

减轻 TOA 和 AOA 定位系统非视距影响的方法¹

田孝华 廖桂生

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

摘要: 结合圆位置线误差、直线位置线误差与参数误差的关系,该文提出了一种利用所有基站测量的波达时间与最近一个基站测量的所有多径的到达角进行混合定位的方法。在该方法中,对波达时间用测量的波达时间总是大于等于视距传播时间进行约束,对到达角用 GBSBCM 确定的最大角度扩展进行约束,以有效减小非视距传播的影响,提高定位精度。仿真结果证明了该方法的有效性。

关键词: 定位,波达时间,到达角,非视距传播,可行区域

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2003)12-1664-05

A New Method for Mitigating the Effect of NLOS Propagation in the TOA and AOA Hybrid Location System

Tian Xiao-hua Liao Gui-sheng

(Key Lab. for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract Based on the relationship between the errors of the Circular Lines of Position (LOPs) and the straight LOPs and that of the measured parameters, a hybrid locating system in which the Time Of Arrival (TOA) and the Angle Of Arrival (AOA) measured by the closest Base Station (BS) are combined is presented to mitigate the effect of Non-Line-Of-Sight (NLOS) propagation in this paper. In order to reduce the feasible region of the Mobile Station (MS) and to improve the accuracy of the location estimation, the restrictions that TOA estimates are always greater than the true TOA values and the angle spreads are always smaller than the maximum angle spread determined by the Geometrically Based Single Bounce Circular Model (GBSBCM) are used. Its effectiveness is verified by the simulation.

Key words Position Location (PL), Time Of Arrival (TOA), Angle Of Arrival (AOA), Non-Line-Of-Sight(NLOS) propagation, The feasible region

1 引言

随着美联邦通信委员会 (FCC) 于 1996 年正式将位置信息作为 E-911 急救业务必备要求的提出,利用移动通信网对移动用户进行定位引起了广泛关注^[1,2]。对于网络的定位系统来说,为满足 E-911 定位精度要求,必须减小基站与用户间的非视距 (NLOS) 传播效应对定位精度的影响,针对波达时间 (TOA) 定位系统已经提出了一些改进算法^[3-6]。这些算法有的是从测量的波达时间序列中重构视距 (LOS) 传播时间,有的是对测量的波达时间进行判断,对存在非视距传播的波达时间加大权重,对存在视距传播的波达时间加大权重来定位,有的是利用测量的波达时间总是不小于视距传播时间,将原来的定位问题由无约束非线性最小二乘问题变为不等式约

¹ 2002-07-11 收到, 2002-11-18 改回

国家自然科学基金 (No.60172028)、装备预研基金 (51407030101D20120) 和国家教育部科学技术重点项目联合资助课题

束的非线性最小二乘问题来使定位精度得到提高, 有的是利用非视距传播引起附加时延的统计特性来减小非视距传播影响。

本文针对基站采用智能天线的宏蜂窝系统, 提出将基站测量的到达角与波达时间相结合对用户进行定位, 并利用测量的波达时间总是不小于视距传播时间以及基于几何结构的单次反射 (GBSB) 统计信道模型来减小非视距传播的影响。

2 基于几何结构的单次反射 (GBSB) 统计信道模型

为了对采用智能天线的蜂窝系统进行合理设计以及对系统的性能进行分析, 文献 [7] 给出了适用于宏蜂窝和微蜂窝的各种空时信道模型。在这些模型中, GBSB 统计信道模型是一种适用于对各种定位算法进行分析的信道模型, 其中基于几何结构的单次反射圆模型 (GBSBCM) 适用于宏蜂窝环境, 基于几何结构的单次反射椭圆模型 (GBSBEM) 适用于微蜂窝环境。本文主要考虑适用于宏蜂窝环境的 GBSBCM, 如图 1 所示, 散射物均匀分布在以移动台为中心, R_m 为半径的圆内, 移动台与基站间的距离 D 大于 R_m 。该模型利用了与实际相符的一个假设: 在宏蜂窝环境中, 基站天线较高, 基站附近反射物不产生反射信号。由模型可知, 最大时延扩展 τ_{\max} 和最大角度扩展 θ_{\max} 分别为

$$\tau_{\max} = 2R_m/c \quad (1)$$

$$\theta_{\max} = \arcsin\left(\frac{R_m}{D}\right) = \arcsin\left(\frac{R_m}{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}}\right) \quad (2)$$

式中 c 为光速, 当收发站的位置给定时, 最大时延扩展与最大角度扩展均只与散射区的大小有关, 散射区域半径 R_m 可由实际测定或由 COST-207 模型确定。表 1 为 COST-207 模型在市区宏蜂窝环境下接收宽带信号的功率时延特性 [8], 最大时延扩展为 $5\mu\text{s}$, 包含 6 条多径信号。

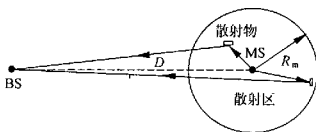


图 1 基于几何结构的单次反射圆模型

表 1 COST-207 六抽头市区宏蜂窝环境功率时延特性模型

多径	1	2	3	4	5	6
时延 (μs)	0.0	0.2	0.5	1.6	2.3	5.0
分数功率	0.189	0.379	0.239	0.095	0.061	0.037

3 TOA 与 AOA 混合定位算法

3.1 TOA 与 AOA 混合定位原理

对于测角定位系统来说, 由测角得到的直线位置线误差与收发间距离成正比, 在测角误差一定的情况下, 用户离基站的距离越近, 产生的定位误差越小, 用户离基站的距离越远, 产生的定位误差越大; 而对于测距定位系统来说, 测距误差对离基站较近的用户的影响大于对离基站较远用户的影响。可见单独采用任何一种定位方式都很难得到最佳效果, 本文采用将 TOA 定位与 AOA 定位相结合的混合定位方式。另外考虑到直线位置线误差与收发间距离成正比, 在

该混合定位系统中, 仅利用离用户最近的基站测量的角度信息. TOA 和 AOA 混合定位原理如下:

设有 N 个基站参与定位, 离用户最近的基站 (设为第一个基站) 测量的到达角 θ_1 , 第 i 个基站测量的波达时间为 τ_i , 用户发射信号的时间为 τ_0 , 移动台的位置坐标为 (x, y) , 基站的位置坐标为 (x_i, y_i) , 则有

$$\operatorname{tg}\theta_1 = \frac{y - y_1}{x - x_1} \quad (3)$$

$$c(\tau_i - \tau_0) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

上方程为关于 x, y, τ_0 的非线性方程, 将式 (3) 代入式 (4) 进行整理, 并令 $x_{i,1} = x_i - x_1$, $y_{i,1} = y_i - y_1$, $\tau_{i,1} = \tau_i - \tau_1$, 可得如下表达式:

$$(x_{i,1} + y_{i,1} \operatorname{tg}\theta_1)x - c^2 \tau_{i,1} \tau_0 = (x_{i,1} + y_{i,1} \operatorname{tg}\theta_1)x_1 + (1/2)(x_{i,1}^2 + y_{i,1}^2 - c^2 \tau_{i,1}^2 + c^2 \tau_1^2), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

当测量无误差时, 用式 (5) 的任意两个及式 (3) 即可得到 x, y 和 τ_0 . 但实际测量是存在误差的, 一般存在视距传播时误差较小, 此时可将式 (5) 的线性最小二乘解作为上面非线性方程的近似解来得到 x, τ_0 , 然后用式 (3) 得到 y . 将式 (5) 用矩阵可表示为

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (6)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} (x_{2,1} + y_{2,1} \operatorname{tg}\theta_1)x_1 + (x_{2,1}^2 + y_{2,1}^2 - c^2 \tau_{2,1}^2 + c^2 \tau_1^2)/2 \\ (x_{3,1} + y_{3,1} \operatorname{tg}\theta_1)x_1 + (x_{3,1}^2 + y_{3,1}^2 - c^2 \tau_{3,1}^2 + c^2 \tau_1^2)/2 \\ \vdots \\ (x_{N,1} + y_{N,1} \operatorname{tg}\theta_1)x_1 + (x_{N,1}^2 + y_{N,1}^2 - c^2 \tau_{N,1}^2 + c^2 \tau_1^2)/2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_{2,1} + y_{2,1} \operatorname{tg}\theta_1 & -c^2 \tau_{2,1} \\ x_{3,1} + y_{3,1} \operatorname{tg}\theta_1 & -c^2 \tau_{3,1} \\ \vdots & \vdots \\ x_{N,1} + y_{N,1} \operatorname{tg}\theta_1 & -c^2 \tau_{N,1} \end{bmatrix}$$

$\mathbf{x} = [x \ \tau_0]^T$ 采用最小二乘法估计移动台的位置为

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (7)$$

上面的定位算法在视距传播且测量误差较小时能达到满意效果, 在非视距传播条件下将出现较大误差, 必须对算法进行改进, 以减小非视距传播的影响.

3.2 减小 NLOS 影响的 TOA 与 AOA 混合定位算法

在 NLOS 传播环境下, 各个基站接收的定位用户的信号实际上是到达时间不同、到达角各异的多条多径信号的叠加. 为了减小非视距传播对混合定位的影响, 一方面仅利用各个基站测量的最先到达信号的时间进行定位, 并用测量的波达时间总是不小于视距传播时间来对最先到达信号的时间进行不等式约束^[5]. 另一方面利用主基站测量的所有多径信号的到达角来进行定位, 并由 GBSBCM 得到的最大角度扩展对每条多径的到达角进行约束. 因为与最先到达的多径信号的传播时间总是最接近视距传播时间不同, 最先到达的多径信号的到达角并不一定最接近直达波的方向. 利用同一基站测量的所有多径信号的到达角进行定位可使信息得到充分利用, 而且由 GBSBCM 得到的最大角度扩展对每条多径的到达角进行约束, 可有效减小定位用户的可行区域, 从而大大提高定位精度.

设有 N 个基站参与定位, 离用户最近的基站 (设为第一个基站) 测量定位用户的 3 条多径信号到达角为 $\theta_i, i = 1, 2, 3$, 第 i 个基站测量的最先到达信号的波达时间为 τ_i , 用户发射信号的时间为 τ_0 , 移动台的位置坐标为 (x, y) , 基站的位置坐标为 (x_i, y_i) . 则误差可表示为

$$f_i(x, y) = \theta_i - \arctg\left(\frac{y - y_i}{x - x_i}\right), \quad i = 1, 2, 3 \quad (8)$$

$$g_i(x, y, \tau_0) = c(\tau_i - \tau_0) - \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

根据 GBSBCM, 每条多径的角度扩展满足以下不等式:

$$|\theta_i - \arctg(\frac{y - y_1}{x - x_1})| \leq \arcsin\left(\frac{R_m}{\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}}\right), \quad i = 1, 2, 3 \quad (10)$$

根据测量的最先到达信号的波达时间总是最接近视距传播时间, 且不小于视距传播时间, 有以下不等式:

$$g_i(x, y, \tau_0) = c(\tau_i - \tau_0) - \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

在非视距传播条件下, 对移动台的定位问题由原来视距条件下的无约束近似线性最小二乘问题变为不等式约束的非线性最小二乘问题, 即

$$\left. \begin{aligned} F(x, y, \tau_0) = \min_{x, y, \tau_0} & \left(\sum_{i=1}^3 \left| \theta_i - \arctg\left(\frac{y - y_1}{x - x_1}\right) \right|^2 \right. \\ & \left. + \sum_{j=1}^N \left| c(\tau_j - \tau_0) - \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2} \right|^2 \right) \\ \text{s.t.} & \left. \begin{aligned} & \left| \theta_i - \arctg\left(\frac{y - y_1}{x - x_1}\right) \right| \leq \arcsin\left(\frac{R_m}{\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}}\right) \\ & c(\tau_j - \tau_0) - \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2} \geq 0, \\ & j = 1, 2, \dots, N, \quad i = 1, 2, 3 \end{aligned} \right\} \quad (12) \end{aligned}$$

解上述不等式约束非线性最小二乘问题的常用方法是内点罚函数法^[9]。它利用约束条件和目标函数来构造惩罚函数, 将不等式约束优化问题转化为无约束优化问题, 然后采用迭代方法来得到最优解。常见的两个内点罚函数为倒数罚函数和对数罚函数。本文采用倒数罚函数求解, 在可行域内的起始点由(7)式确定。

4 计算机仿真分析

为了验证上述算法的有效性, 用计算机对几种典型情况进行了仿真分析。仿真中宏小区半径均为 5km, 基站的位置坐标分别为 (0,0)m, (0,8660)m, (7500,4330)m, (7500,-4330)m, (0,-8660)m。移动台位置随机产生, 每个基站均收到定位用户的 3 条多径, 多径信号由均匀分布在用户附近的反射物形成, 各个基站对应反射物相互独立产生。每次定位由最近基站测量的三条多径信号的到达角和各个基站测量的最先到达多径信号的波达时间完成。仿真中只考虑非视距传播导致的角度误差, 不考虑参数估计算法带来的估计误差。

仿真本文提出方法的平均定位误差与散射区域大小和定位基站数的关系, 并与传统方法进行比较。每一点的值由 400 次 Monte-Carlo 实验得到, 仿真结果如图 2 所示。由图可见: 第一, 无论是本文方法还是传统方法, 参与定位的基站数一定时, 定位误差与散射区大小成正比; 在散射区大小一定时, 参与定位的基站越多, 定位误差越小。第二, 本文方法与传统的线性最小二乘法相比, 在相同情况下, 本文方法的精度明显优于传统方法, 说明本文方法在减小非视距影响方面是非常有效的。

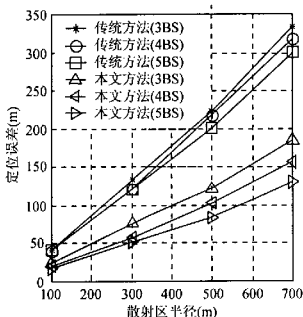


图 2 两种方法性能比较

5 结 论

考虑到位置线误差、直线位置线误差与参数误差的关系, 本文提出了一种利用所有基站测量的波达时间与最近一个基站测量的所有多径的到达角进行混合定位的方法. 在该方法中, 对波达时间用测量的波达时间总是不小于视距传播时间进行约束, 对到达角用 GBSBCM 确定的最大角度扩展进行约束, 以有效减小移动台的可行区域, 提高定位精度. 仿真结果证明了该方法的有效性.

参 考 文 献

- [1] Rappaport T S, Reed J H, Woerner B D. Position location using wireless communications on highways of the future. *IEEE Comm. Mag.*, 1996, 34(10): 33-41.
- [2] Caffery J, Stuber L. Overview of radiolocation in CDMA cellular systems. *IEEE Comm. Mag.*, 1998, 36(4): 38-45.
- [3] Wylie M, Holtzmann J. The NLOS-line of sight problem in mobile location estimation. In: *IEEE International Conference on Universal Personal Communications*, Cambridge, 1996: 827-831.
- [4] Caffery J. *Wireless Location in CDMA Cellular Radio Systems*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000, Chap. 7.
- [5] Caffery J, Stuber L. Subscriber location in CDMA cellular networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 1998, 47(2): 406-415.
- [6] 田孝华, 廖桂生. 一种有效减小非视距传播影响的 TOA 定位方法. *电子学报*, 2003, 31(9): 63-66.
- [7] Ertel R, Cardieri P, Sowerby K W, Rappaport T S, Reed J H. Overview of spatial channel models for antenna array communication systems. *IEEE Personal Communications*, 1998, 5(1): 10-22.
- [8] Parsons J. *The Mobile Radio Propagation Channel*. New Jersey: Halsted Press, 1992, Chaps 5, 6.
- [9] 袁亚湘, 孙文瑜. 最优化理论与方法. 北京: 科学出版社, 2001, 第 4-7 章.

田孝华: 男, 1965 年生, 副教授, 获军队科技进步三等奖两次, 感兴趣的研究方向为移动通信中的定位与参数估计、阵列信号处理及非平稳信号处理等.

廖桂生: 男, 1963 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事统计信号处理、子波变换和神经网络及其在雷达、通信中的应用研究.