

## 基于B-LM圆环模型的NLOS信息 约束单基站定位算法

田增山 舒月月\* 周牧 李勇 李泽

(重庆邮电大学移动通信技术重庆市重点实验室 重庆 400065)

**摘要:** 针对当前室外蜂窝网多基站定位需要基站之间时间同步、数据同步的要求, 以及NLOS环境造成的非服务区基站的信号可测性问题, 该文提出基于B-LM圆环模型的NLOS信息约束单基站定位算法。首先根据散射体、目标和基站间的几何位置关系以及NLOS多路径信息构建定位方程, 然后将定位方程转化为最小二乘优化问题, 之后基于LM算法海森矩阵修正思想和拟牛顿2阶偏导构造思想提出B-LM算法, 保证算法收敛于最优解, 以得到目标位置。仿真结果表明, 所提单基站定位算法能在宏蜂窝NLOS环境实现较高的定位精度。

**关键词:** 单基站定位; 非视距; 圆环模型; B-LM算法; 最小二乘算法

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)10-2316-07

DOI: [10.11999/JEIT171222](https://doi.org/10.11999/JEIT171222)

## Single Base Station Localization Algorithm Based on B-LM Ring of Scattering Model Using NLOS Information

TIAN Zengshan SHU Yueyue ZHOU Mu LI Yong LI Ze

(Chongqing Key Laboratory of Mobile Communication Technology, Chongqing University of  
Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** Considering the requirements of time and data synchronization in multi-BS (Base Station) positioning in the current outdoor cellular network and the problem of signals' detectability in area without service BS due to NLOS (Non-Line-Of-Sight) environment, a single base station localization algorithm based on B-LM (Broyden Fletcher Goldfarb Shanno-Levenberg Marquard) ring of scattering model using NLOS information is proposed. Firstly, the localization objective equation is constructed according to the geometric positions of the scatterers, the target, the base station and the NLOS multipath information. Then, the localization equation is transformed into the least square optimization problem. Finally, the B-LM algorithm based on Hessian matrix modification methodology in LM algorithm and the construction of second order partial derivative in quasi-Newton algorithm is proposed, which ensures the localization algorithm converges to the optimal solutions to obtain the target's location. The simulation results show that the proposed single base station localization algorithm can achieve a high positioning accuracy in the NLOS environment for macrocell.

**Key words:** Single base station localization; Non-Line-Of-Sight (NLOS); Ring of scattering model; B-LM algorithm; Least square algorithm

收稿日期: 2017-12-22; 改回日期: 2018-06-11; 网络出版: 2018-07-30

\*通信作者: 舒月月 shuyueyue6@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61771083, 61704015), 长江学者和创新团队发展计划(IRT1299), 重庆市基础科学与前沿技术研究项目(cstc2017jcyjAX0380, cstc2015jcyjBX0065), 重庆市高校优秀成果转化资助项目(KJZH17117)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61771083, 61704015), The Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (IRT1299), The Fundamental Science and Frontier Technology Research Project of Chongqing (cstc2017jcyjAX0380, cstc2015jcyjBX0065), The University Outstanding Achievement Transformation Project of Chongqing (KJZH17117)

## 1 引言

随着1996年美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)颁布E911定位需求以来, 现代移动通信系统定位技术作为一类新型的导航、定位方式, 受到研究学者的广泛关注<sup>[1]</sup>。当前主流的蜂窝网定位技术主要包括基于信号到达角(Angle Of Arrival, AOA)、到达时间(Time Of Arrival, TOA)、到达时间差(Time Difference Of Arrival, TDOA)、信号接收强度(Received Signal Strength, RSS), 以及多种参数融合的定位方法<sup>[2-6]</sup>。在传统的蜂窝网定位技术中, 实现移动台(Mobile Station, MS)定位通常需要3个基站(Base Station, BS), 或者至少存在一条可视路径(Line Of Sight, LOS)。然而, 由于蜂窝网通信环境十分复杂, 基站和移动台间很少存在可视路径, 同时, 非服务区基站接收信号很不稳定, 导致信号存在可测性问题。因此, 基于单基站(服务基站)的蜂窝网定位技术应运而生。

相比于多基站联合定位, 单基站定位能够减少多基站定位系统中信息交换负荷, 也不存在多基站之间的时间以及数据同步问题, 同时D2D网络<sup>[7]</sup>的发展对研究单基站定位也有着重要意义。然而, 由于非视距(None-Line-Of-Sight, NLOS)传播的影响, 基于单站的定位技术的研究成果较少, 因此对单基站定位进行更加深入的研究显得更为重要。文献<sup>[8]</sup>基于单次散射双向移动信道模型, 联合AOA, TOA和离波方向, 即离开角(Angle Of Departure, AOD)构建定位模型, 实现移动台定位, 然而由于移动端的AOD相比于基站侧的参数估计更为困难, 因此限制了算法的实用性。文献<sup>[9]</sup>假设散射体与MS在同一直线上, 并以此建立定位方程来实现移动台的位置估计, 但散射体的这种特殊分布很难获得与验证。文献<sup>[10]</sup>基于NLOS误差总是导致测量的距离大于实际传播距离的思想, 利用最短的传播路径近似可视路径计算目标位置(文中简称方法A2)以改进传统的单基站定位方法(简称方法A1), 但由于未考虑散射体信息, 因此定位精度较差。

通常, 丰富的散射体信息可以有效地提高定位精度<sup>[9]</sup>, 因此, 本文提出基于B-LM圆环模型的NLOS信息约束单基站定位算法。该方法在基站侧利用AOA, TOA以及圆环模型几何关系建立定位方程, 将圆环模型中丰富的散射体分布特性应用到定位建模中, 增加用于单基站定位的信息量, 并巧妙地将定位问题转化为最小二乘问题, 利用B-LM算法求解目标函数, 从而实现NLOS环境下目标的精确定位。本文通过将NLOS多径信号作为有利的

定位信号, 并充分利用散射体分布特性实现单站定位, 跳出传统的抑制NLOS误差的思想。同时, 提出的B-LM算法收敛快速, 使本文的单站定位算法具有较高的定位精度。

## 2 系统模型描述

当前, 被广泛研究的宏蜂窝散射模型主要包括圆环模型(Ring Of Scattering, ROS)、圆盘模型(Disk Of Scattering, DOS)和高斯模型(Gaussian Scatter Density Model, GSDM)<sup>[11-14]</sup>, 其中圆环模型是最经典的宏蜂窝散射模型, 该模型以“单环”为名由Shiu等人<sup>[11]</sup>于2000年首次提出, 并经Abdi等人<sup>[15]</sup>进一步完善和验证, 研究表明圆环模型适用于描述基站处于较高位置且周围不存在障碍物, 而MS则被周围散射体包围的环境, 因此能较合理地模拟农村和郊区地形<sup>[16]</sup>, 圆环模型如图1所示, 散射体均匀地分布在以MS为圆心的圆环上, 圆环半径为 $R$ , 信号经散射体单次折射或散射后到达基站, BS和MS间直射路径被散射体遮挡, 因此不存在LOS路径。在图1中,  $\beta$ 为离开角, 服从 $[0, 2\pi]$ 的均匀分布,  $\alpha$ 为到达角, 目标和基站之间的距离为 $D$  ( $D \gg R$ )。

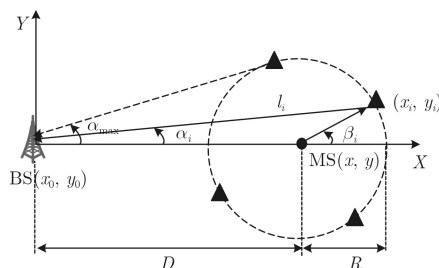


图1 圆环模型

设基站位于坐标原点, 目标位置为 $(x, y)$ , 散射体坐标为 $(x_i, y_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ), 根据基站、散射体和目标几何位置关系, 信号的第 $i$ 条传播路径长度可以表示为

$$L_i = \sqrt{(x - l_i \cdot \cos \alpha_i)^2 + (y - l_i \cdot \sin \alpha_i)^2} + l_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

其中,  $L_i = c\tau_i$ ,  $N$ 为散射路径数,  $l_i$ 为信号在基站和散射体间传播的路径长度,  $\tau_i$ 为信号传播的到达时间,  $c = 3 \times 10^8$  m/s。

## 3 基于B-LM圆环模型的NLOS信息约束单基站定位算法

### 3.1 目标定位模型构建

在第2节中, 式(1)共有 $N$ 个方程,  $N + 2$ 个未知变量, 此方程为欠定方程, 通常直接求解较为困

难。本文根据散射体圆环模型特性,即MS与周围散射体间信号传播距离相等,引入式(2),从而将欠定方程转化为易于求解的超定方程。

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{(x - l_i \cdot \cos \alpha_i)^2 + (y - l_i \cdot \sin \alpha_i)^2} \\ &= L_i - l_i \end{aligned} \quad (2)$$

由式(2)可得

$$L_j - l_j = L_{j+1} - l_{j+1}, \quad j = 1, 2, \dots, N-1 \quad (3)$$

联合式(1),式(3),总的方程数增加到 $2N-1$ 个,当散射路径数大于3时(这在现实环境中很容易满足),定位方程变为超定方程。由于信号的NLOS传播,通常基站对AOA与TOA的估计存在测量误差,因此式(1),式(3)并不总是成立。本文将确定性的方程求解转化为优化问题求解,改写式(1),式(3)为

$$\left. \begin{aligned} v_i(\mathbf{X}) &= \sqrt{(x - l_i \cdot \cos \alpha_i)^2 + (y - l_i \cdot \sin \alpha_i)^2} + l_i - L_i, \\ & \quad i = 1, 2, \dots, N \\ \delta_j(\chi) &= l_{j+1} - l_j - L_{j+1} + L_j, j = 1, 2, \dots, N-1 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中,  $\mathbf{X} = [x, y, \mathbf{l}]^T$ ,  $\mathbf{l} = [l_1, l_2, \dots, l_N]$ ,  $\chi = \mathbf{l}$ ,  $v_i, \delta_j$ 为残差。

因此,对目标的位置估计可以通过最小化式(5)所示目标函数得到

$$\begin{aligned} \psi(\mathbf{X}) &= \frac{1}{2} \sum_{p=1}^{2N-1} \varphi_p^2(\mathbf{X}) \\ &= \frac{1}{2} (v_1, v_2, \dots, v_N, \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_{N-1}) \\ & \quad \cdot (v_1, v_2, \dots, v_N, \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_{N-1})^T \end{aligned} \quad (5)$$

### 3.2 目标可行域分析

在本文定位算法中,目标和散射体位置是未知的,信号经多径传播的最小传播距离为 $L_{\min} = c\tau_{\min}$ 。因此,MS在以BS为圆心, $L_{\min}$ 为半径的圆内,其不同于LOS环境下MS在圆上的情况,同时,由于本文利用单基站进行定位,无法通过多个基站估计的TOA形成的圆盘的公共部分确定目标出现的位置。基于此,本文利用多径信号的AOA对MS出现的位置进行有效约束,使得可行域搜索范围减小。从图1中可以看到, $\alpha_{\max}$ 为基站端到达角的最大角度扩展,由 $D$ 和 $R$ 决定,可以表示为 $\alpha_{\max} \approx \arcsin(R/D) \approx R/D$ ,因此,最大、最小到达角将MS限制在圆心角为 $\theta$ 的扇形区域内,图2所示的阴影扇形区域即是目标的可行域。

图2中的 $\theta, \theta_1, \theta_2$ 可以表示为

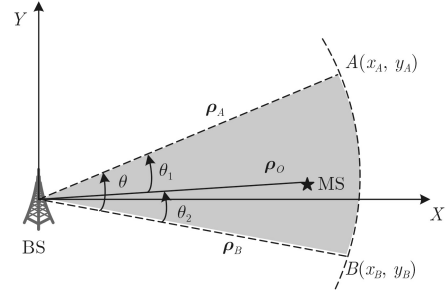


图2 目标可行域区域

$$\left. \begin{aligned} \theta &= |\alpha_{\max}| + |\alpha_{\min}| \\ \theta_1(x, y) &= \arccos \frac{\boldsymbol{\rho}_A \cdot \boldsymbol{\rho}_O}{|\boldsymbol{\rho}_A| |\boldsymbol{\rho}_O|} \\ \theta_2(x, y) &= \arccos \frac{\boldsymbol{\rho}_B \cdot \boldsymbol{\rho}_O}{|\boldsymbol{\rho}_B| |\boldsymbol{\rho}_O|} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式(6)中, $\theta_1(x, y), \theta_2(x, y)$ 表示 $\theta_1, \theta_2$ 是关于 $(x, y)$ 的函数,向量 $\boldsymbol{\rho}_A, \boldsymbol{\rho}_B, \boldsymbol{\rho}_O$ 表示为

$$\left. \begin{aligned} \boldsymbol{\rho}_A &= (x_A, y_A) = (L_{\min} \cdot \cos \alpha_{\max}, L_{\min} \cdot \sin \alpha_{\max}) \\ \boldsymbol{\rho}_B &= (x_B, y_B) = (L_{\min} \cdot \cos \alpha_{\min}, L_{\min} \cdot \sin \alpha_{\min}) \\ \boldsymbol{\rho}_O &= (x, y) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

因此,图2的阴影扇形区域可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{x^2 + y^2} &\leq L_{\min} \\ \theta_1(x, y) &\leq \theta \\ \theta_2(x, y) &\leq \theta \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

同时,根据几何关系,基站和散射体间的反射路径长度 $l_i$ 满足 $l_i \leq L_{\max}$ 。则目标可行域的数学表达记作 $g(\mathbf{X})$ :

$$\begin{aligned} g(\mathbf{X}) &= \left\{ \mathbf{X} \mid \sqrt{x^2 + y^2} \leq L_{\min}, \theta_1(x, y) \leq \theta, \right. \\ & \quad \left. \theta_2(x, y) \leq \theta, l_i \leq L_{\max} \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

综上所述,本文将定位问题转化为求解式(10)所示最小二乘问题:

$$\left. \begin{aligned} \min \quad \psi(\mathbf{X}) &= \frac{1}{2} \sum_{p=1}^{2N-1} \varphi_p^2(\mathbf{X}) \\ \text{s.t.} \quad \mathbf{X} &\in g(\mathbf{X}) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

### 3.3 B-LM算法

高斯牛顿法、LM(Levenberg-Marquard)算法是求解式(10)的经典优化算法,考虑到高斯牛顿法难以收敛,本文选择LM算法<sup>[17]</sup>,LM算法利用式(11)迭代求出最优解。

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{X}_k + \lambda_k \boldsymbol{\delta}_k \quad (11)$$

其中, $\lambda_k$ 为第 $k$ 次搜索步长, $\boldsymbol{\delta} = (\delta_x, \delta_y, \delta_{r_i})^T$ 为目标函数下降方向,表示为

$$\boldsymbol{\delta} = -(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \varepsilon \mathbf{I})^{-1} \mathbf{J}^T \boldsymbol{\varphi} \quad (12)$$

式(12)中,  $\mathbf{I}$ 为单位矩阵,  $\varepsilon$ 为正数参数因子, 通过选取适当的正数, 可以保证海森矩阵  $\mathbf{H} = \mathbf{J}^T \mathbf{J}$  特征值大于零, 从而控制海森矩阵出现奇异或接近奇异的情况。当目标函数减小或增大时,  $\varepsilon$ 随着减小或者增大  $\sigma$  倍以保证海森矩阵的正定性,  $\varphi = [\varphi_1(\mathbf{X}), \varphi_2(\mathbf{X}), \dots, \varphi_{2N-1}(\mathbf{X})]^T$ ,  $\mathbf{J}$ 为雅克比矩阵, 表示为

$$\mathbf{J} = [\nabla\varphi_1(\mathbf{X}), \nabla\varphi_2(\mathbf{X}), \dots, \nabla\varphi_p(\mathbf{X}), \dots, \nabla\varphi_{2N-1}(\mathbf{X})]^T \quad (13)$$

其中,  $\nabla\varphi_p(\mathbf{X}) = \frac{\partial\varphi_p}{\partial\mathbf{X}} = \left[ \frac{\partial\varphi_p}{\partial x}, \frac{\partial\varphi_p}{\partial y}, \frac{\partial\varphi_p}{\partial l_1}, \dots, \frac{\partial\varphi_p}{\partial l_N} \right]$  ( $p = 1, 2, \dots, 2N-1$ )。

LM算法在求解非线性最小二乘问题时, 利用1阶导数来近似海森矩阵, 忽略了其2阶项, 使得残差较大时, 算法很难收敛。因此, 本文结合拟牛顿和LM算法提出B-LM算法。所提B-LM算法特点是: 采取LM算法保证海森矩阵为正定矩阵的思想, 同时利用拟牛顿中BFGS算法<sup>[18]</sup>, 用目标函数1阶偏导的增量和变量的增量信息近似海森矩阵的2阶项, 使算法有效收敛于最优解, 保证定位精度。在B-LM算法中, 目标函数下降方向改写为

$$\delta = -(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \mathbf{B} + \varepsilon \mathbf{I})^{-1} \mathbf{J}^T \varphi \quad (14)$$

其中,  $\mathbf{B}$ 根据式(15)进行更新:

$$\mathbf{B}_{k+1} = \mathbf{B}_k + \frac{\mathbf{q}_k \mathbf{q}_k^T}{\mathbf{q}_k^T \mathbf{p}_k} - \frac{\mathbf{B}_k \mathbf{p}_k \mathbf{p}_k^T \mathbf{B}_k}{\mathbf{p}_k^T \mathbf{B}_k \mathbf{p}_k} \quad (15)$$

式中,  $k$ 为迭代次数,  $\mathbf{q}_k = \mathbf{X}_{k+1} - \mathbf{X}_k$ ,  $\mathbf{p}_k = \nabla\psi(\mathbf{X}_{k+1}) - \nabla\psi(\mathbf{X}_k)$ ,  $\nabla\psi(\mathbf{X}_k) = \mathbf{J}_k^T \varphi_k$ 为目标函数的1阶偏导。本文B-LM算法伪代码描述如表1所示。

## 4 算法仿真与性能分析

为了分析本文所提的单站定位算法的性能, 将本文方法与传统的单站定位方法(方法A1)和改进的单站定位方法(方法A2)进行对比。假设基站位于坐标原点, 目标位于ROS圆心, 坐标为(1000, 0), AOA, TOA的测量误差均为零均值的高斯白噪声, 标准差分别记作 $\sigma_{\text{AOA}}, \sigma_{\text{TOA}}$ , 共进行1000次独立仿真实验。

### 4.1 算法参数比较

**4.1.1 ROS半径和散射路径数** 为了分析ROS半径与散射路径数对本文算法定位性能的影响, AOA, TOA误差的标准差分别设置为 $\sigma_{\text{AOA}}=2^\circ$ ,  $\sigma_{\text{TOA}}=10$  m。仿真结果如图3所示, 从图中可以看到, 随着半径的增大, 定位精度略有改善, 主要原因是当目标和基站间信号传播距离不变时, 半径增大, 基站和散射体间反射路径长度 $l_i$ 减小。由图1以及式(4)可

表1 B-LM算法伪代码

输入:	每条路径到达时间 $\tau_i$ 和到达角 $\alpha_i$ ;
输出:	目标位置 $(x, y)$ ;
(1)	选取可行域内目标初始位置 $\mathbf{X} \in \text{int } \mathbf{g}(\mathbf{X})$ , 设置算法参数 $\varepsilon = 0.01$ , 尺度因子 $\sigma = 10$ , $\mathbf{B} = \mathbf{I}$ , 最大容忍误差 $\xi = 10^{-3}$ 和最大迭代次数 $T = 50$ ;
(2)	for $k = 1 : T$
(3)	计算 $\psi(\mathbf{X}_k)$ , $\nabla\psi(\mathbf{X}_k)$ , $\mathbf{J}_k$ ;
(4)	根据式(14)更新迭代方向 $\delta_k$ ;
(5)	根据Armijo准则 <sup>[17]</sup> 确定搜索步长 $\lambda_k$ , 根据式(11)更新 $\mathbf{X}_{k+1}$ ;
(6)	计算下一时刻目标函数1阶偏导 $\nabla\psi(\mathbf{X}_{k+1})$ , 计算 $\mathbf{q}_k$ 和 $\mathbf{p}_k$ ;
(7)	根据式(15)更新 $\mathbf{B}_{k+1}$ ;
(8)	计算 $\psi(\mathbf{X}_{k+1})$ ;
(9)	if $\psi(\mathbf{X}_{k+1}) < \psi(\mathbf{X}_k)$ then
(10)	if $\ \Delta\mathbf{X}_k\ _2 \leq \xi$ then
(11)	$\mathbf{X} = \mathbf{X}_{k+1}$ and break;
(12)	else
(13)	$\mu := \mu/\sigma$ , $k := k + 1$ 并且返回第3行;
(14)	end if
(15)	else
(16)	if $\ \Delta\mathbf{X}_k\ _2 \leq \xi$ then
(17)	$\mathbf{X} = \mathbf{X}_k$ and break;
(18)	else
(19)	$\mu := \mu\sigma$ , $k := k + 1$ , 并且返回第3行;
(20)	end if
(21)	end if
(22)	end for

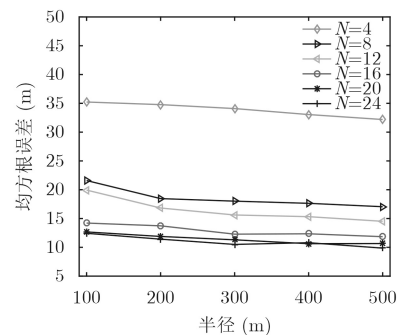


图3 圆环半径与散射路径数对算法性能的影响

知, 在相同的AOA误差条件下,  $l_i \cdot \cos \alpha_i$ 和 $l_i \cdot \sin \alpha_i$ 造成的误差会减小, 从而使得定位精度提高。同时可以看到算法定位精度随着散射路径数的增加逐渐提高。

**4.1.2 AOA误差和TOA误差** 当ROS半径不变时, BS, MS间距离 $D$ 对角度扩展和时延扩展影响较大。图4给出了半径和散射路径数分别为 $R = 100$  m,  $N = 8$ 的条件下,  $D$ 取不同值时, 定位精度随AOA, TOA

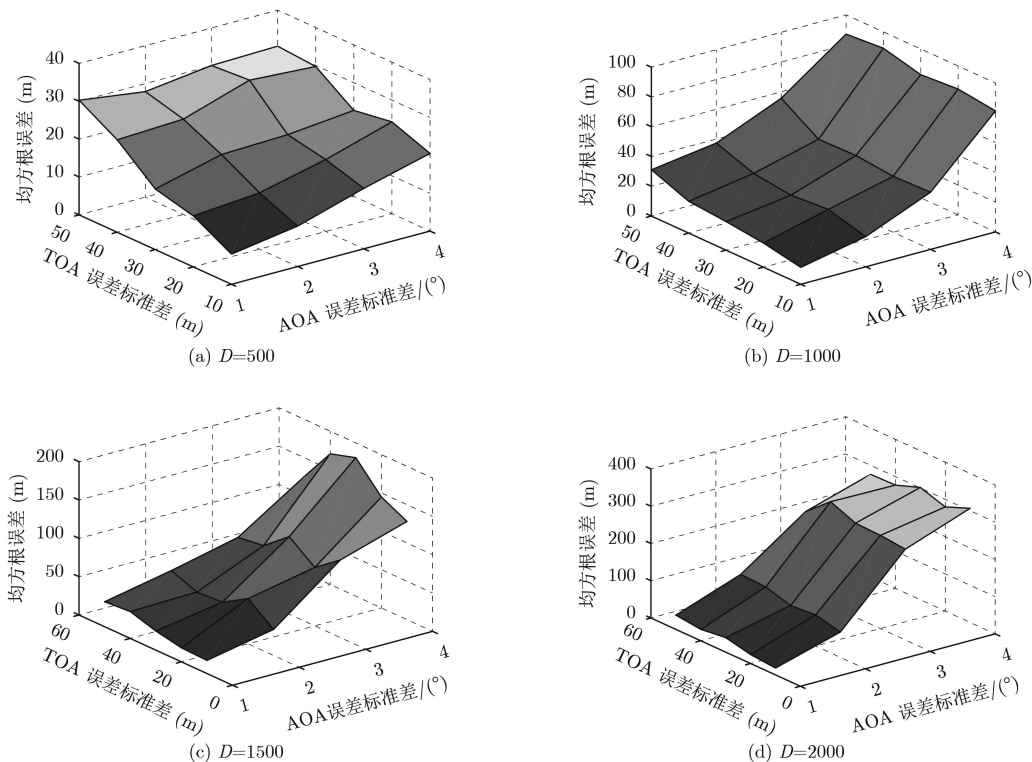


图4 AOA, TOA误差对算法性能的影响

误差的变化情况。从图中可以看到，本文算法的定位精度随着AOA, TOA误差的减小逐渐提高，当  $D$  较小时，如图4(a)，TOA误差对算法精度的影响较AOA误差的影响大，随着  $D$  逐渐增大，AOA误差的影响变大，而TOA误差的影响不再明显。

**4.1.3 B-LM算法与LM算法比较** 图5和图6给出了本文所提的B-LM算法与传统LM算法的在不同  $T$  下定位性能箱线图对比以及  $T=50$  情况下两算法收敛时的迭代情况，从图5中可以看到，在最大迭代次数较小情况下，由于所提的B-LM算法近似求取了

海森矩阵的2阶项，减小了残差误差的影响，因此相比于传统的LM算法具有更高的定位精度。随着最大迭代次数增加，LM算法定位精度逐渐提高，但其性能仍比B-LM算法差。图6显示在最大迭代次数均为50时，B-LM算法与LM算法收敛时平均迭代次数分别约为10和22，前者收敛速度明显快于后者，可见，本文所提的B-LM算法能够以较快速度收敛于最优解，同时保证较高的定位精度。

**4.2 算法性能比较**

图7给出在相同环境下，即  $D=1000\text{ m}$ ,  $R=100\text{ m}$ ,  $N=8$  时，传统的单基站定位算法A1和A2算法与本文所提单基站定位算法在大、小TOA误差和

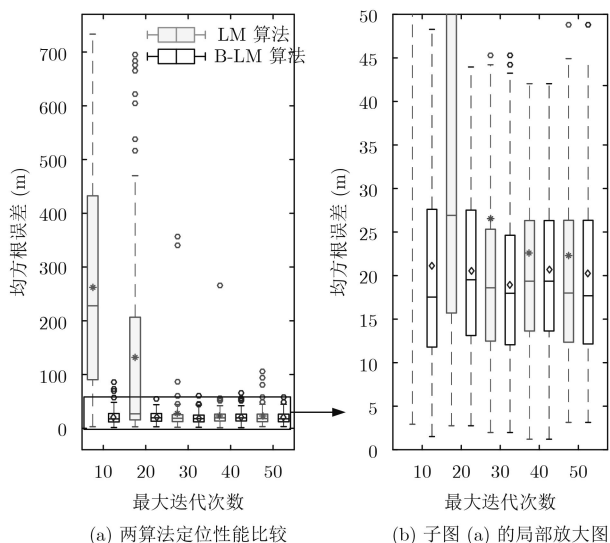


图5 B-LM算法与LM算法在不同最大迭代次数下的定位性能

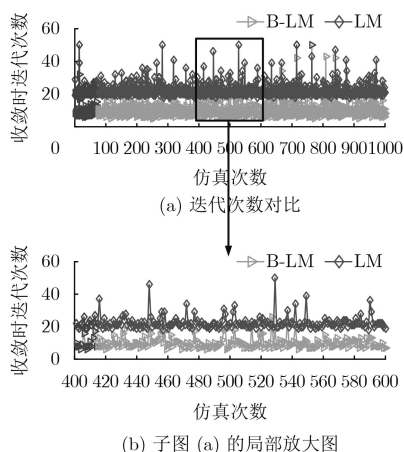


图6 B-LM算法与LM算法收敛时的迭代次数对比图

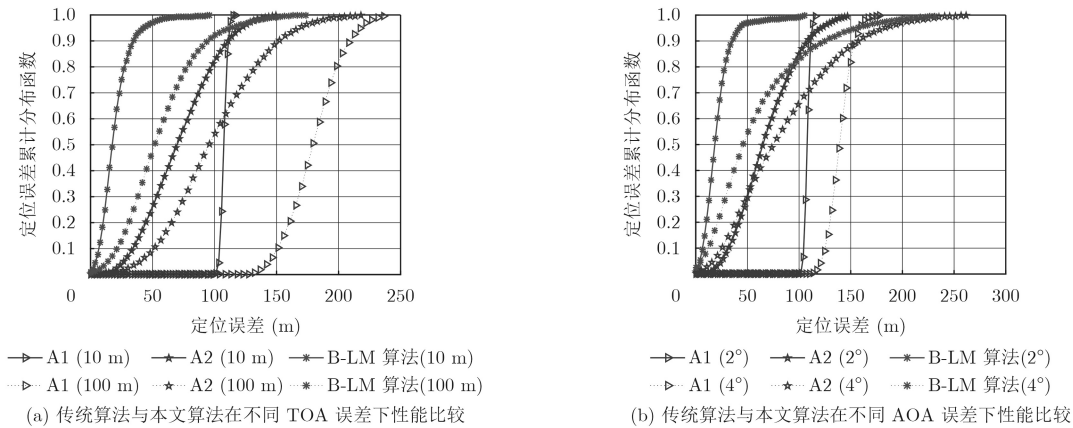


图7 传统算法与本文算法性能比较

AOA误差情况下的误差累积概率分布(CDF)曲线对比图。从图7(a)中可以看到,本文算法在大、小TOA误差情况下定位精度均明显优于传统的A1, A2算法,同时大误差点明显少于A1, A2算法。图7(b)显示AOA误差对本文定位精度影响稍大一些,但仍优于A1和A2算法,能够保持较高的定位精度。由于本文单基站算法充分利用了NLOS路径的信息,有效降低了NLOS误差对定位精度的影响,同时利用散射模型,使得本文算法对多径误差的敏感性降低。

## 5 结束语

本文基于单反射圆环模型,提出基于B-LM算法的NLOS信息约束单基站定位算法。首先利用NLOS路径信号参数及基站、目标和散射体间几何位置关系构建定位模型,将定位问题转化为最小二乘优化问题后,利用B-LM算法快速搜索优化问题最优解,得到目标位置。由于将NLOS误差直接运用到目标位置解算,避免了复杂的NLOS误差抑制算法研究,同时充分运用散射体信息,利用单基站即可实现NLOS环境下目标定位,避免了多基站时间、数据同步的问题。通过与传统的单站算法进行比较,本文算法具有更高的定位精度。

## 参考文献

- [1] 王建辉, 陈乐然, 胡捍英. 一种新的蜂窝网NLOS误差抑制算法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(6): 1424–1427. doi: [10.3724/SP.J.1146.2006.01471](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2006.01471).  
WANG Jianhui, CHEN Leran, and HU Hanying. A new algorithm to mitigate NLOS errors in cellular networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(6): 1424–1427. doi: [10.3724/SP.J.1146.2006.01471](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2006.01471).
- [2] GARCIA N, WYMEERSCH H, LARSSON E G, *et al*. Direct localization for massive MIMO[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2017, 65(10): 2475–2487.

doi: [10.1109/TSP.2017.2666779](https://doi.org/10.1109/TSP.2017.2666779).

- [3] ABU-SHABAN Z, ZHOU Xiangyun, and ABHAYAPALA T D. A novel TOA-based mobile localization technique under mixed LOS/NLOS conditions for cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(11): 8841–8853. doi: [10.1109/TVT.2016.2517151](https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2517151).
- [4] COMPAGNONI M, NOTARI R, ANTONACCI F, *et al*. On the statistical model of source localization based on range difference measurements[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2017, 354(15): 7183–7214. doi: [10.1016/j.jfranklin.2017.07.034](https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2017.07.034).
- [5] WANG L and ZAWODNIOK M J. Bias and CRB analysis of LoS-based and RSS-based ranging methods[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(11): 9085–9097. doi: [10.1109/TVT.2016.2518166](https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2518166).
- [6] SHI Weiguang, QI Xiaoli, LI Jianxiang, *et al*. Simple solution to the optimal deployment of cooperative nodes in two-dimensional TOA-based and AOA-based localization system[J]. *Eurasip Journal on Wireless Communications & Networking*, 2017, 2017(1): 1–16. doi: [10.1186/s13638-017-0859-6](https://doi.org/10.1186/s13638-017-0859-6).
- [7] 钱志鸿, 王雪. 面向5G通信网的D2D技术综述[J]. 通信学报, 2016, 37(7): 1–14. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2016129](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2016129).  
QIAN Zhihong and WANG Xue. Reviews of D2D technology for 5G communication networks[J]. *Journal on Communications*, 2016, 37(7): 1–14. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2016129](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2016129).
- [8] 刘申建, 万群, 彭应宁. 非直达波条件下的TDD高精度移动定位算法[J]. 电子学报, 2002, 30(9): 1288–1291. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2002.09.009](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2002.09.009).  
LIU Shenjian, WAN Qun, and PENG Yingning. A non-line-of-sight high-resolution location algorithm based on TDD for mobile station[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2002, 30(9): 1288–1291. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2002.09.009](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2002.09.009).
- [9] WAN Qun, YANG Wanlin, and PENG Yingning. Closed-form solution to mobile location using linear constraint on

- scatterer[J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(14): 883–884. doi: [10.1049/el:20040581](https://doi.org/10.1049/el:20040581).
- [10] ZHAOUNIA M, LANDOLSI M A, and BOUALLEGUE R. Mobile localization under non-line-of-sight conditions using scattering information[J]. *International Journal of Wireless Information Networks*, 2010, 17(1/2): 1–10. doi: [10.1007/s10776-010-0117-x](https://doi.org/10.1007/s10776-010-0117-x).
- [11] SHIU D S, FOSCHINI G J, GANS M J, *et al.* Fading correlation and its effect on the capacity of multielement antenna systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2000, 48(3): 502–513. doi: [10.1109/26.837052](https://doi.org/10.1109/26.837052).
- [12] 周杰, 朱慧娟, 袁梅. 基于二维空间域移动通信统计信道的空时特性[J]. *电子技术应用*, 2016, 42(8): 116–120. doi: [10.16157/j.issn.0258-7998.2016.08.029](https://doi.org/10.16157/j.issn.0258-7998.2016.08.029).  
ZHOU Jie, ZHU Huijuan, and YUAN Mei. Analysis of mobile communication in a two-dimensional scattering channel model[J]. *Application of Electronic Technique*, 2016, 42(8): 116–120. doi: [10.16157/j.issn.0258-7998.2016.08.029](https://doi.org/10.16157/j.issn.0258-7998.2016.08.029).
- [13] BORHANI A and PATZOLD M. A unified disk scattering model and its angle-of-departure and time-of-arrival statistics[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(2): 473–485. doi: [10.1109/TVT.2012.2227859](https://doi.org/10.1109/TVT.2012.2227859).
- [14] AL-JAZZAR S, CAFFERY J, and YOU H R. Scattering-model-based methods for TOA location in NLOS environments[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2007, 56(2): 583–593. doi: [10.1109/TVT.2007.891491](https://doi.org/10.1109/TVT.2007.891491).
- [15] ABDI A, BARGER J, and KAVEH M. A parametric model for the distribution of the angle of arrival and the associated correlation function and power spectrum at the mobile station[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2002, 51(3): 425–434. doi: [10.1109/TVT.2002.1002493](https://doi.org/10.1109/TVT.2002.1002493).
- [16] BORHANI A and PATZOLD M. A non-stationary one-ring scattering model[C]. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Shanghai, China, 2013: 2620–2625.
- [17] CHEN Liang, DU Cuizhen, and MA Yanfang. The higher-order Levenberg–Marquardt method with Armijo type line search for nonlinear equations[J]. *Optimization Methods and Software*, 2017, 32(3): 516–533. doi: [10.1080/10556788.2016.1225214](https://doi.org/10.1080/10556788.2016.1225214).
- [18] YUAN Gonglin, SHENG Zhou, WANG Bopeng, *et al.* The global convergence of a modified BFGS method for nonconvex functions[J]. *Journal of Computational & Applied Mathematics*, 2017: 274–294. doi: [10.1016/j.cam.2017.05.030](https://doi.org/10.1016/j.cam.2017.05.030).
- 田增山: 男, 1968年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为移动通信、个人通信、GPS及蜂窝网定位技术等。
- 舒月月: 女, 1992年生, 硕士生, 研究方向为蜂窝网室内外定位技术、WiFi室内定位技术。
- 周 牧: 男, 1984年生, 教授, 主要研究方向为无线定位技术、机器学习与人工智能、凸优化理论。
- 李 勇: 女, 1994年生, 硕士生, 研究方向为WiFi室内定位跟踪技术、蜂窝网室内外定位技术。
- 李 泽: 男, 1991年生, 博士生, 研究方向为无线定位技术、机器学习。