 510A, 在该步骤中在与多个卫星相关联的相关值中识别出最高相关值。方法 500A 还包括步骤 520A, 用于确定最高相关值超过预定门限值; 以及包括步骤 530A, 用于确定预定门限值充分大于同多个卫星相关联的相关值中的第二最高相关值。可替换地, 使用方法 500B, 其包括: 步骤 510B, 在该步骤中识别出最高和第二最高相关值; 步骤 520B, 在该步骤中计算最高和第二最高相关值之间的差值; 以及步骤 530B, 用于确定该差值超过预定最小差值。

[0039] 利用被识别出的促成故障测量的卫星, 方法 200 还可包括步骤 230, 在该步骤中估计故障测量中的任何误差的大小 (或故障的大小)。估计故障的大小有时是有用的, 特别是当方法 200 用于识别实时动态 (RTK) 导航模式中的故障测量时。由于 RTK 导航通常涉及到载波相位测量并且因此涉及到整周模糊性的分辨率, 所以测量故障可以

是跟踪回路中的周滑移或不恰当地确定整周模糊性造成的结果。当情况如此时，故障的大小将是载波波长的倍数。假定具有最高相关值的卫星（例如卫星 110 - k，其中 k 是 1, 2... 或 n）被识别，则通过将均方根残差除以 S 矩阵的与卫星 100 - j 相关联的列的长度而得出对误差 e_k 的大小的最佳估计。因此， e_k 是对应于卫星 k 测量创新中单位改变的均方根残差，同时用于其余多个卫星的测量创新保持不变。由于 S 矩阵的列的长度等于 S 矩阵的相应对角元素的平方根，所以有：

$$e_k = \frac{\delta\sqrt{n}}{\sqrt{s_k^k}} \quad (14)$$

应该注意的是，利用不良几何条件，对角元素可以很小。然而，在导致均方根残差超过检测门限之前，对角元素越小，则来自相应卫星的测量误差肯定越大。

[0040] 利用所估计的故障测量中的误差的大小，方法 200 还可包括步骤 240，用于验证在多个 GPS 测量中仅仅存在一个故障测量并且正确地对促成故障测量的卫星进行识别。图 6 说明了一种用于履行步骤 240 中的验证的方法 600。如图 6 所示，方法 600 包括步骤 610，在该步骤中根据下面方程式调整残差向量 Δ 以解决该误差：

$$\Delta' = \Delta + SE \quad (15)$$

其中 E 是一个向量，它具有一些对应于其测量没有误差的卫星的零元素，以及一个对促成故障测量的卫星 100 - k 拥有 e_k 值的元素。方法 600 还包括步骤 620，在该步骤中在使用经调整的残差向量 Δ' 替代方程式 (11)、(12) 或 (12a) 中的残差向量 Δ 之后，根据这些方程式来重新计算检验统计量。如果已经正确地进行了故障识别，则重新计算出的检验统计量现在应当通过对于检验统计量的门限检验，以表明已经消除故障。因此，方法 600 还包括步骤 630，在该步骤中将重新计算出的检验统计量与故障门限相比较，以验证在多个 GPS 测量中仅仅存在一个故障测量并且正确地对促成故障测量的卫星进行了识别。

[0041] 上述用于识别故障 GPS 测量的方法在计算上是高效的，因为它完全工作在测量域中。当被跟踪的卫星多于 5 个时，该方法可被用于仅以额外计算复杂性上很少的成本，使用 GPS 来显著地改善定位和导航的可靠性。

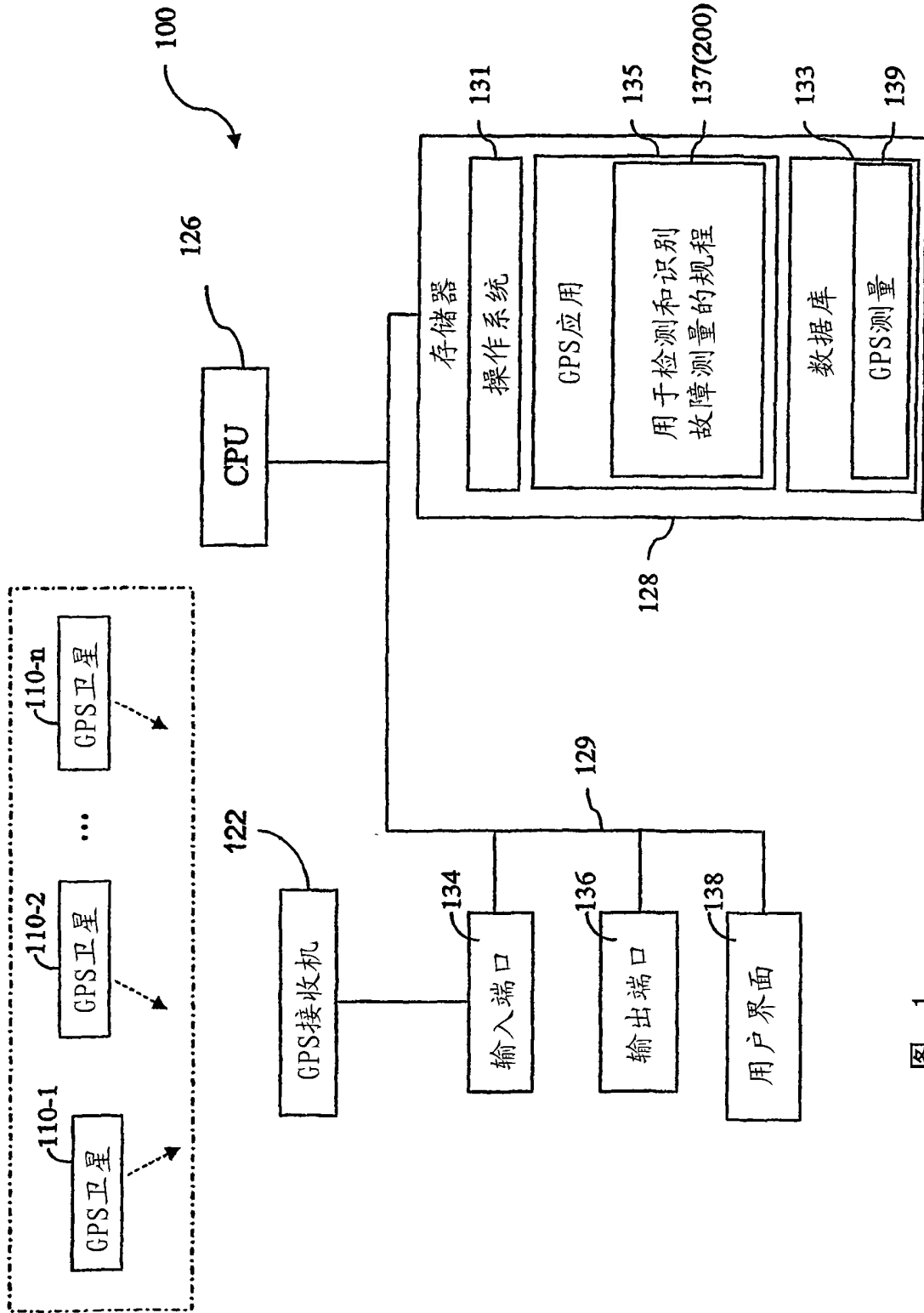


图 1

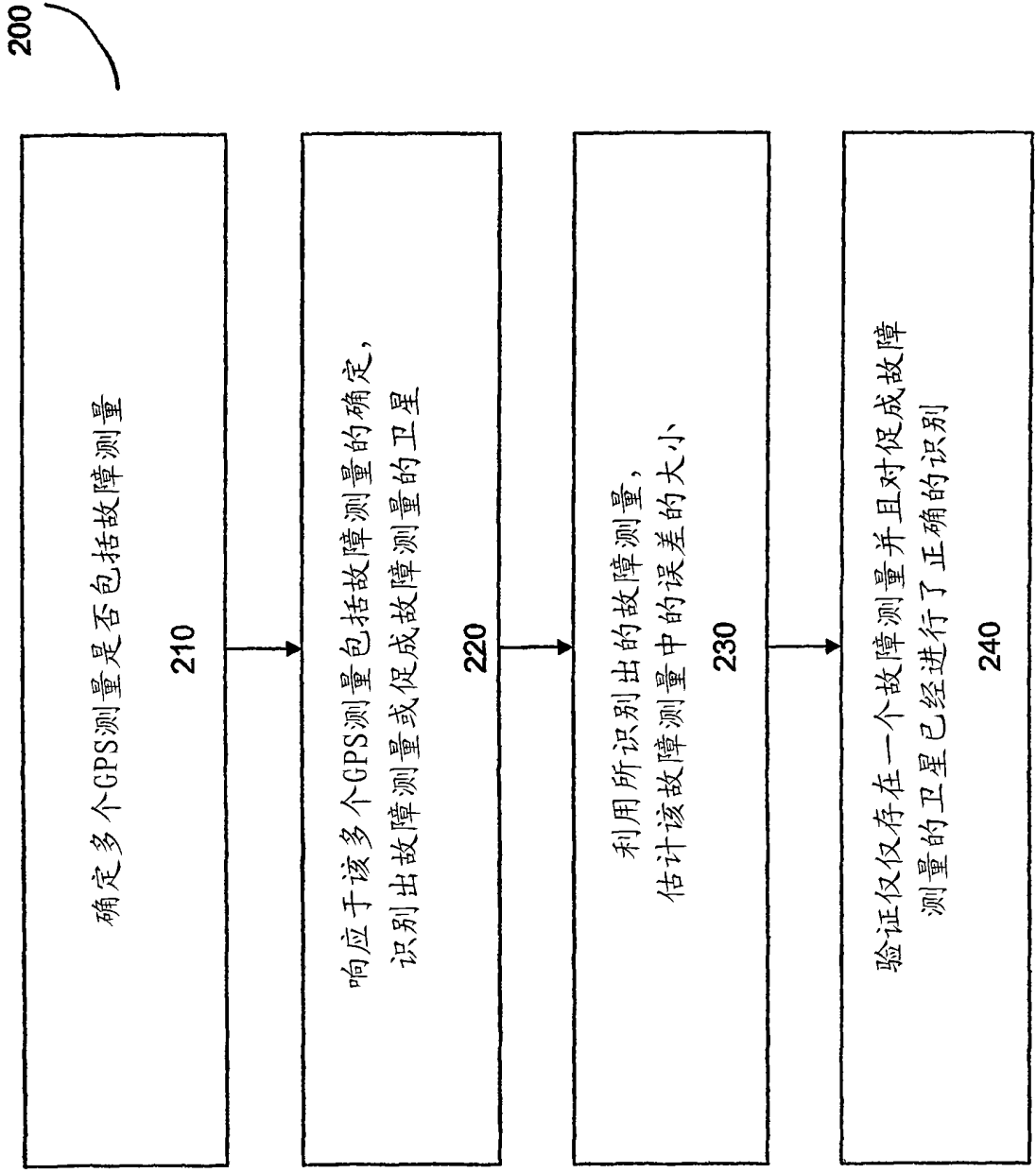


图 2

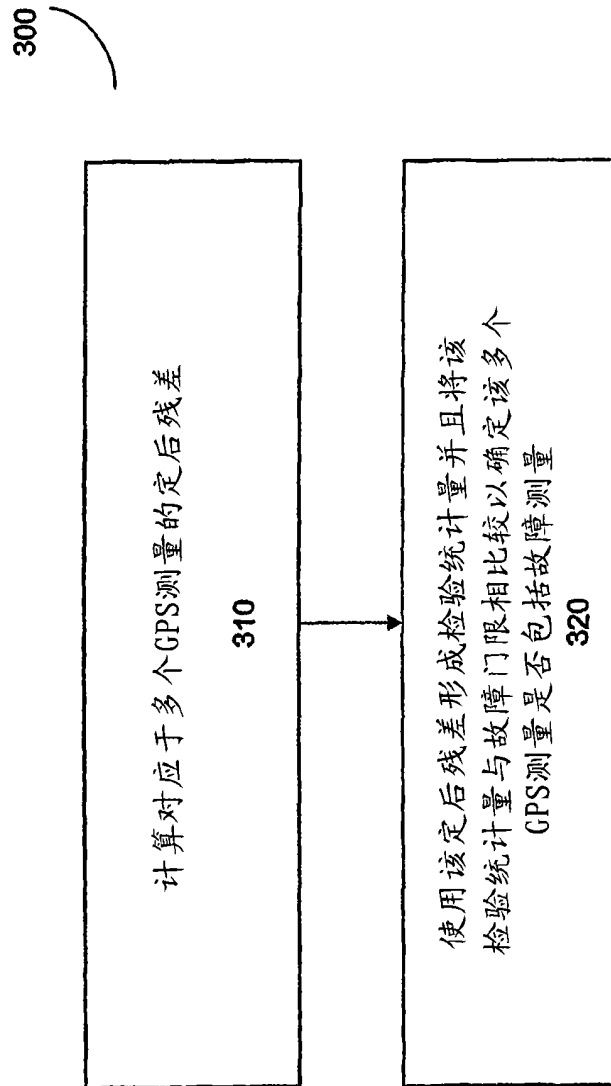


图 3

400

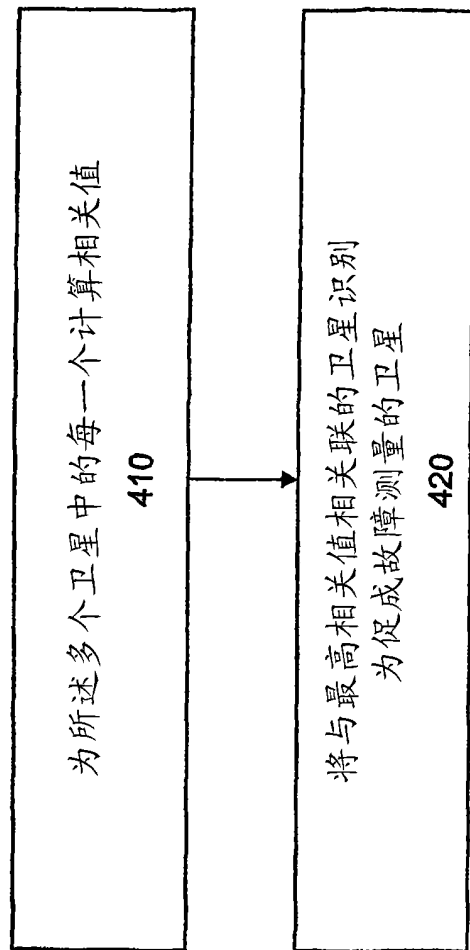


图 4

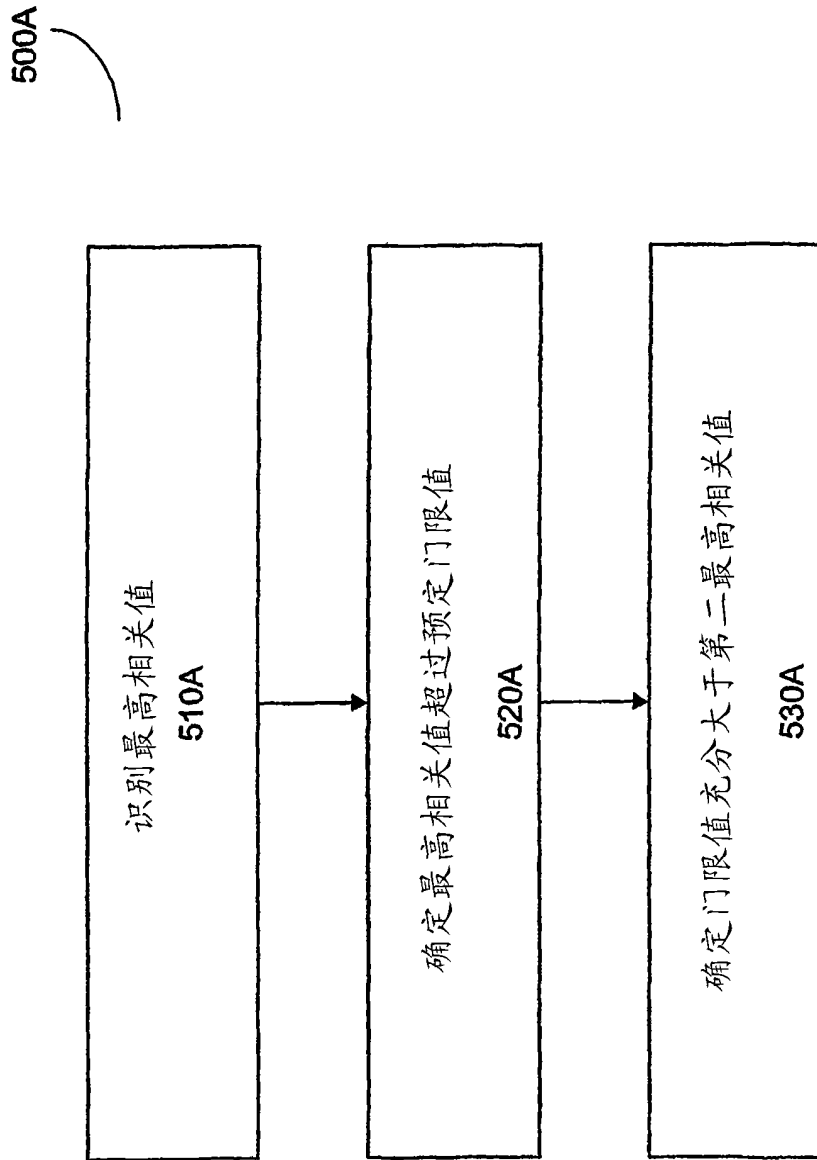


图 5A

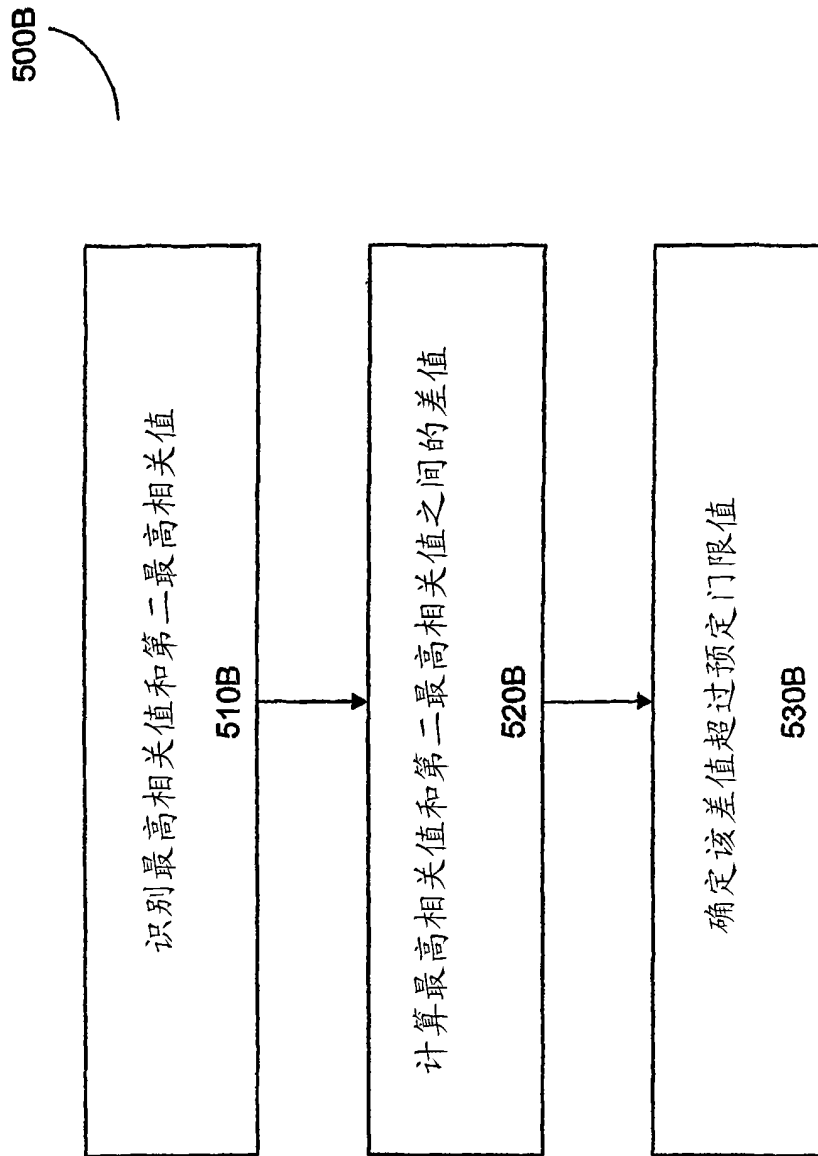


图 5B

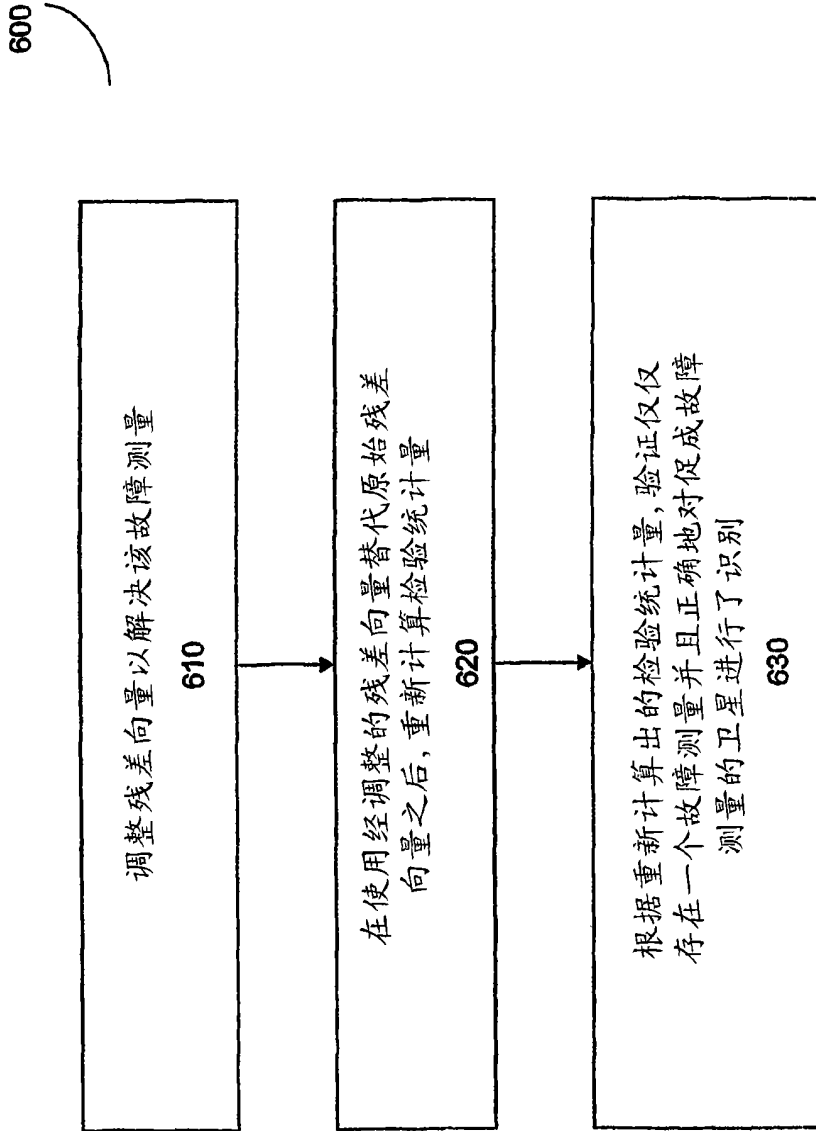


图 6