

Galileo 和 GPS 组合导航的可行性分析研究

王潜心¹, 陈正阳¹, 龚佑兴²

(1. 中南大学信息物理工程学院, 长沙 410083;
2. 国防科技大学指挥军官基础教育学院, 长沙 410073)

摘要: 随着 Galileo 系统的逐步建成并投入使用, 以及全球定位系统 (GPS) 的普及, 如何利用双系统的组合观测值进行高精度定位已成为目前业内关注的热点问题。本文从传统的 GPS 双差观测方程出发, 推导出了 GPS-Galileo 组合定位的数学模型, 提出了其组合定位中的多频周跳探测方法和整周模糊度快速求解的方法。最后利用模拟软件对 GPS、Galileo 以及 GPS-Galileo 三种定位方式对不同长度基线的解算精度进行了比较分析, 实验结果证明了所提方法的正确性和可行性。

关键词: 大地测量学; 卫星导航; 周跳探测; 模糊度求解

中图分类号: P228.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-2850(2008)07-0651-6

The feasibility analysis of different frequency combination observations between Galileo and GPS

WANG Qianxin¹, CHEN Zhengyang¹, GONG Youxing²

(1. *School of Info-Physics and Geomatics Engineering, Central South University, Changsha 410083;*
2. *Basic Education College of Commanding Officer, National University of Defense Technology, Changsha 410073*)

Abstract: With the developing of Galileo system and the modernizing of global positioning system (GPS), using GPS-Galileo multi-frequency combined observations to positioning has become a hotspot in the GNSS field. This paper deduced out the mathematic model of GPS-Galileo combined positioning, based on the traditional GPS double differenced observation equations. It presented some new methods of cycle-slip detection and ambiguity resolution, by using of GPS-Galileo multi-frequency combined observations. Some different distance baselines were tested in the simulation experiments, respectively using GPS, Galileo and GPS-Galileo, and the precision of results were analyzed in detail. The results showed that present methods were right and feasible.

Key words: geodesy; satellite navigation; cycle-slip detection; ambiguity resolution

0 引言

全球定位系统 (GPS) 相对定位技术是目前 GPS 定位中精度最高的一种, 它抵消了钟误差、部分星历误差和大气折射误差, 因此能得到较高的定位精度, 被广泛用于大地测量、精密工程测量、地球动力学研究和精密导航等。但目前由于 GPS 系统自身的缺陷和其它诸多客观因素的影响, 很多情况下 GPS 相对定位技术不能完全满足实际工作的需要。如: 当对大坝或滑坡进行高精度变形监测时, 由于其常处于山区或峡谷地带, 常常会因可见卫星数少、卫星天空几何图形因子不理想、周跳频繁以及多路径效应严重等原因, 导致定位精度达不到工程设计要求^[1]; 又如利用 GPS 进行长基线解算时, 目前利用双频观测值只能将电离层影响消除到一阶, 不能大幅提高最终的定位精度^[2]; 再如当利用 GPS 进

基金项目: 中南大学博士学位论文创新选题项目 (134376221); 国家留学基金委员会公派研究生项目 (2007U18024)

作者简介: 王潜心 (1980-), 男, 博士研究生, 主要研究方向: GPS 数据处理

通信联系人: 陈正阳, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 变形检测, E-mail: kingsen@gfz-potsdam.de

行精密导航时,要求单历元解算整周模糊度,但目前利用单频接收机进行单历元模糊度解算(基线长度为20 km时),成功率仅在30%左右。利用双频,成功率也只能达到70%^[3],这与人们所希望的无缝实时导航相距甚远。因此能否解决GPS相对定位中的这些难题,真正实现高精度的GPS定位,将直接影响GPS定位技术的发展和范围。近年来,Galileo系统的不断完善,为解决以上难题创造了一个良好的契机。利用双系统进行组合定位,将使可见卫星数成倍增加,空中几何图形因子增强,多频数据之间的组合还能加快模糊度的解算速度和提高解算成功率^[4~6]。本文从传统的GPS相对定位模型出发,推导出了GPS-Galileo组合定位模型,提出了其组合定位中的周跳探测方法和整周模糊度解算方法。最后利用模拟软件对GPS、Galileo及GPS-Galileo三种定位方式对不同长度基线的解算精度进行了比较分析。

1 时间系统和坐标系统的统一

由于GPS和Galileo卫星系统所采用的时间基准、坐标基准均不相同,所以在对其观测数据进行联合处理时,首先应对时间系统和坐标系统进行统一处理。GPS采用的时间是GPS时(GPST),与国际原子时(TAI)在任一瞬间均有一常量偏差(TAI-GPST=19 s)^[7]。Galileo系统采用的是GST时间,GST是一个连续的时标,与国际原子时保持偏差小于33 ns,偏差量将通过各种服务的空间信号广播给用户^[8]。所以可根据它们各自与国际原子时的关系得到如下转换关系式

$$T_{GPS} \approx T_{GALILEO} - 19 \text{ s} \pm 30 \text{ ns} \quad (1)$$

GPS采用的坐标系统是1984世界地心坐标系WGS-84,具体定义见文献[7]。Galileo采用的坐标系统是基于Galileo地球参考框架(GTRF)的ITRF-96大地坐标系,它与GPS采用的WGS-84实际上都是国际地球参考框架(ITRF)的一种实现。两个框架之间的转换参数将通过外部参考服务向用户发布^[9]。

2 数据处理方法

2.1 双差观测方程的建立

为了推导过程的简洁,这里仅以短基线情况下的一颗GPS卫星 L_1 上的观测值与一颗Galileo卫星 E_{Gal} 上的观测值组成的双差观测方程为例。误差源只考虑对流层延迟、电离层延迟、接收机钟差、卫星钟差和观测误差残差(如图1所示)。

假设地面上有两个测站 T_1 和 T_2 ,二者相距20 km, T_1 为已知测站, T_2 为未知测站。天空中有一颗GPS卫星编号为 S_{GPS} ,另一颗Galileo卫星编号为 S_{Gal} ,设 S_{GPS} 为参考卫星。在同一观测时刻 t 时刻,组成的相位观测方程如下

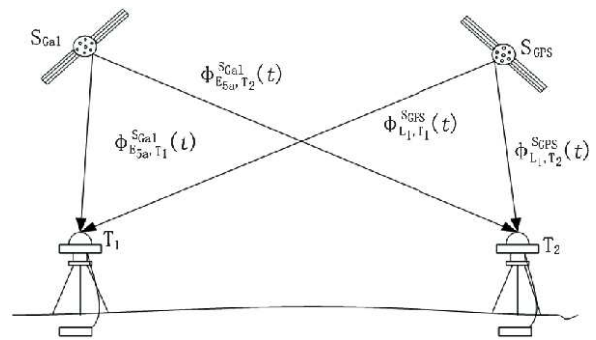


图1 相对定位示意图

Fig. 1 The diagram of relative positioning

$$\lambda_{L_1} \Phi_{L_1, T_1}^{S_{GPS}} = \rho_{T_1}^{S_{GPS}} + C(dt^{S_{GPS}} - dT_{T_1}) - \lambda_{L_1} N_{L_1, T_1}^{S_{GPS}} - \text{dion}_{L_1, T_1}^{S_{GPS}} + \text{dtrop}_{T_1}^{S_{GPS}} + \epsilon_{L_1, T_1}^{S_{GPS}} \quad (2)$$

$$\lambda_{L_1} \Phi_{L_1, T_2}^{S_{GPS}} = \rho_{T_2}^{S_{GPS}} + C(dt^{S_{GPS}} - dT_{T_2}) - \lambda_{L_1} N_{L_1, T_2}^{S_{GPS}} - \text{dion}_{L_1, T_2}^{S_{GPS}} + \text{dtrop}_{T_2}^{S_{GPS}} + \epsilon_{L_1, T_2}^{S_{GPS}} \quad (3)$$

$$\lambda_{E_{\text{Gal}}} \Phi_{E_{\text{Gal}}, T_1}^{S_{Gal}} = \rho_{T_1}^{S_{Gal}} + C(dt^{S_{Gal}} - dT_{T_1}) - \lambda_{E_{\text{Gal}}} N_{E_{\text{Gal}}, T_1}^{S_{Gal}} - \text{dion}_{E_{\text{Gal}}, T_1}^{S_{Gal}} + \text{dtrop}_{T_1}^{S_{Gal}} + \epsilon_{E_{\text{Gal}}, T_1}^{S_{Gal}} \quad (4)$$

$$\lambda_{E_{\text{Gal}}} \Phi_{E_{\text{Gal}}, T_2}^{S_{Gal}} = \rho_{T_2}^{S_{Gal}} + C(dt^{S_{Gal}} - dT_{T_2}) - \lambda_{E_{\text{Gal}}} N_{E_{\text{Gal}}, T_2}^{S_{Gal}} - \text{dion}_{E_{\text{Gal}}, T_2}^{S_{Gal}} + \text{dtrop}_{T_2}^{S_{Gal}} + \epsilon_{E_{\text{Gal}}, T_2}^{S_{Gal}} \quad (5)$$

式中 λ 为波长(m), Φ 为载波相位观测量(cycle), ρ 为卫星至接收机的几何距离(m), dT 为接收机钟差(s), dt 为卫星钟差(s), N 为载波相位观测值的整周模糊度(cycle), dion 为电离层延

迟 (m), $dtrop$ 为对流层延迟 (m), C 为光速 (m/s), ϵ 为其它观测误差残差 (m)。其中, $\rho = \sqrt{(X_S - X_R)^2 + (Y_S - Y_R)^2 + (Z_S - Z_R)^2}$, (X_S, Y_S, Z_S) 为卫星的瞬时坐标, (X_R, Y_R, Z_R) 为接收机的地心坐标。

在短基线情况下, 由于两个观测站相距很近, 这里假设为 20 km, 对于远在 20 000 km 以外的卫星而言, 卫星信号达到两测站所通过的路径基本相同。这就是说, 同一卫星到达两接收机的电离层和对流层延迟基本上是相同的, 即 $dion_{L_1, T_1}^{S_{GPS}} \approx dion_{L_1, T_2}^{S_{GPS}}$, $dtrop_{T_1}^{S_{GPS}} \approx dtrop_{T_2}^{S_{GPS}}$ 。用式 (2) 减式 (3) 后, 得到式 (6)

$$\lambda_{L_1} (\Phi_{L_1, T_1}^{S_{GPS}} - \Phi_{L_1, T_2}^{S_{GPS}}) = (\rho_{T_1}^{S_{GPS}} - \rho_{T_2}^{S_{GPS}}) + C(dT_{T_2} - dT_{T_1}) - \lambda_{L_1} (N_{L_1, T_2}^{S_{GPS}} - N_{L_1, T_1}^{S_{GPS}}) + (\epsilon_{L_1, T_1}^{S_{GPS}} - \epsilon_{L_1, T_2}^{S_{GPS}}) \quad (6)$$

用式 (4) 减式 (5), 得到式 (7)

$$\lambda_{E_{5a}} (\Phi_{E_{5a}, T_1}^{S_{Gal}} - \Phi_{E_{5a}, T_2}^{S_{Gal}}) = (\rho_{T_1}^{S_{Gal}} - \rho_{T_2}^{S_{Gal}}) + C(dT_{T_2} - dT_{T_1}) - \lambda_{E_{5a}} (N_{E_{5a}, T_2}^{S_{Gal}} - N_{E_{5a}, T_1}^{S_{Gal}}) + (\epsilon_{E_{5a}, T_1}^{S_{Gal}} - \epsilon_{E_{5a}, T_2}^{S_{Gal}}) \quad (7)$$

然后用式 (6) 减式 (7), 得到式 (8)

$$\lambda_{L_1} (\Phi_{L_1, T_1}^{S_{GPS}} - \Phi_{L_1, T_2}^{S_{GPS}}) - \lambda_{E_{5a}} (\Phi_{E_{5a}, T_1}^{S_{Gal}} - \Phi_{E_{5a}, T_2}^{S_{Gal}}) = (\rho_{T_1}^{S_{GPS}} - \rho_{T_2}^{S_{GPS}}) - (\rho_{T_1}^{S_{Gal}} - \rho_{T_2}^{S_{Gal}}) - \lambda_{E_{5a}} (N_{E_{5a}, T_2}^{S_{Gal}} - N_{E_{5a}, T_1}^{S_{Gal}}) - \lambda_{L_1} (N_{L_1, T_2}^{S_{GPS}} - N_{L_1, T_1}^{S_{GPS}}) + \nabla \Delta \epsilon_{L_1 - E_{5a}, T_{1,2}}^{S_{GPS, Gal}} \quad (8)$$

其中, $\nabla \Delta \epsilon_{L_1 - E_{5a}, T_{1,2}}^{S_{GPS, Gal}} = (\epsilon_{L_1, T_1}^{S_{GPS}} - \epsilon_{L_1, T_2}^{S_{GPS}}) - (\epsilon_{E_{5a}, T_1}^{S_{Gal}} - \epsilon_{E_{5a}, T_2}^{S_{Gal}})$

式 (8) 为一颗 GPS 卫星 L_1 上的相位观测值与一颗 Galileo 卫星 E_{5a} 上的相位观测值组成的双差观测方程。

2.2 周跳的探测与修复

从式 (8) 可以看出: 对于单一卫星定位系统, 由于两颗卫星的波长相同, 则等式左边为两颗卫星的双差相位观测值与波长的乘积, 而在两个不同卫星定位系统中, 变为两颗卫星的单差相位观测值分别与其波长的乘积。这就要求在接下来的周跳探测中必须知道是哪一颗卫星发生了周跳, 然后才能将其修复到相应卫星的载波观测值上。笔者利用 BLEWITT 提出的联合利用伪距-相位组合 (M-W 组合) 和电离层残差组合 (geometry-free) 来探测单一频点上原始观测值周跳的方法^[10], 综合考虑 GPS 和 Galileo 都将拥有三个不同频率的特点, 提出了多卫星定位系统组合定位的周跳探测方法。其具体解算步骤如下:

1) 对基星的原始相位观测值进行线性组合, 得到待检测量; 这里选取 GPS 卫星为基星, 选用 1 个 M-W 组合: $\Phi_{w23} = (\Phi_{L_2} - \Phi_{L_3})$, 该组合观测值的波长 $\lambda_{w23} = 5.8651$ m, 模糊度均方误差为 0.12σ 。这比 BLEWITT 选用的 Φ_{w12} 组合 ($\lambda_{w12} = 0.8625$ m, $\sigma_{N_{w12}} = 0.7736\sigma$) 具有更长的波长, 更小的噪声; 另选用 2 个 G-F 组合: $\Phi_{-1,1,0}$ 和 $\Phi_{-1,0,1}$ 。

2) 然后分别对以上三组待检测量进行统计检验, 方法同于 BLEWITT 法, 探测出组合观测值的周跳。

3) 对怀疑存在周跳的部分进行多项式拟合, 再利用最小二乘原理, 解算出单一频点上的周跳值, 并将其修复到相应的原始观测值上。

4) 再采用高次差分法对基星与其他卫星组成的双差观测值进行周跳探测, 若发现周跳, 则认为非基星产生的。

5) 解算出周跳值, 将其修复到非基星上。

2.3 整周模糊度求解

同样在多卫星定位系统组合定位的双差观测方程中, 由于两颗卫星的波长不同, 导致模糊度不再

具有整周特性，因此能否找到一种合适的方法来固定模糊度将成为影响组合系统定位精度的关键。这里将式(8)变形得到

$$\lambda_{L_1} \Delta \Phi_{L_1}^{\text{GPS}} - \lambda_{E_{\text{sa}}} \Delta \Phi_{E_{\text{sa}}}^{\text{Gal}} = \nabla \Delta \rho + \lambda_{L_1} \nabla \Delta N_{L_1, E_{\text{sa}}}^{\text{GPS, Gal}} + (\lambda_{L_1} - \lambda_{E_{\text{sa}}}) \Delta N_{L_1}^{\text{GPS}} + \nabla \Delta \epsilon_{L_1, E_{\text{sa}}}^{\text{GPS, Gal}, T_{1,2}} \quad (9)$$

这样就将原来的两个单差模糊度与波长的乘积项组成的双差模糊度，变成了一个具有整周特性的双差模糊度和一个与参考卫星单差模糊度有关的两部分。这样的变形使双差模糊度具有整数特性，有利于进一步固定双差模糊度，得到固定解。对式(9)的模糊度求解思路如下：

1) 首先利用P码伪距计算出基星的单差模糊度解 $\Delta N_{L_1}^{\text{GPS}}$ ，并作为常数代回式(9)。

2) 然后对式(9)进行平差，得到双差模糊度解 $\nabla \Delta N_{L_1, E_{\text{sa}}}^{\text{GPS, Gal}}$ 的浮点解。

3) 再对 $\nabla \Delta N_{L_1, E_{\text{sa}}}^{\text{GPS, Gal}}$ 的浮点解进行整周固定。这里笔者同样考虑到GPS和Galileo将拥有三个不同频率的特点，应用三频载波相位观测值的内在关系，建立了三个不等式，再利用三个不等式的交集构建模糊度的值域空间，从而大大缩小了搜索空间。由式(9)可得GPS卫星其它两个频率上观测方程为

$$\lambda_{L_2} \Delta \Phi_{L_2}^{\text{GPS}} - \lambda_{E_{\text{sa}}} \Delta \Phi_{E_{\text{sa}}}^{\text{Gal}} = \nabla \Delta \rho + \lambda_{L_2} \nabla \Delta N_{L_2, E_{\text{sa}}}^{\text{GPS, Gal}} + (\lambda_{L_2} - \lambda_{E_{\text{sa}}}) \Delta N_{L_2}^{\text{GPS}} + \nabla \Delta \epsilon_{L_2, E_{\text{sa}}}^{\text{GPS, Gal}, T_{1,2}} \quad (10)$$

$$\lambda_{L_5} \Delta \Phi_{L_5}^{\text{GPS}} - \lambda_{E_{\text{sa}}} \Delta \Phi_{E_{\text{sa}}}^{\text{Gal}} = \nabla \Delta \rho + \lambda_{L_5} \nabla \Delta N_{L_5, E_{\text{sa}}}^{\text{GPS, Gal}} + (\lambda_{L_5} - \lambda_{E_{\text{sa}}}) \Delta N_{L_5}^{\text{GPS}} + \nabla \Delta \epsilon_{L_5, E_{\text{sa}}}^{\text{GPS, Gal}, T_{1,2}} \quad (11)$$

然后用式(9)减式(10)，得

$$\nabla \Delta N_{L_1, E_{\text{sa}}}^{\text{GPS, Gal}} = (\lambda_{L_2} / \lambda_{L_1}) \nabla \Delta N_{L_2, E_{\text{sa}}}^{\text{GPS, Gal}} - K_1 / \lambda_{L_1} + Y_1 / \lambda_{L_1} - \mu_1 / \lambda_{L_1} \quad (12)$$

其中， $K_1 = (\lambda_{L_1} - \lambda_{E_{\text{sa}}}) \Delta N_{L_1}^{\text{GPS}} - (\lambda_{L_2} - \lambda_{E_{\text{sa}}}) \Delta N_{L_2}^{\text{GPS}}$ ，由第1步可知为一已知常数； $Y_1 = \lambda_{L_1} \Delta \Phi_{L_1}^{\text{GPS}} - \lambda_{L_2} \Delta \Phi_{L_2}^{\text{GPS}}$ 也为一已知常数； $\mu_1 = [(\epsilon_{L_1, T_1}^{\text{GPS}} - \epsilon_{L_1, T_2}^{\text{GPS}}) - (\epsilon_{L_2, T_1}^{\text{GPS}} - \epsilon_{L_2, T_2}^{\text{GPS}})]$ 。

同理可得

$$\nabla \Delta N_{L_1, E_{\text{sa}}}^{\text{GPS, Gal}} = (\lambda_{L_5} / \lambda_{L_1}) \nabla \Delta N_{L_5, E_{\text{sa}}}^{\text{GPS, Gal}} - K_2 / \lambda_{L_1} + Y_2 / \lambda_{L_1} - \mu_2 / \lambda_{L_1} \quad (13)$$

$$\nabla \Delta N_{L_2, E_{\text{sa}}}^{\text{GPS, Gal}} = (\lambda_{L_5} / \lambda_{L_2}) \nabla \Delta N_{L_5, E_{\text{sa}}}^{\text{GPS, Gal}} - K_3 / \lambda_{L_2} + Y_3 / \lambda_{L_2} - \mu_3 / \lambda_{L_2} \quad (14)$$

其中， μ_n 为误差项，如果不顾及差分残差，并假设三种载波相位的观测精度相同，则 μ_n 将服从正态分布

$$\mu_n \sim N(0, 8\delta_p^2 / \lambda_{L_n}^2)$$

式中， δ_p^2 为载波相位的观测方差。根据统计理论，以下三个不等式依概率99.74%成立

$$|\nabla \Delta N_{L_1, E_{\text{sa}}}^{\text{GPS, Gal}} - (\lambda_{L_2} / \lambda_{L_1}) \nabla \Delta N_{L_2, E_{\text{sa}}}^{\text{GPS, Gal}} - K_1 / \lambda_{L_1} + Y_1 / \lambda_{L_1}| < 0.1 \quad (15)$$

$$|\nabla \Delta N_{L_1, E_{\text{sa}}}^{\text{GPS, Gal}} - (\lambda_{L_5} / \lambda_{L_1}) \nabla \Delta N_{L_5, E_{\text{sa}}}^{\text{GPS, Gal}} - K_1 / \lambda_{L_1} + Y_1 / \lambda_{L_1}| < 0.1 \quad (16)$$

$$|\nabla \Delta N_{L_2, E_{\text{sa}}}^{\text{GPS, Gal}} - (\lambda_{L_5} / \lambda_{L_2}) \nabla \Delta N_{L_5, E_{\text{sa}}}^{\text{GPS, Gal}} - K_3 / \lambda_{L_2} + Y_3 / \lambda_{L_2}| < 0.1 \quad (17)$$

如果顾及差分残差，不等式右边的数值将要增大。由此可分别形成三条斜率为 $\lambda_{L_2} / \lambda_{L_1} = 1.283$ ， $\lambda_{L_5} / \lambda_{L_1} = 1.339$ ， $\lambda_{L_5} / \lambda_{L_2} = 1.043$ ，和竖轴的相交宽度为 $2\mu_n$ 的线型误差带。

对于任何三频相位观测数据，如果不能满足以上不等式即不能落入误差带内，则认为此模糊值备选值为错误，不让其参加后面的模糊值域搜索空间的构建，这样可有效地缩小模糊值搜索空间。然后再将所有通过上述检验的候选值代入方程，求出相应的单位方差，如果最小单位方差与次小单位方差存在明显差异，则对应最小单位方差的整数向量为所求的整数解。

4) 将得到的双差模糊度的整数解作为已知量代入式(9)，求出基星单差模糊度解的真实值。

5) 再将基星单差模糊度解的真实值代入式(9)，重复第2步，依次迭代计算，直到方差小于给定标准结束。

3 算例

为了对以上方法的实际效果进行检验,笔者利用模拟软件进行了如下仿真实验。首先在地面上同一纬度分别选取长度为 10、15、20、30、40 km 五种基线各 10 条,观测时间为 1 h,采样间隔为 15 s,卫星系统包括 24 颗 GPS 卫星和 27 颗 Galileo 卫星,然后采用自己开发的 GPS-Galileo 组合定位数据后处理软件对模拟观测数据进行解算,相同长度基线取其解算结果的平均值,结果如图 2、图 3 所示。

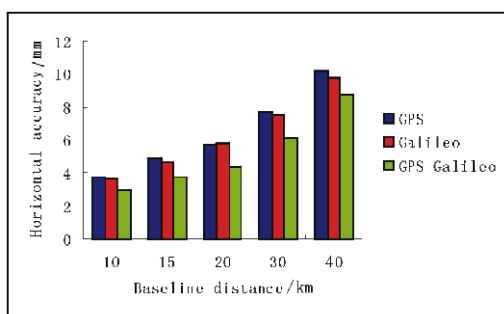


图 2 水平方向的定位精度比较

Fig. 2 The comparison of horizontal positioning accuracy

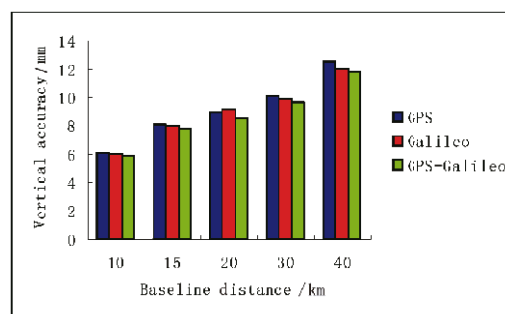


图 3 垂直方向的定位精度比较

Fig. 3 The comparison of vertical positioning accuracy

根据以上基线数据的解算结果,得到如下结论:

1) 总体定位精度方面: Galileo 优于 GPS, Galileo 和 GPS 的组合系统优于任何一个单一系统。

2) 水平方向的定位精度优于垂直方向,且组合系统对水平精度的提高明显优于垂直方向。究其原因主要是由于地球是个近似的椭球体,所以地面上的接收机只能收到其上空的卫星信号,而下方的卫星信号始终无法接收。因此卫星数目的增加对于立体几何图形的改善并不明显。因此建议若要提高垂直方向的定位精度,可以采用伪卫星等技术来改善卫星的空间几何分布图形。

3) 对于 10 km 左右的短基线,组合定位的优势并不显著。但随着基线长度的增加,组合系统对精度的提高越来越明显。

4) 随着基线长度的增加,误差值逐渐增大。当基线长度为 40 km 时,误差值显著增加。究其原因是实验采用的数学处理模型为短基线模型,对于中长基线,基线两端的大气误差已不相关或弱相关,因此应加入相应的大气误差改正模型。如:利用三频组合观测值能将电离层影响消除到高阶^[1]。

4 结论

本文以短基线为例,采用特定的误差模型进行仿真实验,证明了本文提出的基于相对定位模型的 GPS-Galileo 组合定位数据处理方法是可行的。

[参考文献] (References)

[1] 何秀凤,陈永奇,桑文刚,等. 伪卫星增强 GPS 方法在变形监测中的应用研究[J]. 测绘学报, 2006, 35 (11): 315~320.

HE X F, CHEN Y Q, SANG W G, et al. Pseudolite-augmented GPS for deformation monitoring: analysis and experimental study[J]. Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica, 2006, 35(11): 315~320. (in Chinese)

[2] 伍岳,孟泱,王泽民,等. GPS 现代化后电离层折射误差高阶项的三频改正方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2005, 30 (7): 601~603.

WU Y, MENG Y, WANG Z M, et al. Triple-frequency methods for correcting higher-order ionospheric refractive error in GPS modernization[J]. Journal of Wuhan University(Information Science), 2005, 30(7): 601~603. (in

- Chinese)
- [3] 孙红星, 李德仁. 使用双频相关法单历元解算 GPS 整周模糊值[J]. 测绘学报, 2003, 32 (3): 208~212.
SUN H X, LI D R. GPS ambiguity resolution using single-epoch data[J]. Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica, 2003, 32(3): 208~212. (in Chinese)
- [4] 王潜心, 刘庆元, 龚佑兴. Galileo 组合观测值的研究[J]. 测绘工程, 2005, 14 (1): 15~17.
WANG Q X, LIU Q Y, GONG Y X. Research on Galileo combinational observations[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2005, 14(1): 15~17. (in Chinese)
- [5] 王解先, 刘红新. Galileo、GPS 和 Galileo/GPS 组合系统实用性的比较[J]. 大地测量与地球动力学, 2005, 25 (1): 113~117.
WANG J X, LIU H X. Comparison among availabilities of Galileo, GPS and Galileo/GPS combined system[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2005, 25(1): 113~117. (in Chinese)
- [6] 赵春梅, 欧吉坤, 袁运斌. 基于单点定位模型的 Galileo 及 GPS-Galileo 组合系统的定位精度和可靠性的仿真分析[J]. 科学通报, 2005, 50 (8): 811~819.
ZHAO C M, OU J K, YUAN Y B. Simulation and analysis of system performance of Galileo and integrated GPS-Galileo[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(8): 811~819. (in Chinese)
- [7] XU G C. GPS-theory, algorithms and applications[M]. Heidelberg: Springer~Verlag, 2003.
- [8] 李纬, 刘长征. Galileo 系统频率和信号设计现状[J]. 全球定位系统, 2003 (6): 1~4.
LI W, LIU C Z. Status quo of the Galileo frequency and signal design[J]. GNSS World of China, 2003(6): 1~4. (in Chinese)
- [9] 陈智, 张其善. Galileo 系统在空间飞行器定位中的应用[J]. 航空学报, 2004, 25 (5): 576~579.
CHEN Z, ZHANG Q S. The application of Galileo system on spacecraft positioning[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2004, 25(5): 576~579. (in Chinese)
- [10] BLEWITT G. An automatic editing algorithm for GPS data[J]. Geophysical Research Letters, 1990, 17(3): 199~202.
- [11] FENG Y M. Combined Galileo and GPS: a technical perspective[J]. Journal of Global Positioning System, 2002, 2 (1): 67~72.