

一种有效减小非视距传播影响的 TOA 定位方法

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, 陕西西安 710071)

摘要: 本文基于移动通信环境中非视距(NLOS)传播时延服从指数分布的特性,提出了一种有效减小NLOS影响的定位方法.该方法首先利用测量的波达时间(TOA)和NLOS传播时延的统计特性估计由NLOS引起的附加时延;然后从测量的波达时间中减去附加时延,得到对LOS传播时间的估计,进而估计移动台的位置;最后,对不同时刻估计的移动台位置进行平滑处理,进一步减小NLOS的影响.采用该方法对移动台的位置进行的估计是一种无偏估计,不需要增加系统成本,计算简单,是一种非常实用的定位方法.仿真结果证明了该方法的有效性.

关键词: 到达时间; 定位; 非视距传播; 最大似然估计

中图分类号: TN929.53 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2003)09-1429-04

An Effective TOA-Based Location Method for Mitigating the Influence of the NLOS Propagation

TIAN Xiao-hua, LIAO Gui-sheng

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

Abstract: Based on the statistical property of the non-line-of-sight (NLOS) propagation in the mobile communication environment, an effective location method is presented to mitigate the influence of the NLOS propagation. First, the excess delay caused by the NLOS propagation is estimated using the measured time of arrival (TOA) and the statistical property of NLOS propagation; and then the excess delay is removed from the measured TOA to estimate the line of sight (LOS) propagation time and the position location of the mobile station (MS); finally, the position locations of the MS of different time are smoothed to improve the precision of the position location of the MS. The location of the MS estimated by this method is unbiased. The method does not increase the cost. It is a simple and practical method. Its effectiveness is verified by the simulation results.

Key words: time of arrival (TOA); position location (PL); non-line-of-sight (NLOS) propagation; maximum likelihood (ML) estimation

1 引言

1996年美联邦通信委员会(FCC)正式将位置信息的提供列为911急救业务的必备要求.据FCC的计划,到2001年10月要求所有的移动网络运营商对67%以上的呼叫定位精度达到125米以内,2001年以后提供更高的定位精度及三维位置信息.E-911定位服务也已经作为第三代移动通信系统的一个基本功能^[1,2].自E-911定位要求颁布以来,在蜂窝网络移动通信系统中实现无线定位一直是研究的热点,但离E-911的要求还有一定差距.在蜂窝移动通信系统中,由于传播环境的影响,引起定位误差的因素除了设备测量参数产生的随机测量误差外,还有电波的非视距(NLOS)传播效应、多径效应以及多址干扰和远近效应,并且非视距传播是造成定位误差的主要因素.为了减小非视距传播的影响,已提出了一些方法^[3-5].这些方法分别采用小区地形数据库技术、模糊信息

处理技术、数据平滑技术、与GPS相结合的技术以及非视距传播测距误差的方差大于视距传播测距误差的方差对信号进行处理.这些方法有的运算量大,有的需要增加系统存储容量,这都会增加系统成本和复杂性.

本文基于移动通信环境中NLOS传播时延服从指数分布的特性^[6],提出了一种减小NLOS影响的定位方法.该方法首先对测量的数据进行处理,以滤除NLOS的影响,然后利用处理后的数据估计移动台的位置,并对估计的位置进行平滑.该方法运算简单,不需要增加系统存储容量,能有效减小NLOS传播对定位精度的影响.

2 时间测量模型

在实际蜂窝移动通信系统中,测量的参数受测量设备及信号传播环境影响会产生一定的误差,测量期望定位的移动台发射信号到第*i*个基站的波达时间可用下面模型表示:

收稿日期:2002-01-28;修回日期:2003-03-30

基金项目:国家自然科学基金(No. 60172028);国家教育部科学技术研究重点项目,武器装备预研基金(No. 51407030101DZ0120)

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

其中 $t_{i,LOS}$ 为第 i 个基站 (BS) 与移动台间信号的视距传播时间, $t_{i,e}$ 为检测设备带来的误差, 可随着定时技术及信号检测技术的改进而减小, 仅占 TOA 误差中很小的一部分, 一般为零均值的高斯随机变量. $t_{i,N}$ 是无线传播环境带来的误差, 是 TOA 误差的主要组成部分, 可用服从指数分布、均匀分布及 Delta 分布的随机变量表示^[6]. 本文仅考虑服从指数分布的情况, 其条件概率密度函数为:

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

式中 $\tau_{i,ms}$ 为均方根时延扩展, 可表示为^[8]:

$$\tau_{i,ms} = T_1 d_i^\epsilon \xi \quad (3)$$

T_1 为 $\tau_{i,ms}$ 在 $d_i = 1\text{km}$ 时的中值, d_i 为收发间的距离 (km), ϵ 为 0.5 - 1 间的指数, ξ 是服从对数正态分布的随机变量 (即 $10\log\xi$ 是均值为零、标准差 σ_ξ 为 4 - 6dB 的高斯随机变量). 对于四种典型的移动通信环境, 上述参数的典型取值如表 1 所示:

表 1 典型环境的参数

无线环境	$T_1(\mu, s)$	ϵ	σ_ξ (dB)
繁华市区	1.0	0.5	4
一般市区	0.4	0.5	4
郊区	0.3	0.5	4
远郊	0.1	0.5	4

3 减小 NLOS 影响的 TOA 定位算法

3.1 一种视距传播环境下的 TOA 定位算法

文献[7]针对视距传播环境提出了一种最大似然 (ML) 估计的近似实现方法. 它不需要迭代, 在参数误差很小时能达到 C-R 下界, 本文用到该算法, 这里给出主要思想.

考虑平面定位, 假设有 M 个基站测量期望定位的移动台发射信号的 TOA, 其值分别为 $t_{i,m}$, $i = 1, 2, \dots, M$, 各个基站测量的时间相互独立, 期望定位的移动台的坐标为 (x, y) , 基站的位置坐标为 (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, M$, 每个基站与移动台间均存在视距传播, 则有

$$r_i^2(c_{i,m})^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2, i = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

通过令变量 $R = x^2 + y^2$, 并认为 R 与 x 和 y 相互独立, 可将上面的非线性方程变为线性方程:

$$r_i^2 - k_i = -2xx_i - 2yy_i + R, i = 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

式中 $k_i = x_i^2 + y_i^2$. 由于 $t_{i,m}$ 测量误差的存在, r_i 也存在误差, 设 $t_{i,m}$ 的真值为 $t_{i,LOS}$, 误差为 $t_{i,e}$, r_i 的真值为 $r_{i,t}$, 则误差 $\phi_1(i)$ 可表示为:

$$\begin{aligned} \phi_1(i) &= r_i^2 - (x - x_i)^2 - (y - y_i)^2 = (c_{i,m})^2 - r_{i,t}^2 \\ &= (c(t_{i,LOS} + t_{i,e}))^2 - r_{i,t}^2 = 2cr_{i,t}t_{i,e} + c^2t_{i,e}^2 \\ &\approx 2cr_{i,t}t_{i,e}, \quad i = 1, 2, \dots, M \end{aligned} \quad (6)$$

将上式用矢量表示为:

$$\Psi_1 = \mathbf{h}_1 - \mathbf{G}_1 \mathbf{z}_1 \approx 2c\mathbf{B}_1 \mathbf{t}_e \quad (7)$$

用最大似然法对式(7)进行估计可得:

$$\mathbf{z}_1 = (\mathbf{G}'_1 \Psi_1^{-1} \mathbf{G}_1)^{-1} \mathbf{G}'_1 \Psi_1^{-1} \mathbf{h}_1 \quad (8)$$

\mathbf{z}_1 的协方差矩阵为:

$$\text{cov}(\mathbf{z}_1) = (\mathbf{G}'_1 \Psi_1^{-1} \mathbf{G}_1)^{-1} \quad (9)$$

式中, $\mathbf{z}_1 = [x, y, R]^T$, 其余参数含义见文献[7].

在上面的计算中, 假设 x, y, R 相互独立, 但实际上存在确定关系, 利用 \mathbf{z}_1 及 x, y 与 R 的确定关系对结果进行修正. 假设 x, y, R 的估计误差分别为 e_1, e_2, e_3 , 则误差 $\mathbf{z}_1(1)^2 - x^2$, $\mathbf{z}_1(2)^2 - y^2$ 及 $\mathbf{z}_1(3) - R$ 可表示为:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{z}_1(1)^2 - x^2 &= 2xe_1 + e_1^2 \approx 2xe_1 \\ \mathbf{z}_1(2)^2 - y^2 &= 2ye_2 + e_2^2 \approx 2ye_2 \\ \mathbf{z}_1(3) - R &= e_3 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

令 $\Psi_2 = [\mathbf{z}_1(1)^2 - x^2, \mathbf{z}_1(2)^2 - y^2, \mathbf{z}_1(3) - R]^T$, 则误差矢量用矩阵表示为:

$$\Psi_2 = \mathbf{h}_2 - \mathbf{G}_2 \mathbf{z}_2 \quad (11)$$

\mathbf{z}_2 的最大似然估计为:

$$\mathbf{z}_2 = (\mathbf{G}'_2 \Psi_2^{-1} \mathbf{G}_2)^{-1} \mathbf{G}'_2 \Psi_2^{-1} \mathbf{h}_2 \quad (12)$$

式中, $\mathbf{z}_2 = [x^2, y^2]^T$. 其余参数含义见文献[7]. 移动台位置的最终估计 $\mathbf{z} = [x, y]^T$ 为:

$$\mathbf{z} = \sqrt{\mathbf{z}_2} \text{ 或 } \mathbf{z} = -\sqrt{\mathbf{z}_2} \quad (13)$$

\mathbf{z} 中 x, y 的符号分别由 \mathbf{z}_1 的前两个元素的符号确定.

3.2 NLOS 传播时延的均值与方差

由时间测量模型可知: NLOS 传播引起的附加时延服从参数为 $\tau_{i,ms}$ 的指数分布, 从 $\tau_{i,ms}$ 的表达式(3)可以看出, 它是一个与蜂窝环境密切相关的随机量. 在环境一定的条件下, 它是一个服从对数正态分布的随机变量, 且基站与移动台间的真实距离不同, 其均值与方差不同. 对 NLOS 传播引起的附加时延进行无偏估计的方法是用均值作为估计值. 另外, 在用文献[7]的方法对移动台的位置进行估计时, 需要已知测量数据的误差的方差, 下面推导 NLOS 传播引起附加时延的均值与方差.

设 x 是一个随机变量, 它服从参数为 y 的指数分布, 其条件概率密度函数为:

$$f_{X/Y}(x/y) = \begin{cases} \frac{1}{y} \exp\left(-\frac{x}{y}\right), & x \geq 0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (14)$$

其中 y 服从对数正态分布 (即 $z = \ln y$ 服从均值为 m_z 、方差为 δ_z^2 的正态分布), 其概率密度函数为:

$$f_Y(y) = \begin{cases} \frac{1}{y \sqrt{2\pi\delta_z^2}} \exp\left(-\frac{(\ln y - m_z)^2}{2\delta_z^2}\right), & y > 0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (15)$$

y 的均值 $E(y) = \exp(m_z + \delta_z^2/2)$, 方差 $D(y) = (\exp(\delta_z^2) - 1) \exp(2m_z + \delta_z^2)$. 由概率论可知, x 的概率密度函数为:

$$\begin{aligned} f_X(x) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dy = \int_{-\infty}^{\infty} f_{X/Y}(x/y) f_Y(y) dy \\ &= \begin{cases} \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta_z^2 y^2}} e^{-\left(\frac{x}{y} + \frac{(\ln y - m_z)^2}{2\delta_z^2}\right)} dy, & x \geq 0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

则 x 的均值 $E(x)$ 和方差 $D(x)$ 分别为:

$$\begin{aligned}
 E(x) &= \int_0^{\infty} xf_X(x) dx \\
 &= \int_0^{\infty} \frac{x}{\sqrt{2}} \frac{1}{zy^2} e^{-\left(\frac{x}{y} + \frac{(\ln y - m)^2}{2z^2}\right)} dy dx \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(\ln y - m)^2}{2z^2}} dy \\
 &= \int_0^{\infty} y f_Y(y) dy = E(y) = e^{m_z + \frac{z^2}{2}} \quad (17)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E(x^2) &= \int_0^{\infty} x^2 f_X(x) dx \\
 &= \int_0^{\infty} \frac{x^2}{\sqrt{2}} \frac{1}{zy^2} e^{-\left(\frac{x}{y} + \frac{(\ln y - m)^2}{2z^2}\right)} dy dx \\
 &= \frac{2y}{\sqrt{2}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(\ln y - m)^2}{2z^2}} dy \\
 &= 2 \int_0^{\infty} y^2 f_Y(y) dy = 2 E(y^2) \quad (18)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E(y^2) &= D(y) + E^2(y) = e^{2m_z + \frac{2}{z}(e^{\frac{z^2}{2}} - 1)} \\
 &\quad + e^{2m_z + \frac{2}{z}} = e^{2m_z + \frac{2}{z}} (2e^{\frac{z^2}{2}} - 1) \quad (19)
 \end{aligned}$$

$$D(x) = E(x^2) - E^2(x) = e^{2m_z + \frac{2}{z}} (2e^{\frac{z^2}{2}} - 1) \quad (20)$$

对于 NLOS 传播引起附加时延的特性由式(2)、(3)确定, 结合上面的公式, NLOS 传播引起附加时延的均值与方差为:

$$E(t_{i,N}) = T_1 d_i e^{m_z + \frac{z^2}{2}} \quad (21)$$

$$D(t_{i,N}) = (T_1 d_i)^2 e^{2m_z + \frac{2}{z}} (2e^{\frac{z^2}{2}} - 1) \quad (22)$$

式中 d_i 以 km 为单位, m_z, z 为高斯随机变量 $z = 10 \log$ 的均值与均方差, 均方差以奈培为单位. 显然, NLOS 传播引起附加时延的均值与方差均和移动台与基站间的真实距离、信号传播环境有关.

3.3 减小 NLOS 影响的 TOA 定位算法

由于 NLOS 的影响使得测量距离 (实际测量的为时间, 由时间与距离的线性关系可得到距离) 总是大于真实距离, 如果不对测量数据进行处理而直接用文献[7]的方法来估计移动台的位置, 那么估计的位置将是有偏的, 必须采取措施去掉偏差的影响. 由式(21)、(22)可知, 在信号传播环境一定的条件下, NLOS 传播引起附加时延的均值与方差仅由移动台与基站间的真实距离确定. 本文首先将测量的基站与移动台间的距离作为对真实距离的一种近似, 用式(21)计算 NLOS 引起的附加时延的均值, 并将该均值作为对 NLOS 引起的附加时延的估计, 然后从测量距离中减去 NLOS 引起的附加距离, 作为对基站与移动台间 LOS 传播距离的近似估计; 最后对处理后的数据采用文献[7]的方法估计移动台的位置, 并对不同时刻估计的移动台位置进行平滑, 进一步减小 NLOS 的影响.

采用上面的方法对数据进行处理, 一方面减小了 NLOS 传播的影响, 另一方面由于对附加时延的估计是一种无偏估计, 则对 LOS 传播距离的估计也是一种无偏估计, 从而对处理后的数据用文献[7]的方法估计移动台的位置时也将是一种无偏估计, 这样就消除了定位误差中有偏部分的影响. 另外,

文献[7]方法中用到的测量数据的协方差矩阵由 LOS 传播距离估计误差确定. LOS 传播距离估计误差是一个均值为零、方差由式(22)和设备测量误差的方差共同确定的随机变量. 能有效减小 NLOS 影响的 TOA 定位算法如下:

(1) 根据各个基站的测量时间 $t_{i,m}, i=1, 2, \dots, M$, 用式(21)对 NLOS 引起的附加时延 $t_{i,N}$ 进行估计, 估计值为 $\hat{t}_{i,N}$, 并按下式估计基站到移动台的 LOS 传播时延 $t_{i,LOS}$:

$$t_{i,LOS} = t_{i,m} - \hat{t}_{i,N}, \quad i=1, 2, \dots, M \quad (23)$$

(2) 用式(22)估计 NLOS 传播时延的方差, 记为 $\sigma_{i,N}^2$, 并与设备测量误差的方差 σ_e^2 相加, 作为对 LOS 传播时延 $t_{i,LOS}$ 方差的估计. 其协方差矩阵 Q 为:

$$Q = \text{diag} \left(\sigma_{1,N}^2 + \sigma_e^2, \sigma_{2,N}^2 + \sigma_e^2, \dots, \sigma_{M,N}^2 + \sigma_e^2 \right) \quad (24)$$

(3) 根据估计的 $t_{i,LOS}$ 和 Q , 利用文献[7]的方法对移动台的位置进行估计. 记为 (\hat{x}, \hat{y}) ;

(4) 对 K 个不同时刻估计的移动台位置进行算术平均, 得到对移动台位置的最终估计.

4 计算机仿真分析

本文用计算机对上述算法的有效性进行验证, 并与文献[7]的方法进行性能比较. 仿真中蜂窝系统的结构如图 1 所示, 每个小区半径均为 500m, 基站的位置坐标分别为 $(0, 0), (0, 866), (750, 433), (750, -433), (0, -866), (-750, -433), (-750, 433)$. 移动台均匀分布在以 BS1 为中心, 半径为 500m 的圆内. 检测设备带来的 TOA 测量误差用均值为零、标准差为 0.1us (对应距离为 30m) 的高斯随机变量表示, NLOS 传播引起的附加时延用参数为 i, m_{ms} 的指数分布随机变量表示, 参数 i, m_{ms} 由式(3)决定, 为服从对数正态分布的随机变量. 蜂窝环境为一般市区环境 (即 $T_1 = 0.4\mu s, \sigma = 0.5, \sigma = 4\text{dB}$).

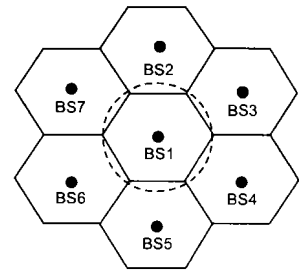


图 1 蜂窝小区结构及移动台分布示意图

仿真 1 采用 7 个基站测量的 TOA 对移动台进行定位, 对于每一个特定的移动台位置, 各个基站只进行一次 TOA 测量, 考虑测量的 TOA 受到 NLOS 影响和未受到 NLOS 影响两种情况. 经过 10^3 次 Monte-Carlo 实验, 定位误差 (m) 与误差分布函数的关系如图 2 所示. 实线对应本文提出的方法, 虚线为文献[7]的方法. 从结果可以看出: (1) 当测量时间不受 NLOS 影响时, 两种方法都能满足 $E-911$ 的要求, 但文献[7]方法的定位误差小于本文方法的定位误差; 当测量时间受 NLOS 影响时, 只有本

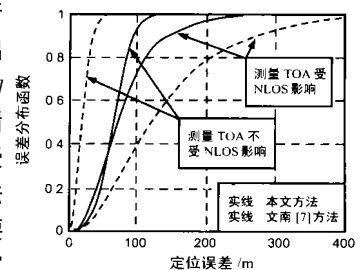


图 2 存在 LOS 传播和不存在 LOS 传播两种方法比较

文方法能满足 E_{911} 的要求,且文献[7]方法的定位误差比本文方法的定位误差大得多.说明本文方法确实能减小 NLOS 影响;(2)在测量时间受 NLOS 影响和不受 NLOS 影响两种情况下,采用本文方法的定位误差相差不大,而采用文献[7]方法定位误差相差很大,说明文献[7]方法对 NLOS 影响敏感,而本文方法对 NLOS 影响不敏感.

仿真 2 在测量误差受 NLOS 影响的情况下,分析平滑处理对定位误差的影响.采用 7 个基站测量的 TOA 对移动台进行定位,对于每一个特定的移动台位置,基站在不同时刻对 TOA 进行多次测量,对于同一时刻的测量数据用本文方法估计移动台的位置,然后对不同时刻的估计结果进行平滑实现对移动台位置的最后估计.经过 10^3 次 Monte-Carlo 实验,定位误差(m)与误差分布函数的关系如图 3 所示.由图可见:定位误差随不同时刻测量次数的增加而减小,特别是测量次数小于 5 时,改善明显.

5 结论

本文基于移动通信环境中 NLOS 传播时延服从指数分布的特性,提出了一种有效减小 NLOS 影响的定位方法.该方法首先对测量的数据进行预处理,然后对处理后的数据采用文献[7]的方法估计移动台的位置,最后对估计的结果进行后处理.采用该方法对移动台的位置进行的估计是一种无偏估计,不需要增加系统成本.从仿真的结果来看,该方法对 NLOS 的影响不敏感,优于文献[7]的方法,是一种简单而又非常实用的定位方法.

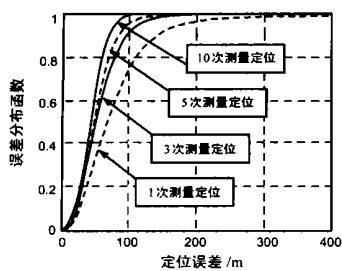


图 4 时间平滑对定位性能影响分析

参考文献:

- [1] T S Rappaport, J H Reed, B D Woerner. Position location using wireless communications on highways of the future [J]. IEEE Commun Mag, 1996, 34(10): 33 - 41.
- [2] J Caffery, L Stuber. Overview of radiolocation in CDMA cellular systems [J]. IEEE Commun Mag, 1998, 36(4): 38 - 45.
- [3] S S Woo, et al. The NLOS mitigation technique for position location using IS-95 CDMA networks[A]. IEEE VTS Fall VTC[C]. Boston, US: IEEE Press, 2000. 2556 - 2560.
- [4] X M Shen, et al. Mobile location estimation in cellular networks using fuzzy logic [A]. IEEE VTS Fall VTC[C]. Boston, US: IEEE Press, 2000. 2108 - 2114.
- [5] S S Wang, M Green. Mobile location method for non-line-of-sight situation[A]. IEEE VTS Fall VTC[C]. Boston, US: IEEE Press, 2000. 608 - 612.
- [6] William C. Y. Lee. Mobile communication engineering[M]. New York: McGraw-Hall, 1993. Chapter 9.
- [7] Y T Chan, K C Ho. A simple and efficient estimator for hyperbolic location[J]. IEEE Trans SP, 1994, 42(8): 1905 - 1915.
- [8] L J Greenstein, et al. A new path gain/ delay spread propagation model for digital cellular channels[J]. IEEE Trans on VT, 1997, 46(2): 477 - 484.

作者简介:



田孝华 男,1965 年生于湖南石门县,副教授,西安电子科技大学博士生,感兴趣的研究方向为无线定位、阵列信号处理、非平稳信号处理等.

廖桂生 男,1962 年生于广西,西安电子科技大学教授,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.