

适用于 NLOS 传播环境的几何定位方法

常戎 吕善伟

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100083)

摘要: 基于非视距传播(NLOS)的影响,移动通信环境中波达时间(TOA)的测量误差具有正偏置的特性,本文提出了一种简单的几何定位方法。该方法根据基站分布和 TOA 测量数据确定出若干个定位点,对这些点的坐标取平均值即得到移动台的位置估计。仿真结果表明,该方法能够有效提高 NLOS 传播环境下的定位精度,对 LOS 传播条件下的定位精度影响小。

关键词: 几何定位; 非视距传播; 波达时间

中图分类号: TN929.53

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)09-2212-05

A Geometrical Position Location Method Suitable for NLOS Environment

Chang Rong Lü Shan-wei

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the positive bias property of the Time-Of-Arrival(TOA)measurement error caused by Non-Line-Of-Sight(NLOS)propagation in the mobile communication environment, a simple geometrical position location method is presented. Some sites are determined according to the coordinates of the base-stations and TOAs, and the location estimation of mobile station is achieved by averaging the coordinates of these sites. The simulation results show that this method can effectively improve the location accuracy in NLOS environment with little degeneration to mobile location in LOS environment.

Key words: Geometrical position location; Non-Line-Of-Sight(NLOS) propagation; Time-Of-Arrival(TOA)

1 引言

1996 年美国联邦通信委员会(FCC)公布了E-911 定位要求,从 2001 年 10 月起所有的移动网络运营商为用户提供精度在 125m 内的定位服务,并将定位服务作为今后第三代(3G)无线通信网络必备的基本业务^[1]。

在蜂窝移动通信系统中,常用测量 TOA 的方法对移动台进行定位。TOA 的测量精度决定了这种方法的定位精度,1ns 的时间测量误差对应 0.3m 的距离误差。TOA 的测量误差主要由两部分组成,即系统测量误差和多径衰落,多址干扰, NLOS 传播以及远近效应等产生的时延误差。系统测量误差服从高斯分布,随着技术的不断发展会逐渐减小,其它一些误差因素受电波传播环境的影响会始终存在,其中 NLOS 传播是主要因素^[2]。针对减小 NLOS 传播对 TOA 方法定位精度的影响,国内外进行了大量的研究,产生了散射模型方法^[3], BF 参数方法^[4], 高阶统计量方法^[5]和 MUSIC 方法^[6]等。这些方法有的运算量大,有的需要增加系统存储容量,都会增加系统成本和复杂性。

本文针对移动通信环境中 TOA 的测量误差具有正偏置

的特性,提出了一种简单的几何定位方法。该方法首先根据基站分布和 TOA 测量数据确定出若干个定位点,然后对这些点的坐标取平均值即得到移动台的位置估计。该定位方法简单,运算量小,能够有效提高 NLOS 传播环境下的定位精度,对 LOS 传播条件下的定位精度影响小。

2 TOA 时间测量模型

蜂窝移动通信系统中,受测量设备及信号传播环境的影响,基站的 TOA 测量值存在误差。假设移动台到第 i 个基站的信号波达时间是

$$t_{i,m} = t_{i,LOS} + t_{i,e} + t_{i,N}, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

其中 $t_{i,LOS}$ 是移动台与第 i 个基站间信号的视距传播时间, $t_{i,e}$ 是服从 $N(0, \sigma_i^2)$ 分布的系统测量误差, $t_{i,N}$ 是由于 NLOS 传播等引入的误差。

在式(1)中隐含着一个条件,即所有的基站与移动台的时钟完全同步,这在现实中很难做到,系统测量误差 $t_{i,e}$ 包含有时钟同步误差成份。假设时钟同步误差是 0 均值的高斯分布,则时钟同步误差可以归于系统测量误差 $t_{i,e}$ 的范畴统一进行处理。

NLOS 传播引入的 $t_{i,N}$ 是误差的主要成分,它可以用服

从指数分布、均匀分布及Delta分布的随机变量来表示。本文中仅考虑 $t_{i,N}$ 服从指数分布^[7]的情形,即

$$p(t_{i,N} / \tau_{i,rms}) = \begin{cases} \frac{1}{\tau_{i,rms}} \exp\left(-\frac{t_{i,N}}{\tau_{i,rms}}\right), & t_{i,N} \geq 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, $\tau_{i,rms} = t_1 d_i^\varepsilon \xi$ 为传播时延扩展的均方根值, t_1 为 $\tau_{i,rms}$ 在 $d_i = 1\text{km}$ 时的中值, d_i 为移动台到第 i 个基站的距离(km), 指数 $\varepsilon = 0.5 \sim 1$, ξ 是服从对数正态分布的随机变量。

由概率论可知, $t_{i,N}$ 的概率密度函数是

$$p(t_{i,N}) = \int_{-\infty}^{\infty} p(t_{i,N}, \tau_{i,rms}) d\tau_{i,rms} = \begin{cases} \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z \tau_{i,rms}^2} \cdot \exp\left(-\frac{t_{i,N}}{\tau_{i,rms}} - \frac{(\ln \tau_{i,rms} - m_z)^2}{2\sigma_z^2}\right) d\tau_{i,rms}, & t_{i,N} \geq 0 \\ 0, & t_{i,N} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, $m_z = \ln t_1 + \varepsilon \ln d_i$, $\sigma_z^2 = \sigma_\xi^2$ 。 $t_{i,N}$ 的各阶统计量是

$$E[t_{i,N}^n] = n! t_1^n d_i^{n\varepsilon} e^{n^2 \sigma_\xi^2 / 2}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (4)$$

从式(4)可以看出, NLOS 传播时延的各阶统计量仅仅是通信距离的指数函数, 均为正值。

3 基于 TOA 测量的 LS 定位方法

为了便于与文献[8]和文献[9]方法比较, 本文只考虑二维平面上的定位问题。如图1所示, 假设平面上分布着 M 个基站, 基站 i 测量的移动台 M 于 (x, y) 点发射信号波达时间 TOA 值为 $t_{i,m}$, 且各个基站测量的结果相互独立。

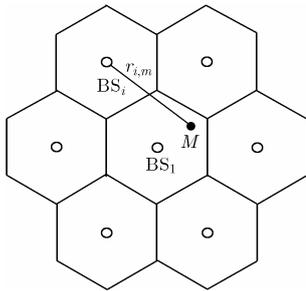


图1 二维平面的蜂窝结构和移动台分布

设基站 i 的坐标为 (x_i, y_i) , 有

$$\begin{cases} r_{i,m}^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \\ r_{i,m} = ct_{i,m}, \quad i = 1, 2, \dots, M \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, $r_{i,m}$ 是通过测量 $t_{i,m}$ 获得的基站 i 与移动台的距离测量值, $r_{i,LOS}$ 是二者的真实距离, 由于系统测量误差的存在, 有 $r_{i,m} = r_{i,LOS} + r_{i,e}$, 定义误差函数:

$$\psi(i) = r_{i,m}^2 - r_{i,LOS}^2 = 2c^2 t_{i,LOS} t_{i,e} + c^2 t_{i,e}^2 \quad (6)$$

当系统测量误差 $t_{i,e}$ 相对较小时, 可忽略误差函数中二次项 $c^2 t_{i,e}^2$, 对 M 个基站, 式(6)可以写成

$$\boldsymbol{\psi} = \mathbf{h} - \mathbf{G}_a \mathbf{Z}_a = 2c^2 \mathbf{T}_{LOS} \mathbf{t}_e \quad (7)$$

其中

$$\mathbf{h} = \begin{pmatrix} r_{1,m}^2 - k_1^2 \\ r_{2,m}^2 - k_2^2 \\ \vdots \\ r_{M,m}^2 - k_M^2 \end{pmatrix}_{M \times 1}, \quad \mathbf{G}_a = \begin{pmatrix} -2x_1 & -2y_1 & 1 \\ -2x_2 & -2y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -2x_M & -2y_M & 1 \end{pmatrix}_{M \times 3}, \quad \mathbf{Z}_a = \begin{pmatrix} x \\ y \\ R \end{pmatrix}$$

$$k_i^2 = x_i^2 + y_i^2 R = x^2 + y^2,$$

$$\mathbf{T}_{LOS} = \text{diag}(t_{1,LOS}, t_{2,LOS}, \dots, t_{M,LOS}),$$

$$\mathbf{t}_e = (t_{1,e}, t_{2,e}, \dots, t_{M,e})^T \quad (8)$$

由于 $t_{i,e}$ 互不相关, 其协方差矩阵 \mathbf{R}_e 是对角阵, 则误差函数的协方差矩阵可写成

$$\mathbf{D}(\boldsymbol{\psi}) = E[\boldsymbol{\psi}\boldsymbol{\psi}^T] = 4c^4 \mathbf{T}_{LOS}^2 \mathbf{R}_e \quad (9)$$

按照文献[8]的方法, 可以得到移动台坐标的最小二乘估计

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_a &= \arg \min \{ (\mathbf{h} - \mathbf{G}_a \mathbf{Z}_a)^T \mathbf{D}^{-1}(\boldsymbol{\psi}) (\mathbf{h} - \mathbf{G}_a \mathbf{Z}_a) \} \\ &= (\mathbf{G}_a^T \mathbf{D}^{-1}(\boldsymbol{\psi}) \mathbf{G}_a)^{-1} \mathbf{G}_a^T \mathbf{D}^{-1}(\boldsymbol{\psi}) \mathbf{h} \end{aligned} \quad (10)$$

对式(10)中的 \mathbf{Z}_a 进行去相关处理, 可以得到移动台坐标更好的估计结果, 受篇幅所限不再赘述, 详见文献[8]。

需要说明的是, 上述文献[8]的 LS 算法没有考虑 NLOS 传播时延的影响, 它在 LOS 传播条件下的估计误差可达到 Cramer Rao 下限(CRLB), 是一种最佳估计器。因此选取文献[8]的算法作为不考虑 NLOS 影响的代表与本文的几何定位算法进行比较。

文献[9]将 TOA 测量值作为对真实距离的一种近似, 首先用式(4)计算 NLOS 传播时延的均值, 并将该均值作为对 NLOS 传播时延的估计, 然后从测量值中减去该 NLOS 时延, 作为对基站与移动台间 LOS 传播的近似估计, 最后采用文献[8]的 LS 方法估计移动台位置。该方法能消除 NLOS 传播环境中定位误差中的有偏部分的影响, 对移动台位置的估计是无偏估计, 因此本文选取它作 NLOS 传播环境下移动台定位性能对比。

4 基于 TOA 的几何定位方法

在 NLOS 传播环境下, 由于系统测量误差和 NLOS 传播误差的存在,

$$r_{i,m} = r_{i,LOS} + r_{i,e} + r_{i,N}, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (11)$$

其中 $r_{i,N}$ 是 NLOS 传播 $t_{i,N}$ 产生的距离误差。为表述方便, 以下将圆心在 (x_i, y_i) , 半径为 $r_{i,m}$ 的圆称为定位圆 i 。

要实现移动台的定位, 至少需要 3 个基站进行 TOA 测量, 并且通常只能得到式(11)的最小二乘解。在只有系统测

量误差存在的LOS传播环境下,式(11)的最小二乘解能够达到CR下界^[8]。在NLOS传播环境下,由于正偏置误差的存在,最小二乘解的误差较大,详见第6节仿真结果。

由第2节可知, $r_{i,e}$ 是零均值的高斯随机变量, $r_{i,N}$ 是均值为 $ct_1 d_i^{\epsilon} \exp(\sigma_{\xi}^2/2) > 0$ 的指数分布随机变量,在实际的移动通信NLOS传播环境中通常有 $t_{i,n} \gg |t_{i,e}|$,因此 $r_{i,m} - r_{i,LOS} = r_{i,e} + r_{i,N}$ 一般具有正偏置,即移动台位于每个

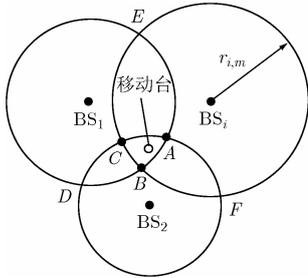


图2 基站和移动台分布及定位圆

定位圆 i 的内部。例如图2中,封闭曲线ABCA包围的区域是3个定位圆重叠的部分,包含在每个定位圆内部,因此移动台一定位于其中,A,B,C3点可以作为移动台的位置估计初始值。

假设A,B,C3点的坐标分别是 (x_A, y_A) , (x_B, y_B) 和 (x_C, y_C) ,定义目标函数

$$f(x, y) = \sum_{i=A,B,C} [(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2] \quad (12)$$

$f(x, y)$ 非负,对 $f(x, y)$ 求偏导数,并令其为零,即可求得 $f(x, y)$ 的极小值点

$$\left. \begin{aligned} x &= (x_A + x_B + x_C)/3 \\ y &= (y_A + y_B + y_C)/3 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

它是平面上与A,B,C3点距离平方之和最小的点,可以作为移动台位置的一个估计值。若存在 M 个定位圆,类似于A,B,C的定位圆交点共有 $K = C_M^2$ 个,此时移动台的位置估计是 $\left(\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K x_i, \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K y_i \right)$ 。

需要说明的是,系统测量误差服从零均值的高斯正态分布,因而在LOS传播环境下移动台可能在定位圆的内部,也可能在其外部,几何定位方法的误差会有稍许增加,但是在系统测量误差不大(标准差 $0.1\mu\text{s}$)的情况下,定位精度降低不多,仿真例子中最大约 12.5m (宏蜂窝)。

5 TOA 测量数据的预处理

第4节的几何定位方法,没有考虑定位圆不相交的特殊情况:

(1) 两个定位圆相互分离,没有交点,如图3中的定位圆1和圆2。虽然NLOS传播环境中 $r_{i,e} + r_{i,N}$ 通常具有正偏置,但也不能排除某个基站有LOS传播路径而 $t_{i,N}$ 比较小,

同时 $t_{i,e} < 0$,从而 $r_{i,e} + r_{i,N} < 0$ 的情况出现。

(2) 一个定位圆包含在另一个定位圆内,二者没有交点,如图3中的定位圆2和圆3。

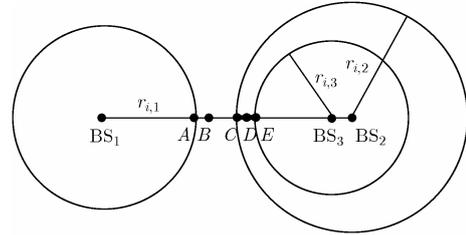


图3 定位圆不相交的情形

当两个定位圆不相交时,为使用第4节所述几何定位方法,首先需要对TOA数据进行处理。根据第2节的结果,NLOS传播时延的均值是通信距离的指数函数,可以认为TOA测量数值越大其误差越大。由此,当定位圆不相交时,将其交点定义为:与两个定位圆距离成正比且距离之和最小的点,对于上述第一种情况就是AC上的点B,对于第二种情况就是CE上的点D,B和D分别满足

$$\frac{AB}{r_{i,1}} = \frac{BC}{r_{i,2}}, \quad \frac{CD}{r_{i,2}} = \frac{DE}{r_{i,3}} \quad (14)$$

TOA测量数据 $t_{i,m}$ 越小,所定义的交点离定位圆 i 越近,因此而产生的误差相对也会越小。

定位圆交点的求解过程,当定位圆相交时只需要求解二次方程,定位圆不相交时只需要进行逻辑判断和代数运算,算法简单、运算量小。

6 计算机仿真分析

6.1 仿真参数设置

采用规则的蜂窝结构,基站分布如图1所示。相邻基站间距 r 取典型值 0.3km (微蜂窝)、 3.0km (宏蜂窝),基站1在原点 $(0, 0)$,其它6个基站均匀分布在半径 r 的圆周上;移动台在 (x, y) ,与原点的距离 $0.03 \sim 0.24\text{km}$ (微蜂窝)、 $0.3 \sim 2.4\text{km}$ (宏蜂窝),实际上真正有意义的在 $0 \sim 0.15\text{km}$ (微蜂窝)和 $0 \sim 1.5\text{km}$ (宏蜂窝)这两个区域,超过这个区域将进入另一个基站为中心的覆盖范围,这时可以将该基站作为中心重新组织TOA测量和定位;系统测量标准差取 $0.1\mu\text{s}$ 和 $1.0\mu\text{s}$,后者是为了模拟系统时钟同步误差比较大时的定位误差情况;按一般市区环境选取NLOS传播时延参数,即 $t_1 = 0.4\mu\text{s}$, $\epsilon = 0.5$, $\sigma_{\xi} = 4\text{dB}$;进行10000次蒙特卡罗仿真,计算定位误差的均方根值和概率分布。

6.2 几何定位与LS定位结果的比较

图4和图5分别是文献[8],文献[9]和本文的几何定位这3种方法在LOS和NLOS传播环境,微蜂窝和宏蜂窝中,系统测量误差小和大等不同组合情况下定位误差均方根值和定位误差概率分布的仿真结果。

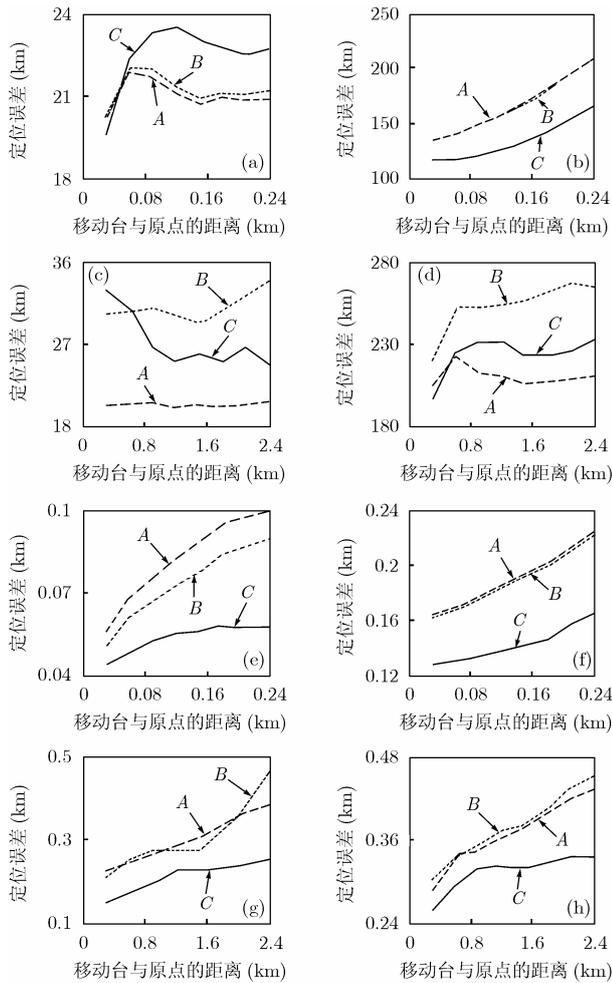


图4 3种方法的定位精度比较

图4和图5中的曲线A, B, C的含义是: 曲线A为文献[8]方法, 曲线B为文献[9]方法, 曲线C为几何定位方法。图(a)~图(h)的含义:

- 图(a): LOS环境, 微蜂窝, 系统测量误差标准差 $0.1\mu\text{s}$;
- 图(b): LOS环境, 微蜂窝, 系统测量误差标准差 $1.0\mu\text{s}$;
- 图(c): LOS环境, 宏蜂窝, 系统测量误差标准差 $0.1\mu\text{s}$;
- 图(d): LOS环境, 宏蜂窝, 系统测量误差标准差 $1.0\mu\text{s}$;
- 图(e): NLOS环境, 微蜂窝, 系统测量误差标准差 $0.1\mu\text{s}$;
- 图(f): NLOS环境, 微蜂窝, 系统测量误差标准差 $1.0\mu\text{s}$;
- 图(g): NLOS环境, 宏蜂窝, 系统测量误差标准差 $0.1\mu\text{s}$;
- 图(h): NLOS环境, 宏蜂窝, 系统测量误差标准差 $1.0\mu\text{s}$ 。

从仿真结果可以得到以下结论:

(1) 移动通信环境对移动台的定位精度有很大影响。3种方法的定位误差在LOS传播环境下都较小, 都满足E-911的定位精度要求, 而在NLOS传播环境下都明显增加。原因很简单, 是由于TOA测量值的误差在NLOS传播环境下变大了。

(2) 系统测量误差(含时钟同步误差)对几种定位方法性能的影响非常明显。不论是LOS或NLOS传播环境, 不论是微蜂窝或宏蜂窝, 3种方法的定位误差随着系统测量误差

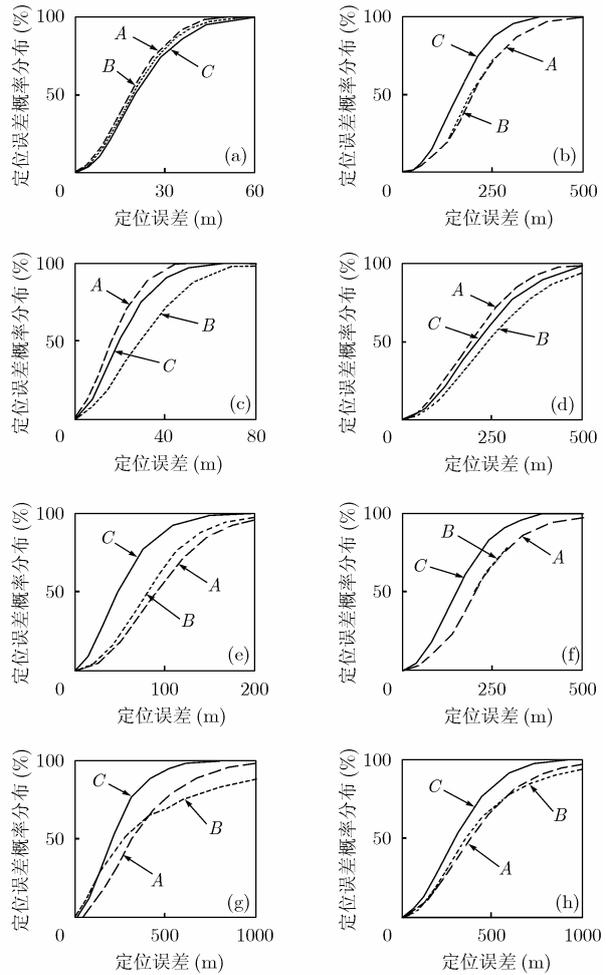


图5 3种方法的定位误差概率分布比较

的增加迅速增加。因此, 减小系统测量误差对于提高TOA方法的定位精度有重要作用。

(3) 基站分布对移动台定位精度有影响, 蜂窝半径越小, 对移动台的定位越准确。

(4) LOS传播环境下, 文献[8]的LS方法定位精度最高, 这已经有理论证明^[8], 但是这个结论需要一个前提, 即系统测量误差不能很大。正如图4(b)所示, 当系统测量误差引入的距离误差与蜂窝半径相当时, 本文的几何定位方法的性能最好, 图4(a)中横坐标0.03km和图4(d)中横坐标0.3km所对应的仿真结果也表明了这点。

(5) 几何定位方法在NLOS传播环境下的性能是3种方法中最好的, 详见表1。

表1 NLOS传播环境下3种方法的平均定位误差

	系统测量标准差 $0.1\mu\text{s}$		系统测量标准差 $1.0\mu\text{s}$	
	微蜂窝	宏蜂窝	微蜂窝	宏蜂窝
文献[8]方法	83.0m	301.1m	190.5m	371.1m
文献[9]方法	73.8m	305.3m	189.4m	377.7m
几何方法	53.7m	211.2m	143.0m	313.1m

(6) 文献[9]的方法不适用于LOS传播环境。因为在LOS

传播环境下, TOA 测量值不含 NLOS 传播时延, 因此用该方法去估计 LOS 传播时间会引入额外的误差, 且误差随着通信距离的增加迅速变大。

(7) 文献[9]的方法在 NLOS 传播环境下定位性能会随着蜂窝半径的增加而迅速降低。由于该方法将 NLOS 传播时延的均值这个统计量作为 NLOS 传播时延的真实值来处理, 必然带来误差, 而 NLOS 传播时延的各阶统计量是通信距离的指数函数, 因此随着蜂窝半径的增加误差会增加, 从而导致定位性能下降。

7 结束语

本文提出的几何定位方法, 仅仅利用蜂窝的基站分布坐标、TOA 测量数据和 NLOS 传播具有正偏置的特性, 通过求解二次方程、进行逻辑和代数运算实现了移动台定位, 无需复杂的矩阵运算和反复迭代, 算法简单、运算量小, 对系统测量误差和 NLOS 传播的统计特性没有要求。仿真结果表明, 该方法不但能够有效提高 NLOS 传播环境下移动台的定位精度, 而且对 LOS 传播条件下的定位精度影响不大。

参 考 文 献

- [1] Rappaport T S, Reed J H, and Woerner B D. Position location using wireless communications on highways of the future[J]. *IEEE Commun. Mag.*, 1996, 34 (10): 33-41.
- [2] Wylie M P and Holtzmann J. The non-line-of-sight problem in mobile location estimation[A][C]. 5th IEEE Int. Conf. on Universal Personal Communications, Cambridge, USA, 29 Sep.- 2 Oct., 1996, vol.2: 827-831.
- [3] Ertel R B and Reed J H. Angle and time of arrival statistics for circular and elliptical scattering models[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1999, 17 (11): 1829-1840.
- [4] He Yan, Hu Han-Ying, and Zhou Shan. A TOA based believable factor mobile location algorithm[A][C]. 2004 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Atlanta, USA, 21-25 March 2004, Vol.1: 260-263.
- [5] Liu Ying and Wang Shu-xun. TOA estimation method using fourth order cumulants[A][C]. 2000 5th International Conference on Signal Processing Proceedings, Beijing, China, 21-25 Aug., 2000, vol.1: 210-214.
- [6] Winter J and Wengerter C. High resolution estimation of the time of arrival for GSM location[A][C]. 2000 IEEE 51st Vehicular Technology Conference Proceedings, Tokyo, Japan, 15-18 May., 2000, vol.2: 1343-1347.
- [7] Greenstein L J, *et al.* A new path-gain/delay spread propagation model for digital cellular channels[J]. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 1997, 46(2): 477-484.
- [8] Chan Y T and Ho K C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location[J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1994, 42(8): 1905-1915.
- [9] 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[J]. *电子学报*, 2003, 31(9): 1429-1432.
- Tian Xiao-hua and Liao Gui-sheng. An effective TOA based location method for mitigating the influence of the NLOS propagation[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31 (9): 1429-1432.

常 戎: 男, 1971 年生, 博士生, 研究方向为无源定位技术。

吕善伟: 男, 1937 年生, 博士生导师, 主要研究方向为电磁场与微波技术、射频技术与天线工程。