

# 基于多天线系统的 TOA 特征值估计融合方法

朱晓暄

(科技部中国科学技术交流中心 北京 100045)

**摘要** TOA 的测量精度对移动台定位精度有极大的影响。然而,现有的信号特征值估计由于多径传播以及非视距环境等因素,其测量误差一直无法得到有效的降低。通过利用多天线系统提供的多个 TOA 估计信息,采用信号处理以及数据融合等多种方式,大幅提高了信号特征值估计精度,并进一步提高了移动台定位精度。

**关键词** 多天线,定位,TOA

**中图分类号** TN929.5 **文献标识码** A

## TOA Estimation and Integration Method Based on Multi-antenna System

ZHU Xiao-xuan

(Ministry of Science and Technology, China Science and Technology Exchange Center, Beijing 100045, China)

**Abstract** In urban environment with serious blocking of direct paths, as a result of non-line-of-sight (NLOS) propagation effect, the accuracy of TOA estimation as well as the accuracy of location estimation is significant influenced. We developed a new algorithm to mitigate the NLOS errors in location estimation based on multi-antenna system. Utilizing the TOAs obtained from different antennas in a multi-antenna array, the TOA with high accuracy is obtained by signal processing and integration. Simulation results show that this algorithm can mitigate NLOS errors effectively and improve the performance of TOA based location algorithm in NLOS environment significantly.

**Keywords** Multi-antenna, Location, TOA

### 1 前言

通常,基于时间测量的移动台定位方法通过延时估计<sup>[1-3]</sup>获得移动台到达基站的时间测量值 TOA,然后根据 TOA 测量值建立圆周方程组,并采用相应的算法进行求解<sup>[4-7]</sup>。TOA 的测量精度会对最终的定位精度产生很大影响。

由于多径传播、噪声、非视距以及带宽的有限性等问题,特别是在多径传播和 NLOS 传播严重的无线电报传播条件比较恶劣的区域,传统方法的 TOA 估计精度往往不理想。克服多径影响的两种代表性改进算法是 Root-MUSIC<sup>[8]</sup>算法和 MLS-Prony<sup>[9]</sup>算法。前者用噪声子空间来提高估计精度,而后者利用奇异值分解降低噪声的影响,但是在多径严重以及非视距的情况下,单纯采用这两种算法都不能够很好地解决估计精度问题。

在传统单天线系统中,通常直接利用以上传统算法估计 TOA,然后运用相应的定位算法进行目标定位。但对于多天线系统,由于系统架构产生变化,多个天线产生了不同的估计结果,因此相应的信号特征值估计以及合并方法也将发生变化。基于以上分析,本文针对多天线系统数据融合算法进行研究,提出了采用多天线阵列对 TOA 进行信息估计融合的方法。该方法利用多天线可从移动台的各个方位对特征值进行测量的优势,利用多天线系统信息的冗余性,分析信号的传播特征,将多个天线之间的估计信息进行有效融合,从而提高

了 TOA 估计值的鲁棒性以及估计精度。

### 2 多天线 TOA 估计基本模型

设多天线系统中发送端有  $N$  根发送天线 $[T_1, T_2, \dots, T_N]$ ,有  $M$  根接收天线 $[R_1, R_2, \dots, R_M]$ 。根据信道估计,可以得到收发天线两两之间的信道响应,再利用 Root-MUSIC<sup>[8]</sup>算法对每对收发天线间的信道响应进行 TOA 估计,便可得到  $M \times N$  个 TOA 估计值。对这  $M \times N$  个 TOA 估计值进行排列,可以对应得到多天线系统的 TOA 估计矩阵:

$$T = \begin{bmatrix} \tau_{11} & \tau_{12} & \dots & \tau_{1N} \\ \tau_{21} & \tau_{22} & \dots & \tau_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tau_{M1} & \tau_{M2} & \dots & \tau_{MN} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $\tau_{ij}$  表示第  $i$  根发送天线到第  $j$  根接收天线之间的 TOA。移动台端的多天线相距较近,与对移动台进行定位的整体范围相比可以忽略不计。因此在本文中,我们考虑发送端只有一根天线  $T_i$ ,则得到的 TOA 估计矩阵可被改写成为一个向量:  $T = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N]$ 。其中  $\tau_i$  表示到达第  $i$  根接收天线的 TOA 值。

根据以上的信号传播分析,我们可以假设该向量中部分 TOA 具有 NLOS 误差。以  $\tau_i$  为例,它在 LOS 信道环境中时,可以表示为:

$$\tau_i = \tau_i^0 + n_i, i = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

本文受国家 973 课题(2010CB955801)资助。

朱晓暄(1983),女,博士,助理研究员,主要研究方向为通信与信息系统、国际科技合作, E-mail: zhuxx@cstec.org.cn.

式中,  $\tau_i^0$  为发送天线与第  $i$  根接收天线之间电波的视距传播时间,  $n_i$  通常可以认为是由 TOA 检测系统造成的均值为零、标准差很小的高斯随即变量, 服从  $N(0, \sigma_i)$  分布。但是当出现 NLOS 传播时, 测量误差中既包括与 LOS 环境下相同的高斯随即测量误差, 又包括由 NLOS 引起的随即测量误差<sup>[10]</sup>。NLOS 误差可以认为近似服从具有正均值和较大方差的高斯分布。因此, 此时的 TOA 测量值可以表示为:

$$\tau_i = \tau_i^0 + n_i', i=1, 2, \dots, M \quad (3)$$

式中,  $\tau_i^0$  为 LOS 传播时间,  $n_i'$  服从  $N(\mu_i, \sigma_i')$  分布, 通常  $\sigma_i' \gg \sigma_i$ 。在 NLOS 环境中,  $\tau_i$  也可表示为:

$$\tau_i = \tau_i^0 + \mu_i + n_i, i=1, 2, \dots, M \quad (4)$$

式中,  $\mu_i$  为 NLOS 引起的平均超量时延,  $n_i$  则服从  $N(0, \sigma_i')$  分布。

### 3 TOA 信息估计融合方法

#### 3.1 TOA 信号 NLOS 误差 Wylie 鉴别改进方法

在传统的 NLOS 误差 Wylie 鉴别方法<sup>[10]</sup>中, 对于第  $i$  根接收天线来说, 当其接收到的 TOA 信号  $\sigma_i' = \sigma_i$  时, 其为视距传播; 而当  $\sigma_i' > \sigma_i$  时, 其为非视距传播。

根据上述信号分析, 假定实际计算的标准差为  $\hat{\sigma}_i$ 。在实际情形中, 当为 LOS 传播时,  $\hat{\sigma}_i$  通常与  $\sigma_i$  相近或者可比, 无法严格满足  $\hat{\sigma}_i = \sigma_i$ ; 而当为 NLOS 传播时, 则  $\sigma_i' \gg \sigma_i$ 。因此将 Wylie 鉴别方法中的判定条件修改如下:

$$\begin{aligned} \text{LOS: } \frac{\hat{\sigma}_i}{\sigma_i} &\leq \lambda \\ \text{NLOS: } \frac{\hat{\sigma}_i}{\sigma_i} &> \lambda \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $\lambda$  为判决门限, 由一定的先验信息并通过仿真确定, 可以更符合实际情形并有效地对 LOS/NLOS 信号进行区分。

#### 3.2 TOA 信号多天线鉴别融合算法

将 NLOS 环境中检测到的 TOA 测量值直接输入到 TOA 定位算法中, 得到的定位估计值必然出现较大误差。因此, 如何根据 TOA 测量值中提供的信息及相应的先验信息判断在多个 TOA 测量值中是否存在 NLOS 造成的误差, 如何准确判断  $\mu_i$  的大小并在 TOA 测量值中消除, 以及将多项信息有效融合, 是提高移动台 TOA 测量值精度的关键。本文的信息估计融合算法采取了 NLOS 误差鉴别、抑制以及合并的综合策略, 能够有效地提高 TOA 估计精度, 具体流程如下(见图 1)。

**步骤 1 多天线 TOA 估计。**采用 Root-MUSIC 算法对每根接收天线进行 TOA 估计, 得到 TOA 估计向量:  $T = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N]$ 。

**步骤 2 NLOS 误差鉴别判定。**采用 NLOS 误差 Wylie 鉴别改进方法对接收到的  $\tau_i$  进行判定, 若结果显示  $\tau_i$  中不包含 NLOS 误差, 则标记为  $\tau_i^0$ ; 若包含 NLOS 误差, 则标记为  $\tau_i'$ 。从而得到两个向量  $T^0 = [\tau_1^0, \tau_2^0, \dots, \tau_{N^0}^0]$  和  $T' = [\tau_1', \tau_2', \dots, \tau_{N'}']$ ,  $T^0$  和  $T'$  分别为不包含和包含 NLOS 误差的 TOA 集合, 分别含有  $N^0$  和  $N'$  个元素, 且  $N = N^0 + N'$ 。

**步骤 3 TOA 信号 NLOS 误差抑制。**包含 LOS 数据 TOA 特征值提取, 以及将该特征反馈至具有 NLOS 误差的 TOA 进行误差抑制两个部分, 分别如下:

(1) 根据先验信息  $\sigma_m^0$ , 对向量  $T^0 = [\tau_1^0, \tau_2^0, \dots, \tau_{N^0}^0]$  进行 Kalman 无偏滤波, 得到处理后的向量  $\hat{T}^0 = [\hat{\tau}_1^0, \hat{\tau}_2^0, \dots, \hat{\tau}_{N^0}^0]$ ;

(2) 需计算  $\hat{\sigma}_{NLOS}$  来提高噪声相关矩阵对角线上的元素值, 从而带入有偏 Kalman 滤波器进行 NLOS 误差抑制。通常该系数  $\alpha$  根据先验信息预先设定。为保证准确性, 本文利用 LOS 数据实时滤波结果, 结合 NLOS 数据估计  $\hat{\sigma}_{NLOS}$ 。令  $X_m(t_i)$  为在瞬时  $t_i$  根据 LOS 天线数据采用无偏 Kalman 滤波器所获结果, 则相应的  $\hat{\sigma}_{NLOS}$  计算如下:

$$\hat{\sigma}_{NLOS} = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (r_m(t_i) - X_m(t_i))^2} \quad (6)$$

(3) 将该  $\hat{\sigma}_{NLOS}$  带入 Kalman 平滑滤波器对向量  $T'$  中的元素进行有偏滤波, 并得到 NLOS 误差抑制后的结果  $\hat{T}' = [\hat{\tau}_1', \hat{\tau}_2', \dots, \hat{\tau}_{N'}']$ ;

(4) 采用  $\hat{\sigma}_{NLOS}$  动态修正 Wylie 鉴别改进方法中的判决门限  $\lambda$  以及 Kalman 滤波的系数  $\alpha$ 。

**步骤 4 TOA 信号 LOS、NLOS 融合处理。**利用步骤 1 和 2 所产生的 LOS 数据处理结果  $\hat{T}^0 = [\hat{\tau}_1^0, \hat{\tau}_2^0, \dots, \hat{\tau}_{N^0}^0]$  以及 NLOS 数据的处理结果  $\hat{T}' = [\hat{\tau}_1', \hat{\tau}_2', \dots, \hat{\tau}_{N'}']$ , 本文提出根据对应天线的信号准确度, 即相应噪声标准差来进行加权合并的方法。对于包含 NLOS 误差的天线, 记第  $i$  根天线上的  $\hat{\sigma}_{NLOS}$  为  $\hat{\sigma}_{NLOS,i}$ ; 对于 LOS 数据, 记第  $i$  根天线上的  $\hat{\sigma}_{LOS}$  为  $\hat{\sigma}_{LOS,i}$ 。则最终得到的 TOA 估计值为:

$$\tau = g_1 \cdot \hat{\tau}_1^0 + g_2 \cdot \hat{\tau}_2^0 + \dots + g_{N^0} \cdot \hat{\tau}_{N^0}^0 + g_{N^0+1} \hat{\tau}_1' + g_{N^0+2} \hat{\tau}_2' + \dots + g_{N^0+N'} \hat{\tau}_{N'}' \quad (7)$$

其中,

$$g_i = \begin{cases} \frac{\hat{\sigma}_{LOS,i}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{N^0} \hat{\sigma}_{LOS,j}^2 + \sum_{j=1}^{N'} \hat{\sigma}_{NLOS,j}^2}}, & i \in 1, 2, \dots, N^0 \\ \frac{\hat{\sigma}_{NLOS,i}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{N^0} \hat{\sigma}_{LOS,j}^2 + \sum_{j=1}^{N'} \hat{\sigma}_{NLOS,j}^2}}, & i \in N^0+1, N^0+2, \dots, N^0+N' \end{cases} \quad (8)$$

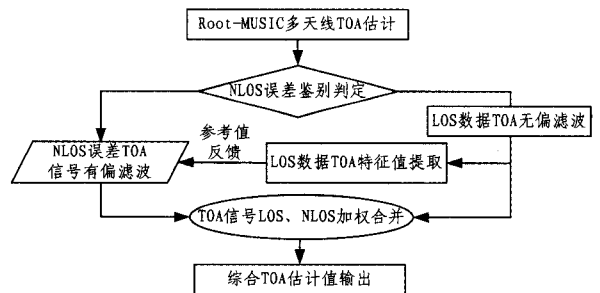


图 1 TOA 估计融合方法流程示意图

### 4 性能仿真及结果分析

如图 2 所示, 实验仿真中多天线阵天线间距为 10m, 天线阵共有 4 根天线。3 个天线阵列的位置分别为: A1: [0, 1.732], A2: [3, 0] 和 A3: [0, -1.732], 小区半径为 2km, 移动台在图中阴影部分所示的小区中的 1/12 三角形内随机分布。由于在城市环境中, NLOS 情况较为严重, 为了区别不同

天线之间的 NLOS/LOS 分布状况,令每根天线以 1/10 的概率出现 LOS 直射径。选用 DOS 散射体分布模型来随机产生 NLOS 误差<sup>[11]</sup>,散射盘半径为 200/300m,该模型假定所有天线与移动台之间的电波传播均在一个水平面,且 NLOS 路径仅经历一次反射。

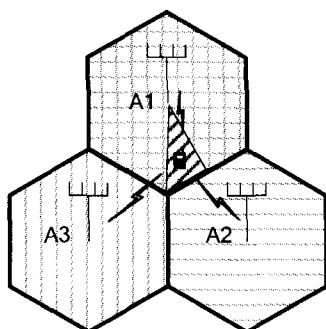


图 2 小区分布图

在仿真中所用的多天线信道为 3GPP 25.996 信道模型<sup>[12]</sup>中的第二种。与 TOA 鉴别融合算法相比较的为单天线情况下,本文采用 Root-MUSIC 估计、Kalman 滤波以及 LLOP 定位算法<sup>[13]</sup>进行位置估计。

图 3、图 4 分别为本文提出的 TOA 估计融合方法与单天线 TOA 估计方法的估计平均误差以及均方根误差。仿真结果表明,本文提出的 TOA 估计融合方法,无论散射体大小,均可以有效提高 TOA 估计的精度。

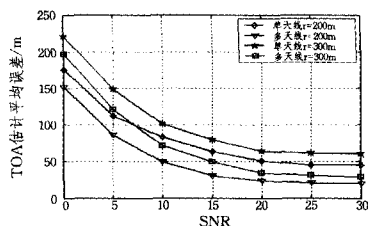


图 3 TOA 估计平均误差比较

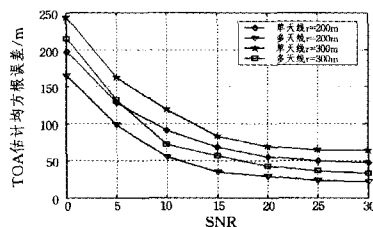


图 4 TOA 估计均方根误差比较

图 5、图 6 为分别采用多天线以及单天线 TOA 估计结果的定位平均误差以及均方根误差。仿真结果表明,采用本文所提算法得出的 TOA 估计结果对移动台进行定位,定位精度与 TOA 估计结果直接相关,可以大幅提高移动台定位的精度。

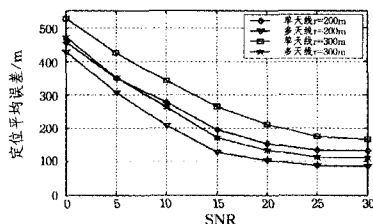


图 5 定位平均误差比较

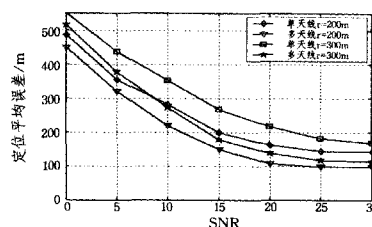


图 6 定位均方根误差比较

**结束语** 本文根据多天线系统的信道传输特性,对多天线系统的 TOA 估计进行了数学建模。在此基础上,对 NLOS 误差 Wylie 鉴别方法进行改进,并提出了一种对多天线 TOA 特征值进行鉴别、处理和融合的方法。仿真结果表明,本文所提出的 TOA 特征值估计融合方法可以有效提高 TOA 估计的精度,从而大幅提高移动台定位的精度。

## 参考文献

- [1] Carter G C. Coherence and Time Delay Estimation[J]. Ptoe. IEEE, 1987, 75: 236-255
- [2] Carter G C. Time Delay Estimation for Passive Sonar Signal Processing[J]. IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1981, 29(3): 463-470
- [3] Chan Y, Hattin R, Plant J. The Least Squares Estimation of Time Delay and Its Use in Signal Detection[J]. IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1978, 26(3): 217-222
- [4] Yost G, Panchapakesan S. Improvement in Estimation of Time of Arrival (TOA) from Timing Advance (TA)[C]//Proceeding of IEEE VTC. 1999: 111-116
- [5] Chan Y, Ho K. A simple and efficient estimator for hyperbolic locatio[J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 1994, 42(8): 1905-1915
- [6] Caffery J. A new approach to the geometry of TOA location [C]// Proceeding of IEEE VTC. 2000: 1943-1949
- [7] He Yan, Hu Han-ying, Zhou Shan. A TOA based believable factor mobile location algorithm[C]//Proceeding of IEEE WCNC. 2004: 260-263
- [8] Dumont L, Fattouch M, Morrison G. Supper-Resolution of Multipath Channels in a Spread Spectrum Location System[J]. Electronics Letters, 1994, 30: 1583-1584
- [9] Winter J, Wengerter C. High Resolution Estimation of the Time of Arrival for GSM Location[C]// Proceeding of IEEE VTC. 2000: 1343-1347
- [10] Wylie M P, Holtzman J. The Non-Line of Sight Problem in Mobile Location Estimation[C]// 5th IEEE International Conference on Universal Personal Communications. 1996: 827-831
- [11] Rooyen P, Lotter M, Wyk D. Space-Time Processing for CDMA Mobile Communications[M]. Kluwer Academic Publishers, 2000
- [12] 3G TR 25.996; Spatial channel model for Multiple input Multiple output (MIMO) Simulations (Release 6), V6. 1. 0, 2003. 09
- [13] Caffery J. A new approach to the geometry of TOA location[C]// Proceeding of IEEE VTC. 2000(4): 1943-1949