

## 一种基于 TDOA/AOA 的混合三维定位算法

杨 浩<sup>1</sup>,周俊奇<sup>1,3</sup>,孟庆民<sup>2,3</sup>

- (1. 南京邮电大学 电子科学与工程学院,江苏 南京 210023  
2. 东南大学 移动通信国家重点实验室,江苏 南京 210096  
3. 南京邮电大学 宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室,江苏 南京 210003)

**摘要:**基于 Chan 算法,提出了一种改进的到达时间差(TDOA)和到达角(AOA)混合三维定位算法。该算法的主要思想是将 Chan 算法推广到三维空间,并在 TDOA 误差方程组里附加 AOA 误差方程来构建三维形式的非线性方程组。为了有效地克服 Chan 算法的二值根模糊性问题,先使用加权最小二乘法(WLS)获取初始解或者估计;接着根据初始解分量之间的相关性,并基于约束加权最小二乘(CWLS)算法,重新建立方程以对初始估计进行修正。通过计算拉格朗日因子,获取最终位置估计。仿真结果表明,与直接将 Chan 算法推广到三维相比,该算法具有较高的定位精度,其均方误差逼近克拉美-罗界(CRLB)。

**关键词:**到达时间差;到达角;三维;约束加权最小二乘;克拉美罗界

中图分类号:TN911.7

文献标识码:A

文章编号:1673-5439(2012)06-0031-06

## A Hybrid Three-dimensional Location Algorithm Based on TDOA and AOA

YANG Hao<sup>1</sup>, ZHOU Jun-qi<sup>1,3</sup>, MENG Qing-min<sup>2,3</sup>

- (1. College of Electronic Science & Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China  
2. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China  
3. Key Lab of Broadband Wireless Communication and Sensor Network Technology, Ministry of Education, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** An improved hybrid TDOA/AOA 3-dimensional location algorithm is proposed based on the Chan's algorithm. In the algorithm, Chan's algorithm is extended to 3-dimensional space, and the nonlinear location equations in a 3-dimensional form are constructed by adding an AOA error equation to the group of TDOA error equations. Firstly, initial solutions or estimations of these equations can be obtained by using the weighed least square (WLS) method. Then, due to the correlation between elements of the initialization estimations, the equation can be re-constructed by using the constrained weighted least squares (CWLS) algorithm to correct the initial estimations. By using the proposed method, the ambiguity of two roots in the Chan's algorithm can be eliminated effectively. At last, final location estimation will be obtained by calculating Lagrange gene. Simulation shows that, compared with modified Chan's algorithm which is directly extended to 3-dimensional space, the proposed algorithm can achieve location accuracy, and the mean square error approaches Cramer-Rao lower bound (CRLB).

**Key words:** time difference of arrival; angle of arrival; 3-dimensional; constrained weighted least squares algorithm; Cramer-Rao lower bound

收稿日期:2012-01-12;收稿日期:2012-03-19

基金项目:东南大学移动通信国家重点实验室开放课题(2011D17)和江苏高校优势学科建设工程资助项目

通讯作者:杨 浩 电话:(025)85866404 E-mail:yanghao@njupt.edu.cn

## 0 引言

随着移动通信技术的不断发展,基于用户位置的移动位置服务(Location-Based Services)开始受到越来越多的关注。美国联邦通信委员会颁布了 E-911 定位标准<sup>[1]</sup>,要求提供定位精度在 125 m 内的概率不小于 67%。对于蜂窝网中的移动台定位而言,到达时间差(TDOA)方法对网络的要求相对较低,因而是一种理想的定位方法。但是在非视距(NLOS)传播环境下,TDOA 方法的定位精度将会明显下降<sup>[2]</sup>。而随着智能天线阵在基站中的使用,服务基站能够测量到比较精确的到达角(AOA)值。尽管与 TDOA 测量类似,AOA 测量也会受多径传播,特别是非视距衰落等因素的影响,但只要天线阵列所提供的 AOA 测量值达到一定的精度,即在一定的误差阈值内,利用 TDOA 与 AOA 的混合定位方法,无线定位系统可以得到比单纯 TDOA 方法更好的精度<sup>[2-3]</sup>。在二维定位算法中,TDOA/AOA 混合算法及其改进算法目前已经成为研究的热点。文献[3-4]在 Chan 算法<sup>[5]</sup>的 TDOA 误差方程组中各附加了一个不同的 AOA 测量误差方程,获得了较高的定位精度。文献[6]提出了一种基于最大似然估计的 TDOA 和 AOA 混合估计算法,在 NLOS 环境下得到更为精确的结果。文献[2]提出了利用 Kalman 滤波算法对 AOA 值进行估计,并对求解变量进行了简化,减少了计算量,在 NLOS 下也取得了很好的定位性能。

考虑到实际应用中移动台以及基站分布在三维空间,特别是在重庆、贵阳这样的山地城市移动台所处的高度信息是十分有用的,因此研究分布式低计算复杂度的三维定位方法是有实际意义的。然而,研究移动台三维定位的文献比较少。文献[7]针对城市微蜂窝和微微蜂窝系统,构建了一种三维监听模型,通过研究移动台位置与监听信标包数量之间相关性,为移动台三维坐标估计提供了一种有效的途径。该算法适用于半径为几百米的微小区,定位精度较高,但是算法比较复杂,且对移动台在各小区分布的非均匀性比较敏感。

本文着重研究小区半径在几千米的宏蜂窝系统,针对典型的 NLOS 环境,在经典 Chan 算法<sup>[5]</sup>基础上提出了基于 TDOA 和 AOA 的混合三维定位算法,并且在第二次位置修正中采用约束加权最小二乘(CWLS)算法<sup>[8]</sup>代替了 Chan 算法中所使用的加权最小二乘(WLS)算法,有效地克服 Chan 算法的

二值根模糊性问题。

## 1 基于 TDOA/AOA 混合三维定位算法

Chan 算法<sup>[5]</sup>通过求解 TDOA 误差方程组获得移动台的二维位置估计值。基于 TDOA/AOA 混合三维定位算法的思想是将 Chan 算法推广至三维空间,并将 TDOA 误差方程组里附加一个 AOA 误差方程构建三维形式的非线性方程组,通过两次位置估计最终确定移动台的三维位置坐标。第一次位置估计是根据 WLS 算法来获取目标位置的初始解,第二次位置估计时考虑初始解分量之间的相关性而采用 CWLS 算法,重新建立方程来完成对第一次估计的修正。

### 1.1 定位场景

假定三维空间中任意分布着  $M$  个接收基站,采用天线阵列的各个基站可提供 AOA 测量值,待定位终端的坐标为,基站的坐标为  $(x, y, z)$ ,基站  $BS_i$  的坐标为  $(x_i, y_i, z_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, M$ ),其中  $BS_1$  为服务基站。为了减小计算量,不妨设定  $BS_1$  的坐标为  $(0, 0, 0)$ 。 $r_i$  表示为待定位移动台  $MS$  到  $BS_i$  的距离, $r_{i,1}$  为 TDOA 距离测量值, $c$  为电波传播速度。

### 1.2 混合三维定位的第一次估计

在 Chan 算法<sup>[5]</sup>的基础上,根据测量到的电波传播时间  $\tau_i$  可建立以下距离方程:

$$\begin{aligned} r_i^2 &= (c\tau_i)^2 \\ &= (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 \\ &= K_i - 2x_ix - 2y_iy - 2z_iz + x^2 + y^2 + z^2 \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $K_i = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2$ 。由于  $r_{i,1} = r_i - r_1$ ,因此式(1)可改写为:

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

其中,  $x_{i,1} = x_i - x_1$ ,  $y_{i,1} = y_i - y_1$ ,  $z_{i,1} = z_i - z_1$ 。

假定服务基站可以提供  $MS$  的 AOA 测量值,根据 AOA 测量值  $\alpha$  可建立方程:

$$\sin\alpha = \frac{|z - z_1|}{r_1} \quad (3)$$

令  $\mathbf{z}_a = [\mathbf{z}_p^T, r_1]^T$  为未知量,其中  $\mathbf{z}_p = [x, y, z]$ ,则可建立线性方程:

$$\mathbf{h} = \mathbf{G}_a \mathbf{z}_a \quad (4)$$

当存在测量误差时可得到  $MS$  位置对应的误差矢量:

$$\boldsymbol{\psi} = \mathbf{h} - \mathbf{G}_a \mathbf{z}_a^0 \quad (5)$$

其中,  $\mathbf{z}_a^0$  为  $MS$  的真实位置所对应的  $\mathbf{z}_a$  值,

$$\mathbf{h} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (r_{2,1}^2 - K_2 + K_1) \\ (r_{3,1}^2 - K_3 + K_1) \\ \vdots \\ (r_{M,1}^2 - K_M + K_1) \\ 2z_1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G}_a = \begin{bmatrix} -x_{2,1} & -y_{2,1} & -z_{2,1} & -r_{2,1} \\ -x_{3,1} & -y_{3,1} & -z_{3,1} & -r_{3,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -x_{M,1} & -y_{M,1} & -z_{M,1} & -r_{M,1} \\ 0 & 0 & 1 & -\sin\alpha \end{bmatrix}$$

TDOA 和 AOA 测量值的联合协方差矩阵为  $\mathbf{Q} = \text{diag}\{\sigma_{2,1}^2, \sigma_{3,1}^2, \dots, \sigma_{M,1}^2, \sigma_\alpha^2\}$ , 这里  $\sigma_{i,1}^2$  和  $\sigma_\alpha^2$  分别为各 TDOA 测量值和 AOA 测量值的方差。为使  $\mathbf{Q}$  中元素的量纲一致, 假定所测得的 AOA 测量值精度较高, 即其误差标准差  $\sigma_{\alpha_0}$  较小, 则 AOA 对应的距离误差标准差可表示为:

$$\sigma_\alpha \approx r_1 \sigma_{\alpha_0} \quad (6)$$

当 TDOA 和 AOA 测量误差较小时, 误差矢量  $\boldsymbol{\psi}$  的协方差矩阵:

$$\boldsymbol{\psi} = E[\boldsymbol{\psi}\boldsymbol{\psi}^T] = \mathbf{B}\mathbf{Q}\mathbf{B}^T \quad (7)$$

其中,  $\mathbf{B} = \text{diag}\{r_2^0, r_3^0, \dots, r_M^0, 1\}$ ,  $r_i^0$  为 MS 和第  $i$  个 BS 的实际距离。利用加权最小二乘算法, 可得到  $\mathbf{z}_a$  的初始值:

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_a &= \arg \min (\mathbf{h} - \mathbf{G}_a \mathbf{z}_a)^T \boldsymbol{\psi}^{-1} (\mathbf{h} - \mathbf{G}_a \mathbf{z}_a) \\ &= (\mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\psi} \mathbf{G}_a)^{-1} \mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\psi}^{-1} \mathbf{h} \end{aligned} \quad (8)$$

### 1.3 混合三维定位的第二次估计

在第一次估计过程中由于  $\boldsymbol{\psi}$  中含有不可知参数  $r_i^0$ , 可以先将  $\mathbf{Q}$  近似替代误差矢量  $\boldsymbol{\psi}$  的协方差矩阵, 利用得到的  $\mathbf{z}_a$  估计值就能求得新的矩阵  $\mathbf{B}$ , 进而通过第二次位置估计对初始估计进行修正。

考虑到  $\mathbf{z}_a$  的元素之间具有相关性, 即  $r_1^2 = x^2 + y^2 + z^2$ , 表示为矩阵形式:

$$\mathbf{z}_a^T \mathbf{P} \mathbf{z}_a = 0 \quad (9)$$

$$\text{其中, } \mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \text{。考虑约束加权最小二}$$

乘 (CWLS) 算法<sup>[8]</sup>, 引入拉格朗日函数

$$L(\mathbf{z}_a, \lambda) = (\mathbf{G}_a \mathbf{z}_a - \mathbf{h})^T \boldsymbol{\psi}^{-1} (\mathbf{G}_a \mathbf{z}_a - \mathbf{h}) + \lambda \mathbf{z}_a^T \mathbf{P} \mathbf{z}_a \quad (10)$$

其中,  $\lambda$  为拉格朗日乘数因子, 由  $\frac{\partial L(\mathbf{z}_a, \lambda)}{\partial \mathbf{z}_a} = 0$  可以得到:

$$\mathbf{z}_a = (\mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\psi}^{-1} \mathbf{G}_a + \lambda \mathbf{P})^{-1} \mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\psi}^{-1} \mathbf{h} \quad (11)$$

将式(11)代入式(9)中:

$$\begin{aligned} &(\mathbf{h}^T \boldsymbol{\psi}^{-1} \mathbf{G}_a) (\mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\psi}^{-1} \mathbf{G}_a + \lambda \mathbf{P})^{-1} \times \\ &\mathbf{P} (\mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\psi}^{-1} \mathbf{G}_a + \lambda \mathbf{P})^{-1} \mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\psi}^{-1} \mathbf{h} = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

注意到  $(\mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\psi}^{-1} \mathbf{G}_a)^{-1} \mathbf{P}$  可以对角化:

$$(\mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\psi}^{-1} \mathbf{G}_a)^{-1} \mathbf{P} = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda} \mathbf{U}^{-1} \quad (13)$$

其中,  $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}\{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4\}$ ,  $\gamma_i$  为矩阵  $(\mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\psi}^{-1} \mathbf{G}_a)^{-1} \mathbf{P}$  的特征值, 把式(13)代入  $(\mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\psi}^{-1} \mathbf{G}_a + \lambda \mathbf{P})^{-1}$  中得到:

$$\begin{aligned} &(\mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\psi}^{-1} \mathbf{G}_a + \lambda \mathbf{P})^{-1} \\ &= \mathbf{U} (\mathbf{I} + \lambda \mathbf{\Lambda})^{-1} \mathbf{U}^{-1} (\mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\psi}^{-1} \mathbf{G}_a)^{-1} \end{aligned} \quad (14)$$

将式(14)代入式(12)得:

$$\mathbf{e}^T (\mathbf{I} + \lambda \mathbf{\Lambda})^{-1} \mathbf{\Lambda} (\mathbf{I} + \lambda \mathbf{\Lambda})^{-1} \mathbf{f} = 0 \quad (15)$$

其中,  $\mathbf{e}^T = \mathbf{h}^T \boldsymbol{\psi}^{-1} \mathbf{G}_a \mathbf{U} = [e_1, e_2, e_3, e_4]$ ,

$$\begin{aligned} \mathbf{f} &= \mathbf{U}^{-1} (\mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\psi}^{-1} \mathbf{G}_a)^{-1} \mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\psi}^{-1} \mathbf{h} \\ &= [f_1, f_2, f_3, f_4]^T \end{aligned}$$

式(15)表示为代数形式, 即为:

$$\sum_{i=1}^4 \frac{e_i f_i \gamma_i}{(1 + \lambda \gamma_i)^2} = 0 \quad (16)$$

式(16)求解出的  $\lambda$  非唯一解, 因此要选取最优的  $\lambda$  值, 根据文献[9]的结论, 假设两次 LS 估计的位置分别为  $\mathbf{z}'_a$  和  $\mathbf{z}''_a$ , 因此得到:

$$\mathbf{z}''_a = [\mathbf{I} + \lambda (\mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\psi}^{-1} \mathbf{G}_a)^{-1} \mathbf{P}]^{-1} \mathbf{z}'_a \quad (17)$$

上式说明了第二步处理对第一步位置估计的修正过程, 如果满足正则条件:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (\lambda (\mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\psi}^{-1} \mathbf{G}_a)^{-1} \mathbf{P})^n = 0 \quad (18)$$

则  $\mathbf{z}''_a$  可展开成诺伊曼 (Neumann) 级数:

$$\mathbf{z}''_a = \mathbf{z}'_a + \sum_{n=1}^{\infty} (-\lambda (\mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\psi}^{-1} \mathbf{G}_a)^{-1} \mathbf{P})^n \mathbf{z}'_a \quad (19)$$

式(19)中的第二项为线性修正项, 为了避免级数发散, 因此拉格朗日乘数因子应取很小的值。最后, 把确定的  $\lambda$  值代入式(11), 就可得到最终的  $\mathbf{z}_a$  位置估计。

与基于 Chan 算法的 TDOA 定位算法相比, 本文在 TDOA 方程组中附加了一个 AOA 测量误差方程, 并且在第二次位置估计中采用 CWLS 算法, 不仅考虑了  $x, y, z, r_1$  之间的相关性, 同时避免了 Chan 算法固有的二值根模糊性问题, 使得算法能够有效地解决三维空间的位置估计问题。

### 1.4 混合三维定位的克拉美-罗界 (CRLB) 表示

克拉美-罗界 (CRLB) 可用于表征无偏估计方差的下限, 它给出了参数估计性能的最佳极限。本文

TDOA/AOA 混合定位算法的克拉美-罗界(CRLB)表示为:

$$CRLB = \left( \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \mathbf{z}_p} & \frac{\partial \alpha}{\partial \mathbf{z}_p} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1/\sigma_{i,1}^2 \mathbf{I}_{M-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 1/\sigma_\alpha^2 \mathbf{I}_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \mathbf{z}_p} & \frac{\partial \alpha}{\partial \mathbf{z}_p} \end{pmatrix}^T \right)^{-1} \quad (20)$$

其中,  $\alpha = \arcsin \frac{|z - z_1|}{r_1}$ ,

$$\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \mathbf{z}_p} = \begin{pmatrix} \frac{x_1 - x}{r_1} - \frac{x_2 - x}{r_2} & \dots & \frac{x_1 - x}{r_1} - \frac{x_M - x}{r_M} \\ \frac{y_1 - y}{r_1} - \frac{y_2 - y}{r_2} & \dots & \frac{y_1 - y}{r_1} - \frac{y_M - y}{r_M} \\ \frac{z_1 - z}{r_1} - \frac{z_2 - z}{r_2} & \dots & \frac{z_1 - z}{r_1} - \frac{z_M - z}{r_M} \end{pmatrix}^T$$
$$\frac{\partial \alpha}{\partial \mathbf{z}_p} = \begin{pmatrix} \frac{-(x_1 - x)(z_1 - z)}{r_1^2 \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2}} \\ \frac{-(y_1 - y)(z_1 - z)}{r_1^2 \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2}} \\ \frac{\sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2}}{r_1^2} \end{pmatrix}^T$$

## 2 仿真结果与分析

为了检验算法对移动台三维位置估计的性能,我们利用计算机进行仿真并分析仿真结果。本文将直接推广至三维空间的 Chan 算法记为“改进的 Chan 算法”,将第二次位置更新没有采用 CWLS 算法的 TDOA/AOA 方法记为“方法 1”,采用 CWLS 的方法记为“方法 2”。

具体的仿真环境和参数为:采用 7 个 BS 组成的典型蜂窝网络结构,图 1 所示为各小区的二维分布,小区半径取 3 km,基站高度服从(0,100)上的均匀分布。

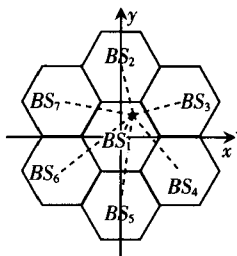


图 1 基站的二维位置分布

为了便于处理,假设所有基站对的 TDOA 系统测量误差均为独立同分布的高斯噪声,均值为 0,标准差为 0.1 μs(约 30 m)。信道环境参数参考

Greenstein 模型<sup>[10]</sup>,不同信道的  $T_1$  值如表 1 所示,并且假定 MS 与  $BS_1$  之间为 LOS,与其它基站之间为 NLOS。根据文献[11]的测量结果,AOA 系统测量误差为独立同分布的均值为 0,标准差为 0.01 ~ 0.09 rad 的高斯随机变量。MS 在服务小区内随机均匀分布。最终结果取 1 000 次仿真结果的平均值,定位误差评价指标采用均方根误差(RMSE)。

表 1 不同信道环境下  $T_1$  的取值

信道环境	闹市区	一般市区	郊区	远郊
$T_1/\mu\text{s}$	1.0	0.4	0.3	0.1

仿真结果分析如下:

### (1) 不同 NLOS 环境下定位性能比较

图 2 为不同 NLOS 环境参数对定位误差的影响。3 种算法在 NLOS 环境下随着  $T_1$  值的增大,定位的均方根误差也随之增大。其原因是 NLOS 引起的误差随着  $T_1$  值的增大而增大。其中,改进的 Chan 算法由于没有考虑 AOA 测量,表现出的定位精度和可靠性最差;而本文提出的方法 1 和方法 2 在 WLS 的加权矩阵中附加了 AOA 系统测量误差方程,有效地抑制了定位误差的增长,取得了较高的定位精度,从图 2 中可以看出,本文算法的均方根误差接近 CRLB。此外,随着信道环境的不断恶化,本文算法的误差增长速度也低于改进的 Chan 算法,因而具有更好的稳定性。

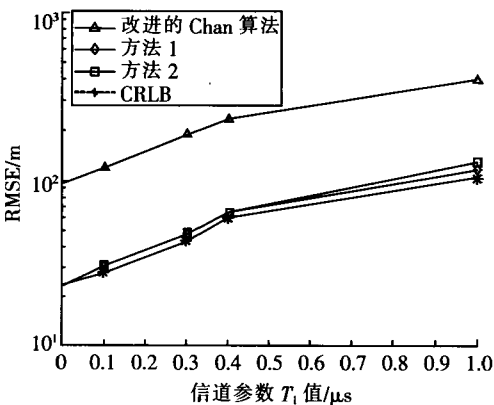


图 2 信道参数对定位性能的影响

### (2) AOA 标准差对定位性能的影响

图 3 所示为在郊区环境( $T_1 = 0.3 \mu\text{s}$ )时,定位的均方根误差随 AOA 增大而变化的情况。改进的 Chan 算法由于没有考虑 AOA,其误差并不发生变化,保持为一水平直线;而本文提出的方法 1 和方法 2,当 AOA 测量值越精确,定位性能的提高越大,并且在一定的 AOA 标准差内,算法性能都很大程度上优于改进的 Chan 算法性能。

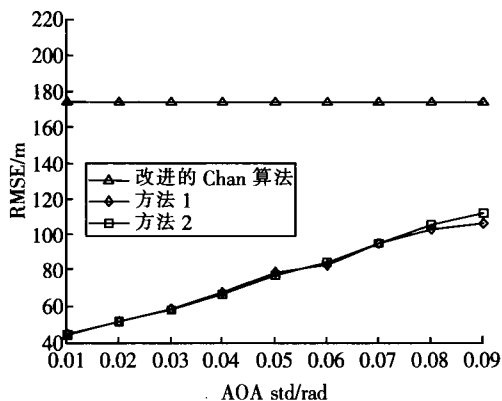


图3 AOA标准差对定位性能的影响

## (3) 小区半径大小对定位性能的影响

图4给出了在  $T_1 = 0.4 \mu\text{s}$ ,  $\sigma_{\alpha_0} = 0.09 \text{ rad}$  环境下,3种算法的定位均方根误差变化曲线。可以看出,它们的定位误差都随着小区半径的增大而增大,这是由于半径增大带来的 NLOS 误差变大引起的。可以看到,本文提出的算法的定位精度和可靠性明显优于改进的 Chan 算法,所引入的 AOA 参数在很大程度上降低了由半径增大产生的定位误差的影响。

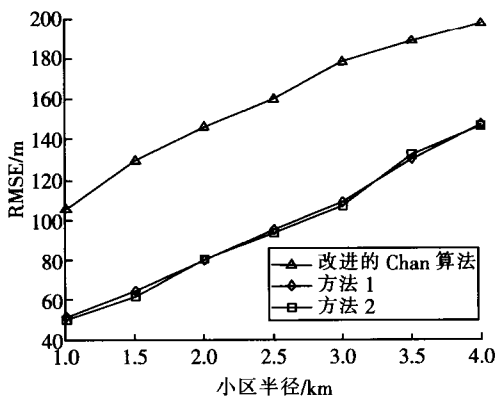


图4 小区半径大小对定位性能的影响

## (4) 不同方法定位误差的累积分布函数

图5显示了3种方法在  $T_1 = 0.4 \mu\text{s}$ ,  $\sigma_{\alpha_0} = 0.09 \text{ rad}$  时,定位误差的累积分布函数(CDF)。本文的两种方法都能保持基本不变的精度概率,并且都能很好地满足 E-911 定位标准的精度要求, RMSE 达到125 m精度的概率明显大于67%,并且性能优于改进的 Chan 算法。

可见,所研究算法性能要优于改进的 Chan 算法的定位性能,这也验证了所研究算法的正确性和可靠性。在算法的执行时间上,以 WLS 算法作为第二次估计算法的程序运行时间为 2.7 ms/次;而采用 CWLS 算法的运行时间为 26.2 ms/次,算法的运算量相对较大,如何进一步降低算法执行时间将是今

后研究的重点。

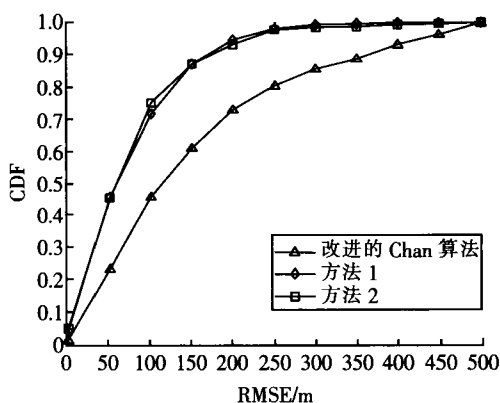


图5 不同方法定位误差的累积分布函数

## 3 结束语

本文对三维空间定位问题进行了研究,将 TDOA/AOA 定位算法推广应用到三维空间的目标定位中。通过仿真分析,得出 TDOA/AOA 算法相比单纯的 TDOA 算法能够获得更高的定位精度。此外,本文采用 CWLS 算法,克服了 Chan 算法的二值根问题,具有更高的稳健性和可靠性。

## 参考文献:

- [1] REED J, RAPPAPORT T. An overview of the challenges and progress in meeting the E-911 requirement for location service [J]. IEEE Communication Magazine, 1998, 36(4): 30-37.
- [2] 段凯宇, 张力军. 基于到达角 Kalman 滤波的 TDOA/AOA 定位算法 [J]. 电子与信息学报, 2006, 28(9): 1710-1713.  
DUAN Kaiyu, ZHANG Lijun. A TDOA/AOA location algorithm based on Kalman filtering angle of arrival [J]. Journal of Electronic & Information Technology, 2006, 28(9): 1710-1713. (in Chinese)
- [3] 邓平, 李莉, 范平志. 一种 TDOA/AOA 混合定位算法及其性能分析 [J]. 电波科学学报, 2002, 17(6): 633-636.  
DENG Ping, LI Li, FAN Pingzhi. A hybrid TDOA/AOA location algorithm and its performance analysis [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2002, 17(6): 633-636. (in Chinese)
- [4] MA C L, KLUKAS R, LACHAPELLE G. An enhanced two-step least squared approach for TDOA/AOA wireless location [C] // ICC. 2003, 2: 987-991.
- [5] 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.
- [6] CONG L, ZHUANG W. Hybrid TDOA/AOA mobile user location for wideband CDMA cellular systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 31(1): 439-447.
- [7] GHABOOSI N, JAMALIPOUR A. 3D location estimation in urban

cellular systems using the overhearing model [ C ] // IEEE ICC. 2011:1 - 5.

[ 8 ] CHEUNG K W, SO H C, MA W K, et al. Least squares algorithms for time of arrival based mobile location [ J ]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 42 ( 4 ) : 1121 - 1128.

[ 9 ] HUANG Y, BENESTY J, ELKO G W, et al. Real-time passive source localization: A practical linear-correction least-squares approach [ J ]. IEEE Transactions on Speech Audio Processing, 2001, 9 ( 8 ) : 943 - 956.

[ 10 ] GREENSTEIN L J. A new path-gain/delay spread propagation model for digital cellular channels [ J ]. IEEE Transactions on VT, 1997, 46 ( 2 ) : 177 - 484.

[ 11 ] KLUKAS R, FATTOUCHE M. Line-of-sight angle of arrival estimation in the outdoor multipath environment [ J ]. IEEE Transactions on VT, 1998, 47 ( 1 ) : 342 - 351.

作者简介:



杨 浩 ( 1969 - ), 男, 江苏如皋人。南京邮电大学电子科学与工程学院讲师, 博士。研究方向为信号处理、图像处理。

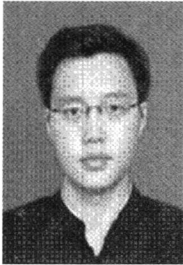
周俊奇 ( 1988 - ), 男, 江苏盐城人。南京邮电大学宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室硕士研究生。研究方向为无线通信技术。

孟庆民 ( 1965 - ), 男, 江苏滨海人。南京邮电大学宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室副教授, 博士。研究方向为信号处理、无线通信技术。

( 本文责任编辑: 胡长贵 )

( 上接第 30 页 )

作者简介:



焦东来 ( 1977 - ), 男, 河北安国人。南京邮电大学地理与生物信息学院讲师, 博士。主要研究方向为空间信息可视化、空间数据共享与互操作。

苗立志 ( 1981 - ), 男, 山东苍山人。南京邮电大学地理与生物信息学院讲师, 博士。( 见本刊 2012 年第 1 期第 88 页 )

朱彩英 ( 1963 - ), 女, 江苏昆山市人。苏州市数字城市工程研究中心博士。主要研究方向为地理信息系统、雷达摄影测量。

( 本文责任编辑: 胡长贵 )