

# 高精度 GPS 差分载波相位多普勒/INS 新型全组合解算机载 TLS 外方位元素

孙红星<sup>1</sup> 闫利<sup>2</sup> 姜卫平<sup>3</sup>

(1 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2 武汉大学测绘学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(3 武汉大学 GPS 工程技术研究中心, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

**摘要:** 在提出单历元解算 GPS 模糊度技术的基础上, 使用 INS 间接法误差模型, 提出了一种 GPS 双差载波相位多普勒/INS 全组合 Kalman 滤波的新方法, 高精度直接解算机载 TLS 中的外方位元素。仿真数据试验表明, 其姿态精度高于  $10''$ , 位置精度高于 10cm。

**关键词:** TLS; 外方位元素; GPS; INS; 卡尔曼滤波

中图法分类号: P228.42; P236

近几年, 机载三线阵 CCD 摄影已成为空间信息获取和处理的又一个热点研究问题, 如东京大学空间信息科学中心(CSIS)、瑞士联邦技术学院大地与摄影测量研究所等都对此进行了大量研究, 日本 STARLABO 公司还成功开发了一种新的机载 TLS(three line scanner)系统。

与框幅式航空摄影相比, 机载 TLS 每行扫描线都有 6 个外方位元素, 采用间接摄影测量确定外方位元素是不现实的。机载 TLS 摄影时, 航迹是不可预测的, 需用高精度机载 GPS/INS 直接解算外方位参数, 如果能得到高精度的外方位元素, 就可实现测量对象地理坐标的直接求解。使用集成 GPS/INS 直接解算外方位参数的方法, 也称为直接地理参考(direct georeference)或直接定位定向(direct orientation), 是近年来刚刚兴起的一种新方法, 它结合了 GPS 的高精度定位、误差无积累及 INS 的自主性等优点。两者的结合不但可以提高系统的精度和可靠性, 而且能够同时提供高精度的载体动态姿态角, 这是其他方法如 GPS 多天线法所不能实现的。

从数学模型的角度讲, GPS/INS 组合通常认为有松散组合(也称分布式组合<sup>[3]</sup>)和紧密组合(也称全组合)两种组合模式<sup>[1, 2]</sup>, 全组合方法中的 GPS 差分载波相位多普勒/INS 的精度最高,

但涉及到 GPS 模糊度的解算, 技术难度较大。

## 1 单历元 GPS 模糊度解算

整周模糊度的确定是高精度 GPS 定位的关键, 也是 GPS 高精度动态定位的热点问题。许多学者提出了各种动态定位过程中确定整周模糊度的方法(又称 OTF), 如模糊度函数法(AMF)、最小二乘搜索法(LS)、FASF 法、FARA 法、Cholesky 分解算法、LAMBDA 法等<sup>[4]</sup>。纵观这些方法, 一般都需要利用多个历元的观测数据, 这样在很多动态定位领域的使用会受到限制。本文通过双频相位观测数据的内在关系及统计特性, 在观测值域构建一个整周模糊度误差带, 将整周模糊度限制在此误差带内, 大幅度压缩了模糊度域搜索空间, 实现了使用一个历元的 C/A 码和双频相位数据就可以确定正确的整周模糊度, 为高精度 GPS 差分载波相位多普勒/INS 新型全组合打下了基础。

GPS 载波相位双差观测方程为:

$$(\nabla\Delta N_{ab}^{ij} + \nabla\Delta\phi_{ab}^{ij})\lambda = \nabla\Delta R_{ab}^{ij} + \nabla\Delta\epsilon \quad (1)$$

式中,  $\nabla\Delta N$  表示双差整周模糊度, 其具有整数特性;  $\nabla\Delta\phi$  表示双差相位观测值;  $\lambda$  表示载波波长;  $\nabla\Delta R$  表示站星双差真实距离;  $\nabla\Delta\epsilon$  表示双差相

位观测误差及电离层等差分残差; 角标  $i, j$  表示卫星,  $a, b$  表示测站。

对于双频 GPS 接收机载波相位观测值, 由式(1)可以得到:

$$\begin{aligned} (\nabla \Delta N_{1ab}^{ij} + \nabla \Delta \phi_{1ab}^{ij}) \lambda_1 - \nabla \Delta \epsilon_1 = \\ (\nabla \Delta N_{2ab}^{ij} + \nabla \Delta \phi_{2ab}^{ij}) \lambda_2 - \nabla \Delta \epsilon_2 \end{aligned} \quad (2)$$

其中, 角标 1、2 分别表示频率 1 和频率 2。记  $(\nabla \Delta \epsilon_1 - \nabla \Delta \epsilon_2) / \lambda_1 = u$ , 整理式(2)得:

$$\nabla \Delta N_{1ab}^{ij} = (\lambda_2 / \lambda_1) \nabla \Delta N_{2ab}^{ij} + (\lambda_2 / \lambda_1) \nabla \Delta \phi_{2ab}^{ij} - \nabla \Delta \phi_{1ab}^{ij} + u \quad (3)$$

式(3)为任何 GPS 双频相位观测值都满足的线性关系, 其中  $u$  为误差项。如果不顾及差分残差, 并假设两种载波相位的观测精度相同, 则  $u$  将服从正态分布,  $u \sim N(0, 8 \frac{\sigma}{\lambda})$ ,  $\sigma$  为载波相位的观测方差。根据统计理论, 双频相位不等式为:

$$|\nabla \Delta N_{1ab}^{ij} - ((\lambda_2 / \lambda_1) \nabla \Delta N_{2ab}^{ij} + (\lambda_2 / \lambda_1) \nabla \Delta \phi_{2ab}^{ij} - \nabla \Delta \phi_{1ab}^{ij})| < 0.1 \quad (4)$$

以概率 99.74% 成立。如果顾及差分残差, 式(4)右边数值将要增大, 由此可以形成一条斜率为  $\lambda_2 / \lambda_1 \approx 1.283$ 、与竖轴相交宽度为  $2u$  的线型误差带。双频整周模糊度分别近似为以 9 和 7 为周期 ( $N_1$  为 9,  $N_2$  为 7) 落入带内或两侧, 如图 1 所示。

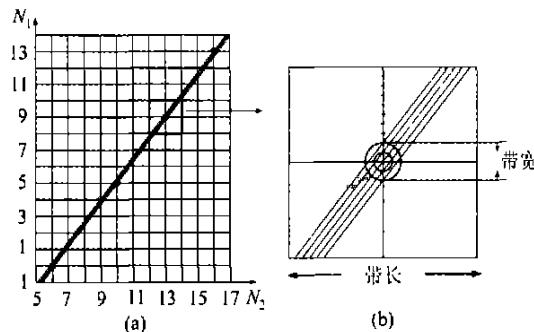


图 1 双频模糊度误差带

Fig. 1 Error Strip of Ambiguities from Two Frequencies Data

本文称图 1 所示的直线带为“观测值域整周模糊度误差带”, 简称误差带, 并称误差带跨越横轴的范围为带长, 误差带与竖轴的相交宽度  $2u$  为带宽。如果将误差带的带长作为观测值域搜索空间某维的搜索长度, 带宽为方程(3)误差项  $u$  的两倍, 则可使用此误差带在观测值域内筛选模糊度备选值。对于任何双频相位观测数据, 如果不能落入误差带内, 则认为此模糊度备选值错误, 不让其参加后面的模糊度域搜索空间的构建, 即

可有效地压缩模糊度搜索空间。

误差带的约束作用取决于带宽, 其值愈小, 带的约束条件就愈强; 其值愈大, 带的约束条件就愈弱。分析图 1 中的误差带可以得知, 当带宽为 0.3 时, 一个周期内将只有 3 对双频模糊度落入带内, 其他点则在误差带外。由于一个双差方程对应一条误差带, 因此, 一个观测历元中含有几个双差方程, 就含有几个误差带。如果使用  $N_1$  参与创建模糊度域搜索空间, 并使用 0.3 的带宽, 则搜索空间的压缩率为:

$$k = (3/9)^{n-1} \quad (5)$$

式中,  $n$  为卫星数。如果观测 7 颗卫星, 则搜索空间被压缩为原来的 0.001, 可见其压缩效果十分显著。

需要指出的是, 虽然误差带属于观测值域, 但并不一定要在原始观测值域上建立误差带。本文首先通过 C/A 码伪距观测值进行初步定位, 然后在定位结果的伪距观测值平差值域中建立误差带。由于观测值平差值的精度高于原始观测值的精度, 所以此观测值平差值域的搜索空间明显小于原始观测值的搜索空间, 而且其准确度也比原始观测值高。完成了观测值平差值域误差带对双差模糊度对象的搜索后, 即可使用该搜索结果进行模糊度域搜索空间的创建, 并在此空间中进行再次搜索。对于搜索结果进行 Ratio 检验, 如果不能通过 Ratio 检验, 则此历元搜索失败, 下一个历元重新搜索。但多次试验的统计结果表明, 绝大多数数据都能在一个历元内成功搜索整周模糊度。

## 2 基于 GPS 双差载波相位多普勒/INS 新型全组合滤波器

GPS 差分载波相位多普勒/INS 全组合存在 GPS 模糊度解算问题。在这种情况下, 模糊度向量通常被扩充作为滤波器的状态<sup>[4,5]</sup>, 这样, 不但模糊度的解算时间不能实时, 而且增加了滤波器的不稳定性和运算量。本文通过单历元解算 GPS 模糊度技术, 不需要将模糊度作为滤波器状态进行滤波, 因而降低了滤波器状态向量的维数, 建立了一个 18 维的全组合滤波器, 这样既提高了精度, 又可以达到较好的计算速度和稳定性。

### 2.1 状态方程

差分 GPS/INS 组合系统中的状态方程是一组微分方程, 主要用于描述 INS 的误差状态, 包括空间误差和惯性传感器误差, 由于在量测方程中不能提高惯性传感器误差的量测信息, 因而, 必须在状态方程中建立空间误差及惯性传感器误差

的数学统计关系, 通过测得的空间误差来进一步解算惯性传感器误差。INS 的误差方程根据不同的需要而有不同的形式, 主要由 93 阶状态微分方程经过逐步精简而得, 常用的有 39 阶、22 阶、18 阶、15 阶和 11 阶几种。在 GPS 双差载波相位多普勒/INS 全组合中, 如果将 GPS 模糊度引入状态向量, 则状态方程的个数要相应提高, 即一个双差模糊度添加一个方程, 这正是附带模糊度参数滤波器运算量大的原因。如果模糊度已经解出, 滤波器的状态方程即只为惯导系统的误差方程。本文采用 18 维的一阶线性微分方程来描述 INS 在地固系的空间误差及惯性传感器误差状态传播特性, 其中, 空间误差包括位置误差、速度误差和平台姿态角误差; 陀螺漂移考虑成常值漂移和一阶马尔柯夫过程的组合; 加速度计偏置考虑成一阶马尔柯夫过程:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\delta r}^e = \delta V^e \\ \delta V^e = -2\Omega_{ie}^e \delta V^e - F^e \epsilon^e + R_b^e \nabla_b \end{array} \right. \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon^e = -\Omega_{ie}^e \epsilon^e + R_b^e d \\ d = \epsilon_b + \epsilon_r + \epsilon_g \\ \epsilon_b = 0 \\ \epsilon_r = -\alpha \epsilon_r + w_r \\ \dot{\nabla}_b = -\beta \nabla_b + w_b \end{array} \right. \quad (7)$$

式中,  $\delta r^e$  为地固系三维坐标误差;  $\delta V^e$  为速度误差;  $\epsilon^e$  为平台误差角;  $\Omega_{ie}^e$  为地球自转速度;  $F^e$  为观测比力;  $R_b^e$  为变换矩阵;  $\epsilon_b$  为陀螺常值漂移;  $\epsilon_r$  为陀螺一阶马尔柯夫过程漂移;  $\nabla_b$  为加速度计一阶马尔柯夫过程偏置;  $\alpha, \beta$  分别为相关时间的倒数;  $\epsilon_g, w_r, w_b$  为白噪声。

## 2.2 观测方程

在 GPS 双差载波相位多普勒/INS 全组合中, 量测方程由 GPS 的定位和测速方程组成, 通过 GPS 的位置和速度的观测信息来为滤波器提供量测更新。如果 GPS 模糊度解算成功, 双差载波相位多普勒/INS 组合的量测方程为仅含空间位置和速度向量为未知数的非线性方程:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \Delta \rho_{ab}^{ij} = \nabla \Delta R_{ab}^{ij} + \nabla \Delta \epsilon_p \\ \nabla \Delta \rho_{ab}^{ij} = \nabla \Delta R_{ab}^{ij} + \nabla \Delta \epsilon_p \end{array} \right. \quad (8)$$

式中,  $\nabla \Delta \rho$  为 GPS 双差载波相位等效伪距;  $\nabla \Delta \rho$  为 GPS 双差多普勒观测量;  $\nabla \Delta R$  表示站星双差距离;  $\nabla \Delta R$  表示站星双差距离变率。

由于 GPS 的定位测速方程为非线性方程, 滤波器需要使用广义卡尔曼滤波的形式。在 GPS/INS 全组合中, 必须使用 INS 导航结果作为观测

方程的线性化初值, 才能符合状态方程中“空间误差”的定义, 即在每一个滤波周期开始时, 开始 INS 导航计算, 同时进行滤波器时间更新, 在得到 GPS 定位和测速信息后, 由 INS 导航结果线性化 GPS 定位测速方程, 用此线性方程进行量测更新。如果不使用 INS 导航结果进行线性化, 量测方程中的估计量将不是状态方程中的“空间误差”, 从而不能正确地进行量测更新。INS 的导航方程参见文献[2]。

使用式(6)~式(8)可以形成 GPS 双差载波相位多普勒/INS 全组合滤波器, 此滤波器的结果实时进行反馈校正, 修正 INS 误差, 而 INS 的导航结果又可以辅助 GPS 解算模糊度, 从而组成闭环全组合广义卡尔曼滤波器。按照广义卡尔曼滤波方程, 即可实现反复的迭代计算, 达到高精度位置和姿态计算的目的。

## 3 算例

笔者使用 C<sup>++</sup> 开发了 GPS/INS 高精度集成处理软件, 并使用此软件处理了 TSL 仿真数据。本仿真数据中, 观测时间 2h, GPS 提供双频载波相位数据、C/A 码伪距数据、多普勒频移数据, INS 提供角速率及加速度观测值, 其具体指标如下。

1) 运行状态及工作情况: 起飞时间 5min; 工作时间 110min; 降落时间 5min; 拍摄航带 20 条; 飞行速度 500m/s; 曝光同步时间 1μs; 摄影中心和 GPS 天线中心的偏心距离 3m。

2) GPS: 双频数据; 载波相位噪声 3mm; C/A 码伪距噪声 3m; 数据采样率 1Hz。

3) INS: 陀螺常值漂移 0.01°/h; 陀螺马尔柯夫过程相关时间 1h; 陀螺随机游走 0.001°/sqrt(h); 陀螺分辨率 0.0003°; 加速度计偏置 10μg; 加速度计马尔柯夫过程相关时间 1h; 时间同步精度 1μs; 输出率 500Hz。

使用实时解算模糊度的新型全组合闭环卡尔曼滤波器处理 GPS/INS 仿真数据结果表明, 空间位置精度可以达到 10cm, 速度精度可以达到 5cm/s, 航向角精度为 10'', 倾仰和翻滚角精度为 8''。图 2 显示了三维位置和姿态的误差曲线。

一般地, 机载 TLS 影像扫描频率高于 GPS/INS 采样频率, 因此, 必须利用 GPS/INS 确定的外方位元素序列进行拟合, 求出机载 TLS 影像每一条扫描线瞬间时刻的外方位元素。常用的拟合方法有多项式法、三次样条法, 本文采用半参数法进行拟合, 拟合精度优于前两种方法, 能够满足高精度机载 TLS 影像外方位元素的解算要求。

致谢: 感谢陶本藻教授在本文的撰写中给予的指导和帮助。

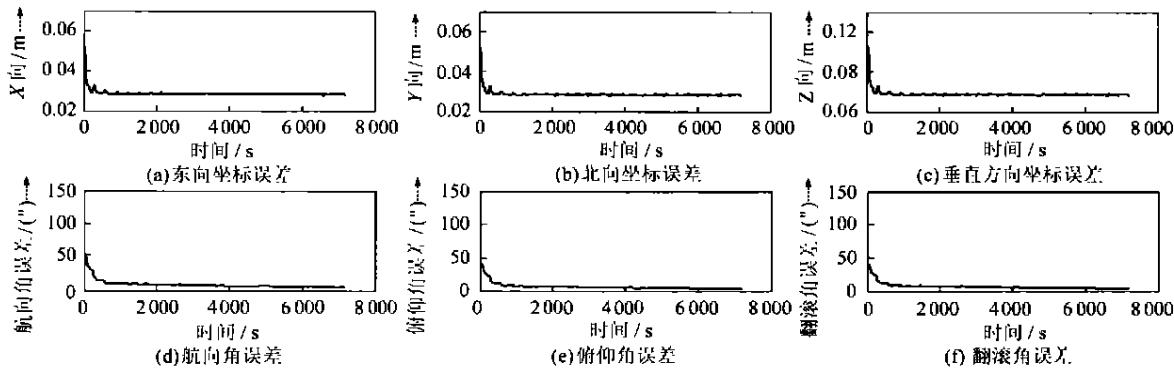


图2 全组合滤波器的位置和姿态的误差曲线

Fig. 2 Curve of Position and Attitude Error

## 参 考 文 献

- 1 袁信, 俞济祥, 陈哲. 导航系统. 北京: 航空工业出版社, 1993
- 2 董绪荣, 张守信, 华仲春. GPS/INS 组合导航定位及其应用. 长沙: 国防科技大学出版社, 1998
- 3 Yang Y, Farrell J, Tan H S. GPS-aided INS based Control State Calculation for AHS. The American Control Reference Arlington, 2001
- 4 陈小明. 高精度 GPS 动态定位的理论和实践: [博士论文]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 1997

- 5 冯绍军. 低成本 IMU/GPS 组合导航系统研究: [博士论文]. 南京: 南京航天航空大学, 1999
- 6 杨春钧. 差分 GPS 伪距、载波相位/INS 组合技术研究: [博士论文]. 南京: 南京航天航空大学, 1998
- 7 王惠南, 吴智博. 采用卡尔曼滤波器的 GPS/INS 姿态组合系统的研究. 中国惯性技术学报, 2000, 8(3): 1~7
- 8 王艳东, 黄继勋, 范跃祖. GPS/INS 组合导航系统半实物仿真研究. 北京航天航空大学学报, 1999, 25(3): 299~301

第一作者简介: 孙红星, 博士生。现从事 GPS/INS 集成高精度定位定姿及相关 3S 集成理论与应用研究。

## Accurately Calculating Exterior Orientation Elements of Airborne TLS Using Kalman Filter to Process the New Combination of GPS Double-Difference Carrier Phase and Doppler/INS Data

SUN Hongxing<sup>1</sup> YAN Li<sup>2</sup> JIANG Weiping<sup>3</sup>

(1) School of Remote Sensing and Information Engineering, Whuhan University, 129 Luoyu Road, Whuan 430079, China)

(2) School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(3) Research Center of GPS, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** In this paper, a single epoch GPS ambiguity resolution is proposed. Then based on it and using the INS indirect error model, a new method, using Kalman filtering to process the new combination of GPS double-difference carrier phase and Doppler/INS integrated data, is presented. The exterior orientation elements of airborne three-line-scanner can be accurately calculated directly based this method. The experiment used simulated data proved that the precision of attitude is higher than 10 arc second and the precision of position is higher than 10cm.

**Key words:** TLS; exterior orientation elements; GPS; INS; Kalman filtering

About the first author: SUN Hongxing, Ph. D candidate. His research interest includes the integration of GPS/INS as well as its application to mobile mapping system (MMS).

(责任编辑: 晓晨)