

CDMA 网络中 TSOA/AOA 定位跟踪技术

程爱华, 葛宝忠, 季中恒

(解放军信息工程大学国家数字交换系统工程技术研究中心, 郑州 450002)

摘要: 为研制基于 CDMA 网络的新型定位系统, 提出一种新的到达时间之和(TSOA)/到达角(AOA)定位技术, 它利用信号 TSOA 与 AOA 实现移动台的定位。为研究高精度实时定位算法, 建立 TSOA/AOA 混合定位的数学模型, 推导基于扩展卡尔曼滤波器的定位算法, 通过仿真验证其可行性。

关键词: 到达时间之和; 到达角; 扩展卡尔曼滤波器; 定位算法

TSOA/AOA Locating and Tracking Technique in CDMA Network

CHENG Ai-hua, GE Bao-zhong, JI Zhong-heng

(China National Digital Switching System Engineering & Technological Research Center,
PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450002)

【Abstract】 In order to develop a new locating system in CDMA network, this paper proposes a novel TSOA/AOA locating technique, which uses the measurements of Time Sum Of Arrival(TSOA) and Angle Of Arrival(AOA) to locate a move station. It sets up the mathematical model for TSOA/AOA locating, and presents a locating and tracking algorithm based on Extended Kalman Filter(EKF). The feasibility of the algorithm is verified in the simulation.

【Key words】 Time Summation Of Arrival(TSOA); Angle Of Arrival(AOA); Extended Kalman Filter(EKF); locating algorithm

1 概述

自 1996 年美国联邦通信委员会(FCC)公布 E-911 定位需求以来, 受政府的强制性推动和巨大的市场利益驱动, 基于蜂窝网的各种无线定位技术得到前所未有的发展。目前, 以 TOA(Time Of Arrival), TDOA(Time Difference Of Arrival), AOA(Angle Of Arrival)为代表的基本定位技术, 以及由它们融合而成的混合定位技术, 如 TOA/AOA, TDOA/AOA 等, 已得到成功的商业化应用^[1]。为了研制基于 CDMA 网络的新型定位系统, 本文提出一种称为“TSOA/AOA”的新型定位技术, 这种新型定位技术利用到达时间之和(Time Sum Of Arrival, TSOA)与到达角(AOA)实现移动台的定位。

TSOA/AOA 混合定位的原理如图 1 所示。

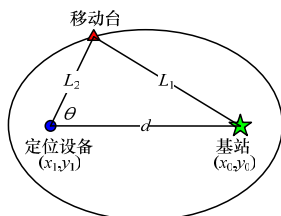


图 1 TSOA/AOA 混合定位原理图

整个定位系统由定位设备、基站、移动台(目标)三者构成。其中, 定位设备是一种可以移动的车载装置, 它是定位的发起者和实现者, 基站和移动台是被动参与者, 定位设备能够获取以下 3 类数据:

(1) 基站和定位设备的坐标 (x_0, y_0) 和 (x_1, y_1) 。在目前的技术条件下, 基站的地理坐标由存储在定位设备中的数据库提供, 定位设备自身的坐标由 GPS 提供, 两者的精度均能达到 10 m 左右。

(2) 距离之和 L_1+L_2 。在 CDMA 网络中, 所有的基站通过 GPS 的授时系统实现 PN 码的精确同步, 移动台通过监听相应基站的下行链路, 提取其中的 PN 码以获得自身的时钟基准, 由于 One-Way Delay^[2]的存在, 其时钟基准比基站的落后一个固定的时差, 其大小由 L_1 决定。定位设备具有类似基站的功能, 其时钟基准与 CDMA 网络是严格同步的, 定位设备监听移动台的上行链路, 提取其 PN 码的时钟基准并获得时差, 时差的大小由 L_1 和 L_2 共同决定。定位设备不可能直接测量得到 L_2 , 它按照测量 L_2 的方法得到的却是 L_1+L_2 。

(3) 到达角 θ 。此数据由定位设备的阵列天线获得。

由(1)和(2)可以确定移动台在以基站和定位设备为焦点的椭圆轨迹上, 由(3)可以确定移动台在信号到达角 θ 确定的直线上, 椭圆轨迹和直线相交就能为移动台定位, 因而, TSOA/AOA 定位又可称为“椭圆-角度混合定位”。最早使用 TSOA 一词的是文献[3], 但在蜂窝网定位领域里, 目前还没有出现 TSOA 定位体制或者 TSOA/AOA 定位体制^[1,4]。在无源定位领域里, T/R-R 定位系统中基于测量子集 (ρ_R, ϕ_T) 的定位技术, 其本质和本文提出的 TSOA/AOA 定位技术无异, 但由于其 GDOP 性能欠佳而一直没有受到研究者的重视^[5]。

以上是使用单台定位设备的情况, 在实际应用中, 为了提高定位精度, 可以使用多台定位设备同时为一个目标(移动台)定位, 如图 2 所示。值得一提的是, 由于定位设备具有可移动性, 在目标静止不动的情况下, 可以改变定位设备的位

基金项目: 河南省杰出人才创新基金资助项目(0421000100)

作者简介: 程爱华(1982—), 男, 硕士研究生, 主研方向: 无线与移动通信, 计算智能; 葛宝忠, 教授; 季中恒, 工程师

收稿日期: 2008-10-17 **E-mail:** aihuacheng@gamil.com

置进行多点测量，以实现等效的多台定位设备协同定位。

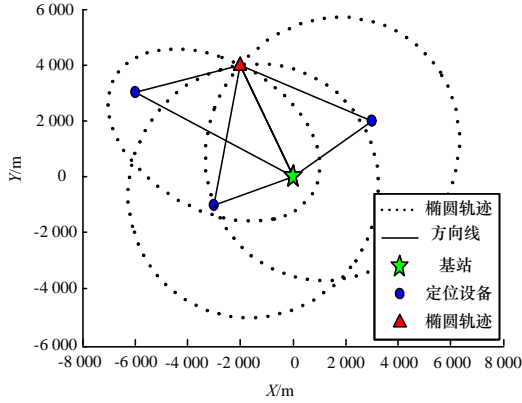


图2 3台定位设备的TSOA/AOA定位

本文建立了TSOA/AOA定位的数学模型，作为定位和跟踪算法的初步研究，推导了基于扩展卡尔曼滤波器的定位跟踪技术，并在Matlab平台下进行了定位精度的仿真分析，仿真得出的2条结论对于定位系统的硬件实现具有重要的指导意义。

2 数学模型

假设参与定位的定位设备个数为 $M(M \geq 1)$ 个，令 (x_0, y_0) 表示基站位置坐标， (x_i, y_i) 表示第 $i(i=1, 2, \dots, M)$ 个定位设备的位置坐标， (x, y) 表示目标的位置坐标。 M 个定位设备利用基站可以获得 M 个距离之和的观测数据：

$$L_i = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} + \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} + v_{Li} \quad (1)$$

以及 M 个角度观测数据：

$$\theta_i = \arctan\left(\frac{y-y_i}{x-x_i}\right) + v_{\theta i} \quad (2)$$

其中， v_{di} 和 $v_{\theta i}$ 为观测噪声。

可以使用矩阵形式表示由式(1)和式(2)确定的定位数学模型

$$Y = h(X) + V \quad (3)$$

其中，

$$X = [x, y]^T \quad (4)$$

$$Y = [L_1, L_2, \dots, L_M, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M]^T_{(2M)} \quad (5)$$

$$V = [v_1, v_2, \dots, v_M, v_{\theta 1}, v_{\theta 2}, \dots, v_{\theta M}]^T_{(2M)} \quad (6)$$

$$h(X) = \left[\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} + \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_2)^2}, \dots, \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} + \sqrt{(x-x_M)^2 + (y-y_M)^2}, \arctan\left(\frac{y-y_1}{x-x_1}\right), \dots, \arctan\left(\frac{y-y_M}{x-x_M}\right) \right] \quad (7)$$

以上所建数学模型是一个含随机参数的非线性超定方程组，在目标静止不动的情况下，任何能够求解该方程组的方法都可以设计成定位算法，但在目标运动的情况下，为了充分利用历史数据，可以把定位问题转化为下面的非线性滤波问题。

$$\begin{cases} X(t_{k+1}) = f(X(t_k), W(t_k)) \\ Y(t_{k+1}) = h(X(t_{k+1})) + V(t_{k+1}) \end{cases} \quad (8)$$

其中，函数 f 由目标的运动规律确定。

3 扩展卡尔曼滤波器

扩展卡尔曼滤波器是解决非线性滤波的经典方法，它具有

高精度实时性好的优点，已在各种定位系统中得到广泛应用^[6]。因此，对于TSOA/AOA混合定位而言，研究基于扩展卡尔曼滤波器的定位算法具有重要的现实意义。下面将推导TSOA/AOA混合定位的扩展卡尔曼滤波迭代公式。

首先由运动规律确定目标的状态方程：

$$S_{k+1} = \Phi S_k + W_k \quad (9)$$

其中， $S_k = [x_k, y_k, v_{xk}, v_{yk}]^T$ 是 t_k 时刻的状态向量， (x_k, y_k) 是目标的位置坐标， (v_{xk}, v_{yk}) 代表目标在 x 轴和 y 轴的速度；状态转移矩阵为 Φ ；噪声向量 W_k 的协方差矩阵为 Q ，它们的定义如下：

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_u^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_u^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中， σ_u^2 是驱动高斯噪声的方差； T 是采样间隔。

目标的观测方程定义如下：

$$Z_k = h(S_k) + V_k \quad (11)$$

其中， Z_k 是观测数据向量； $h(S_k)$ 是非线性变换； V_k 是观测噪声， V_k 的协方差矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_L^2 I_{M \times M} & 0 \\ 0 & \sigma_\theta^2 I_{M \times M} \end{bmatrix}_{2M \times 2M} \quad (12)$$

其中， σ_L^2 是距离之和观测值的误差； σ_θ^2 是角度观测值的误差。

由于 $h(S_k)$ 是非线性变换，采用泰勒级数将 $h(S_k)$ 展开， H_k 为 k 时刻 $h(S_k)$ 在级数展开点的雅可比矩阵：

$$H_k = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1(S_k)}{\partial x} & \frac{\partial h_1(S_k)}{\partial y} & 0 & 0 \\ \frac{\partial h_2(S_k)}{\partial x} & \frac{\partial h_2(S_k)}{\partial y} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial h_{2M}(S_k)}{\partial x} & \frac{\partial h_{2M}(S_k)}{\partial y} & 0 & 0 \end{bmatrix}_{S_k=S_{k+1k}} \quad (13)$$

式(13)展开可得

$$H_k = \begin{bmatrix} \frac{x-x_1}{d_1} + \frac{x-x_0}{d_0} & \frac{y-y_1}{d_1} + \frac{y-y_0}{d_0} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x-x_M}{d_M} + \frac{x-x_0}{d_0} & \frac{y-y_M}{d_M} + \frac{y-y_0}{d_0} & 0 & 0 \\ \frac{-(y-y_1)}{d_1^2} & \frac{x-x_1}{d_1^2} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{-(y-y_M)}{d_M^2} & \frac{x-x_M}{d_M^2} & 0 & 0 \end{bmatrix}_{\substack{x=x_{k+1k} \\ y=y_{k+1k}}} \quad (14)$$

其中，

$$d_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}, i=0, 1, \dots, M \quad (15)$$

由此可得线性化后的观测方程如下：

$$Z_k = H_k S_k + V_k \quad (16)$$

最后，列出扩展卡尔曼滤波算法迭代过程如下：

Step1 给定初值 P_0 和 S_0 ，重复 Step2~Step6；

Step2 计算最优预测值：

$$\hat{S}_{k+1k} = \Phi \hat{S}_k \quad (17)$$

Step3 计算估计误差的协方差的预测值:

$$P_{k+1/k} = \Phi P_k \Phi^T + Q \quad (18)$$

Step4 计算增益矩阵:

$$K_{k+1} = P_{k+1/k} H_k^T (H_k P_{k+1/k} H_k^T + R)^{-1} \quad (19)$$

Step5 根据测量值计算状态估值:

$$\hat{S}_{k+1} = \hat{S}_{k+1/k} + K_{k+1} (Z_{k+1} - H_k \hat{S}_{k+1/k}) \quad (20)$$

Step6 计算估计误差的协方差:

$$P_{k+1} = P_{k+1/k} - K_{k+1} H_k P_{k+1/k} \quad (21)$$

式(20)中的 Z_{k+1} 由式(11)计算得到。

4 仿真分析

仿真环境如图 3 所示, 基站位于坐标原点, 定位设备数目最多为 3 个, 它们的坐标分别为(-3 000, -1 000), (3 000, 2 000), (-6 000, 3 000), 距离单位均为 m(下同)。目标以 20 m/s(72 km/h)的速度沿折线 ABCD 匀速运动, A, B, C, D 4 点的坐标分别为(-8 000, 1 000), (-2 000, 1 000), (-2 000, 6 000), (2 000, 6 000), 样本间距(仿真时间步长)为 2 s, 驱动噪声 σ_u^2 为 1。

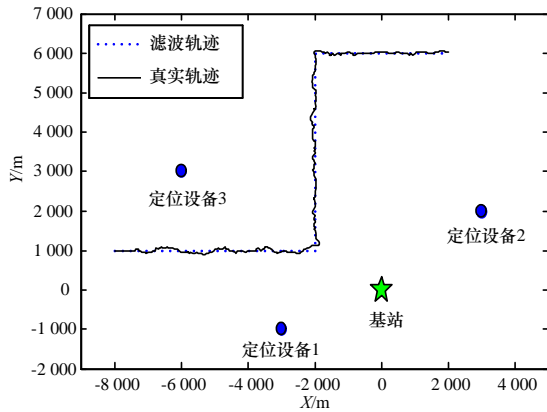


图 3 仿真环境及定位轨迹

图 3 中的定位轨迹是在 σ_L 为 150 m, σ_θ 为 15° 的情况下, 使用 3 台定位设备得到的。

从图 4 可以看出, 仅仅使用一台定位设备的时候, 均方根误差 RMSE 对角度标准差 σ_θ 非常敏感, 这是因为角度误差引起的方位误差会随着距离的增大而线性放大。

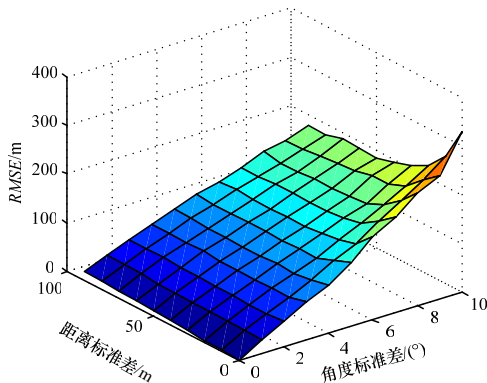


图 4 仅使用定位设备 1 的定位精度分析

图 5 是 2 台定位设备协同定位的情况, 其定位精度相对单台的情况有大幅提高。在多台定位设备的情况下, 只有当 σ_θ 非常小的时候(小于 2°), RMSE 才对 σ_θ 非常敏感, 当 σ_θ 大于 2° 的时候, RMSE 几乎只对 σ_L 敏感。

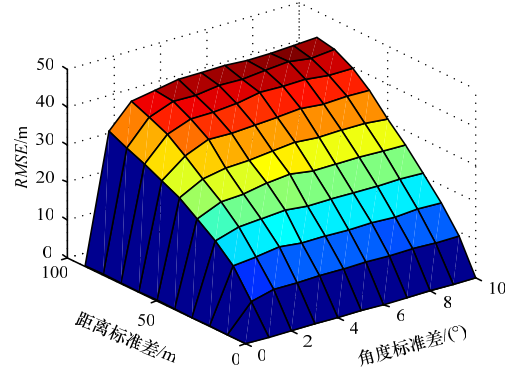


图 5 使用 2 台定位设备的定位精度分析

综合分析图 4 和图 5 的仿真结果, 可以得出以下 2 条结论: (1)使用单台定位设备时, 设计系统应尽可能优先保证角度测量的精度; (2)使用多台定位设备时, 如果角度测量标准差不能做到小于 2° , 出于节省成本的考虑, 可以取消角度测量模块。

5 结束语

本文提出基于蜂窝网的新型 TSOA/AOA 定位技术, 推导了基于扩展卡尔曼滤波的定位算法, 最后基于这一算法对定位精度进行仿真分析, 并得出对定位系统设计具有重要指导意义的 2 条结论。目前所做研究只是初步的, 还有很多问题需要解决, 比如非视距和多径等复杂信道环境下的定位技术、新型高精度快速定位算法的研究与实现等, 相信随着研究的深入, 这些问题将会得到解决。

参考文献

- [1] 袁正午. 移动通信系统终端射线跟踪定位理论与方法[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [2] 3GPP2. C.S0002-A-2001 Physical Layer Standard for CDMA2000 Spread Spectrum Systems[S]. 2001.
- [3] Lay K T, Chao Weikai. Mobile Positioning Based on TOA/TSOA/TDOA Measurements with NLOS Error Reduction[C]//Proc. of International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems. Hong Kong, China: [s. n.], 2005.
- [4] Zhao Yilin. Standardization of Mobile Phone Positioning for 3G Systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(2): 108-116.
- [5] 孙仲康, 周一宇, 何黎星. 单多基地有源无源定位技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- [6] Wann C D, Yeh Y J, Hsueh C S. Hybrid TDOA/AOA Indoor Positioning and Tracking Using Extended Kalman Filters[C]//Proc. of the 63rd Vehicular Technology Conference. Melbourne, Australia: [s. n.], 2006: 1058-1062.

编辑 任吉慧