

聚类算法的 GPS 静态单点定位方法

刘 胜, 张青春, 张兰勇

(哈尔滨工程大学 自动化学院, 150001 哈尔滨)

摘要: 为有效提高 GPS 静态单点定位的精度, 提出了一种基于模糊聚类算法和卡尔曼滤波算法的组合优化方法. 该方法首先对 GPS 实测数据进行卡尔曼滤波, 消除波动较大的数据, 然后应用模糊 C-均值聚类算法寻求聚类中心, 以该聚类中心为最终定位坐标. 实验结果表明, 该组合优化定位方法在降低定位成本的同时, 可以有效提升 GPS 静态单点定位精度, 采用该方法得到的定位坐标更接近于真实的地理坐标.

关键词: GPS; 单点定位; 卡尔曼滤波; 模糊 C-均值聚类

中图分类号: P228.4 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2012)11-0071-04

A method of GPS static single point positioning based on clustering algorithm

LIU Sheng, ZHANG Qing-chun, ZHANG Lan-yong

(School of Automation, Harbin Engineering University, 150001 Harbin, China)

Abstract: This paper presents a combination method based on fuzzy C-means clustering algorithm and Kalman filter, which effectively improves the GPS static point positioning accuracy. Firstly, the latitude and longitude data collected by GPS was filtered by Kalman filtering, which could eliminate large fluctuations in the data. Secondly, the fuzzy C-means clustering algorithm was used to find the clustering center as the final positioning coordinate. The experimental result shows that, this method can effectively promote the degree of accuracy of GPS static single point positioning with low cost, and the coordinates of the positioning is more close to the true geographical coordinates.

Key words: GPS; Single point positioning; Kalman filter; Fuzzy C-means clustering algorithm

GPS(Global Positioning System)的定位精度受很多因素影响,诸如电离层延时误差、多径延时误差等,这些因素所导致的定位精度在很多场合不能满足用户的要求^[1].因此,消除误差,提高GPS的定位精度,已成为人们研究的热点.目前,提高静态单点定位精度的研究工作,主要有:1)利用差分技术,基准站的GPS差分信号接收机,将得到的GPS定位误差修正值发送至用户接收机,并对用户接收机的定位结果进行修正;2)单点自主式定位技术,采用各种滤波算法,对接收机实测的数据进行实时或事后处理,以滤除各类误差影响^[2-3].差分GPS技术的应用受工作区的限制且成本较高.因此,研

究提高成本较低的GPS单点自主式定位精度的方法是一项有意义的工作.

在滤波算法上,比较常用的有最小二乘法、卡尔曼滤波、自适应滤波及粒子滤波等.杜晓辉等^[4]分别将最小二乘法和卡尔曼滤波应用于静态单点定位并比较了二者的定位误差,证明卡尔曼滤波算法可以有效的利用噪声统计特征对坐标量进行估计,得到较好的定位精度;K. Yedukondalu等^[5]应用最小均方差(LMS)自适应滤波算法对GPS信号多径效应误差进行消除,证明该方法可以有效降低多径效应误差,提高定位精度.本文从实际应用的角度出发,提出一种基于卡尔曼滤波和模糊C-均值聚类的组合优化定位方法.该方法首先对GPS采集到数据进行卡尔曼滤波,消除波动较大的数据,然后采用模糊C-均值聚类算法确定数据中心,得到高精度的坐标点.

收稿日期: 2012-02-13.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51079033).

作者简介: 刘胜(1957—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 张青春, zhqch0126@126.com.

1 GPS 单点定位原理

GPS 的定位原理,其依据是测量学中的空间距离后方交会.通过观测 GPS 卫星,可以获得卫星的位置及卫星到观测点的距离.以此位置为圆心,距离为半径做球面,多个球面的相交点,便是所求观测点的位置.在实际的观测过程中,接收机观测所得的卫星到观测点的距离包含了接收机钟与卫星钟之间的钟差所带来的误差,并非卫星到观测点的实际距离,故称之为伪距^[6].

接收机测得的距离为伪距,存在一个固定但未知的钟差,加上所求观测点的三维位置坐标,共4个未知数待求,故要实现单点定位至少须同时观测4个GPS卫星,以组成GPS定位基本方程,如图1所示.

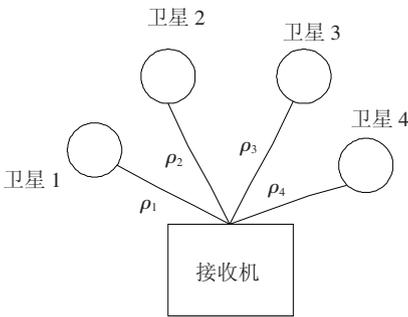


图1 GPS 单点定位

图1中 R 为卫星到接收机间的真实距离, ρ 为伪距观测值, τ 为接收机钟差,则观测方程为

$$\rho = R + c \times \tau = \sqrt{(X_s - X_p)^2 + (Y_s - Y_p)^2 + (Z_s - Z_p)^2} + c \times \tau.$$

式中:假定伪距观测值 ρ 已通过星历中的电离层延迟和对流层延迟修正; (X_s, Y_s, Z_s) 为卫星的瞬时地心坐标,可通过卫星星历电文求得; (X_p, Y_p, Z_p) 为接收机的地心坐标,即所求量.

解算出的 (X_s, Y_s, Z_s) 为地心坐标,可与常用的经纬度坐标 (φ, λ, h) 相互转换为

$$\begin{cases} X_p = (n + h) \cos \varphi \cos \lambda, \\ Y_p = (n + h) \cos \varphi \sin \lambda, \\ Z_p = [n(1 - e^2) + h] \sin \varphi. \end{cases}$$

式中: e 为椭球第1偏心率; n 为椭球卯酉圈曲率半径.设椭球长半径为 a ,短半径为 b ,那么

$$\begin{cases} e = \sqrt{a^2 - b^2} / a, \\ n = a / \omega, \\ \omega = \sqrt{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)}. \end{cases}$$

已知,地球长半径 $a = 6\,378\,137.07\text{ m}$,地球短半径 $b = 6\,356\,752.48\text{ m}$.

2 Kalman 滤波模型及数据处理

静态单点定位模型,可近似认为定常速度模型,以待测点的位置和速度作为状态变量.为便于观测数据的处理,假定系统噪声和测量噪声为高斯白噪声,有针对性的分析滤波后的效果^[7].通常情况下可将其视为一个线性系统,采用最小二乘法或卡尔曼滤波的方法进行数据处理.

根据以上分析,定义状态向量为

$$\mathbf{x} = [x \ y \ z \ \dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z}]^T.$$

式中: x, y 和 z 分别为待测点纬度、经度和海拔; \dot{x}, \dot{y} 和 \dot{z} 分别为待测点在对应方向上的速度.

离散化后的系统状态方程与观测方程为

$$\begin{cases} \mathbf{x}_k = \Phi_{k/k-1} \mathbf{x}_{k-1} + \Gamma_{k-1} \mathbf{w}_{k-1}, \\ \mathbf{z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k. \end{cases}$$

式中: \mathbf{x}_k 为状态向量; $\Phi_{k/k-1}$ 为状态转移矩阵; Γ_{k-1} 为噪声驱动阵; \mathbf{w}_{k-1} 为系统噪声,其相应协方差阵为 \mathbf{Q}_{k-1} ; \mathbf{z}_k 为观测向量; \mathbf{H}_k 为量测阵; \mathbf{v}_k 为观测噪声,其相应的协方差阵为 \mathbf{R}_k .根据牛顿方程可得离散化后的定常速模型参数为

$$\Phi_{k/k-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{T} \cdot \mathbf{I}_3 \end{bmatrix}_{6 \times 6}, \quad \Gamma_{k-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{T} \cdot \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{T}^2 \cdot \mathbf{I}_3 \end{bmatrix}_{6 \times 3},$$

$$\mathbf{w}_{k-1} = [w_x \ w_y \ w_z]^T_{3 \times 1}.$$

由于本文研究静态定位,因此无需速度信息,只需位置信息.所以

$$\mathbf{H}_k = [\mathbf{I}_3 \ \mathbf{0}_{3 \times 3}]_{3 \times 6},$$

$$\mathbf{v}_k = [v_x \ v_y \ v_z]^T_{3 \times 1}.$$

其后,需要对卡尔曼滤波的初值进行适当的选取.根据卡尔曼稳定性定理及滤波误差方差阵的渐近性定理^[8]:在系统初始状态的统计特性不明或不易获得的情况下,可令 $\hat{\mathbf{x}}_0 = \mathbf{0}_{6 \times 1}, \mathbf{P}_0 = \alpha \mathbf{I}_6$ (α 可为一个较大的常数).鉴于单点定位观测数据的特征,取第1个坐标点 (x_0, y_0, z_0) 为初值,即 $\hat{\mathbf{x}}_0 = [x_0 \ y_0 \ z_0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$, 并取 $\mathbf{P}_0 = 10\mathbf{I}_6$.

因为本文所采用的GPS数据输出频率为1 Hz,所以离散化后的采样时间为 $T = 1$.经过上文分析与设定,滤波计算采用定常系统卡尔曼滤波方程^[9]

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{x}}_{k/k-1} = \Phi_{k,k-1} \hat{\mathbf{x}}_{k-1}, \\ \mathbf{P}_{k/k-1} = \Phi_{k,k-1} \mathbf{P}_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \Gamma_{k-1} \Phi_{k,k-1} \mathbf{I}_{k-1}^T, \\ \mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1}, \\ \mathbf{P}_k = (\mathbf{I}_6 - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k/k-1} (\mathbf{I}_6 - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k)^T + \mathbf{K}_k \mathbf{P}_k \mathbf{K}_k^T, \\ \hat{\mathbf{x}}_k = \bar{\mathbf{x}}_{k/k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \bar{\mathbf{x}}_{k/k-1}). \end{cases}$$

滤波前数据如图2所示,可以看到未滤波的GPS原始数据,波动范围比较大,经度范围为

[126.673 2°, 126.673 9°]; 纬度范围为 [45.771 7°, 45.772 7°]. 经卡尔曼滤波后数据分布如图 3 所示, 经度控制在 [126.673 55°, 126.673 65°] 范围内; 纬度控制在 [45.771 9°, 45.772 1°] 范围内.

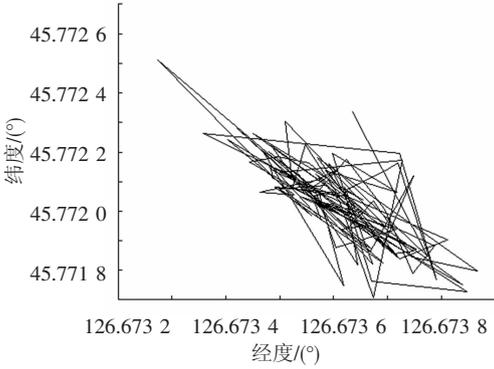


图 2 滤波前数据分布

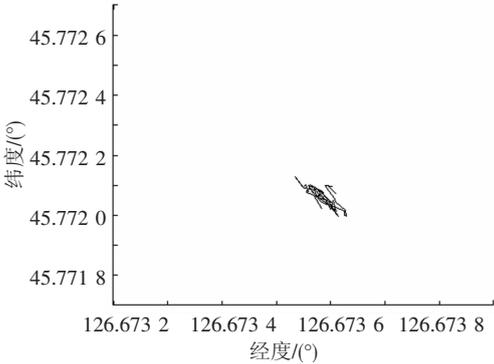


图 3 滤波后数据分布

通过对比, 卡尔曼滤波的确能够消除较大的数据波动, 逼近 GPS 所测位置的真实坐标. 当然, 滤波的目的是对原始数据进行预处理, 剔除波动较大的数据, 滤波后的数据是一个较小的区域, 要得到高精度的坐标位置, 需要进一步的数据处理.

3 模糊 C-均值聚类算法确定坐标中心

经过卡尔曼滤波后的坐标值全都处在空间内较小的邻域内, 但是还不能提供可以使用的定位值. 模糊 C-均值聚类算法^[10]是基于目标函数的聚类算法, 该算法沿着目标函数减小的方向进行迭代, 具有良好的收敛性, 能够对数据进行分类, 并找出聚类中心. 根据本文所述, GPS 数据不需分类, 仅需确定聚类中心即可. 因此, 在本文中采用模糊 C-均值聚类方法确定坐标中心.

设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \subset R^s$ 是数据集, n 为数据集元素个数, c 为聚类中心数 ($1 < c < n$), $d_{ij} = \|x_i - V_j\|$ 为样本点 x_i 和聚类中心 V_j 的欧式距离, $V_j \subset R^s$ ($1 < j < c$). u_{ij} 为第 i 个样本属于第 j 个中心的隶属度, $U = [u_{ij}]$ 为一个 $n \times c$ 矩阵, $V = [V_1, V_2, \dots, V_c]$ 是一个 $s \times c$ 矩阵.

模糊 C-均值聚类问题可表示成数学规划问题

问题
$$\min J_m(U, V) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^c u_{ij}^m d_{ij}^2.$$

使得
$$\sum_{j=1}^c u_{ij} = 1, \quad 1 \leq i \leq n.$$

$$0 \leq u_{ij} \leq 1, \quad 1 \leq i, j \leq n.$$

$$0 \leq \sum_{i=1}^n u_{ij} \leq n, \quad 1 \leq j \leq c.$$

这里 m 为权重系数 ($m > 1$), 研究表明, m 的最佳选择范围为 [1.5, 2.5], 通常 $m = 2$ 是比较理想的取值^[11].

解决上述的数学规划问题的算法步骤如下:

起始 选取 $\varepsilon > 0$, 初始聚类中心 $V^{(0)}$, 令 $k = 0$,

步骤 1 计算 $U^{(k)}$

如果存在 i, r 使得 $\text{dir}(k) > 0$, 则

$$u_{ij}(k) = \left\{ \sum_{r=1}^c \left[(d_{ij}(k)/d_{ir}(k))^{2/m-1} \right] \right\}^{-1}.$$

如果存在 i, r 使得 $d_{ir}(k) = 0$, 则令

$$u_{ir}(k) = 1 \text{ 且对 } j \neq r, \quad u_{ij}(k) = 0.$$

步骤 2 计算 $V^{(k+1)}$

$$V_j(k+1) = \frac{\sum_{i=1}^n u_{ij}^m(k) x_i}{\sum_{i=1}^n u_{ij}^m(k)}.$$

步骤 3 如果 $\|V(k+1) - V(k)\| < \varepsilon$ 则停止, 否则令 $k = k + 1$, 回到步骤 1. 最终得到的 V 即为聚类中心矩阵.

将模糊 C-均值聚类方法, 结合本文实际. 在卡尔曼滤波的基础上, 采用基于数据密度的模糊 C-均值聚类方法, 直接将 GPS 数据划分为一类, m 取值为 2, 最后确定数据中心. 其算法流程如图 4 所示.

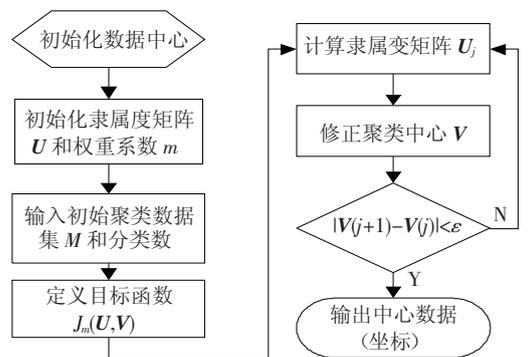


图 4 模糊 C-均值聚类算法流程

4 结果分析

实验采用的 GPS 数据为实测单点静态定位原始数据. 真实地理信息位置为 (126.673 596°E, 45.772 053°N). GPS 接收机, 数据输出频率为 1 Hz, 共得到观测数据 520 组.

首先, 对原始数据直接应用模糊 C-均值聚类

算法,得到未滤波数据的聚类中心.其坐标值为 (126.673 614°E,45.772 026°N),如图 5 所示.

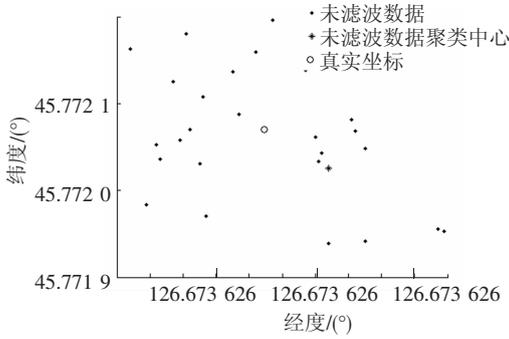


图 5 滤波前聚类中心

然后,对原始数据进行卡尔曼滤波,将滤波后的数据进行模糊 C-均值聚类运算,得到滤波后聚类中心.其坐标值为(126.673 586°E,45.772 061°N).如图 6 所示.

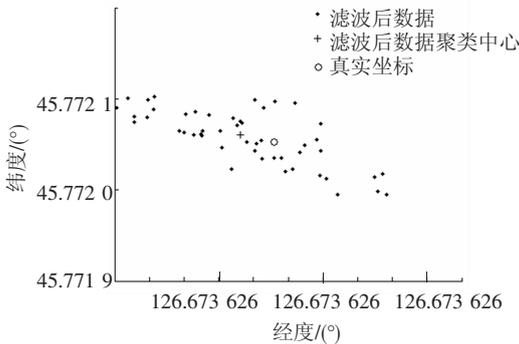


图 6 滤波后聚类中心

图 7 为滤波前后聚类中心位置与真实坐标的对比图.可以直观的看出,采用卡尔曼滤波与模糊 C-均值聚类算法相结合的方法,得到的聚类中心更接近于真实的地理坐标.提高了单点静态 GPS 定位精度.

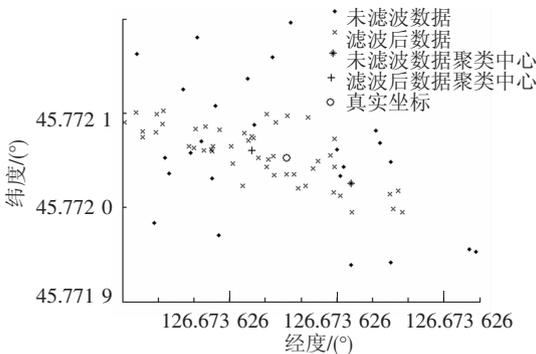


图 7 滤波前后聚类中心与真实坐标对比

5 结 论

1)提出了基于卡尔曼滤波和模糊 C-均值聚类算法的单点定位组合优化方法.理论分析和实验结果证明该方法可以有效提升 GPS 静态单点定位精度,同时大大降低定位成本,是一种较好的

单点定位算法.

2)对于卡尔曼滤波,采用定常速模型.对 GPS 定位数据处理结果显示,该模型可以有效利用噪声的统计特征,得出较小的估计误差.经该模型去噪后求取的聚类中心,更接近真实的地理坐标,证明了该模型是合理有效的.

参 考 文 献:

[1] 刘娣,薄煜明,邹卫军.基于时间序列的 GPS 误差建模及单点定位精度研究[J].兵工学报,2009,30(6): 825 - 828.

[2] TU Xianqin, MENG Qinghai, YI Dong-un, et al. Evaluation of kinematic airborne GPS data processing using precise point positioning approach[C]//2012 International Conference on Computer Science and Electronic Engineering. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2012: 63 - 68.

[3] GAO Y. Canadian high precision real-time gps correction service and real-time atmosphere and deformation monitoring[R]. Wuhan: CPGPS Workshop, 2008.

[4] 杜晓辉,任章.基于卡尔曼滤波的 GPS 静态定位精度分析[J].全球定位系统,2008(5): 47 - 51.

[5] YEDUKONDALU K, SARMA A D, SRINIVAS S V. Multipath mitigation using LMS adaptive filtering for GPS applications[C]//IEEE-Applied Electromagnetics Conference (AEMC-2009). Washington, DC: IEEE Xplore, 2009: 14 - 16.

[6] WANG Huihui, ZHAN Xingqun, ZHANG Yanhua. Geometric dilution of precision for GPS single-point positioning based on four satellites[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2008, 19(5): 1058 - 1063.

[7] 孙罡,王昌明,张爱军.GPS 静态单点定位的滤波方法比较[J].南京理工大学学报,2011,35(1): 80 - 85.

[8] JWO DahJing, WANG Shenghung. Adaptive Fuzzy strong tracking extended Kalman filtering for GPS navigation[J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(5): 778 - 789.

[9] 聂建亮,张双成,徐永胜.基于抗差 Kalman 滤波的精密单点定位[J].地球科学与环境学报,2010,32(2):218 - 220.

[10] HUNG Chih-cheng, KULKARNI S, KUO Bor-chen. A new weighted Fuzzy C-means clustering algorithm for remotely sensed image classification[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2011, 5(3): 543 - 553.

[11] PAL N R, PAL K, KELLER J M, et al. A possibilistic Fuzzy C-means clustering algorithm[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2005, 13(4): 517 - 530.

(编辑 张 红)