

CHAN 算法在 LOS 和 NLOS 环境下的定位研究

陆 音, 王宝全, 丘觐玮

(南京邮电大学 江苏省无线通信重点实验室, 江苏 南京 210003)

摘 要: 在基于时间到达差(Time Difference Of Arrival, TDOA)的定位估计算法中, CHAN 算法计算量小,能够在视距(Line Of Sight, LOS)传播环境下获得较高的定位精度,因而被广泛应用。但是在非视距传播环境(Non-Line Of Sight, NLOS)下,该算法的定位性能会明显下降。因为在非视距情况,尤其是密集城区,由于建筑物等障碍物的存在使得无线电信号无法直线传播,这就引入了NLOS误差;而CHAN算法中的加权矩阵只考虑了系统误差,无法消除NLOS误差。文中在基于视距环境下CHAN算法的研究基础上,对非视距引入的NLOS误差的统计特性进行分析,给出一种在NLOS情况下,通过优化非视距TDOA测量值误差的方法来改善非视距下的CHAN算法性能,并通过仿真分析了CHAN算法在不同环境模型下的定位性能。仿真结果表明,改善的CHAN算法在NLOS环境下能取得较好的定位性能。

关键词: 时间到达差; CHAN 算法; 视距; 非视距传播

中图分类号: TP39

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2015)09-0061-05

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2015.09.013

Study on Localization of CHAN Algorithm in LOS and NLOS Environment

LU Yin, WANG Bao-quan, QIU Jin-wei

(Key Laboratory of Wireless Communications of Jiangsu Province, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Among the positioning algorithms based on TDOA, CHAN algorithm is widely used for its small calculation and high positioning accuracy in LOS propagation environment. However, CHAN positioning performance decreases significantly when the propagation condition is NLOS. In the case of NLOS, especially in dense urban areas, the radio signals can't travel in straight lines with the existence of the obstacles such as tall buildings, thus introducing the NLOS error. While the weighted matrix in CHAN algorithm is unable to eliminate the NLOS error for it only considers system error. Based on the study of CHAN algorithm in LOS environment and the analysis of statistical characteristics of NLOS error, a method which improves the CHAN performance in the case of NLOS by optimizing the NLOS TDOA measurement error is proposed in this paper. Analysis of CHAN algorithm is done by computer simulation in different environment models. The simulation results show that improved CHAN algorithm can achieve better positioning performance.

Key words: TDOA; CHAN algorithm; LOS; NLOS propagation

0 引 言

由于E-911法规的颁布,加上政府的强制性要求及市场利益的驱动,基于定位服务的研究越来越得到各大通信公司、许多大学和研究机构的重视。随着定位技术研究的开展,国内外涌现出很多关于无线定位方面研究的算法,这些算法中的很大部分都是基于TDOA技术的。TDOA技术以其算法计算复杂度低、易于实现并且能够获得较高的定位精度等优点而成为

移动台定位中较常用的参数估计方法^[1]。基于TDOA的定位算法,其定位误差的来源主要由两方面组成:接收机的热噪声及测量引入的距离测量误差和NLOS环境下所引入的距离测量误差。第一种误差的分布为高斯白噪声,且对总误差影响较小;第二种误差即NLOS传播引入的误差,对于定位精度的影响很大,是算法误差的主要来源^[2]。CHAN算法^[3]是一种具有解析表式解的非递归双曲线方程组解法,是基于TDOA参

收稿日期: 2014-11-02

修回日期: 2015-02-04

网络出版时间: 2015-08-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61271236);工业和信息化部通信软科学项目(2014-R-50);江苏政府留学奖学金资助项目;南京邮电大学校项目(NY210007);南京邮电大学大学生创新训练计划省级重点项目(SZDG2013012)

作者简介: 陆 音(1970-),男,博士,副研究员,研究方向为无线通信;王宝全(1988-),男,研究生,研究方向为无线通信。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20150826.1558.046.html>

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

数估计方式的经典算法之一。该算法得到广泛的应用主要因为它具备三大优势:

- (1) 算法不需要提供初始值;
- (2) 只需要进行两次迭代就可以获得最终的结果;
- (3) 算法的定位性能在视距 LOS 环境下能达到克拉美罗下界。

CHAN 算法采用两次最小二乘算法给出定位方程组的非迭代式闭式解,在噪声服从理想高斯分布的情况下,能实现较高的定位精度,但是在实际误差比较大的 NLOS 情况下,CHAN 算法的性能急剧下降。许多文献研究 CHAN 算法都是基于理想 LOS 环境下。文献[4]分析了基于视距环境下 CHAN 算法的定位性能并对闹市和山区两种不同的环境模型进行仿真分析,但是忽略了 NLOS 噪声影响。对 NLOS 误差处理的国内外文献也不少,文献[5]剖析了基于 LOS 和 NLOS 环境下 CHAN 算法的定位性能,但是只基于 UWB 系统。文献[6]考虑了 NLOS 误差环境,采用了先对 NLOS-LOS 进行辨认,再进行误差消除的方法,但是运算量偏大。文献[7]利用散射模型削弱 NLOS 误差,但是只适合宏小区。

文中在对 CHAN 算法研究的基础上,先对 CHAN 算法在 LOS 环境下的性能进行仿真分析,并在此基础上对 NLOS 环境下 TDOA 误差统计特性进行分析,再通过优化 NLOS 环境下获取的 TDOA 值以达到减小 NLOS 误差的目的。文献[4]在 LOS 环境下对 CHAN 算法在闹市和山区环境下进行仿真分析,并比较了各种算法性能,但它并未考虑 NLOS 环境下的误差。文中将在文献[4]的基础上对 CHAN 算法在 LOS 和 NLOS 环境下进行仿真分析,并通过在 NLOS 环境下获得的 TDOA 测量值进行修正优化来改善算法在 NLOS 环境下的定位性能。

1 TDOA 定位模型

1.1 TDOA 测量值的获取

首先需要获取到 TDOA 的测量值,而 TDOA 参数测量值的获取主要有以下两种方法:一种是直接求两个基站信号的到达时间(Time Of Arrival, TOA)之差;另一种则是采用相关技术^[8],所谓相关技术即是将一个基站接收到的信号和另一个基站接收的信号进行互相关运算,以此来获得 TDOA 测量值。第一种方法虽然当两个基站间移动信道传输特性相似时可以减少多径效应带来的误差,但是它仍需要基站时间的严格同步;后一种方法可以在基站和移动台不同步时估计出 TDOA 值。在实际的应用中,因为待定位的移动台常常缺乏参考时钟而多采用相关技术来获取 TDOA 测量

值,一旦获得 TDOA 参数测量值就可以采用 TDOA 定位法对移动台进行定位^[9]。

1.2 定位模型

TDOA 定位法是通过测量电波从移动台(MS)传播到两个基站(BS)的传播时差来确定移动台的位置,由这个传播时间差对应的距离差可以得到一条以相应的两个基站为焦点的双曲线。要想得到移动台的估计位置值,只需要测量到两组 TDOA 差值,由这两组 TDOA 数据值可以得到两条双曲线,这两条双曲线的交点就是待测移动台的估计位置。其定位原理图如图 1 所示。

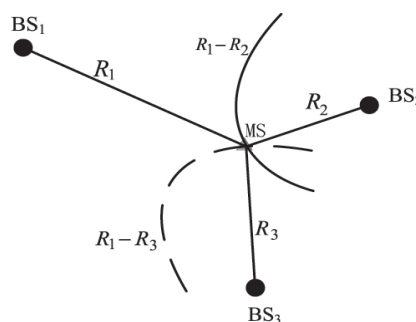


图 1 TDOA 定位原理图

在一个二维(2D)空间中的一组 $M \geq 4$ (文中不考虑基站数为 3 的情况,定位性能差)的基站,可以扩展到三维(3D)空间^[10]。基站坐标分别为 $z_i = [x_i \ y_i]^T$, $i = 1, 2, \dots, M$,假设需要估计的移动台位置为 $z = [x \ y]^T$,将第一个基站作为参考点,用 r_i 表示移动台到基站 i 的测量距离, r_i^0 为 r_i 的真实值, $r_{i,1}$ 表示移动台到参考基站 i ($i \neq 1$) 与参考基站 1 的距离差,则有:

$$r_{i,1} = c\tau_{i,1} = r_i - r_1 \quad i = 2, 3, \dots, M \quad (1)$$

式中, $r_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}$, $i = 1, 2, \dots, M$; c 为电波传播速度; $\tau_{i,1}$ 是移动台到基站 i 与基站 1 的时间到达差值。将上式进行线性化处理可得^[11]:

$$(r_{i,1} + r_1)^2 = r_{i,1}^2 + 2r_{i,1}r_1 + r_1^2 = x_i^2 + y_i^2 - 2x_ix - 2y_iy + x^2 + y^2 \quad (2)$$

令 $K_i = x_i^2 + y_i^2$, $x_{i,1} = x_i - x_1$, $y_{i,1} = y_i - y_1$,即有下式:

$$x_{i,1}x + y_{i,1}y + r_{i,1}r_1 = \frac{1}{2}(K_i - K_1 - r_{i,1}^2) \quad (3)$$

将 x, y, r_1 看成未知数,那么式(3)就是一组线性方程组,只要求解出该方程组的值就可以获得移动台的估计位置。

2 LOS 及 NLOS 环境下的定位算法

2.1 LOS 情况下的 CHAN 算法

令 $z_a = [z^T \ r_1]$ 为未知矢量, z_a^0 为 MS 真实位置所对应 z_a 的值,假定 z_a 的元素间相互独立,则 z_a 的最大

似然估计(Maximum Likelihood ,ML) 为^[12]:

$$\mathbf{z}_a = \arg \min \{ (\mathbf{h} - \mathbf{G}_a \mathbf{z}_a)^T \boldsymbol{\psi} (\mathbf{h} - \mathbf{G}_a \mathbf{z}_a) \} = (\mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\psi}^{-1} \mathbf{G}_a)^{-1} \mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\psi}^{-1} \mathbf{h} \quad (4)$$

式中, $\boldsymbol{\psi} = E[\boldsymbol{\psi} \boldsymbol{\psi}^T] = c^2 \mathbf{B} \mathbf{Q} \mathbf{B}$, $\mathbf{B} = \text{diag}\{r_2^0, r_2^0, \dots, r_M^0\}$, \mathbf{Q} 为 TDOA 的协方差矩阵。因为 \mathbf{B} 中含有 MS 与各个基站发射机之间的距离, 即 $\boldsymbol{\psi}$ 未知, 因此要想得到 MS 的位置, 还需要进一步近似。

假设当 MS 距离很远时, $r_i^0 (i = 2, 3, \dots, M)$ 与 r^0 (定义距离) 接近, 所以 $\mathbf{B} \approx r^0 \mathbf{I}$, 则式(4)可近似为:

$$\mathbf{z}_a \approx (\mathbf{G}_a^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{G}_a)^{-1} \mathbf{G}_a^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{h} \quad (5)$$

当 MS 距离较近时, 利用式(5)可以得到一个初始解来计算 \mathbf{B} 矩阵, 即 $\boldsymbol{\psi}$ 的值, 然后代入式(4)可获得第一次加权最小二乘估计(WLS)值。其中:

$$\mathbf{h} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} r_{2,1}^2 - K_2 + K_1 \\ r_{3,1}^2 - K_3 + K_1 \\ \vdots \\ r_{M,1}^2 - K_M + K_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_a = \begin{bmatrix} x_{2,1} & y_{2,1} & r_{2,1} \\ x_{3,1} & y_{3,1} & r_{3,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{M,1} & y_{M,1} & r_{M,1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{z}_a^0 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ r_1^0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Q} = E(\mathbf{n} \mathbf{n}^T) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{n} = \begin{bmatrix} n_{2,1} \\ n_{3,1} \\ \vdots \\ n_{M,1} \end{bmatrix}$$

其中, \mathbf{n} 为噪声矢量, 近似服从正态分布。

接着利用上面得到的第一次估计值和附加变量 r_1 等已知条件, 重新构造一组误差方程组进行第二次估计, 得到第二次估计位置为:

$$\mathbf{z}_a' \approx (\mathbf{G}_a^T \mathbf{B}^{-1} \mathbf{G}_a^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{G}_a \mathbf{B}^{-1} \mathbf{G}_a)^{-1} (\mathbf{G}_a^T \mathbf{B}^{-1} \mathbf{G}_a^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{G}_a \mathbf{B}^{-1} \mathbf{G}_a) \mathbf{h}' \quad (6)$$

$$\text{式中, } \mathbf{h}' = \begin{bmatrix} (z_{a,1} - x_1)^2 \\ (z_{a,2} - y_1)^2 \\ z_{a,1}^2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_a' = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{z}_a' = \begin{bmatrix} (x - x_1)^2 \\ (y - y_1)^2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}' = \begin{bmatrix} z_a(1) - x_1 & 0 & 0 \\ 0 & z_a(2) - y_1 & 0 \\ 0 & 0 & z_a(3) \end{bmatrix}$$

通过上述两次最小二乘法(WLS)可知 MS 的最终位置为:

$$\mathbf{z} = \pm \sqrt{\mathbf{z}_a'} + \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

以上两次 WLS 估算都是基于测量噪声服从零均值的高斯分布前提下, 只有在这前提下才能得到较准确的移动台 ML 估计值, 因为该算法的加权矩阵已经包含系统的测量误差, 这在一定程度上消除了系统误差带来的影响。并且因为系统误差是零均值的, 所以结果是无偏估计的。所以如果没有上述前提条件, 那么获得的定位估计结果误差会很大。

NLOS 环境下获得的 TDOA 测量值误差除了系统误差外还有附加时延引入的误差, 因此它比在 LOS 环境下得到的 TDOA 测量误差更大。并且 NLOS 误差均值不是为零的, 而 CHAN 算法中的加权矩阵只考虑系统误差, 无法抵消附加时延带来的误差影响, 所以在这种情况下算法得到的定位结果的误差很大。

2.2 NLOS 情况下优化的 CHAN 算法

由于文献[4]的算法没有考虑如何减小 NLOS 误差, 因此文中将信号传播过程中的非视距影响考虑在内。通过对 NLOS 引起的超量时延进行统计分析, 以此来对 TDOA 测量值进行优化, 并将修正优化后的 TDOA 值代入到文献[4]的 CHAN 算法中进行改善, 并对其算法性能进行仿真分析。

先将式(1)中的 $\tau_{i,1}$ 写成^[12]:

$$\tau_{i,1} = \tau_{i,1}^0 + n_{i,1} + \tau_{\text{NLOS},i,1} \quad (8)$$

其中, $\tau_{i,1}^0$ 是在 LOS 环境下的 TDOA 值; $n_{i,1}$ 为系统的测量误差, 其服从均值为 0、方差为 $\sigma_{n,i,1}^2$ 的高斯分布; $\tau_{\text{NLOS},i,1}$ 为由 NLOS 引起的附加时延误差, 其均值为 $\mu_{\text{NLOS},i,1}$, 方差为 $\sigma_{\text{NLOS},i,1}^2$ 。

在 NLOS 环境下, 常用的附加时延分布概率密度函数有指数、均匀和 delta 分布^[13]。文中针对其中一种指数分布情况进行仿真分析。根据均方根延时扩展 $\tau_{\text{rmsi}} = T_1 d_i^\epsilon \xi$ 。其中, T_1 为 τ_{rmsi} 在 $d_i = 1 \text{ km}$ 时的中值; ϵ 为 0.5 ~ 1 之间的一个常数; ξ 为服从 0 均值的对数正态分布的随机变量, 标准差 σ_ξ 为 4 ~ 6 dB。不同环境下的具体参数可见表 1。

表 1 不同信道环境下的参数取值

信道环境	T_1/μ_s	ϵ	σ_ξ/dB
市区	0.4	0.5	4
山区	0.1	0.5	4

由文献[14]可知, τ_{rmsi} 的概率密度函数为:

$$f(\tau_{\text{NLOS},i}) = \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_\xi \tau_{\text{rmsi}}^2} \exp \left[\frac{\tau_{\text{NLOS},i}}{\tau_{\text{rmsi}}} + \frac{(\ln \tau_{\text{rmsi}} - m_i)^2}{2\sigma_\xi^2} \right] d\tau_{\text{rmsi}}, \quad \tau_{\text{rmsi}} \geq 0 \quad (9)$$

式中, $m_i = E(\ln \tau_{\text{rmsi}})$, $\sigma_\xi^2 = D(\ln \tau_{\text{rmsi}})$ 。由此可知 NLOS 引起的附加时延的统计特性为:

$$\mu_{\text{NLOS},i,1} = [\exp(m_i - m_1)] \exp(\sigma_\xi^2/2) \quad (10)$$

$$\sigma_{\text{NLOS},i}^2 = \frac{[2\exp(2\sigma_{\xi}^2) - \exp(\sigma_{\xi}^2)] [\exp(2m_i) + \exp(2m_1)]}{(11)}$$

由于 $\mu_{\text{NLOS},i}$ 的存在,使得总体的误差均值不服从零均值分布,也就是位置的估计值是有偏的,若此时直接用 CHAN 算法就会使定位结果产生较大的误差。为了进一步减小 NLOS 误差对定位结果的影响,对 TDOA 的测量值进行优化。令:

$$\tau'_{i,l} = \tau_{i,l} - \mu_{\text{NLOS},i} = \tau_{i,l}^0 + n'_{i,l} \quad (12)$$

式中, $n'_{i,l}$ 服从 $N(0, \sigma_{n_{i,l}}^2 + \sigma_{\text{NLOS},i}^2)$ 分布。这样符合 CHAN 算法 ML 估计条件,然后将修正后的 TDOA 值代入到上式的 CHAN 算法中进行 MS 位置估算。

3 仿真与分析

3.1 LOS 情况下的 CHAN 算法仿真

在 LOS 环境下 CHAN 算法仿真环境参考文献 [4]。仿真条件是:小区半径 $R = 3\,000\text{ m}$,基站数目从 4 个到 7 个不等,在 LOS 下,测量误差服从零均值理想高斯分布,标准差 σ 分别取值为 30 m, 60 m, 90 m, 120 m, 150 m, 180 m 和 210 m。每次仿真运行的次数为 10 000 次,文中采用定位结果均方根误差来表示定位精度。其中,均方根误差(RMSE)的表达式为:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(\tilde{x} - x)^2 + (\tilde{y} - y)^2]}{n}} \quad (13)$$

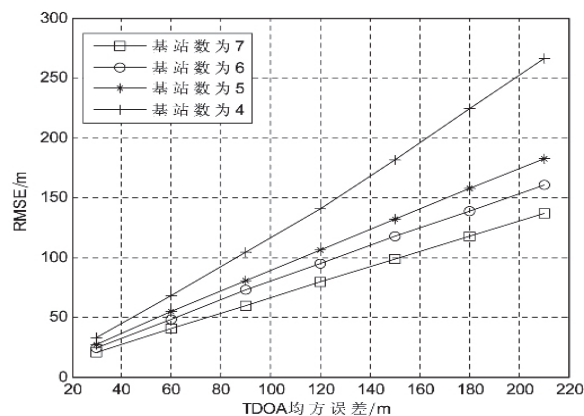
其中, (\tilde{x}, \tilde{y}) 是 MS 的位置估计值。

图 2 中(a)图给出了 CHAN 算法定位性能与 TDOA 测量误差的关系,(b)图是参与定位基站数目对 CHAN 算法性能的影响。仿真结果显示随着参与定位的基站数的增加,CHAN 算法的定位性能不断提高,这是因为基站数的增加可以提供更多可利用的冗余位置信息使得定位更精确。并且随着测量误差的增加,CHAN 算法的 RMSE 也越大,即算法定位性能下降。

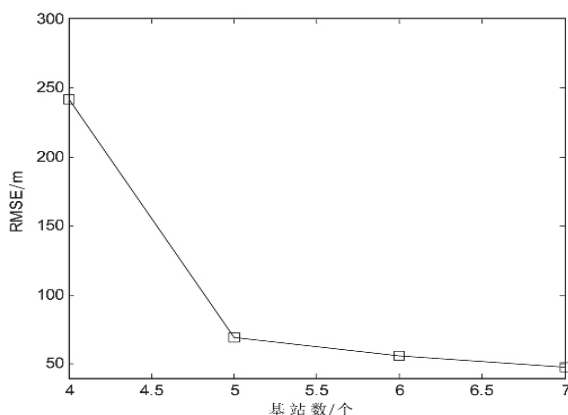
文献 [4] 的仿真已经表明在高斯环境下,CHAN 算法要比 Taylor、SI 等算法获得更高的定位精度,且更加接近克拉美罗下界(CRLB)值。

3.2 NLOS 情况下的 CHAN 算法仿真

图 2 表明当基站数为 7 时,CHAN 算法定位性能已经很高,所以将这部分仿真参与基站数设为 7,其坐标分别为: $(0, 0)$, $(\sqrt{3}R/2, \sqrt{3}R/2)$, $(\sqrt{3}R/2, -\sqrt{3}R/2)$, $(-\sqrt{3}R/2, \sqrt{3}R/2)$, $(-\sqrt{3}R/2, -\sqrt{3}R/2)$, $(\sqrt{3}R/2, -\sqrt{3}R/2)$, $(-\sqrt{3}R/2, \sqrt{3}R/2)$ 。半径取值为 1~5 km。下面将在有 NLOS 误差情况下对一般市区和山区两种情形进行仿真,将文中算法和文献 [4] 中未考虑 NLOS 误差的 CHAN 算法进行性能比较。



(a)CHAN 算法性能与测量误差关系



(b)CHAN 算法性能与基站数目关系

图 2 CHAN 算法性能与基站数目和测量误差的关系

图 3 和图 4 分别显示不同小区半径对算法定位性能的影响。仿真结果表明,小区半径越小,算法的定位

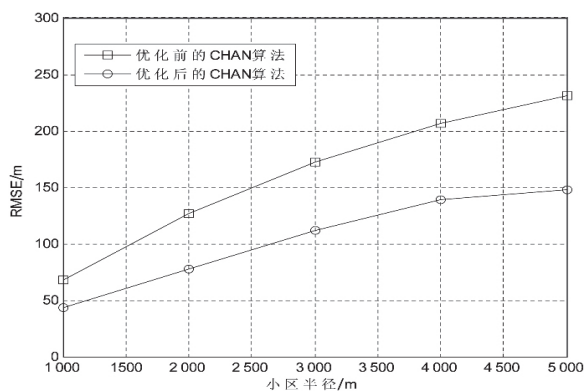


图 3 山区(NLOS)环境下定位性能

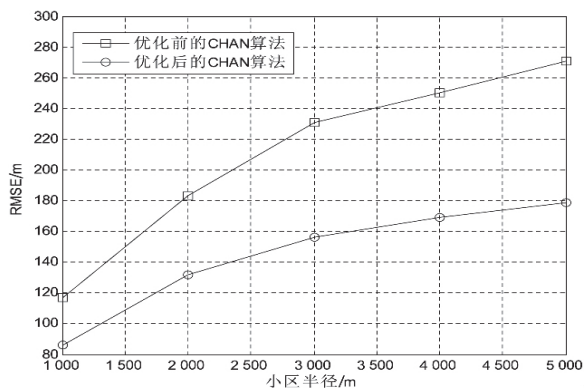


图 4 市区(NLOS)环境下定位性能

性能越高。无论在市区还是山区环境下,文中算法的性能都远优于文献[4]中 CHAN 算法性能,因为文中将 NLOS 误差考虑在内,且对其值进行修正优化。从仿真结果还可以看出,市区的定位性能远比山区环境的差,因为在市区建筑物比较密集,多径干扰影响更大,从而引起的 NLOS 误差也更大。

4 结束语

文中在对 CHAN 算法研究的基础上,通过对 NLOS 引起的超量时延统计特性进行分析,以此来对 TDOA 的测量值进行修正优化,将修正后的 CHAN 算法和文献[4]未考虑 NLOS 误差的 CHAN 算法进行仿真比较。仿真结果表明,不管在市区还是山区环境下,文中算法精度都要优于文献[4]中的算法性能,并且对 TDOA 测量误差的修正在理论程度上能够达到无偏的,即在一定程度上消除了 NLOS 环境的影响。

CHAN 算法是目前应用比较广泛的一种算法,比如 GPS、GSM 蜂窝网等,在测量误差服从高斯分布的情况下能获得比较好的定位性能,并且该算法的运算复杂度不大;虽然在 NLOS 环境下其定位精度急剧下降,但是可以通过各种改进的 CHAN 算法来达到比较理想的效果。通过对 CHAN 算法的不断改进,它可以应用到更多复杂的定位环境中,例如眼下流行的 LTE 网络甚至以后的 4G、5G 网络环境中。以 CHAN 算法的优点及基于该算法上研究的开展,相信在未来蜂窝网络的定位中它能够有更好的应用前景。

参考文献:

- [1] 3GPP_TS_25_305. 3GPP TS group radio access network functional specification of location services - stage 2 [EB/OL]. 2002. <http://www.3gpp.org/ftp/specs/1>.
- [2] Silventoinen M I, Rantalainen T. Mobile station emergency locating in GSM [C]//Proc of IEEE international conference on personal wireless communications. India: IEEE, 1996: 232-238.
- [3] Chan Y T, Ho K C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(8): 1905-1915.
- [4] 陈晓维, 李校林. 蜂窝网络中基于 TDOA 的 CHAN 定位算法性能分析 [J]. 广东通信技术, 2007, 27(8): 66-68.
- [5] 郑飞, 郑继禹. 基于 TDOA 的 CHAN 算法在 UWB 系统 LOS 和 NLOS 环境中的应用研究 [J]. 电子技术应用, 2007, 33(11): 110-113.
- [6] Li Cong, Zhuang Weihua. Non-line-of-sight error mitigation in TDOA mobile location [C]//Proc of global telecommunications conference. San Antonio: IEEE, 2001: 680-684.
- [7] Al-Jazzar S, Caffery J, You H R. A scattering model based approach to NLOS mitigation in TOA location systems [C]//Proc of IEEE 55th vehicular technology conference. [s. l.]: IEEE, 2002: 861-865.
- [8] Carter G C. Coherence and time delay estimation [J]. Proceedings of IEEE, 1987, 75(2): 236-255.
- [9] 蔡永棋. NLOS 环境下的 TDOA 定位算法研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- [10] 章坚武, 唐兵, 秦峰. Chan 定位算法在三维空间定位中的应用 [J]. 计算机仿真, 2009, 26(1): 323-326.
- [11] 范平志, 邓平. 蜂窝无线定位技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [12] 张鹤峰. 蜂窝网络无线定位算法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- [13] Asplund H. A channel model for positioning [M]. Switzerland: [s. n.], 1998.
- [14] 段凯宇, 张力军. 一种在 NLOS 环境下提高精度的 TDOA 定位方法 [J]. 南京邮电学院学报: 自然科学版, 2005, 25(5): 15-19.
- [5] Chio Chan-Keong, Ting Sio-Weng, Tam Kam-Weng, et al. Radiation analysis for co-exisiting GSM900 and UMTS900 networks [C]//Proc of APSURSI. [s. l.]: IEEE, 2013: 1528-1529.
- [6] Wang Zongjie, Fan Shuju, Rui Yun. CDMA-FMT: a novel multiple access scheme for 5G wireless communications [C]//Proc of 19th international conference on digital signal processing. [s. l.]: [s. n.], 2014: 898-902.
- [7] 李晨. 滤波多音调制系统中降低码间干扰 (ISI) 的方法与技术研究 [D]. 济南: 山东大学, 2005.
- [8] 何贤杰. 滤波器组多载波系统信道估计技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [9] 魏慧玲, 高振明, 朱维红, 等. FMT 系统中信道估计的分析与仿真 [J]. 山东大学学报: 理学版, 2005, 40(3): 62-65.
- [10] 史晶晶, 杜栓义, 姚霏. WCDMA 信道估计的研究与仿真 [J]. 电子科技, 2008, 21(9): 43-45.
- [11] 刘涛. 第三代移动通信中 RAKE 接收技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006.
- [12] 王大勇, 周朝霞. HSDPA 连续导频信道估计原理与实现 [C]//2007 年通信理论与技术新发展—第十二届全国青年通信学术会议论文集 (下册). 出版地不详: 出版者不详, 2007: 141-148.
- [13] Li Yunxin, Huang Xiaojing. The generation of independent Rayleigh faders [C]//Proc of ICC 2000. [s. l.]: IEEE, 2000.
- [14] Moret N, Tonello A M. Design of orthogonal filtered multitone modulation systems and comparison among efficient realizations [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2010, 2010: 141865.

(上接第 60 页)

n.] 2009: 590-594.