

文章编号:1004-9037(2012)02-0259-05

基于SRUKF的TSOA/TDOA单站跟踪技术

刘翔¹ 宋常建¹ 胡磊² 钟子发¹

(1. 解放军电子工程学院电子制约技术重点实验室,合肥,230037;2. 蚌埠汽车管理学院干部轮训大队,蚌埠,230011)

摘要:阐述了蜂窝网系统中单台定位设备TSOA/TDOA被动式新型混合定位技术的原理。利用TSOA/TDOA混合定位的数学模型建立系统观测方程,采用受随机加速影响的匀速运动状态模型,描述了移动台的位移和速度。在此基础上推导了基于平方根无迹卡尔曼滤波的跟踪算法,并通过仿真实现了对移动台位置和速度的同时跟踪。仿真结果表明,与扩展卡尔曼滤波及无迹卡尔曼滤波算法相比,平方根无迹卡尔曼滤波算法的跟踪性能更优。

关键词:到达时间之和(TSOA);到达时间之差(TDOA);平方根无迹卡尔曼滤波(SRUKF);移动台跟踪

中图分类号:TN929.53

文献标识码:A

TSOA/TDOA Tracking Technology Based on Square-Root Unscented Kalman Filter

Liu Xiang¹, Song Changjian¹, Hu Lei², Zhong Zifa¹

(1. Key Laboratory of Electronic Restriction, Electronic Engineering Institute of PLA, Hefei, 230037, China;

2. Academy Cadre Trained Group, Automobile Management Institute of PLA, Bengbu, 230011, China)

Abstract: According to the single location equipment application in cellular networks, the principle of a novel passive location technology is firstly presented in detail based on the time sum of arrival and the time difference of arrival (TSOA/TDOA). Then the equation of observation is built by the mathematical model of the TSOA/TDOA location system. And the speed and shift of the mobile are described with the uniform motion state model which is affected by the random acceleration. Finally, the locating and tracking algorithm is put forward and derived based on square-root unscented Kalman filter (SRUKF). And the mobile position and speed are estimated at the same time. Simulation result shows that the proposed algorithm has superior performance to the extended Kalman filter (EKF) algorithm and the unscented Kalman filter (UKF) tracking algorithm.

Key words: time sum of arrival (TSOA); time of difference arrival (TDOA); square-root unscented kalman filter (SRUKF); mobile tracking

引 言

随着蜂窝网移动通信技术的迅猛发展,移动台无线定位技术已成为研究热点。目前,到达场强(Single strength of arrival, SSOA)、到达入射角度(Angle of arrival, AOA)、到达时间(Time of arrival, TOA)、到达时间差(Time difference of arrival, TDOA)及其融合而成的混合定位技术,如TDOA/AOA, TOA/AOA等,在商业化应用上已

取得成功^[1]。但以上定位技术大多要求用于定位的参数由基站或移动台主动支持^[2]。为研制基于蜂窝网系统的新一代被动式跟踪系统,本文利用一种基于到达时间(Time sum of arrival, TSOA^[4])与到达时间差(TDOA)的新型混合定位技术称为“TSOA/TDOA”^[3]新型混合定位技术。它由第三方定位侦察设备获取定位参数并完成定位,无需基站和移动台的主动支持,因此也称其为非合作式定位或被动式定位。

单站式跟踪通常是一个非线性估计问题,非线性

式中: k 时刻即 $t=t_0+kT_s$ 时刻, T_s 为抽样间隔, $\mathbf{W}_k=[a_{x_k}, a_{y_k}]^T$ 为 k 时刻系统的过程噪声,表示该时刻的加速度向量,它的协方差矩阵记为 \mathbf{Q} 。将式(1)写成矩阵形式,即系统方程

$$\mathbf{X}_k = \Phi \mathbf{X}_{k-1} + \Gamma \mathbf{W}_{k-1} \quad (2)$$

式中 $\Gamma = \begin{bmatrix} T_s^2/2 & 0 \\ 0 & T_s^2/2 \\ T_s & 0 \\ 0 & T_s \end{bmatrix}$ 为控制变量。

2.2 观测方程

假设定位台获取TSOA和TDOA测量值分别为 τ_k 和 Δt_{ki} 。它们分别由式(3-4)得到

$$\tau_k = \tau_{x_k} + \tau_{y_k} = \frac{1}{c} (\sqrt{(x_k - x_r)^2 + (y_k - y_r)^2} + \sqrt{(x_k - x_b)^2 + (y_k - y_b)^2}) + n_k^{\text{TSOA}} \quad (3)$$

$$\Delta t_{ki} = t_{i_k} - t_{b_k} = \frac{1}{c} (\sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2} - \sqrt{(x_k - x_b)^2 + (y_k - y_b)^2}) + n_k^{\text{TDOA}} \quad (4)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, M$

式中: τ_k 为 k 时刻系统TSOA测量时间, Δt_{ki} 为 k 时刻目标用户到主基站和到相邻基站的时间之差, M 为参与计算的相邻小区的数目, (x_k, y_k) 为 k 时刻目标移动台坐标, (x_b, y_b) 为主基站(目标用户所在小区基站)的坐标, (x_i, y_i) 为相邻基站的坐标, (x_r, y_r) 为定位台的坐标, c 为光速, $n_k^{\text{TSOA}} \in N(0, \sigma_{\text{TSOA}}^2)$ 为TSOA测量噪声, $n_k^{\text{TDOA}} \in N(0, \sigma_{\text{TDOA}}^2)$ 为TDOA测量噪声,并且 $n_k^{\text{TSOA}}, n_k^{\text{TDOA}}$ 相互独立。将 k 时刻的测量值表示为 $\mathbf{z}_k = [\tau_k, t_{k_1}, t_{k_2}, \dots, t_{k_M}]^T$,测量等式可以表示为动态模型形式,即观测方程

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{h}_k(\mathbf{X}_k) + \mathbf{V}_k \quad (5)$$

式中: $\mathbf{h}_k = [\frac{1}{c} (\sqrt{(x_k - x_r)^2 + (y_k - y_r)^2} + \sqrt{(x_k - x_b)^2 + (y_k - y_b)^2}), \frac{1}{c} (\sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2} - \sqrt{(x_k - x_b)^2 + (y_k - y_b)^2})]^T$ 为非线性测量函数矩阵; $\mathbf{V}_k \in [n_k^{\text{TSOA}}, n_k^{\text{TDOA}}]^T$ 为系统的观测噪声,其协方差矩阵 $\mathbf{R}_k = \text{diag}(\sigma_{\text{TSOA}}^2 \mathbf{I}, \sigma_{\text{TDOA}}^2 \mathbf{I})$ 。

2.3 SRUKF 算法原理

SRUKF算法是在UKF算法的基础上借鉴卡尔曼滤波中的分解滤波思想:在滤波过程中,直接用状态协方差矩阵的平方根代替协方差参加递推运算。相比UKF算法,计算效率更高,数值解更稳定。

UKF算法采用具有确定性的点集(称为Sigma点集)来表征输入状态的概率分布,每次时间更新时要计算新的Sigma点,这要求每次都必须计算状态协方差矩阵 \mathbf{P} 的平方根,并假定 $\mathbf{S}\mathbf{S}^T = \mathbf{P}$ 。而在SRUKF滤波过程中, \mathbf{S} 会被记录下,使用 \mathbf{S} 代替 \mathbf{P} 参加递推运算,可以保证协方差阵的非负定性,从而实现有效滤波。其具体实现步骤如下:

(1)初始化

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}}_0 = E[\mathbf{X}_0] \\ \mathbf{S}_{X_0} = E[(\mathbf{X}_0 - \hat{\mathbf{X}}_0)(\mathbf{X}_0 - \hat{\mathbf{X}}_0)^T] \\ \hat{\mathbf{X}}_0^a = E[\mathbf{X}_0^a] = [\hat{\mathbf{X}}_0^T, 0, 0]^T \\ \mathbf{S}_{X_0^a} = E[(\mathbf{X}_0^a - \hat{\mathbf{X}}_0^a)(\mathbf{X}_0^a - \hat{\mathbf{X}}_0^a)^T] \end{cases} \quad (6)$$

式中 $\mathbf{X}^a = [\mathbf{X}^T, \mathbf{W}^T, \mathbf{V}^T]^T$ 是由状态变量 \mathbf{X} 、过程噪声 \mathbf{W} 和观测噪声 \mathbf{V} 扩展成的新增广状态向量。

(2)对于 $k=1, 2, 3, \dots$ 实现以下步骤:

①计算Sigma点

$$\hat{\xi}_{k-1}^a = [\hat{\mathbf{X}}_{k-1}^a, \hat{\mathbf{X}}_{k-1}^a + \gamma \mathbf{S}_{X_{k-1}^a} \hat{\mathbf{X}}_{k-1}^a - \gamma \mathbf{S}_{X_{k-1}^a}^a], \quad (7)$$

式中 $\hat{\xi}^a = [\hat{\xi}^X \quad (\hat{\xi}^W)^T \quad (\hat{\xi}^V)^T]^T$

②计算时间更新方程

$$\hat{\xi}_{k,k-1}^X = f(\hat{\xi}_{k-1}^X, \hat{\xi}_{k-1}^W) \quad (8)$$

$$\hat{\mathbf{X}}_k^- = \sum_{i=0}^{2n} \omega_i^{(m)} \hat{\xi}_{k,k-1}^X(i) \quad (9)$$

$$\hat{\mathbf{S}}_{X_k}^- = \text{qr}\{[\sqrt{\omega_1^{(c)}} (\hat{\xi}_{(1;2n), (k,k-1)}^X - \hat{\mathbf{X}}_k^-)]\} \quad (10)$$

$$\hat{\mathbf{S}}_{X_k}^- = \text{Cholupdate}\{\hat{\mathbf{S}}_{X_k}^-, \hat{\xi}_{0, (k,k-1)}^X - \hat{\mathbf{X}}_k^-, \omega_0^{(c)}\} \quad (11)$$

$$\chi_{k,k-1} = h(\hat{\xi}_{k,k-1}^X, \hat{\xi}_{k,k-1}^V) \quad (12)$$

$$\hat{\mathbf{Z}}_k^- \approx \sum_{i=0}^{2n} \omega_i^{(m)} \chi_{k,k-1}(i) \quad (13)$$

③计算观测更新方程

$$\hat{\mathbf{S}}_{Z_k}^- = \text{qr}\{[\sqrt{\omega_1^{(c)}} (\chi_{(1;2n), (k,k-1)} - \hat{\mathbf{Z}}_k^-)]\} \quad (14)$$

$$\hat{\mathbf{S}}_{Z_k}^- = \text{Cholupdate}\{\hat{\mathbf{S}}_{Z_k}^-, \chi_{0, (k,k-1)} - \hat{\mathbf{Z}}_k^-, \omega_0^{(c)}\} \quad (15)$$

$$\mathbf{P}_{X_k Z_k} = \sum_{i=0}^{2n} \omega_i^{(c)} \{\hat{\xi}_{k,k-1}^X(i) - \hat{\mathbf{X}}_k^-\} \{\chi_{k,k-1}(i) - \hat{\mathbf{Z}}_k^-\}^T \quad (16)$$

$$\mathbf{K}_k = \frac{(\mathbf{P}_{X_k Z_k} / \hat{\mathbf{S}}_{Z_k}^{-T})}{\hat{\mathbf{S}}_{Z_k}^-} \quad (17)$$

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}_k - \hat{\mathbf{Z}}_k^-) \quad (18)$$

$$\mathbf{U} = \mathbf{K}_k \hat{\mathbf{S}}_{Z_k}^- \quad (19)$$

$$\hat{\mathbf{S}}_{X_k}^- = \text{Cholupdate}\{\hat{\mathbf{S}}_{X_k}^-, \mathbf{U}, -1\} \quad (20)$$

(3) 计算权值和参数

$$\begin{aligned} \gamma &= \sqrt{n + \lambda}, \quad \omega_0^{(m)} = \frac{\lambda}{n + \lambda} \\ \omega_0^{(c)} &= \omega_0^{(m)} + (1 - \alpha^2 + \beta) \\ \omega_i^{(c)} &= \omega_i^{(m)} = \frac{1}{2(n + \lambda)} \quad i = 1, 2, \dots, 2n \end{aligned} \tag{21}$$

式中： $\lambda = \alpha^2(n+k) - n$ ； n 为增广状态向量的维数； α 为决定 Sigma 点分布广度的主要刻度因子，其典型分布范围为 $10^{-3} < \alpha \leq 1$ ； β 是零阶 Sigma 点权值的第 2 刻度因子，用来强调调整后协方差计算； k 为第 3 刻度因子，通常设置为 0。qr(A) 表示对矩阵 A 进行 QR 分解得到的下三角矩阵；Cholupdate{R,U,±V} 表示矩阵 R±VUU' 的 Cholesky 分解。“/”表示通过旋转三角 QR 分解得到的有效最小二乘伪逆。

3 仿真结果

为了验证 SRUKF 算法在 TSOA/TDOA 移动台单站跟踪系统中的应用效果，在典型蜂窝式基站分布的环境下进行仿真，分别在直角坐标系下使用 EKF, UKF, SRUKF 算法对目标移动台进行跟踪。仿真条件设置为：目标初始位置 (200, 100)，相邻基站的坐标为： $BS_1(2\ 250, 1\ 299)$ ， $BS_2(2\ 250, -1\ 299)$ ， $BS_3(0, -2\ 598)$ ，主基站的坐标为： $BS_b(0, 0)$ ，定位台的坐标为： $BS_r(450, -200)$ ，运动状态为带有随机加速的匀速运动，横向和纵向速度分别为 7, 2 m/s，它们均受到零均值方差为 3/2 的高斯随机加速的影响。抽样间隔为 2 s，取 100 个采样点， $\sigma_{TSOA} = 100\ m$ ， $\sigma_{TDOA} = 50\ m$ ， $\alpha = 0.1$ ， $\beta = 2$ ， $k = 0$ 。在上述仿真条件下，经过 100 次蒙特卡罗仿真，得到了 EKF, UKF 和 SRUKF 三种算法的目标跟踪轨迹曲线及误差曲线，如图 2-5 所示。

由图 2, 3 可看出，在轨迹较平缓的区域，3 种算法都能较好的实现跟踪，其中 UKF, SRUKF 算法效果明显优于 EKF 算法，SRUKF 算法略优 UKF 算法；但在目标出现机动转弯时，EKF 和 UKF 算法均出现跟踪轨迹与目标轨迹发生偏离的现象，其中 EKF 算法在某些机动转弯较强区域出现跟踪丢失的现象，但 SRUKF 算法能一直保持较好的跟踪效果。

图 4 为蒙特卡罗仿真统计得到的 RMSE，其中

$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (x' - x)^2 + (y' - y)^2}$ ， $M = 100$ 为蒙特卡罗仿真次数， (x, y) 为目标实际坐标， (x', y') 为算法估计坐标。从图 4 中易对 EKF, UKF,

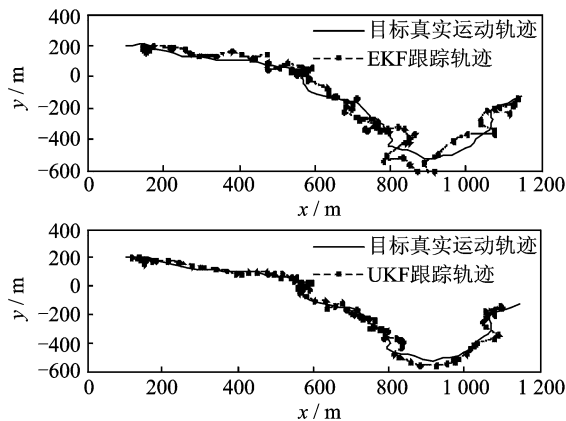


图 2 一次 EKF, UKF 算法跟踪对比图

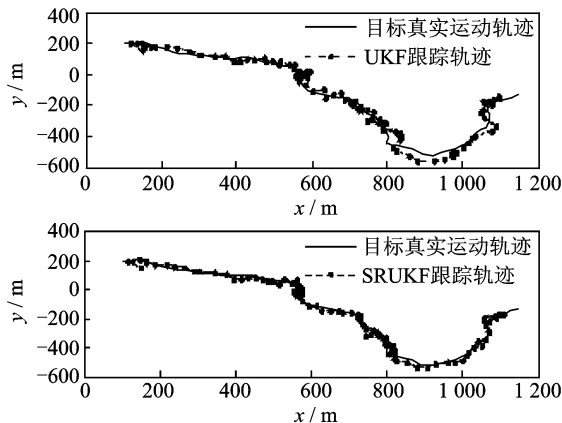


图 3 一次 UKF, SRUKF 算法跟踪对比图

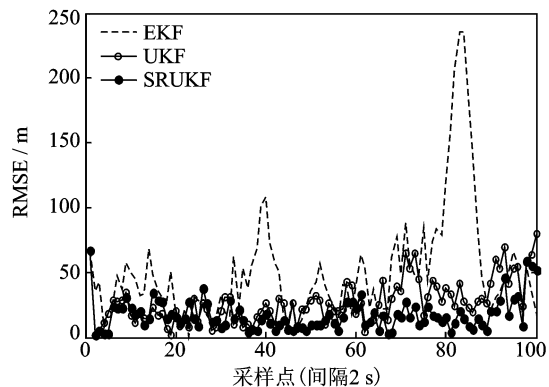


图 4 各算法 RMSE 比较图

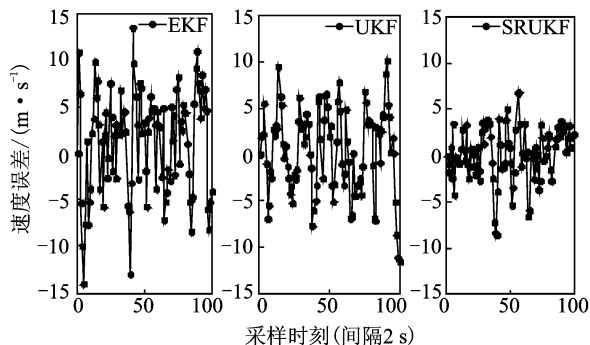


图 5 各算法速度跟踪误差比较图

SRUKF 三种算法的性能有更直观的了解,在目标轨迹较平缓阶段,UKF 与 SRUKF 算法的性能相差不多,皆明显优于EKF 算法;但到达目标机动转弯段时,EKF 算法的跟踪误差迅速增大,UKF 算法的跟踪误差也有所增大,而SRUKF 算法能保持较稳定的跟踪精度,说明SRUKF 算法相对于另两种算法有更高的精度和稳定性,这与图2,3所示的情况也是相一致的。这是由于EKF 算法在对非线性测量方程的线性化时产生了误差,而这种误差对于上一时刻状态初值较为敏感,导致该算法处理前后状态变化较大的情况下效果下降甚至滤波发散;而UKF,SRUKF 算法直接利用系统非线性方程,无需线性化,避免了复杂的雅可比矩阵的求取,同时利用一系列的确定性采样点描述滤波过程的真实均值和方差,一定程度上也避免EKF 线性化方程过程中带来的误差,其滤波效果和算法效率显著提高^[11]。另外,SRUKF 算法更是直接用状态协方差矩阵的平方根代替协方差参与递推运算,避免了UKF 算法中协方差阵出现负定的现象,其稳定性和精确性更优^[12]。

图5显示了3种算法对于目标速度的跟踪性能,EKF 跟踪速度的偏差在(-15,15)范围内波动且波动的范围较大,而UKF 和SRUKF 算法跟踪速度偏差都在(-10,10)内,但SRUKF 算法的跟踪偏差更小一些,其对目标速度的跟踪相对于其余两种算法更佳。

4 结束语

本文在研究了蜂窝网系统中的基于TSOA/TDOA 的混合式被动定位技术的基础上,推导了一种基于平方根无迹卡尔曼滤波算法的单站跟踪算法,并与常用的EKF 和UKF 算法的性能进行仿真比较。结果表明,基于TSOA/TDOA 混合被动定位模型的平方根卡尔曼滤波跟踪具有更好的准确性和鲁棒性。

参考文献:

- [1] 范志平,邓平,刘林. 蜂窝网无线定位[M]. 北京:电子工业出版社,2002:52-100.
- [2] 3GPP TS 25. 215 v6. 0. 0. 2003. Physical layer measurements (FDD) [S]. 2003:1-12.
- [3] 胡磊,钟子发,宋常建. 基于TSOA/TDOA 的WCDMA 目标单站定位算法研究[C]//中国通信学会第六届学术年会论文集. 北京:国防工业出版社,2009. Hu Lei, Zhong Zifa, Song Changjian. Research on WCDMA target location algorithm based on TSOA/TDOA [C]// The Sixth Anniversary Academic

Meeting of China Communication Committee. Beijing: National Defense Industry Press,2009.

- [4] 邓平,朱中梁. 一种天线阵列定位法及其仿真研究[J]. 电子与信息学报,2005,27(6):841-844. Deng Ping, Zhu Zhongliang. An antenna array location method and its simulation study [J]. Journal of Electronics & Information Technology,2005,27(6):841-844.
- [5] Aidala V, Hammel S E. Utilization of modified polar coordinates for bearings-only tracking [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1983, 28 (3): 283-294.
- [6] Banani S A, MasnadiShirazi M A. A new version of unscented Kalman filter [C]// Proceedings of the World Academy of Science, Engineering and Technology. Barcelona, Spain; [s. n.], 2007:192-197.
- [7] Arulampalam S, Maskell S, Gordon N, et al. A tutorial on particle filters for online non-linear/ non-Gaussian Bayesian tracking [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(2):174-188.
- [8] 胡浩,李婧,陈乐然. WCDMA 系统中基于UE 测量报告的无线定位及参数提取方法[J]. 信息工程大学学报,2008,9(2):200-202. Hu Hao, Li Jing, Chen Leran. Radio positioning and parameters getting method based on measurement report of UE in WCDMA system [J]. Journal of Information Engineering University, 2008, 9 (2): 200-202.
- [9] 3GPP TS 25. 211 v6. 0. 0 2003. Physical channels and mapping of transport channels onto physical channels (FDD) [S]. 2003:9-15.
- [10] Brooker E. Tracking and Kalman filtering made easy [M]. New York: Wiley, 1998:11-45.
- [11] 王向磊,丁硕,苏牡丹. EKF/UKF 在基于地磁场的卫星自主定轨中的应用比较[J]. 测绘科学技术学报, 2011,28(1):50-53. Wang Xianglei, Ding Shuo, Su Mudan. Comparison on the application of EKF/ UKF in satellite autonomous orbit determination using geomagnetic field [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2011,28(1):50-53.
- [12] Julier S J, Hlmann U J K. Reduced sigma point filters for the propagation of means and covariance through nonlinear transformations [C]// Proceedings of the American Control Conference. Anchorage, A K; [s. n.],2002:8872892.

作者简介:刘翔(1988-),男,硕士研究生,研究方向:移动通信、定位与组合导航,E-mail:lx0505020@163.com;宋常建(1981-),男,博士研究生,研究方向:移动通信、信号处理;胡磊(1986-),男,硕士,研究方向:信号处理、定位与组合导航;钟子发(1957-),男,教授,研究方向:通信信息系统、信号处理。