



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 1726406 B

(45) 授权公告日 2011.08.17

(21) 申请号 200380106136.0

代理人 徐谦 杨红梅

(22) 申请日 2003.12.16

(51) Int. Cl.

(30) 优先权数据

G01S 5/14 (2006.01)

0216227 2002.12.19 FR

(56) 对比文件

(85) PCT申请进入国家阶段日

M. Hernandez-Pajares, J. M. Juan, J. Sanz. Impact of real-time ionospheric determination on improving precise navigation with GALILEO and next-generation GPS. Research group of Astronomy and Geomatics. 2002,

2005.06.15

(86) PCT申请的申请数据

PCT/FR2003/050176 2003.12.16

(87) PCT申请的公布数据

W02004/057364 FR 2004.07.08

审查员 沈晓东

(73) 专利权人 欧洲空间局

地址 法国巴黎

(72) 发明人 曼纽尔·埃尔南德斯-帕哈雷斯

何塞·米格尔·胡安-索诺萨

豪梅·桑斯·苏维拉纳

阿尔韦托·加西亚·罗德里格斯

(74) 专利代理机构 北京集佳知识产权代理有限公司

11227

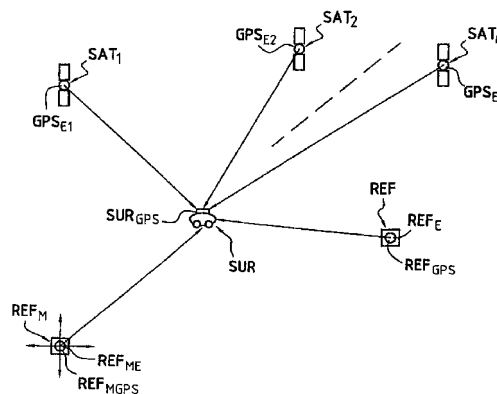
权利要求书 2 页 说明书 15 页 附图 6 页

(54) 发明名称

利用卫星发射的三载波无线电信号和电离层校正的实时导航方法与系统

(57) 摘要

本发明涉及一种实时导航方法,用于利用由卫星 (SAT<sub>1</sub>-GPS<sub>E1</sub>至 SAT<sub>n</sub>-GPS<sub>En</sub>) 发射的具有三个不同频率的三个载波来对漫游者 (SUR) 定位,以确定用户位置。该方法包括:第一步骤,包括确定超长路径载波相位模糊;第二步骤,包括估计长路径相位模糊;以及第三步骤,包括解析这些频率之一的相位模糊。一个附加步骤包括在第三步骤中实时应用电离层校正,所述电离层校正基于与由所谓主参考固定地球站 (REF<sub>M</sub>-REF<sub>ME</sub>) 计算的测地数据组合的、由参考固定地球站 (REF-REF<sub>E</sub>) 计算的所述电离层的连续更新电离层模型。本发明还涉及用于实现该方法的系统。



1. 一种用于实时导航的方法,利用三种不同频率的第一、第二和第三载波无线电信号,所述频率在数值上从所述第一载波的频率增加至所述第三载波的频率,以确定被称为漫游者的用户的位置,所述无线电信号是由绕地球沿轨道运行和观察所述漫游者的卫星上安装的给定数量的发射器发射的,所述信号由与所述漫游者相关联的接收器以及与多个固定地面参考站中的至少一个固定地面参考站相关联的接收器接收;所述无线电信号穿过围绕地球的所谓大气电离层,而且经历在所述载波中产生相位模糊的扰动,其特征在于至少包括如下步骤:

第一步骤,包括:在所述漫游者(SUR)中,根据使用单个码值的伪距组合,确定所述第三和第二载波之间相位差的所谓“超宽道”模糊;

第二步骤,包括:在所述漫游者(SUR)中,根据所述第一步骤中确定的所述“超宽道”模糊,估计所述第一和第二载波之间相位差的所谓“宽道”模糊;

第三步骤,包括:在所述漫游者(SUR)中,根据所述第二步骤中估计的所述“宽道”模糊,解析所述频率之一的模糊;以及

附加步骤,用于在所述第三步骤中应用实时电离层校正,所述电离层校正基于所述电离层( $C_{ION}$ )的连续更新的实时电离层模型。

2. 根据权利要求1的方法,其特征在于,在所述第三步骤中,所述模糊解析是对所述第一载波的频率进行的。

3. 根据权利要求1和2中任一项的方法,其特征在于,所述模型是所述电离层的描述性电离层模型,其由接收绕地球(GT)沿轨道运行和观察地球的预定数量的所述卫星( $SAT_1-GPS_{E1}$ 至 $SAT_n-GPS_{En}$ )发射的信号的至少一个所述固定地面参考站(REF)来确定,所述信号包括至少两个不同频率的载波,其中所述模型是根据来自所述发射信号的相位数据来确定的,以及其中包括用于发射与所述电离层模型对应的数据的步骤。

4. 根据权利要求3的方法,其特征在于,所述电离层模型确定是根据对所述电离层( $C_{ION}$ )中自由电子分布的估计来获得的,其中该估计是通过将该电离层( $C_{ION}$ )分解成被称为“体素”的分解体积单位( $VoX_{ijk}$ )的格子来近似进行的,其由所述电离层( $C_{ION}$ )中传播的所述信号的无线电辐射照射,其中该电离层电子密度分布在给定时刻被假定为恒定,以及其中所述确定是通过利用所谓Kalman滤波器、在由所述无线电辐射照射的每个所述体积单位( $VoX_{ijk}$ )中平均电子密度的实时解析来获得的。

5. 根据权利要求4的方法,其特征在于包括附加步骤,其包括:将与所述电离层模型相关联的数据与同时计算的测地数据组合,其中所述测地数据由所述固定地面参考站(REF)中的仅一个称为主站( $REF_M$ )的固定地面参考站计算,且被分发至所述多个固定地面参考站(REF)。

6. 根据权利要求1的方法,其特征在于包括附加步骤,其包括:在第一步骤中利用与所述三个载波相关联的三个伪距码,用于确定所述第三和第二载波之间相位差的所谓“超宽道”模糊。

7. 根据权利要求2的方法,其特征在于包括附加步骤,其包括:利用伪距和“宽道”码以及所述第二载波的频率的代码来进行完整性测试,以检测与所述第一载波的频率的所述模糊解析中的误差相关联的跳越。

8. 一种用于实现根据前述任一权利要求的方法的卫星导航系统,其特征在于包括:

多个卫星 ( $SAT_1-GPS_{E1}$  至  $SAT_n-GPS_{En}$ ), 绕地球 (GT) 沿轨道运行, 每个卫星发射不同频率的所述三载波信号; 至少一个漫游者 (SUR), 包括所述信号的接收器 ( $SUR_{GPS}$ ) 和集成计算装置, 该集成计算装置执行所述第一至第三步骤, 并且整合从所述多个卫星 ( $SAT_1-GPS_{E1}$  至  $SAT_n-GPS_{En}$ ) 发射的所述信号的无线电辐射所穿过的电离层区域的描述性电离层模型导出的所述电离层校正; 多个固定地面参考站 (REF), 每一个包括接收由所述卫星发射的所述信号的接收器 ( $REF_{GPS}$ )、用于确定该电离层 ( $C_{ION}$ ) 的所述描述性电离层模型的集成计算装置、以及用于将对应于所述电离层模型的数据发射到漫游者 (SUR) 的所述接收器 ( $SUR_{GPS}$ ) 的发射器 ( $REF_E$ ), 其中称为主站 ( $REF_M$ ) 的所述固定地面参考站中的至少一个包括所述多个卫星 ( $SAT_1-GPS_{E1}$  至  $SAT_n-GPS_{En}$ ) 发射的所述信号的接收器 ( $REF_{MGPS}$ )、用于计算测地数据的装置、以及用于将它们分发至所述多个固定地面参考站 (REF) 的发射器 ( $REF_{ME}$ )。

9. 根据权利要求8的系统, 其特征在于, 所述漫游者 (SUR) 位于与最近的固定地面参考站 (REF) 相距大于 100km 的距离处。

## 利用卫星发射的三载波无线电信号和电离层校正的实时导航方法与系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种使用卫星发射的三载波无线电信号和电离层校正的实时导航方法和系统,尤其涉及借助于连续更新的实时电离层模型而获得的校正,该模块基于来自卫星导航系统的数据,例如像三维体素 (voxel) 模块一样实现的。

[0002] 虽然不专门但是特别适用于高精度度瞬时导航领域,其如下所示一般在大约数百千米或更高级别的距离时具有一个分米以内的精确度。

### 背景技术

[0003] 通过示例,我们下面将聚焦于本发明的优选应用上,不以任何方式限制其范围。

[0004] 为了获得“物体”的精确定位、是静止或移动、以及在后一情况下与其位置、其移动、该移动的方向和 / 或其速度相关的数据,当前普遍使用的技术之一是使用通过绕地球沿轨道运行的人造卫星而发射的无线电信号。术语“物体”应该被理解为其最一般的意思,特别是陆地、海洋或空中交通工具。为简单起见,我们下面将该“物体”称为“漫游者 (rover)”。

[0005] 有各种已知的技术用于获得前述定位。它们特别地基于数个卫星在空间上的瞬时位置 (或卫星的星群,因为这些卫星可能或不一定对地静止) 和无线电波传播速度的知识。高精度度时钟被安装在这些卫星上,发射的信号包括时间戳信息,其使得精确地得知发射和接收的时刻是可能的。因此,已知波的传播速度和它们到达漫游者所用的时间,就能够确定在给定时刻观察漫游者的卫星与漫游者的理论距离。如果足够数量的卫星是可观测的,则确定漫游者相对于参考框 (frame) 在二维 (地球上的经度和纬度) 或者甚至三维 (经度、纬度和高度 / 垂直) 的坐标是可能的。

[0006] 然而,如下所示,由于各种原因而导致的测量错误累积,计算的距离 只是尽是的,漫游者位置的确定受困于不精确性的或多或少的实质程度,其依赖于所用的技术。

[0007] 最熟知的卫星导航系统之一是称为“全球定位系统”的“GPS”系统。

[0008] 通常,“GPS” (或类似系统) 卫星在两个频带内发射,一般指定  $L_1$  (等于 1.575GHz 的载波频率) 和  $L_2$  (等于 1.227GHz 的载波频率),因此将形容词“双频”用于它们。

[0009] 根据本领域技术人员公知的某些方法,这两个频率的使用使得改善漫游者相对于参考框的位置的确定精确度成为可能,但是它需要更复杂和更昂贵的“GPS”接收器。

[0010] 可使用两种主要方法来进行位置确定:实时;或者事后,其通过进行已知的“后处理”来实现。第一种情况一般指“单历元 (single-epoch)”解析 (resolution) (后面将用到的术语) 或瞬时解析,这些计算是在单个观测“历元”期间进行的。第二种方法 (“后处理”) 使得改善精确度成为可能。然而,虽然一种方法对于缓慢移动的漫游者 (例如船舶) 不具有任何主要缺点,但是对于快速移动的漫游者 (例如飞行器 (aircraft)) 是不合适的。

[0011] 精确度可通过将卫星发射的信号与源自于其位置已知的固定地面参考站的信号

加以组合来进一步改善。然而,如果漫游者行进很大距离,则站网络需要相对地密集,特别是在确定漫游者位置时需要高精度度的情况下,其相应地增加全球系统的成本。

[0012] 而且,在许多误差原因中,当考虑等于几十千米或更多的距离时,差分(difference)电离层折射是影响载波相位模糊的瞬时解析能力、从而影响提供导航的能力的主要问题之一,其中采用双频全球导航卫星系统,比如前述“GPS”系统,精确度是一个厘米级别)。该特征对于未来的三频系统比如“GALILEO”系统和“现代化 GPS”系统将保持不变。

[0013] 本质上,目前计划的三载波系统以最小数量的测地计算来提供瞬时模糊解析的高成功率和高完整性的潜在优点。这特别是因为更高数量的不同数据(即与前述三个频率相关联)变得可用,其相应地改善了获得瞬时(“单历元”)模糊解析的机会。

[0014] 但是如下所述,该解析在此依然受到电离层折射的严重影响。

[0015] 为了实现漫游者位置瞬时确定的高精度,尤其是行进很大距离的漫游者,仍需要实施技术以使它特别地减少电离层折射的有害影响。

[0016] 在现有技术中,已经提出用于满足此需要的各种方法。

[0017] 例如,一种已知方法“TCAR”,用于“三载波模糊解析”。该方法在“Proceedings of the ION GPS”1998, IX-0-13,1-6 页中公开的、U.VOLLATH 等人的、题为“ANALYSIS OF THREE-CARRIER AMBIGUITYRESOLUTION (TCAR)TECHNIQUE FOR PRECISE RELATIVEPOSITIONING IN GNSS-2”的文章中有所描述。

[0018] 还有一种已知方法“CIR”,用于“级联整数解析”。该方法在“Proceedings of the ION GPS 2000”中公开的、Jaewo JUNG 等人的“Optimization of Cascade Integer Resolution with Three Civil GPSFrequencies”的文章中有所描述。

[0019] 这两种技术共享相似的基本方式:整数的双差模糊是通过计算波频节拍 (beat) 来连续解析的。该计算是从最长进行到最短节拍波长进行的,包括所谓“宽”道 (lane) 和“超宽”道载波相位(分别具有 7.480m 和 0.862m 的波长)的组合、以及“ $L_1$  频率”处的第一载波(具有 0.190m 的波长)。

[0020] “TCAR”方法特别地构成简单方式,其设法瞬时地解析模糊的全集(以“单历元”模式)。但是,“TCAR”的性能受到随着距离而发生的电离层折射去相关的强烈影响。事实上如下所述,当其双差大于 0.26 TECU(其对应  $L_1$  的 4cm 延迟)时(与在二频系统情况中一样),电离层延迟是个问题。

[0021] “TECU”是一个用于描述某一电离层电性特征的单位。本质上,电离层可使用表示电子总数的计数或“TEC”(对于“总电子含量”)的图来描述。该图表示作为纬度和经度函数的垂直方向上的电子数量积分(integration)。单位 TEC 是指“TECU”(对于“TEC Unit”),一个 TECU =  $10^{16}$  个电子,其包含于观察卫星的观测线上排列的圆柱体内,其横截面是  $1\text{m}^2$ 。电离层中的带电粒子是由太阳产生的,其辐射强度作为所讨论的时间的函数而自然变化。因为地球在电离层下在其轴上旋转,“TEC”图一般被认为表示相对太阳而固定但是作为时间的函数而改变的参考框。

[0022] 上述门限容易被超过,正如同可通过参考从“GPS”数据计算的垂直延迟的电离层(“TEC”)图而看到的那样。这样的图例如由 Bern 大学的“JetPropulsion Laboratory”等发行,由“University Corporation for AtmosphericResearch”和其他类似组织在互联网

网上公开。

[0023] 因此,为了进一步改善“TCAR”方法,开发了一种称为“ITCAR”的整合方式。该技术例如在 VOLLATH 等人的上述文章中有所描述。

[0024] 该技术使用搜索算法和导航过滤,其中模糊是输出信号的一部分,残余电离层误差被粗略估计。对于所用技术的更详细描述,参考此文是有价值的。

[0025] 然而,虽然提供了很大改善,但是“ITCAR”技术仍然受到缺乏电离层折射双差知识的影响,因此对于大于数十千米的距离而言,限制了模糊解析的成功率,如 2001 年 5 月 21 日公布的“GNSS Symposium”Seville,VOLLATH 等人的、题为“Ambiguity Resolution Using Three Carriers-Performance Analyzing Using ‘Real’ Data”的文章中所描述的。

[0026] 再次以改善漫游者相对于参考框的位置的确定精确度为目的,还提出了将从由固定站网络产生的“双频”数据中获得的电离层的实时电离层模型与来自测地程序的数据加以组合,并使用这样的数据进行电离层校正。该方法已经多次成功地用于在“GPS”类型的二频系统中实时解析模糊。

[0027] 这种称为“WARTK”(对于“宽区域实时运动学”)的一种方法例如在 2002 年 9 月 19-22 的“ION GPS”616-625 页中公开的、Hernández-Pajares 等人的、题为“Tomographic Modeling of GNSS Ionospheric Corrections :Assessment and Real-Time Applications”的文章中有所描述。该方法使得削弱在电离层中传播的无线电波所经历的扰动的有害影响成为可能,因此在本质上改善相位模糊解析的成功率和漫游者相对于参考框的位置的确定,但是它需要大量计算,以实时产生前述模型,还实时确定将应用于距离测量的电离层纠正。

## 发明内容

[0028] 本发明旨在克服现有技术的方法和系统的缺点,其中一些已被提到。

[0029] 本发明的目的是提供一种高精度度实时导航的方法(漫游者位置的确定一般优于一个分米),其利用了卫星发射的三载波无线电信号和从与测地数据相结合的电离层模型中的数据而获得的电离层校正,该电离层描述无线电辐射所穿过的区域。

[0030] 为达到此目的,根据本发明的第一个重要方面,使用一种方法,用于瞬时(“单历元”)解析前述“TCAR”类型的卫星发射的三载波相位的模糊。以描述性的电离层模型为基础的精确实时电离层校正是由固定的参考站产生的。这些电离层校正被发送到用户,用户将它们并入到“TCAR”中。

[0031] 本发明具有三个重要优点。

[0032] 本发明所特有的能力使得能够在远离最近参考站的位置处在很长距离上获得比“ITCAR”方法更好的性能。根据本发明的方法一般允许在距离该站 100km 之处多于 90% 模糊的瞬时解析,实际上在 60km 等级时则为 100%,即使在不是非常满意的操作情形下:低的电离层值和最大的日光条件。在可比条件下,使用三频的现有技术方法仅获得 60% 等级的典型成功率。

[0033] 容易看出后者特征是很有利的,因为它不需要安装很密集的固定地面参考站网络(距离数百千米等级的站)。其结果是数量很大的总体节省,例如对于欧洲:在覆盖该大陆时,与参考站仅分离十千米等级距离的网站相比,能够减少 99% 的参考站数量,同时保持与

通过现有技术的方法而获得的相同的漫游者位置确定精确度。这事实上是所需要的安装密度,用以获得优于一分米的导航精确度,如本发明的方法在其优选应用中所寻求的。而且,本发明的方法所需的固定地面参考站网络非常类似于正在为欧洲卫星导航系统所安装的网络,已知缩写“EGNOS GNSS”(对于“欧洲对地静止导航覆盖系统-全球导航卫星系统”)。该系统基于“IMMERSAT III”卫星的星群,其暗示了与目前存在或处于安装过程中的安装的实质兼容。

[0034] 然而,根据本发明的方法依然很简单,类似于TCAR”方法。具体地,如上所述,与为二频定位系统而开发的“ITCAR”和“WARTK”方法相比,它仅需要用户(漫游者的接收器)的少量计算。

[0035] 而且,由观测卫星发射的无线电辐射所通过的区域描述性实时电离层模型仅使用载波相位数据,该数据与在单个中心计算出的测地估计相结合,该单个中心可以是参考站网络中的多个站中的一个,称为“主”站。

[0036] 因此,本发明的基本主题是一种实时导航方法,其使用第一、第二和第三不同频率的三载波无线电信号,这些频率在数值上从所述第一频率增加到所述第三频率,以确定被称为漫游者的用户的位置,所述无线电信号被绕地球沿轨道运行和观察漫游者的卫星上安装的给定数量发射器发射,所述信号由与所述漫游者相关联的接收器、以及与多个固定地面参考站中的至少一个固定地面参考站相关联的接收器接收,所述无线电信号穿过围绕地球的所谓大气电离层,而且经历在所述载波中产生相位模糊的扰动,其中至少包括如下步骤:

[0037] - 第一步骤,包括:在所述漫游者中,根据使用单个码值的伪距(pseudorange)的组合,确定第三和第二载波之间相位差的所谓“超宽道”模糊;

[0038] - 第二步骤,包括:在所述漫游者中,根据所述第一步骤中确定的所述“超宽道”模糊,估计第一和第二载波之间相位差的所谓“宽道”模糊;

[0039] - 第三步骤,包括:在所述漫游者中,根据所述第二步骤中估计的所述“宽道”模糊,解析所述频率之一的模糊;以及

[0040] 附加步骤,用于在所述第三步骤中应用实时电离层校正,所述电离层校正基于所述层的连续更新的实时电离层模型。

[0041] 本发明的另一目的是实现该方法的卫星导航系统。

## 附图说明

[0042] 现在参考附图,将更详细地描述本发明,在附图中:

[0043] 图 1A 示意性地示出地球和围绕它的被分割成体素的电离层的部分截面图、以及由三个通信卫星上的“GPS”发射器所产生的无线电波束和接收这些信号的三个地面站;

[0044] 图 1B 示意性地示出从漫游者的“GPS”接收器所看到的用于实现本发明方法的完整导航系统的体系结构;

[0045] 图 2 示意性地表示相对于相同坐标轴的地面参考站和漫游者的基线和位置;

[0046] 图 3 是示出了相对于这些相同坐标轴的漫游者轨线的图 2 的扩张图(放大);

[0047] 图 4 是示出了相比于真实电离层延迟、从根据本发明的实时电离层模型估计的延迟实例的曲线图;

[0048] 图 5 是示出了相比于真实值、利用电离层的描述性模型而实时估计的“倾斜总电子含量”(“STEC”)的双差实例的曲线图；

[0049] 图 6 是示出了相比于两个电离层门限、“STEC”双差的实时电离层模型的确定误差实例的曲线图；

[0050] 图 7A 至 7D 是示出不同导航分量中估计的误差(米)实例的曲线图；

[0051] 图 8A 至 8D 是示出相同导航成分中的真实误差(米)的实例的示意图；

[0052] 图 9 是示出了电离层双差的瞬时确定的示例成功率的示意图,其对于 1 至 30 秒范围内的反应时间(latency time)的校正,高得足以解析所有模糊(具有优于 0.26 的“TECU”),;以及

[0053] 图 10 是示出了对于达到 900 秒的反应时间的校正、电离层双差的瞬时确定的示例成功率的示意图。

### 具体实施方式

[0054] 此后,不以任何方式限制本发明的范围,我们将把重点放在其优选应用的内容上,除非另有表明,即高精度卫星导航方法的情况,其使用由卫星发射的不同频率三载波无线电波、以及从来自于由卫星的射频辐射所探测(sound)的区域的描述性实时电离层模型中导出的实时校正。

[0055] 我们现在将详细地描述根据本发明的方法的主要步骤,其使用典型的数值来标示它们。它包括三个基本步骤,其类似于前述“TCAR”方法的步骤,如下所述:

[0056] 步骤 1:

[0057] 为了解析所谓的“超宽道”模糊(在给定示例试验的数据集中具有典型的 7.5 米波长),增加了称为“伪距(pseudorange)”的码的组合。

[0058] 在已知的误差原因中是所谓的“多路径”现象。虽然伪距多路径能够减少成功率,但是此误差与“超宽道”的长波长相比一般是低幅的,且通常能够克服此问题。

[0059] 事实上,“TCAR”方式的典型第一步骤(例如参见 1998 年的 VOLLATH 等人的前述文章)是根据“超宽”道载波相位的双差(此后称为  $\nabla\Delta N_{ew}$ ,  $L_{ew}$  是“超宽”道载波的波长)来估算模糊的双差(卫星接收器对之间),此后称为  $\nabla\Delta N_{ew}$ ,其中利用了“伪距”(或代码)  $P_{ew}$  的组合,这些“伪距”(或代码)共享与这些相位组合相同的电离层相关值和符号。这就能够从“超宽道”组合中给出长的波长。 $L_{ew}$  和  $P_{ew}$  的值可由如下等式确定:

$$[0060] \quad L_{ew} = \lambda_{ew} (\phi_3 - \phi_1) = \frac{f_3 L_3 - f_1 L_1}{f_3 - f_1} = \rho^* + \lambda_{ew} b_{ew} + \alpha_{ew} I + m_{ew} + \varepsilon_{ew} + \dots$$

$$[0061] \quad P_{ew} = \frac{f_3 P_3 + f_1 P_1}{f_3 + f_1} = \rho^* + \alpha_{ew} I + M_{ew} + E_{ew} + \dots \quad (2)$$

[0062] 在等式中,  $L_x$  是具有频率  $f_x$  和具有波长  $\lambda_x$  的载波相位观测(波长单位)。X 值被显示在本说明书最后所附的表 I 中,可理解数字 1 至 3 与所述实例中的三个频率相关联。表 I 将一定数量的关联数据分组在一起:频率、波长、电离层相关和最大多路径误差,以及有利于理解根据本发明的方法的各种观测。此数据分别与三个频段  $L_1$  至  $L_3$  相关联,且分别与“超宽”和“宽”道载波相位( $L_{ew}$  和  $L_w$ )相关联。 $P_x$  是相应的“伪距”观测。载波相位和“伪距”的多路径和观测误差分别标记为  $m_x$ 、 $M_x$ 、 $\varepsilon_x$  和  $E_x$ (最大多路径值和典型测量误差也

在表 I 中列出)。非差载波相位模糊  $\lambda_x b_x$ , 其包含仪器延迟在双差之后变成波长  $\lambda_x \nabla \Delta N_x$  的倍乘 (multiplication) 整数值。电离层延迟  $\alpha_x I$  与“倾斜总电子含量”或“STEC”成比例, 即: 自由电子密度沿着卫星所辐射的波束的积分 (通常在 TECU 中测量), 如前所述。在等式 (1) 和 (2) 中,  $\rho^*$  表示不依赖于频率的项 (距离、时钟误差、对流层折射等)。

[0063] 从等式 (2) 中, 其中: 附加的较小项, 比如载波相位的结尾 (wind-up), 未被明确表示; 通过减去相应代码, 在单个观测“历元”中能够估计“超宽”道模糊的双差, 此后称为  $\nabla \Delta \hat{N}_{ew}$ , 如下面的等式所示:

$$[0064] \quad \nabla \Delta \hat{N}_{ew} = \frac{1}{\lambda_{ew}} \nabla \Delta (L_{ew} - P_{ew}) = \nabla \Delta N_{ew} - \frac{1}{\lambda_{ew}} (\nabla \Delta M_{ew} + \nabla \Delta E_{ew}) + \dots \quad (3)$$

[0065] 当没有影响接收器的大量多路径时 (通常小于 3.7 米), 此评估的误差限制小于 0.5 周期 (如表 I 中提供的值所示), 其使得将模糊瞬时地确定至准确的整数值成为可能。

[0066] 步骤 2:

[0067] 该组合“宽道”模糊是从第一步骤期间获得的明确 (unambiguous) “超宽道”载波相位中估计的。多数时候, 二者之差是由“超宽道”模糊和差分电离层折射构成的 (大约 0.06 周期 / 具有本例工作频率的 TECU)。这些非分散项被消除。这里主要问题是测量错误和载波相位信号的多路径。虽然在中间纬度处和在小于 100 千米的基线时, 差分电离层折射的典型值仅仅是少量 TECU, 但是电离层纠正的使用能够大大增加在更大距离处和在更困难的电离层场合中的成功率。

[0068] 现在将解释该步骤的主要细节。

[0069] 一旦使用相应的“伪距”解析出第一“长波长”模糊  $\nabla \Delta N_{ew}$ , 由如下等式表达的第二模糊, 比如“宽道”组合  $L_w$ :

$$[0070] \quad L_w = \lambda_w (\phi_1 - \phi_2) = \frac{f_1 L_1 - f_2 L_2}{f_1 - f_2} = \rho^* + \lambda_w b_w + \alpha_w I + m_w + \varepsilon_w + \dots \quad (4)$$

[0071] (在等式中,  $\phi_1$  和  $\phi_2$  是具有频率  $L_1$  和  $L_2$  的相位) 能够从  $\nabla \Delta N_{ew}$  和从载波相位的相应差中来估算 (见表 I 中的相应常数值), 其根据等式:

$$[0072] \quad \nabla \Delta \hat{N}_w = \frac{\nabla \Delta L_w - \nabla \Delta L_{ew} + \lambda_{ew} \nabla \Delta N_{ew}}{\lambda_w} =$$

$$[0073] \quad \nabla \Delta N_w = \frac{1}{\lambda_w} \nabla \Delta (\varepsilon_{ew} + m_{ew} - m_w) + \frac{1}{\lambda_{ew}} (\alpha_w - \alpha_{ew}) \nabla \Delta I \quad (5)$$

[0074] 本质上, 在存在适度的多路径时, 相应于等式 (5) 的误差项 (其还包括观测误差) 一般小于 0.3 米, 即小于 0.4 周期。对于实例中的频率, 从模糊解析中保留的误差项对应于 0.0580 周期 / TECU 值处的电离层折射 (见表 I)。该项可能降低成功率, 但是它在中间纬度处和在小于几百千米的距离处不是关键项, 对于此点, “STEC”值的双差 (此后称为  $\nabla \Delta I$ ) 一般小于 10 TECU。下面参考图 5 中的示意图, 将给出具体实例。

[0075] 正是在这样的背景下, 实时电离层模型的使用改善了在低纬度处和在具有较长线路的场合时的“超宽道”模糊解析成功率的状况。

[0076] 步骤 3:

[0077]  $L_1$  相位模糊是从  $L_1$  和前面所得的单值“超宽道”之差导出的。在该步骤中, 主要问

题是相应的差分电离层折射（约 1.9 周期 /TECU），其在中间纬度处可能产生数个周期的误差。

[0078] 在第三步骤中，实施了与第二步骤相似的方式，但是使用了短波和中波长而不是中波和长波之间的载波相位差，如下等式 (6) 清楚地所示：

$$[0079] \quad \nabla \Delta \hat{N}_1 = \frac{1}{\lambda_1} \nabla \Delta (L_1 - L_w + \lambda_w N_w) = \nabla \Delta N_1 - \frac{1}{\lambda_1} \nabla \Delta (\varepsilon_w + m_w - m_1) + \frac{1}{\lambda_1} (\alpha_1 - \alpha_w) \nabla \Delta I + \dots;$$

[0080] 在等式中， $\alpha_1$  和  $\alpha_w$ （一般  $\alpha_x$ ）是表 I 中定义的电离层系数，在所描述的实例中。

[0081] 在第三步骤中，载波相位测量误差和适度多路径的组合引入了另一误差，一般小于 0.2 周期（见表 I）。然而，这里关键问题是电离层折射，其对于短基线也可能引入大于 0.5 周期（-1.945 周期 /TECU）的误差。

[0082] 通过计算优于 0.26 TECU（即 0.5 周期 x TECU/1.9475）的实时电离层校正，能够克服此基本限制，以便保证正确的整数模糊评估。这些校正在步骤 4 中被引入，现在将对其进行描述。

[0083] 步骤 4：

[0084] 为了克服第三步骤中出现的问题（即为了确定最短波长的模糊），确定实时模型，以估计差分电离层折射。该模型是根据参考站网络中的固定位置处的双频载波相位数据而计算的。假设卫星发射的无线电波辐射所穿过的电离层区域的描述由此而产生。该模型的数据以已知的方式与从同时的测地计算导出的数据相结合，后者能够有利地通过网络中的固定地面站之一来执行，其称为“主”站。该技术的主要优点是，即使在与最近参考点相距几百千米处和在变化的电离层条件下，仍可估算具有小于 0.25 TECU 的典型误差的差分折射。对于中、长距离，该精确度在  $L_1$  模糊的瞬时确定中一般涉及小于 0.5 周期的误差。

[0085] 自由电子的电离层分布能够通过分解体积单位或“体素”的栅格来近似确定，其中“地球中心惯性”（或“ECI”）系统中的电子密度被假设为在给定时刻是恒定的。

[0086] 该类型的典型设置在图 1A 中有所描述。该图 1A 示意性地示出体素  $V_{ox_{ijk}}$ （ $i$ 、 $j$ 、 $k$  分别是经度、纬度和高度的坐标下标）的子午界面图，其中电离层电子密度分布是根据等式 (7) 来分解（break down）的，以便确定实时电离层模型的数据。

[0087] 在图 1A 中，地球 GT 在局部截面中示出，由电离层  $C_{TON}$  包围，其已经分别被任意细分为两个中间层  $C_{i1}$  和  $C_{i2}$ 。层  $C_{i1}$  的较低高度在所述实例中是 60km，其较高高度是 740km。层  $C_{i2}$  的较低高度是 740km，其较高高度是 1420km。体素  $V_{ox_{ijk}}$  的角表面均是  $5 \times 2$  度。

[0088] 通过图示，我们已经表示了卫星  $SAT_1$  至  $SAT_n$ （在图中示出其中三个），其中分别安装“GPS”发射器、 $GPS_{E1}$  至  $GPS_{En}$ 。这些卫星  $SAT_1$  至  $SAT_n$  考虑了全部或一些地面站，例如图 1A 中所示的三个固定参考站  $ST_1$  至  $ST_m$ ，其包括“GPS”接收器  $GPS_{R1}$  至  $GPS_{Rn}$  和集成计算装置（未表示）。

[0089] 图 1B 示意性地表示从漫游者 SUR 所看到的根据本发明方法的完整导航系统的体系结构。

[0090] 该系统需要与某些当前应用的系统比如 EGNOS 或 WAAS 相似的计算机、接口和物理资源。

[0091] 用于实现根据本发明的方法的该系统包括“GPS”接收器  $SUR_{GPS}$ ，其接收卫星发射的信号，例如图 1A 中的卫星  $SAT_1$  至  $SAT_n$ 。根据这些三频带信号，如上所述，使用集成计算装

置（未表示）来进行“TCAR”方法的三个步骤。

[0092] 它还接收来自实时电离层模型的数据信号，该模型是由参考站 REF（图 1 的固定地面参考站  $ST_1$  至  $ST_M$  的网络中最近的站）根据利用“GPS”接收器  $REF_{GPS}$  从卫星  $SAT_1-GPS_{E1}$  至  $SAT_n-GPS_{En}$  而收到的信号来确定的。站 REF 利用发射器  $REF_{E1}$  将数据从该模型传送至漫游者 SUR。

[0093] 能够在单个所谓主站  $REF_M$  中被确定的测地配置数据被其发射器  $REF_{ME}$  发射，并被分发至漫游者 SUR，以与来自电离层模型的数据组合。作为规则，该站还具有“GPS”接收器  $REF_{MGPS}$ ，就像其他固定地面参考站一样。与测地模型的数据同时地计算测地配置数据。

[0094] 以一种已知方式，使用 Kalman 滤波器，实时地解析每个照射单元  $i$ 、 $j$  和  $k$ （如上定义， $i$ 、 $j$  和  $k$  是三个尺度的坐标下标）的平均电子密度  $N_e$ ，就像随机传播过程一样来处理，并利用  $10^9$  至  $10^{10}$  电子 /  $m^3$  /  $\sqrt{hour}$  的典型过程噪声，可获得电离层确定。为了给出一个非限制实例，使用 Kalman 滤波器的处理在 Mathematics in Science and Engineering Vol. 128, Academic Press, New York, 1977 中公开的、G. J. BIERMAN 的题为“Factorization Methods for Discrete Sequential Estimation”一书中有所描述。

[0095] 根据本发明方法的重要特征，仅使用载波相位数据。因此，避免了“伪距”码噪声和多路径。载波相位极化  $B_1$ （对于每对卫星接收器，其在载波相位数据的每个连续弧中是恒定的）被同时估计，作为随机变量（当周期滑移 (cycle slip) 发生时，其变为随机白噪声过程）。在该滤波器中，这些极化是从电子密度值实时去相关的，因为卫星几何变化和两类未知元的变化已经变小，如下面等式 (7) 所示，其表示“GNSS”卫星 - 接收器对之间给定电离层信息的模型， $L_1$  和  $L_2$  是长度单位中表示的载波相位， $L_1 = L_1 - L_2$ ，且  $N_e$  为电子密度）。 $L_1$  由如下等式给出：

$$[0096] \quad L_1 = STEC + B_1 = \int_{REC}^{SAT} N_e dl + B_1 = \sum_i \sum_j \sum_k (N_e)_{i,j,k} \Delta s_{i,j,k} + B_1 \quad (7)$$

[0097] 在等式中，值“REC”和“SAT”分别与“接收器 - 卫星”对的 GPS 接收器和卫星相关， $dl$  是链接该对的视线上的基本距离，且  $\Delta s_{i,j,k}$  是 STEC 的单基本坐标表面， $i$ 、 $j$ 、 $k$  是三维的坐标下标，如上所定义的。

[0098] 该方案尤其适合用于检测电子密度分布的局部特征，且将两个层与来自全球导航卫星系统（缩写“GNSS”）的地面数据一起使用，而不是通常方法中的单个层，大大减少了电子含量的不良建模的风险。

[0099] 在“WADGNSS”（“广域差分 GNSS”）网络的情况下，根据倾斜总电子含量的这些实时校正的内容或者经过等式 (7) 获得的“STEC”，能够：

[0100] - 第一，形成站 - 卫星双差  $\nabla \Delta STEC$ ，其具有小于 1TECU 的误差，以及在参考站中获得第二（即“宽道”）模糊；以及

[0101] - 第二，在漫游者的接收器中插入单值  $L_1$ ，即在数百个 TECU 的水平时的非常精确值  $\nabla \Delta STEC$ ，在模糊的解析之后获得的值。

[0102] 如果插入值优于 0.26TECU，则漫游者的接收器能够实时地解析两个模糊。

[0103] 该方法本质上类似于前述 Hernández-Pajares 等人 (2000) 的前述文章中公开的所谓“WARTK”方法。迄今为止在各种试验中利用“WARTK”技术而获得的结果在“ION GPS 2001”中于 2001 年 9 月公开的、Hernández-Pajares 等人的、题为“Tomographic Modeling

of GNSS Ionospheric Corrections: Assessment and Real-Time Applications”的另一篇文章有所概括。为了该方法的更详细描述,参考这两篇文章是有价值的。

[0104] 在该方法的动态利用中,最重要的限制之一是局部电离层无规则的存在,比如传播的电离层扰动或“TID”(用于“行进电离层扰动”),其在使用网络中的参考站之间电离层校正的线性插值时可能产生不正确的结果。通过并入来自漫游者的双频数据,能够改善性能。

[0105] 而且,在参考站中进行计算的情况下,长距离和强电子含量梯度也可能限制该技术的性能。由于此原因,根据本发明方法的特征,开发出附加过程,以利用所谓的平滑“宽道”码,来涵盖相隔数千千米的永久和/或参考站的情况,以便改善电离层模型,由此建立用于实时模糊确定的辅助。这样的过程例如在 Journal of Geophysical Research, 2002 中公开的、Hernández-Pajares 等人的、题为“Improving the Real-Time Ionospheric Determination from GPS Sites at Very Long Distances Over the Equator”的一文中有所描述。

[0106] 然而,现有技术中所用的、利用双频“GPS”系统在漫游者的接收器中实时地解析模糊的这些方法需要大量的测地计算,以便在约二十分米级别上确保相对良好的位置确定,以解析自由浮动的电离层极化组合,因此能够在数分钟级别的聚收敛时间之后(利用前述“WARTK”方法)实时地解析模糊。

[0107] 本发明使得克服现有技术中的缺点、尤其如“WARTK”方法所揭示的缺点成为可能。它能够改善用于在参考站之间的中、长距离时(从数十千米到数百千米变化)、利用最少的测地计算量来解析三载波相位模糊的瞬时方法。该主要改善依赖于前述“TCAR”方法的第三步骤,其利用了参考站中连续计算的电离层模型所提供的实时电离层校正。

[0108] 前述步骤的附加改善也在本发明的方法中有所实现。该改善包括利用三个不同的伪距码,此后称为  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ ,而不是单个码元,其能够减少“超宽道”模糊的解析中的多路径影响。

[0109] 此外,在优选实施例中,使用伪距、“宽道”和  $L_1$  频带码,进行整体性测试,以检测与最长波长的模糊解析中的误差相关联的模糊评估中的跳越(jump)。本质上,在前述第二和第三步骤中,从等式(5)和(6)中容易看出,“超宽道”模糊误差中的一个周期产生了近似八个周期的“宽道”误差,一个周期的“宽道”误差变换成四个周期的  $L_1$  误差,  $L_1$  是所述实例中具有最短波长的载波。通常,模糊评估中的这些跳越大得足以利用相应代码来检测和过滤。

[0110] 根据本发明的该方案能够直接克服主要限制,其使得在长距离上(大于100千米)进行典型误差小于数厘米的导航变得不可能。

[0111] 本说明书末尾处的表 II 概括了现有技术中用于实时模糊解析的主要方法(“TCAR”、“ITCAR”、“WARTK”)与根据本发明的方法相比较的特征。

[0112] 为了更好地说明根据本发明方法的主要特征,我们现在描述基于数个数据集而进行的示例性试验,这些数据集是由前述“GNSS”类型的现有系统中的卫星上安装的改型信号产生器提供的,该试验利用了飞行器、飞行“表面”用户(例如陆地交通工具)或固定点的仿真。各种动态和电离层条件被纳入考虑中。

[0113] 通过图示,为了提供有意义的实例,表面交通工具的接收器(此后称为漫游者

SUR) 的模糊实时解析在各种场合下是相对于与漫游者 SUR 相距约 129km 的固定参考站 (此后称为 REF) 来具体研究的。在所述实例中,两个“GPS”载波 (分别是 1575.42 和 1227.60MHz) 和具有 1615.50MHz 频率的“GLONASS”系统的 24 通道载波构成了“GNSS”系统模拟器所采用的三个频率,对于 1Hz、20 分钟的四个卫星而言,其使用了已知的“AGGA”(对于“高级 GPS/GLONASS ASIC”)类型的有效接收器的十二个可用通道。“AGGA”是数字集成电路,其允许空间应用的高速数字信号处理,比如“DNSS”系统信号的无线电掩藏和低地球轨道确定。该电路基于“ASIC”(或“专用集成电路”)标准(所述实例中的 ATMEL T7905E)。“GLONASS”(“全球轨道导航卫星系统”)是可与“GPS”系统媲美的俄罗斯卫星导航系统。

[0114] 两个基本数据集在所述实例中被考虑,此后引用为:“P5-M0”,与最大信号功率和无多路径相关联的集合,其构成了理想情况;以及“P3-M1”,与平均功率和多路径相关联的集合。

[0115] 除了数据集中模拟的参考站接收器之外,“IGS”(对于“国际 GPS 服务”)中存在的相距大于 200 千米的更多三个站被添加用于电离层计算,其能够仿效更为显示的情形,该情形包括固定点的更大网络。

[0116] 我们现在将示出对于最困难情况的具体研究结果,即“漫游者 SUR-站 REF”对的最长基线或者约 129km。参考站 REF 是图 1A 中的站  $ST_1$  至  $ST_M$  之一。

[0117] 图 2 图示了该实例,表示出基线以及站 REF 和漫游者 SUR 相对于坐标轴、椭圆柱纬度和经度的位置,其在度数上是升级的。

[0118] 图 3 是图 2 所示漫游者 SUR 再次相对于坐标轴、椭圆柱纬度和经度的轨道拓张图(放大),其在度数上是升级的。

[0119] 这些结果的第一方面在电离层滤波器的实时性能方面有所涉及。与真实的电离层延迟(参考  $V_v$ ) 相比,从实时电离层模型估计的延迟实例(参考曲线图中的  $T_m$ ) 在图 4 中有所表示。这些值对应于来自试验的测量,进行该试验是为了表明根据本发明方法的能力。

[0120] 而且,在图 5 和 6 中示出了对于精确导航更为重要的参数:“STEC”的估计双差之间数值和差值(即误差)、漫游者 SUR 的  $\nabla\Delta\hat{I}$ 、及其真实值  $\nabla\Delta I$  (在纵坐标上以 TECU 中表示;横坐标以秒表示延迟)。

[0121] 准确地说,与相对于最远接收器或 REF 的漫游者 SUR 接收器(在大约 129km 的距离处)的真实值相比而言,图 5 示出了“STEC”的双差,标记为“ddSTEC”,其是利用了根据本发明重要方面之一的电离层模型来实时估计的。

[0122] 图 6 示出了“STEC”双差的实时电离层模型的确切误差,再次标记为“ddSTEC”。电离层的真实值与两个电离层门限“阈值<sub>1</sub>”( +0.26TECU) 和“阈值<sub>2</sub>”( -0.26 TECU) 相比较,使得能够确定第三模糊  $\nabla\Delta N_1$ 。

[0123] 92% 以上的电离层确定具有  $\pm 0.26$  TECU 门限以下的误差。因此它们精确到足以使得在没有多路径的情况下能够解析三个模糊,不将测量误差纳入考虑之中。具有大于 0.26TECU 误差的剩余 8% 评估的大部分来自于在较低高度处和在南部方向中观测的卫星,电离层梯度对于该方向是最高的。这些结果是通过向四个参考站增加第五站来略微改善的,该第五站为南部方向执行电离层校正计算。

[0124] 一旦实时电离层校正已被计算且从参考网络发射,根据本发明的方法步骤能够以述方式在漫游者 SUR 中进行,以便估计和瞬时解析(以“单历元”模式)每波束的三个模

糊。

[0125] 分别对于前述数据集“P5-M0”和“P3-M1”，模糊解析的主要结果的概括在两个表 III 和 IV 的形式中被示出，其位于本说明书末尾处。“TCAR”方法的三个步骤的成功率在如下三种情况中示出：

[0126] (a) 没有电离层校正；

[0127] (b) 具有来自当前“GPS”系统发射的 Klobuchar 电离层校正模型的相应电离层校正；

[0128] (c) 具有来自根据本发明方法的实时电离层模型的校正。

[0129] 准确地说，在关于表 III 所述的实例中，成功率(%)是相对于“超宽道”、“宽道”和  $L_1$  带频模糊(分别是  $\nabla\Delta N_{ew}$ 、 $\nabla\Delta N_w$  和  $\nabla\Delta N_1$ ) 的总计 3834 个飞行解析测试，其关于相对于最远固定点 REF(在大约 129 千米距离处)的漫游者 SUR 的接收器，且利用前述理想数据集 P5-M0(最大接收功率，没有多路径)。

[0130] 表 IV 类似于表 III，但是利用了前述数据集 P3-M1(接收功率的平均水平，多路径)。括号内的数字表示相对于观测总数的成功率。

[0131] 容易看出，当查看表 III 和 IV 时，本发明的方法，其组合了“TCAR”方法的三个步骤和应用精确实时电离层模型的步骤，使得大大增加瞬时(“单历元”)模糊确定的成功率成为可能，不仅在理想情形(数据集 P5-M0:从 0 至 92%)中，而且在具有多路径(35%，即使利用“Klobuchar 模型”类型的校正，然而利用来自根据本发明方法而产生的电离层模型的校正，成功率对于  $\nabla\Delta N_1$  达到 92%)的更困难情形(数据集“P3-M1”)中。

[0132] 查看表 IV 表明，利用受到多路径影响的数据集“P3-M1”时的重要问题之一是缺乏根据“TCAR”方法的模糊评估的完整性， $\nabla\Delta N_{ew}$  和  $\nabla\Delta N_w$  分别具有约 10%和 4%的不正确瞬时确定。

[0133] 为了增加完整性，即为了减少不正确模糊中分解(factoring)的可能性(在存在载波相位的情况下)，以及为了每个多路径编码，能够使用相应的伪距、“宽道”和“ $L_1$ ”码，试图在“TCAR”方案中检测先前最长波长的模糊中潜在的模糊确定误差(分别是“超宽道”和“宽道”模糊)，这些误差分别被“超宽道”和“宽道”中的 9 和 4 个波长因子放大，如等式(5)和(6)中所示。

[0134] 相应结果的概括在两个表 V 和 VI 的形式中示出，其位于本说明书末尾处，分别利用伪距和平滑伪距来滤除这些重要误差。

[0135] 表 V 类似于表 II，但是这里模糊解析成功率是在进行完整性测试之后计算的，即与伪距导出的模糊相比较，以便滤除“宽道”和  $L_1$  模糊中的大跳越，这些跳越由先前较长波长的模糊误差引起的。最后一栏表示可用性，即：通过利用伪距的完整性测试的 3834 个观测的百分比。括号“\*”内的数字表示在通过完整性测试之后计算的模糊百分比。如前，括号内的数字表示相对于观测总数的成功率。

[0136] 表 VI 类似于表 III，但是平滑伪距被用来代替“纯”伪距以进行完整性测试。

[0137] 容易看出，本发明的方法通过利用平滑码的完整性测试，提供了完整性约 20%的大量改善(从表 IV 中的 79%到表 VI 中的 91%)，在可用性中具有较小的降低(16%)(从 100%到 84%)。如果替代使用瞬时(“单历元”)码，则完整性进一步改善(84%)，且具有较大的可用性(90%)。当使用 Klobuchar 类型的已知“GPS”传输模型，代替来自本

发明方法的实时电离层模型的校正,则结果发生实质恶化,伴随着可用性的近乎完全缺乏。

[0138] 尽管它们适合用于获得瞬时模糊解析,但是对于刚才所述试验的可用数据集在确定瞬时(“单历元”)位置时却是很受限制的。事实上,对于该试验,仅有四个可用卫星观察 20 分钟的数据,因此用于漫游者 SUR 的瞬时导航解决方案不得不使用没有多路径的数据集“P5-M0”来计算,具有很高的可用信噪比,以便利用最少数量的四个卫星用于导航。而且,忽略了对流层延迟,对它的评估将需要至少第五个卫星。而且,从大约 7200 至 7500 秒的第一间隔在关于某些载波相位截止配置的定位确定中被略过,其潜在地归因于该时段中接收器内的测量问题。另一方面,从电离层校正和模糊解析的相应成功率来看,这些结果实际上与对于数据集“P5-M0”而获得的结果是相同的(见表 III)。

[0139] 这些限制归因于现有系统所供应的数据集的使用,它们仅受到最少量的改装。利用更真实的数据集,例如由六个或更多卫星供应的,对于定位确定的这些重要限制将消失。事实上,将能够获得更好的几何(几何“DOP”或“精确度的稀释”因子)以及检测和滤除具有模糊误差的卫星的能力。这也能够通过使用导航滤波器或自治接收器监督算法来实现。

[0140] 包含于数据集 P5-M0 中相应于四个卫星的结果在图 7A 至 7D 中示出,其示出了调整之前(图 7A)的残余、以及在实施了根据本发明的方法之后瞬时定位误差的东(图 7B)、北(图 7C)和垂直(7D)分量,其是对于与参考站 REF 相距约 129km 的漫游者 SUR 而言的。曲线图的纵坐标按米升级,横坐标(延迟)按秒升级。

[0141] 为了比较,图 8A 至 8D 表示相应的数据,但是对于真实的模糊。

[0142] 调整(图 7A)之前的残余  $\nabla\Delta L_c$  的主要特征是与  $L_1$  中的 1 个周期误差(大约 8%: 见表 III)相关联的约 10cm 误差,其产生了与跳越相似的(“单历元”)导航误差。它们也在图 7B 至 7D 中示出。它们被相应几何“精确度的稀释”因子“DOP”放大。 $L_1$  模糊的这些不正确评估通常影响每个历元可用的每三个(用于确定定位的最小数量)之中的一个双差,因此该误差三次影响定位(这些历元的约 24%,在 5cm 下三维误差是 76%,在 21 厘米下是 100%)。虽然误差分布不是 Gaussian,但是最终的有效三维值(“RMS”)对于东、北和垂直分量分别是 7、3.5 和 2 厘米。

[0143] 为了概括这些结果,当正确解析模糊时(约 92% 的测试和 77% 的历元),分别为东、北和垂直分量获得 1、1 和 2cm 的“RMS”误差;当包含具有不正确模糊解析的历元时,3、5 和 2cm 的“RMS”误差分别对于东、北和垂直分量而出现。

[0144] 而且,在调整之前,由于载波相位双差和瞬时(“单历元”)导航误差的残余计算而减少的观测在图 8A 至 8D 中被表示。可看见载波相位的大量放大,尤其在垂直分量中,产生约 5cm 的误差。该轨线(对于北、东和垂直分量,分别具有 3cm、1.1cm 和 2cm 的三维“RMS”值,在 2、2 和 4cm 处具有 95% 的水平)非常清楚地表示这样的解决方案,其可在第一次历元期间的正确模糊解析之后利用实时滤波器替代瞬时(“单历元”)模式解决方案来获得。

[0145] 为了表征电离层校正中反应时间的影响(例如归因于通信中的潜在问题),对于固定站网络中的电离层校正计算,则考虑 1 至 30 秒的延迟(30 个历元)。对于这些延迟中的每一个,计算“ddSTEC”(TECU)的成功率,以便获得对于 129km 距离处的漫游者的 0.26 TECU 绝对精确度。该比率在图 9 中被表示为反应时间(秒)的函数。容易看出,反应时间的影响被忽略直至 30 秒,对于所有反应时间则实现大于 90% 的成功率。

[0146] 在图 10 中,同时在对于参考网络和漫游者校正的情况下,考虑更长的反应时间,

从而电离层穿透点紧密保持在一起。显然的是,在 5 分钟之后,成功率从 90%降低到 85%。在 10 分钟之后,成功率进一步下降到 75%。这些值在差分电离层延迟的变化甚至更高的情形下可能更急剧地下降。

[0147] 显然的是,在中间纬度处,对于根据本发明的方法,反应时间不会引起重大问题,其能够支持高达约 5 分钟的典型反应时间。

[0148] 通过阅读上文,容易看出本发明达到下述目的。

[0149] 根据本发明的方法通过应用使用了电离层断层分析模型的实时电离层校正,伴随着最少数量的测地计算,能够获得完全的实时模糊解析。同时,它在与参考站相距多于 100 千米处在一个厘米级别上允许精确导航。

[0150] 本发明的优选应用将会在未来的卫星导航系统,比如“GALLILEO”或“现代化 GPS”中,其在不同频段中实现了载波传输。

[0151] 根据本发明方法的主要特征,具有优于一分米精确度的瞬时导航能力归因于这样的事实:并不很复杂的“TCAR”类型的三载波相位模糊解析方法与实时电离层模型的确相结合,以便能够应用电离层校正。

[0152] 本说明书中描述的示例性试验表明了在同条件下通过现有技术的方法而获得的结果的显著改善:

[0153] - 约 60%或以下的瞬时(“单历元”)成功率有所改善,在与最近固定地面参考站相距大于 100km 处,以及在难以产生电离层模型的条件(在日光最强的正午时),增加到约 90%;

[0154] - 该高效率在电离层校正中保持约 5 分钟的反应时间;

[0155] - 在数据集中,对于通过示例而保持的试验条件,尽管有限数量的卫星可用,但是仍可在“单历元”模式中同时实现相应的导航,并能够对于东、北和垂直分量分别获得 3、5 和 2 厘米的三维“RMS”值;

[0156] - 在优选实施例中,实时模糊完整性测试能够改善性能,因为简单的伪距多路径减少方案被并入该方法中;以及

[0157] - 该良好性能在困难情形下也得到证实;

[0158] - 低纬度(35 度取代 48 度),具有较高电离层值。

[0159] - 关于电离层“北赤道异常”之下热带站的极限条件,其中通常可产生最高梯度。在后者情况下,用户需要产生其自有电离层滤波器供给,并将其与来自参考网络和其自身电离层观测的校正相结合。

[0160] - 高动态,能够提供精确的电离层校正,该校正可由与参考站相距约 140km 的飞行中的飞行器使用。

[0161] 然而应当清楚,本发明不仅限于明确描述的、特别是与图 1 至 8 相关的示例性实施例。

[0162] 最后,数字表示的实例仅作为说明来提供,对于本发明的范围部构成任何类型的限制。它们源于本领域技术人员的能力之内的简单技术选择。

[0163] 表 I

[0164]

	X = 1	X = 2	X = 3	X = ew	X = w
频率 ( $f_x$ , MHz)	1575.42	1227.6	1615.5	40.08	347.82
波长 ( $\lambda_x$ , m)	0.1903	0.2442	0.1856	7.4799	0.8619
相位测量误差 ( $\epsilon_x$ , m)	$\approx 0.002$	$\approx 0.002$	$\approx 0.002$	$\approx 0.1$	$\approx 0.01$
码测量误差 ( $E_x$ , m)	$\approx 3$	$\approx 3$	$\approx 3$	$\approx 2.1$	$\approx 2.1$
最大相位 多路径 ( $m_x$ , m)	$\ll 0.05$ ( $\leq 0.01$ )	$\ll 0.06$ ( $\leq 0.01$ )	$\ll 0.05$ ( $\leq 0.01$ )	$\ll 2$ ( $\leq 0.5$ )	$\ll 0.2$ ( $\leq 0.05$ )
最大码 多路径 ( $M_x$ , m)	$\ll 450$ ( $\leq 10$ )	$\ll 450$ ( $\leq 10$ )	$\ll 450$ ( $\leq 10$ )	$\ll 450$ ( $\leq 10$ )	$\ll 450$ ( $\leq 10$ )
电离层系数 ( $\alpha_x$ , m/TECU)	-0.1623	-0.2673	-0.1543	-0.2083	-0.2031

[0165] 表 II

[0166]

	优点	缺点
“TCAR”	低的计算负荷	电离层误差, 严重限制第三模糊度的求解
“ITCAR”	通过将 TCAR 整合到导航滤波器 中而改善的结果	电离层延迟继续限制第三模糊度的求解
“WARTK”	精确实时建模; 允许与最近参考站 相距一百千米处的精确导航	高的计算负荷; 计算飞行器的第一电离层自由解决方案的需要以及大量的收敛时间是必要的
根据本发明 的方法	低的计算负荷以及电离层的精确实时建模允许距离参考站 相距达到 100km 处的精确 “单历元” 导航	

[0167] 表 III

[0168]

P5-M0/SUR2-REF5 ( $\approx 129$ km)	成功率 $\nabla\Delta N_{ew}$	成功率 $\nabla\Delta N_w$	成功率 $\nabla\Delta N_1$
无电离层校正	100%	100%	0%
<b>Klobuchar</b> 校正	100%	100%	33%
实时 <u>电离层</u> 校正	100%	100%	92%

[0169] 表 IV

[0170]

P5-M0/SUR2-REF5 ( $\approx 129$ km)	成功率 $\nabla\Delta N_{ew}$	成功率 $\nabla\Delta N_w$	成功率 $\nabla\Delta N_1$
无电离层校正	90%	95% (86)%	3% (2)
<b>Klobuchar</b> 校正	90%	95% (87)%	35% (31)
实时 <u>电离层</u> 校正	90%	95% (86)%	92% (79)

[0171] 表 V

[0172]

P3-M1/SUR2-REF5 ( $\approx 129$ km)	成功率 $\nabla\Delta N_{ew}$ -*	成功率 $\nabla\Delta N_w$ *	成功率 $\nabla\Delta N_1$ *	可用性
无电离层校正	99%	95% (94)	0(2)%	38%
<b>Klobuchar</b> 校正	99%	97% (96)	33% (32)	38%
实时 <u>电离层</u> 校正	99%	96% (92)	91% (84)	90%

[0173] 表 VI

[0174]

<b>P3-M1/SUR2-REF5</b> (≈129 km)	成功率 $\nabla\Delta N_{ew}^*$	成功率 $\nabla\Delta N_w^*$	成功率 $\nabla\Delta N_i$	可用性
无电离层校正	100%	100% (100)	0% (0)	0.002%
<b>Klobuchar</b> 校正	100%	100% (100)	37% (37)	0.002%
实时电离层校正	100%	100% (100)	91% (91)	84%

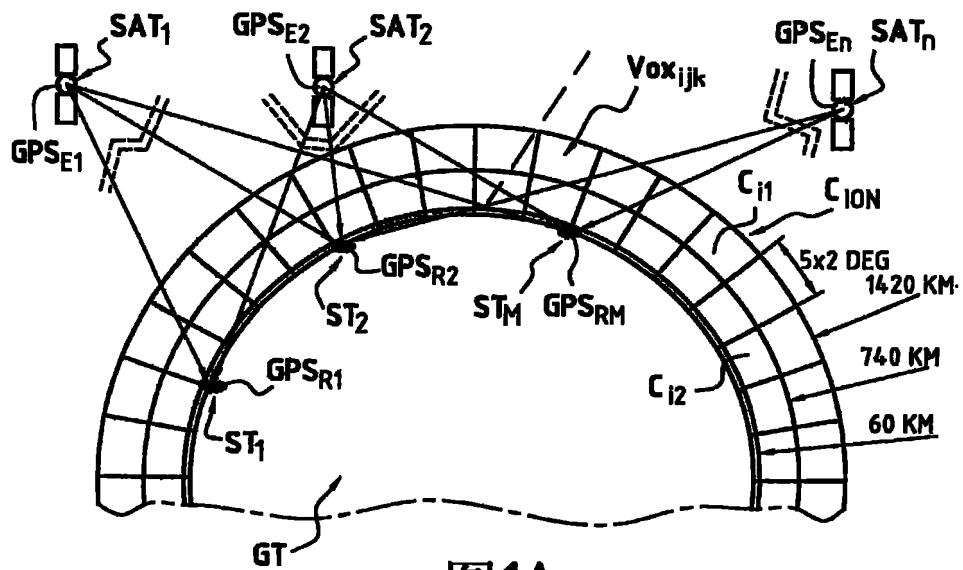


图1A

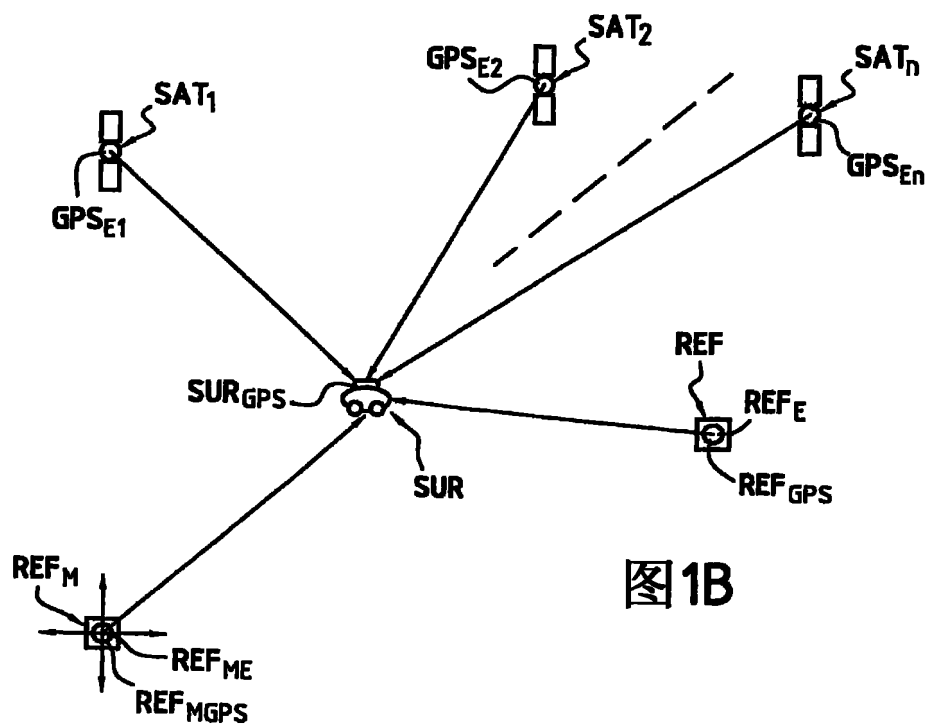


图1B

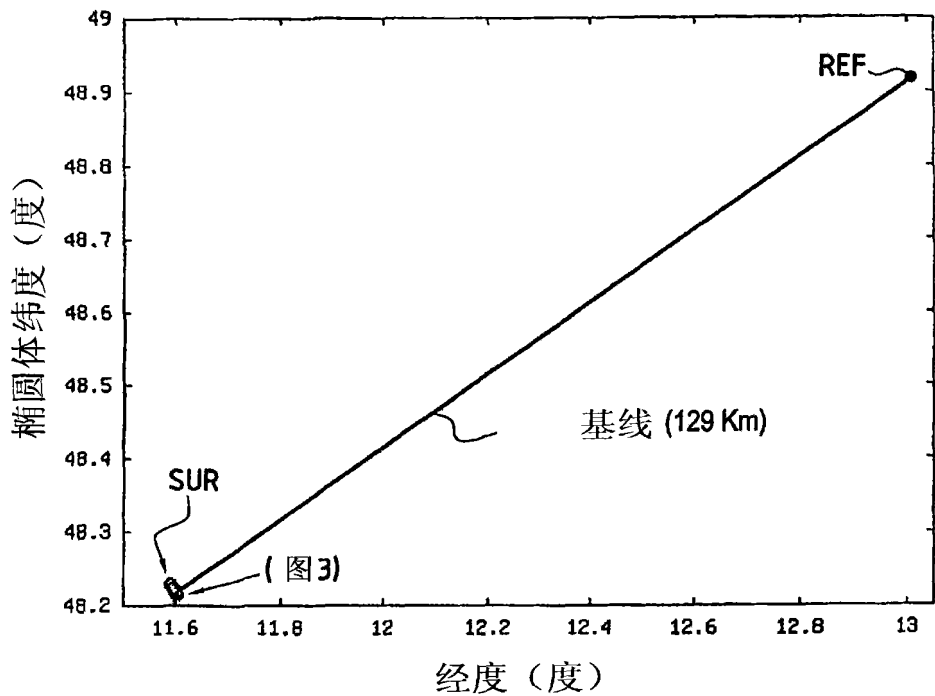


图 2

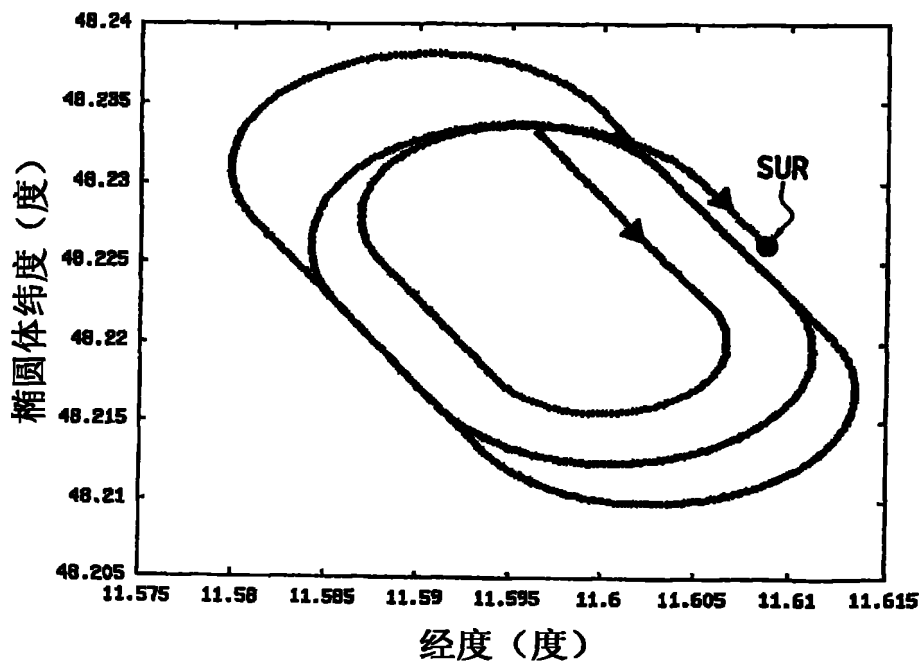


图 3

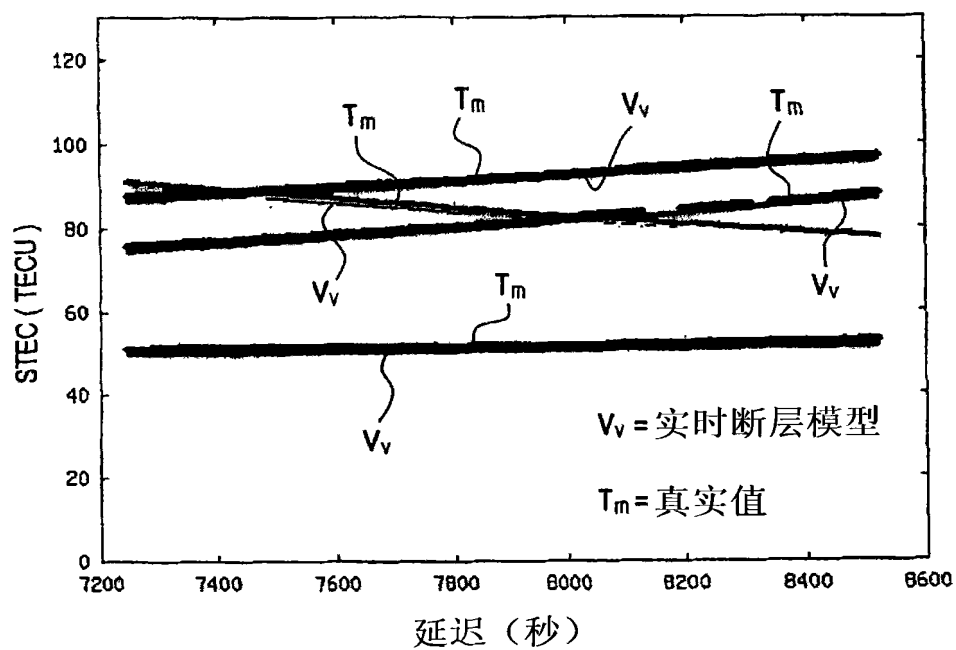


图 4

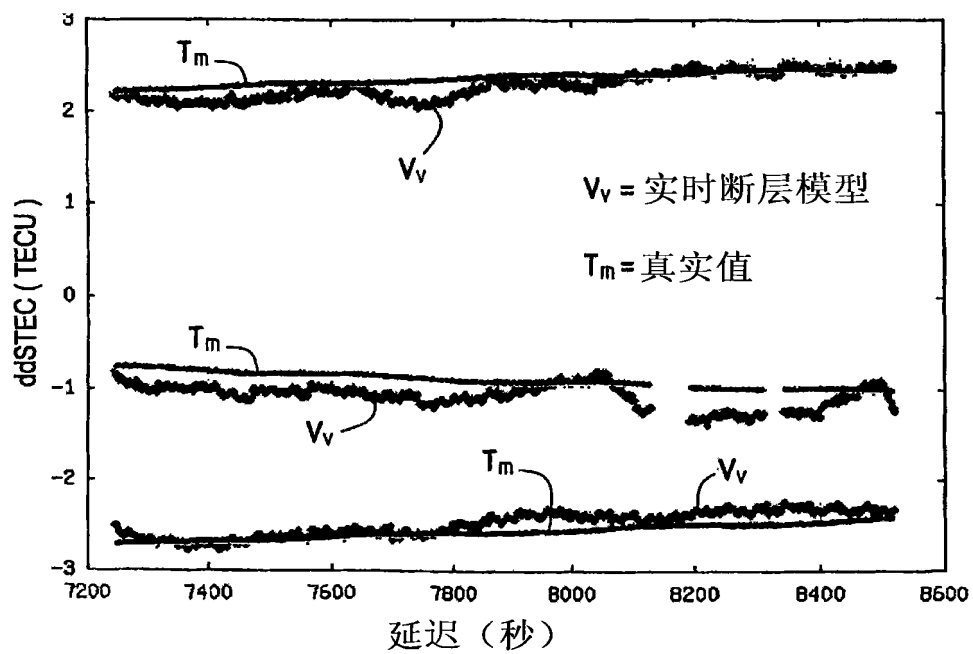
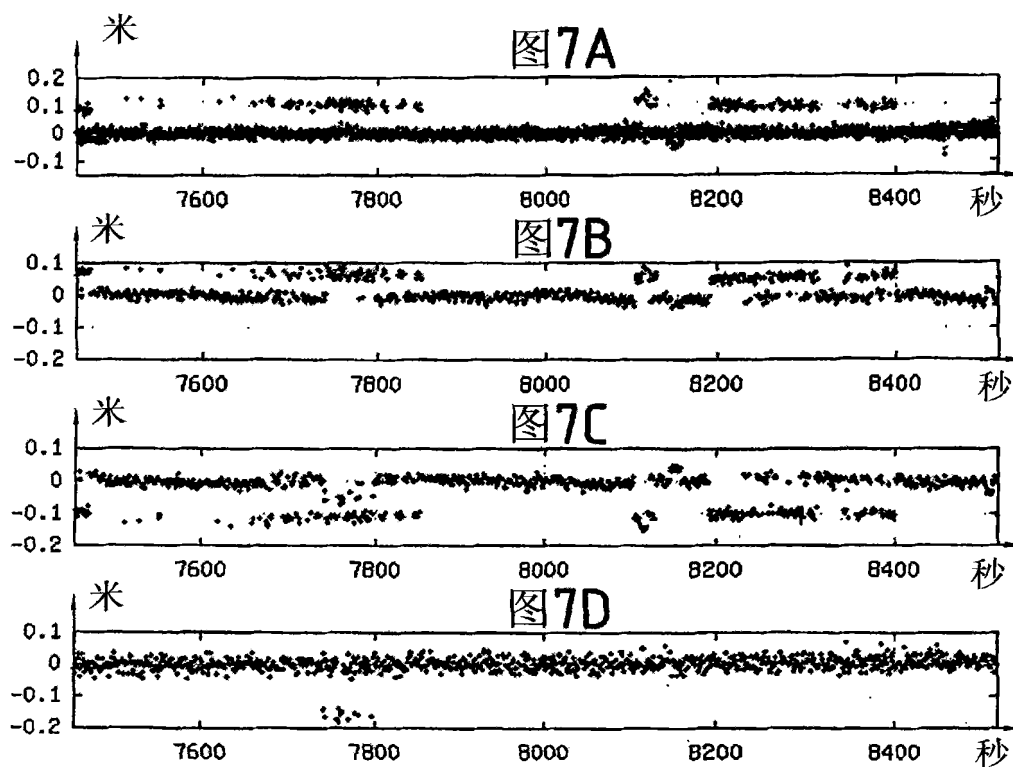
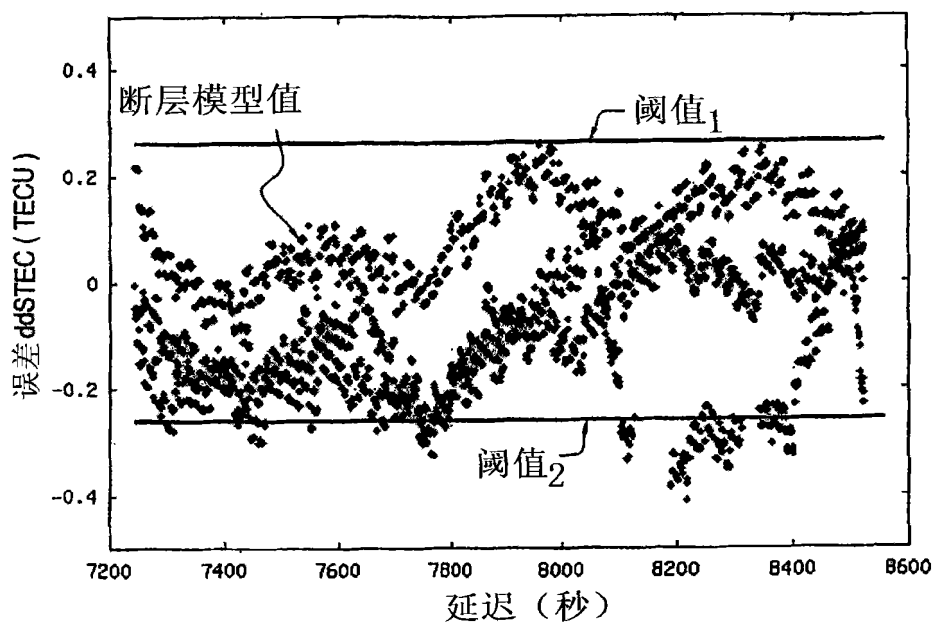
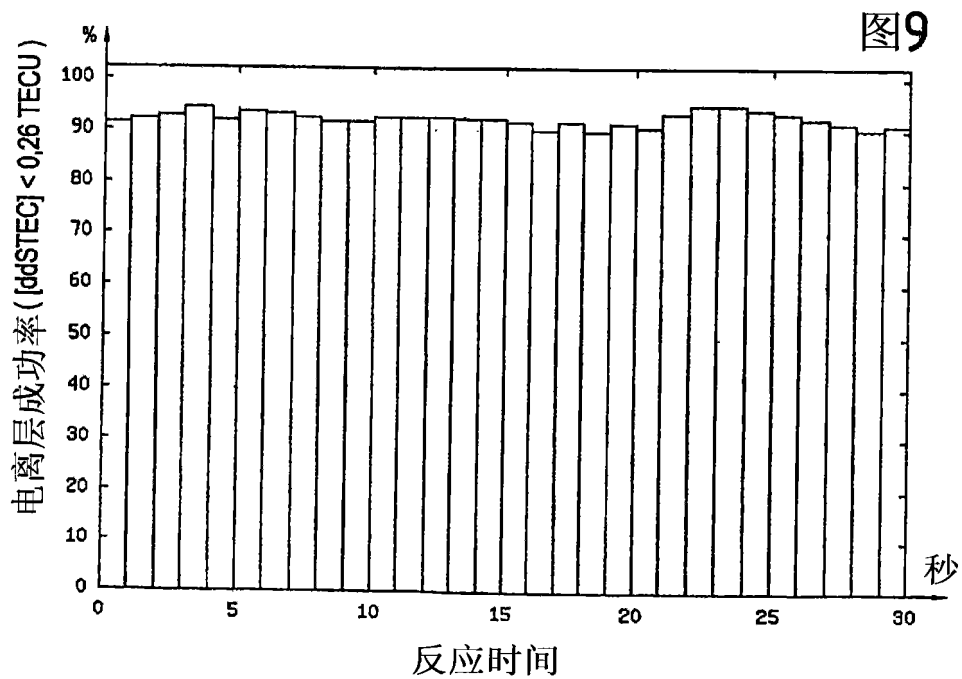
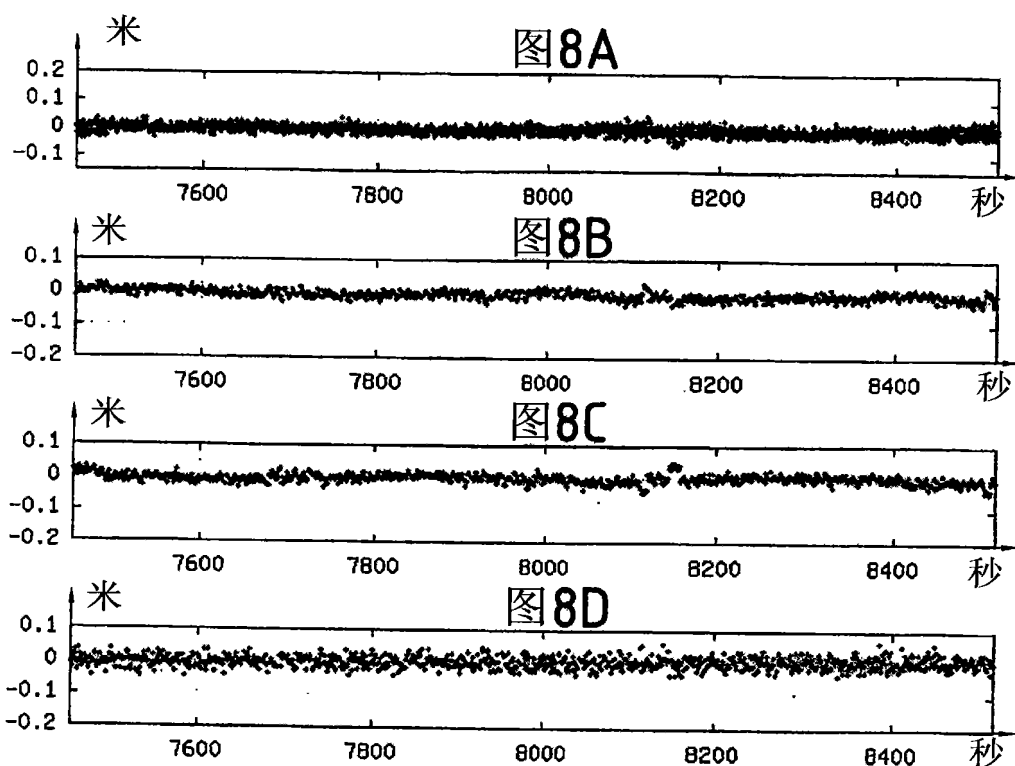


图 5

图6





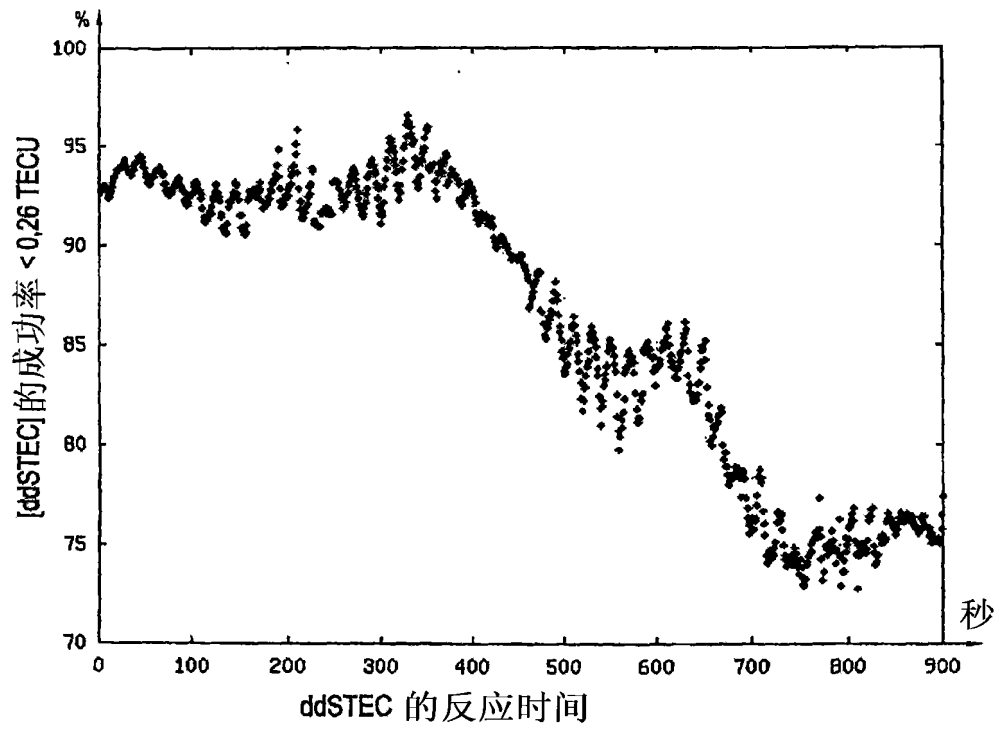


图 10