

基于卡尔曼滤波的 CORS 系统导航

邹俊平^{1,2}, 季善标²

(1. 同济大学 测量与国土信息工程系, 上海 200092; 2. 上海市测绘院, 上海 200063)

CORS System Navigation Based on Kalman Filter

ZOU Junping, JI Shanbiao

摘要: 基于 CORS 技术对高精度的 CORS 系统导航进行探讨, 提出以卡尔曼滤波来解决短时间 GPS 信号丢失情况下的导航定位问题, 并推导相应的公式。以上海市 CORS 系统导航服务为例, 经该算法计算得到的结果与实际情况基本一致, 模型正确可靠。

关键词: CORS; GPGGA; 卡尔曼滤波; 信号缺失

一、引言

GPS 的定位方式可分为静态定位、动态定位和准动态定位。而导航过程中需要采用动态相对定位的方式。利用安置在基准点和运动载体上的 GPS 接收机所采集的同步观测资料来确定运动载体相对于基准点的位置的工作称为动态相对定位^[1]。动态相对定位由于观测时间短、误差消除不充分, 故定位精度不高。但随着 CORS 技术的发展, 目前各个省市相继建立了各自的 CORS 系统, 我国也在筹建全国性的 CORS 系统。因此, 采用 CORS 系统差分服务的方式实现高精度的动态定位成为可能^[2]。

在 CORS 系统服务的支持下, 当接收机端获得初始化后, 每个历元可以达到厘米级的观测精度, 有效解决了动态定位精度不高的问题^[3]。同时, CORS 系统的网络 RTK 模式扩大了流动接收机端的移动范围, 避免了单基站由于距离限制造成的精度降低问题。然而, 由于运动物体的位置始终处于持续变化中, 如在城市中的车辆导航, 很有可能因某个时刻卫星信号的遮挡或者因通信故障造成 CORS 系统服务中断, 以致无法获得运动物体的具体位置或者造成接收机初始化的丢失, 形成动态定位的盲点区域。考虑到载体的运动前后时刻有一定的相关性, 运动有一定的规律, 因此可以通过平滑和滤波等技术来解决短时间信号丢失情况下的定位问题。本文以上海市 CORS 系统导航服务为例, 提出一种基于卡尔曼滤波的 CORS 系统导航算法。

二、GPGGA 数据

在 CORS 系统导航中, GPS 接收机接收 CORS 系统差分数据并获得初始化后, 可快速获得某时刻的位置向量。对于 GPS 系统而言, 解算结果数据可输出为 NEMA-0183 的数据格式。目前大多 GPS 接收机均支持多种符合 NEMA-0183 数据格式的语句, 在模型的实现过程中, 数据源采用接收机接收 CORS 系统差分数据后输出的 GPGGA 数据格式^[4]。GPGGA 格式为 GPS 定位信息, 下面为一条 GPGGA 格式的语句。

```
$GPGGA,hhmmss.ss,ddmm.mm,N,dddmm.mm,E,q,ss,xx.x,hhhhh.h,A,HHHHH.H,B,tt,nnm*hh<CR><LF>
```

GPGGA 格式详细介绍如下: ① hhmmss.ss 为当前 UTC 时间, 用时分秒格式表示; ② ddmm.mm 为纬度, 格式为“度度分.分分”; ③ N 为北纬(S 为南纬); ④ dddmm.mm 为经度, 格式为“度度度分.分分”; ⑤ E 为东经(W 为西经); ⑥ q 为质量因子, ‘0’为未定位, ‘1’为 GPS 单点定位固定解, ‘2’为差分定位, ‘3’为 PPS 解, ‘4’为 RTK 固定解, ‘5’为 RTK 浮点解, ‘6’为估计值, ‘7’为手工输入模式, ‘8’为模拟模式; ⑦ ss 为应用于解算的卫星数; ⑧ xx.x 为平面位置精度因子(horizontal dilution of precision, HDOP); ⑨ hhhhh.h 为相对于海平面的天线高程; ⑩ A 为天线高程单位, 一般高程单位为 m; ⑪ HHHHH.H 为大地水准面起伏, 即地球椭球面相对于大地水准面的高度; ⑫ B 为大地水准面起伏单位, 一般高程单位为 m; ⑬ tt 为差分 GPS 数据期: 差

分时间(从最近一次接收到差分信号开始的秒数);

④ nmmn 为基准站号。例如,下面的一条 GPGGA 格式信息: \$ GPGGA 084 224.00 3 117.015 642 43 , N 12 129.666 238 89 , E 4 , 6 , 1.5 , 55.392 , M , 8.141 , M , * 5F。表示为:在北京时间 16:42:24 的时刻,当前 GPS 所在位置的经纬度为北纬 31°17.015 642 43',东经 121°29.666 238 89',此时 GPS 为固定解,应用于解算的卫星数为 6 颗,HDOP 为 1.5 相对于海平面的天线高程为 55.392 m,大地水准面起伏为 8.141 m。

三、数学模型

1. 卡尔曼滤波理论

常用的卡尔曼滤波方法有自适应卡尔曼滤波、渐消卡尔曼滤波等^[5]。其标准卡尔曼滤波线性观测方程和状态方程为

$$\left. \begin{aligned} L_k &= A_k X_k + \Delta_k \\ X_k &= \Phi_{k,k-1} X_{k-1} + W_k \end{aligned} \right\}$$

式中 X_k 和 L_k 为 k 时刻的状态向量和观测向量; $\Phi_{k,k-1}$ 和 A_k 分别表示状态转移矩阵和设计矩阵; W_k 为状态方程的误差向量和 Δ_k 为观测误差向量,表示随机误差向量,其协方差矩阵分别为 Σ_{W_k} 和 Σ_k 。

得卡尔曼预测状态向量 \bar{X}_k 为

$$\bar{X}_k = \Phi_{k,k-1} X_{k-1} + W_k$$

根据 k 时刻的最小二乘原理,得到卡尔曼滤波解为

$$\hat{X}_k = \bar{X}_k + K_k (L_k - A_k \bar{X}_k)$$

式中 $K_k = \Sigma_{\bar{X}_k} A_k (A_k \Sigma_{\bar{X}_k} A_k^T + \Sigma_k)^{-1}$;

$$\Sigma_{\bar{X}_k} = \Phi_{k,k-1} \Sigma_{\bar{X}_{k-1}} \Phi_{k,k-1}^T + \Sigma_{W_k}$$

2. 系统导航的卡尔曼误差方程与状态方程

在 CORS 系统导航中,采用运动物体的三维坐标与三个方向的速度为运动物体某个时刻 k 的状态向量,则状态向量为

$$X_k = [x_k \ y_k \ z_k \ \dot{x}_k \ \dot{y}_k \ \dot{z}_k]^T$$

可以列出误差方程为

$$\epsilon_k = A_k X_k - X_k^C$$

式中 $A_k = I_6$; X_k^C 是由 GPS 接收机接收 CORS 差分数据与 GPS 信号后得到的每个时刻的 GPS 观测值 $[x_k \ y_k \ z_k \ \dot{x}_k \ \dot{y}_k \ \dot{z}_k]^T$ ^[6]; X_k^C 中的三维坐标 $(x_k \ y_k \ z_k)$ 由 GPGGA 格式数据的 $(B/L/H)$ 信息转换得到 WGS-84 坐标,三个方向速度 $(\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z})$ 由前后两历元 $k-1 \ k$ 的三维坐标计算得到

$$\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N+H) \cos B \cos L \\ (N+H) \cos B \sin L \\ [(N(1-e^2)+H) \sin B] \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x_k - x_{k-1}) / \Delta t \\ (y_k - y_{k-1}) / \Delta t \\ (z_k - z_{k-1}) / \Delta t \end{bmatrix}$$

对于观测值 X_k^C 的协方差阵,鉴于上海市 CORS 系统的定位精度小于 ± 5 cm,状态向量中速度为前后两历元计算所得,其速度精度为 $\pm 5 \sqrt{2}$ cm/s。故可预设 X_k^C 的协方差矩阵 Σ_k 为

$$\Sigma_k = \begin{bmatrix} 0.0025 & & & & & \\ & 0.0025 & & & & \\ & & 0.0025 & & & \\ & & & 0.005 & & \\ & & & & 0.005 & \\ & & & & & 0.005 \end{bmatrix}$$

对于采用 CORS 系统导航的运动物体而言,根据牛顿运动定律,运动物体的运动模型公式为

$$\left. \begin{aligned} S_k &= S_{k-1} + V_{k-1} \Delta t + 1/2 \times \Delta t^2 a \\ V_k &= V_{k-1} + \Delta t a \end{aligned} \right\}$$

因此,利用卡尔曼滤波可得到状态方程预报值 \bar{X}_k 及其协方差矩阵 $\Sigma_{\bar{X}_k}$ 分别为

$$\bar{X}_k = f(\hat{X}_{k-1}, W_k) = \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1} + \Gamma_{k,k-1} W_k \quad (1)$$

$$\Sigma_{\bar{X}_k} = \Phi_{k,k-1} \Sigma_{\hat{X}_{k-1}} \Phi_{k,k-1}^T + \Gamma_{k,k-1} \Sigma_{W_k} \Gamma_{k,k-1}^T \quad (2)$$

式中 $\bar{X}_k = [\bar{x}_k \ \bar{y}_k \ \bar{z}_k \ \bar{\dot{x}}_k \ \bar{\dot{y}}_k \ \bar{\dot{z}}_k]^T$;

$$\Phi_{k,k-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_3 & \Delta t I_3 \\ 0 & I_3 \end{bmatrix}$$

W_k 为动态噪声向量,由于方程中忽略了载体加速度的影响,因此可以认为动态噪声向量为载体的加速度向量, $W_k = (\ddot{x} \ \ddot{y} \ \ddot{z})$, $\Gamma_{k,k-1}$ 为动态噪声向量对预报值的影响的系数矩阵^[7]

$$\Gamma_{k,k-1} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta t^2}{2} & & & & & \\ & \frac{\Delta t^2}{2} & & & & \\ & & \frac{\Delta t^2}{2} & & & \\ & & & \Delta t & & \\ & & & & \Delta t & \\ & & & & & \Delta t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta t^2}{2} I_3 \\ \Delta t I_3 \end{bmatrix}$$

同样,根据卡尔曼滤波模型,可得 CORS 系统导航状态最优估计值为

$$\hat{X}_k = \bar{X}_k + K_k (L_k - A_k \bar{X}_k) \quad (3)$$

$$\Sigma_{\hat{X}_k} = \Sigma_{\bar{X}_k} - \Sigma_{\bar{X}_k} A_k^T (A_k \Sigma_{\bar{X}_k} A_k^T + \Sigma_k)^{-1} A_k \Sigma_{\bar{X}_k} \quad (4)$$

其中 K_k 为滤波增益矩阵

$$K_k = \Sigma_{\bar{X}_k} A_k^T (A_k \Sigma_{\bar{X}_k} A_k^T + \Sigma_k)^{-1} \quad (5)$$

3. 渐消记忆滤波

为了有效地平衡状态方程预报信息和观测信息之间的权比,采用渐消记忆滤波^[8],即将式(2)改为

$$\Sigma_{\bar{X}_k} = \lambda_k \Phi_{k,k-1} \Sigma_{\bar{X}_{k-1}} \Phi_{k,k-1}^T + \begin{bmatrix} \frac{\Delta t^2}{2} I_3 \\ \Delta t I_3 \end{bmatrix} \Sigma_{W_k} \begin{bmatrix} \frac{\Delta t^2}{2} I_3 & \Delta t I_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

由式(6)得出的 $\Sigma_{\bar{X}_k}$ 来计算

$$K_k = \Sigma_{\bar{X}_k} A_k^T (A_k \Sigma_{\bar{X}_k} A_k^T + \Sigma_k)^{-1} \quad (7)$$

根据渐消记忆滤波理论 λ_k 的计算式为

$$\lambda_k = \max \left(1, \frac{\text{tr } N_k}{\text{tr } M_k} \right)$$

式中

$$M_k = A_k \Phi_{k,k-1} \Sigma_{\bar{X}_{k-1}} \Phi_{k,k-1}^T A_k^T = \Phi_{k,k-1} \Sigma_{\bar{X}_{k-1}} \Phi_{k,k-1}^T;$$

$$N_k = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k [(\bar{X}_i - X_i^G)(\bar{X}_i - X_i^G)^T] -$$

$$A_k \Gamma_{k,k-1} \Sigma_{W_k} \Gamma_{k,k-1}^T A_k^T - \Sigma_K =$$

$$\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k [(\bar{X}_i - X_i^G)^T (\bar{X}_i - X_i^G)] -$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta t^2}{2} I_3 \\ \Delta t I_3 \end{bmatrix} \Sigma_{W_k} \begin{bmatrix} \frac{\Delta t^2}{2} I_3 & \Delta t I_3 \end{bmatrix} - \Sigma_K$$

最后由式(7)替代式(5),再由式(3)和式(4)分别计算 k 时刻的最优估值与协方差阵。

4. CORS 系统服务或者 GPS 信号缺失的处理

由于本文旨在解决 CORS 系统导航中 GPS 信号或者 CORS 系统服务短期缺失的问题。由 Kalman 滤波能提供 GPS 信号丢失前所得的预报值,因此对每一瞬时 GPS 的观测向量都应用该瞬时的预报值向量与之比较,如差值过大,则表明 GPS 信号或者 CORS 系统服务出现问题,应改变该瞬时测定值。如当 GPS 信号与 CORS 系统服务正常或者仅是 CORS 系统服务缺失时,系统导航仍然能获得相应精度的测定值,此时,若当 GPS 观测值 $(x_k, y_k, z_k, \dot{x}_k, \dot{y}_k, \dot{z}_k)$ 与预报值 $(\bar{x}_{k-1}, \bar{y}_{k-1}, \bar{z}_{k-1}, \bar{\dot{x}}_{k-1}, \bar{\dot{y}}_{k-1}, \bar{\dot{z}}_{k-1})$ 相差无几(例如 3 m, 1 m/s),则应加大式(1)中动态模型噪声 W_k 的协方差阵,以加大 k 瞬时 GPS 实测值的贡献^[9],例如可将式(2)中 Σ_{W_k} 取

$$\Sigma_{W_k} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & & \\ & \sigma_y^2 & \\ & & \sigma_z^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.25 & & \\ & 0.25 & \\ & & 0.25 \end{bmatrix} = 0.25 I_3$$

当 GPS 观测值 $(x_k, y_k, z_k, \dot{x}_k, \dot{y}_k, \dot{z}_k)$ 与预报值 $(\bar{x}_{k-1}, \bar{y}_{k-1}, \bar{z}_{k-1}, \bar{\dot{x}}_{k-1}, \bar{\dot{y}}_{k-1}, \bar{\dot{z}}_{k-1})$ 相差悬殊(例如 3 m, 1 m/s),则应减小式(1)中动态模型噪声 W_k 的协方差阵,以加大由 $k-1$ 瞬时 GPS 实测值而预报的估计值的贡献。例如可将式(2)中的 Σ_{W_k} 取

$$\Sigma_{W_k} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & & \\ & \sigma_y^2 & \\ & & \sigma_z^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0080 & & \\ & 0.0080 & \\ & & 0.0080 \end{bmatrix} = 0.0080 I_3$$

特别注意的是,当 GPS 信号缺失时,已无法获得正常 GPS 观测值,观测值 X_k^G 应更换为上一历元预报值 \bar{X}_{k-1} ,即取观测值与预报值相同以解决 GPS 信号短期缺失的问题^[10]。直至某瞬时由 GPS 信号丢失到再次恢复后,重置为第一历元,前面的预报值应不再考虑。

四、算例

试验中采用 Trimble R8 GPS 接收机接收上海市 CORS 系统提供的差分服务,串口输出 GPGGA 数据,并对数据利用以上模型进行处理,获得了 GPS 信号正常和缺失情况下的计算结果。如图 1 所示。

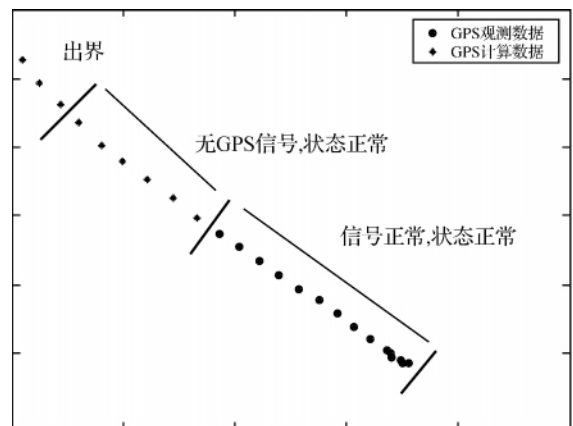


图1 CORS 系统导航载体位移示意图

五、结束语

如图 1 所示,当 GPS 完成初始化,开始测量之后,若 GPS 信号正常,则经过该算法计算得到的坐标值与 GPS 得到的坐标基本一致。实例结果表明,模型正确可靠。若 GPS 信号丢失,计算过程中不再采用 GPS 观测值,而只能使用预报值作卡尔曼滤波计算。若载体一直做匀速直线运动,则采用预报值

可以满足导航的需求,但在遇到拐弯或载体运动为非匀速直线运动时,只采用预报值无法满足导航的需要。故该模型只能解决短时间的 GPS 信号缺失问题。

参考文献:

- [1] 李征航,黄劲松. GPS 测量与数据处理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005.
- [2] 陈俊勇. 中国国家高精度 GPS 大地控制网的建立[J]. 测绘通报, 1998(8): 1-2.
- [3] 施一民. 现代大地控制测量[M]. 2版. 北京: 测绘出版社, 2008.
- [4] 同济大学, 武汉测绘科技大学. 控制测量学(下)[M]. 北京: 测绘出版社, 1986.
- [5] 杨元喜, 高为广. 两种渐消滤波与自适应抗差滤波的综合比较分析[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2006, 31(11): 44-46.
- [6] 刘大杰, 陶本藻. 实用测量数据处理方法[M]. 北京: 测绘出版社, 2000.
- [7] YANG Yuanxi, HE Haibo, XU Guochang. Adaptively Robust Filtering for Kinematic Geodetic Positioning[J]. Journal of Geodesy, 2001, 75(2): 109-116.
- [8] 胡国荣, 欧吉坤. 改进的高动态 GPS 定位自适应卡尔曼滤波方法[J]. 测绘学报, 1999, 28(4): 10-14.
- [9] 陈晓晖, 郭美凤, 毛献辉, 等. 自适应卡尔曼滤波在移动卫星通讯系统中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2001, 9(2): 24-27.
- [10] 杨元喜, 唐颖哲, 李庆田, 等. 用于 GIS 道路信息修测的动态 GPS 自适应滤波试验[J]. 测绘科学, 2003, 28(12): 9-11.

(上接第 15 页)

```
Matrix3d mat1 = new Matrix3d( matElements );
Matrix3d mat = mat1 * imgRef
    . PixelToModelTransform. Inverse( );
Point3d Origin1 = mat * imgRef. Orientation. Origin;
Vector3d Xaxis1 = mat * imgRef. Orientation. Xaxis;
Vector3d Yaxis1 = mat * imgRef. Orientation. Yaxis;
imgRef. Orientation = new CoordinateSystem3d
    ( Origin1, Xaxis1, Yaxis1 );
```

五、试验与结论

笔者在 AutoCAD 2008 环境下,按照本文所述方法编程实现了根据定位文件插入图像以及根据图像生成定位文件的功能。并且将同样的图像分别在 AutoCAD、ArcGIS、MapInfo 中插入,在三种软件中分别量取相同像素点的地图坐标并相互比较,结果完全一致,证明图像定位准确无误。同时,该方法

可对具有任意旋转角、纵向和横向缩放比例不一致的图像进行定位,具有良好的适应性和灵活性。

参考文献:

- [1] 王强,束炯,张晓沪. 一种遥感图像的坐标转换方法[J]. 测绘科学, 2006, 31(4): 137-139.
- [2] 李阳东,董小华,刘妙龙. 几个基于 ObjectARX. net 的 GIS 功能算法[J]. 测绘与空间地理信息, 2009, 32(1): 11-14.
- [3] 曾洪飞,张帆,卢择临. AutoCAD VBA & VB. NET 开发基础与实例教程[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [4] 秦洪现,崔惠岚,孙剑,等. Autodesk 系列产品开发培训教程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [5] Autodesk. ObjectARX for AutoCAD(Managed Class Reference) [EB/OL]. 2010-5-20 [2010-7-20]. [http://www.objectarx.net/downloads/arxref\(.net\).zip](http://www.objectarx.net/downloads/arxref(.net).zip).

《ArcGIS 制图和空间分析基础实验教程》出版

[本刊讯] 由北京建筑工程学院王文宇、杜明义编著的《ArcGIS 制图和空间分析基础实验教程》近日由测绘出版社出版。

该书以 ArcGIS 软件为例,引导读者由浅入深地掌握 GIS 软件操作技巧。通过基础实验,读者将首先熟悉空间数据库的建立和制图等基本操作,然后逐步过渡到空间分析与建模等核心技术,最后通过真实案例实践掌握 GIS 在实际地学中的应用。该书共由 18 个独立实验组成,读者可以按照书中指导的步骤,有效地完成实验,并了解 GIS 软件的基本功能和初步掌握 GIS 的基础空间分析能力(书中的实验数据可在网上下载)。该书是一本 GIS 软件操作的入门指导书,适合地理信息系统和相关专业的高职高专和本科学学生使用。

该书为 16 开本,定价 19.80 元。

(本刊编辑部)