

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2019.06.004

# NLOS 环境中的线性回归最小二乘三维定位算法

江 力, 徐海川, 张 磊, 熊绍文

(湖南工业大学 理学院, 湖南 株洲 412007)

**摘 要:** 针对室内非视距无线环境中移动终端的三维定位问题, 提出了一种非视距无线环境中基于线性回归与最小二乘法的三维定位算法。首先, 基于无线通信环境中波达时间 (TOA) 的测量误差具有正偏置的特性, 运用线性回归估计测试终端到基站之间的非视距测量距离误差与真实距离之间的线性关系; 然后, 根据该线性关系运用最小二乘原理对移动终端进行三维几何定位。实验结果表明, 算法具有较高的定位精度, 最大定位误差不超过 2 m, 且在非视距环境下, 所提出的定位算法不仅不需要 TOA 的时延分布先验知识, 而且定位精度优于其他基于 TOA 的两阶段最小二乘定位算法的定位精度。

**关键词:** 无线定位; 非视距; 波达时间; 线性回归; 最小二乘法

**中图分类号:** TP391.9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2019)06-0023-06

**引文格式:** 江 力, 徐海川, 张 磊, 等. NLOS 环境中的线性回归最小二乘三维定位算法 [J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(6): 23-28.

## 3D Localization Algorithm Based on Linear Regression and Least Square in NLOS Environment

JIANG Li, XU Haichuan, ZHANG Lei, XIONG Shaowen

(College of Science, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** In view of the problem of three-dimensional location of mobile terminals in indoor non-line-of-sight wireless environment, a three-dimensional location algorithm has thus been proposed based on linear regression and least square method in non-line-of-sight wireless environment. Firstly, based on the positively biased measurement error of arrival time (TOA) in wireless communication environment, the linear regression is used to estimate the linear relationship between the non-line-of-sight measurement distance error and the real distance between the test terminal and the base station. Then, combined with the linear relationship, the least square method is used to locate the 3D position of mobile terminal. The experimental results show that the proposed algorithm is characterized with a high positioning accuracy, with the maximum positioning error no more than 2 m. Moreover, in the non-line-of-sight environment, the proposed positioning algorithm does not need the prior knowledge of TOA's time delay distribution, with the positioning accuracy better than other two-stage least squares positioning algorithm based on TOA.

**Keywords:** wireless localization; non-line-of-sight; time of arrival; linear regression; least square method

收稿日期: 2019-03-29

基金项目: 国家级大学生创新训练计划基金资助项目 (201711535009), 湖南省大学生研究性学习和创新性实验计划基金资助项目 (20171153505)

作者简介: 江 力 (1969-), 男, 湖南耒阳人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要研究方向为图像与信号处理,

E-mail: 414281677@qq.com

## 1 研究背景

自从1996年美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)提出E-911定位要求后,无线定位受到广泛的关注<sup>[1-3]</sup>。利用无线定位技术,确定移动终端或其持有者的距离和位置信息,实现对物品的定位、跟踪和监控等功能,在无线通信、移动计算、传感器网络和物联网等领域中都有广泛的应用价值<sup>[4-7]</sup>。基于基站的测量信息,计算或确定手持终端在建筑物内部、地下停车场等区域的三维空间位置坐标的三维定位问题,被认为是现代商用通信网络中对于定位系统真正具有技术难度的挑战。而这种场景下的高精度三维定位也预期能为客户提供更大的价值,如为智能仓储、智能工厂、固定资产追踪等对于三维坐标信息敏感的垂直行业,传统运营商感兴趣的商场、办公楼中基于位置的室内导航、人群流量分析,以及基于精确三维地理位置信息的业务推送等服务提供基础性技术。但这种环境下,无线电信号在传播过程中会经过墙面的多次反射、室内物体的折射和吸收等,这些物理因素会导致通信基站测量得到的诸如距离、角度等信息存在噪声。如何基于这些有噪声的测量,得到对于位置信息的准确估计,是通信基站实现对终端定位需要解决的问题。

从技术角度来看,一种好的无线三维定位算法,要求使用尽可能少的基站完成对终端设备的定位、算法收敛速度快、对于干扰和噪声具有鲁棒性等特点。在移动通信系统中,基于波达时间(time of arrival, TOA)的定位方法中,TOA的测量精度决定了对移动台进行定位的定位精度,1 ns的测量误差对应0.3 m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、非视距(non-line-of-sight, NLOS)传播以及远近效应等产生的实验误差<sup>[8]</sup>。系统测量误差服从高斯分布,且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。

针对减小NLOS传播对TOA方法定位精度的影响,国内外学者进行了大量的研究<sup>[2-14]</sup>,这些NLOS环境下的定位算法基本上可以归结为3种类型,即对非视距误差进行精确建模<sup>[2,9]</sup>、识别出NLOS基站<sup>[9-10]</sup>、对测量距离或者中间估计量进行加权<sup>[7-8,12-14]</sup>等定位计算。这些算法都有各自的优缺点,例如在实际环境中要获得信号的统计特征这些先验知识特别困难,对移动终端的定位估计精度并不高,有的算法甚至难以广泛应用。因此,NLOS误差的抑制已经成为无线

定位算法实用化的关键。国内大部分学者的工作集中在对算法的研究及优化上,如研究非视线传播影响的TOA定位算法及基于移动台位置的动态定位算法等。这些研究都能充分利用第三代移动通信网络资源,在典型的信道环境下取得符合E-911规定的定位性能。但是,许多适合于NLOS环境的二维定位算法无法直接应用于三维场景,国内外也鲜有研究NLOS环境下的三维定位问题的文献<sup>[7]</sup>。

本文利用NLOS环境下测量得到的TOA,将其转化成终端与基站之间的测量距离,对由于NLOS传播引起的测量距离误差与真实距离进行线性回归分析;然后结合回归分析得到的线性关系,运用最小二乘法对终端进行三维几何定位;再通过实验验证本文算法的定位性能。

## 2 TOA 时间测量模型与定位原理

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。假设各个基站测量结果相互独立,移动终端MT到第*i*个基站BS<sub>*i*</sub>的TOA为

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

式中: $t_{i,LOS}$ 为MT与基站BS<sub>*i*</sub>间信号的视距传播时间;

$t_{i,\epsilon}$ 为服从 $N(0, \sigma_i^2)$ 分布的系统测量误差;

$t_{i,N}$ 为NLOS传播等引入的误差;

$M$ 为基站个数。

$t_{i,\epsilon}$ 可随着定时技术及信号检测技术的改进而减少,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<sup>[8]</sup>;当考虑 $t_{i,N}$ 服从指数分布的情形时,则NLOS传播时延的各阶统计量仅仅是通信距离的指数函数,且均为正值<sup>[8]</sup>。

在NLOS传播环境下,由于系统测量误差和NLOS传播误差的存在,因此

$$\begin{aligned} r_{i,m} &= ct_{i,m} = \\ & ct_{i,LOS} + ct_{i,\epsilon} + ct_{i,N} = \\ & r_{i,LOS} + r_{i,\epsilon} + r_{i,N}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $r_{i,m}$ 为通过测量 $t_{i,m}$ 获得的基站BS<sub>*i*</sub>与MT的距离的测量值;

$c$ 为光速,取 $3 \times 10^8$  m/s;

$r_{i,LOS}$ 为基站BS<sub>*i*</sub>与MT的真实距离;

$r_{i,\epsilon}$ 为由于系统测量误差产生的距离误差;

$r_{i,N}$ 为NLOS传播 $t_{i,N}$ 产生的距离误差。

在实际的NLOS无限传播环境中,通常有

$t_{i,N} \gg |t_{i,\varepsilon}|$ , 所以  $r_{i,m} - r_{i,LOS} = r_{i,\varepsilon} + r_{i,N}$  一般具有正偏置。利用测量距离  $r_{i,m}$  建立一系列方程组, 并求得以各个基站为球心, 以测距为半径的球面的两两相交线, 所有交线的交点就是 MT 的位置, 如图 1 所示。

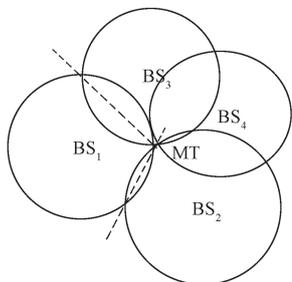


图1 TOA 定位原理图

Fig. 1 TOA location principle diagram

设图 1 中需定位的 MT 的三维位置坐标为  $(x, y, z)$ ,  $BS_i$  的坐标为  $(x_i, y_i, z_i)$ , 则 MT 和  $BS_i$  之间的距离为

$$r_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \quad (3)$$

将式 (3) 两边平方并展开, 得

$$r_i^2 = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - 2x_i x - 2y_i y - 2z_i z + x^2 + y^2 + z^2, \quad (i=1, 2, \dots, M) \quad (4)$$

令  $K_i = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2$ , 并将式 (4) 中的第 2 至  $M$  个方程都减去第 1 个方程, 得

$$r_i^2 - r_1^2 + K_1 - K_i = -2(x_i - x_1)x - 2(y_i - y_1)y - 2(z_i - z_1)z, \quad (i=2, 3, \dots, M) \quad (5)$$

再令

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} r_2^2 - r_1^2 + K_1 - K_2 \\ r_3^2 - r_1^2 + K_1 - K_3 \\ \vdots \\ r_M^2 - r_1^2 + K_1 - K_M \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A} = -2 \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_M - x_1 & y_M - y_1 & z_M - z_1 \end{bmatrix},$$

则式 (5) 可表成矩阵形式

$$\mathbf{b} = \mathbf{A}\mathbf{X} \quad (6)$$

因此, 要实现对 MT 的定位, 至少需要 4 个基站进行 TOA 测量。利用最小二乘法求得 MT 的三维空间位置坐标

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (7)$$

在实际计算中, 由于是用式 (2) 中的  $r_{i,m}$  代替式 (4) 左边的  $r_i$  参与计算, 因此, 在只有系统误差存在的视距 (line of sight, LOS) 传播环境下, 式 (7) 的求解精度较高; 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。

### 3 误差与真实距离的线性回归估计

在某个已知的位置处测量测试终端到若干个基站之间的  $t_{i,m}$ , 计算测试终端到各个基站的真实距离  $r_{i,LOS}(i=1, 2, \dots, M)$ , 则由于 NLOS 传播等原因而产生的距离误差为

$$r_{i,N} = ct_{i,m} - r_{i,LOS} \quad (8)$$

图 2 为一个测试终端到各个基站的测量距离的误差与真实距离的关系图, 图中各点的横坐标为终端到基站的真实距离, 纵坐标为终端到各个基站由于 NLOS 等原因导致的测量距离与真实距离之间的误差。

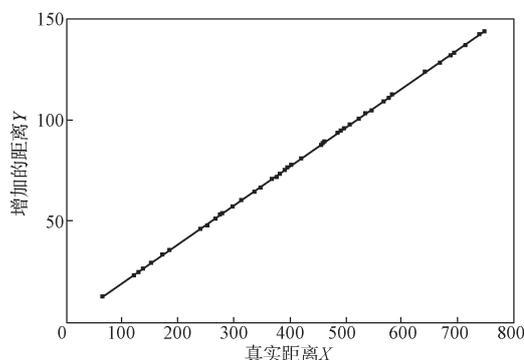


图2 测量距离的误差与真实距离关系图

Fig. 2 Relationship diagram between distance measurement error and real distance

将同一环境中不同终端与各个基站的真实距离和测量的距离误差进行绘图分析, 其结果基本与图 2 相似; 而且利用线性回归显著性检验, 得知终端与基站的测量距离误差与真实距离之间有着高度显著的线性关系:

$$r_{i,N} = kr_{i,LOS} + a \quad (9)$$

式 (9) 说明, 在相同环境下, 同一终端到各个基站的距离误差与真实距离正相关, 且相关程度基本一致。

将式 (9) 代入式 (8), 得

$$r_{i,LOS} = \frac{ct_{i,m} - a}{k+1} \quad (10)$$

因此, 只要求出适当的当前 NLOS 环境下  $k$ 、 $a$  的值, 就可以有效地消除由于 NLOS 传播等原因而产生的误差, 并通过式 (10) 计算出终端到基站的近似真实距离, 这样也就避免了需要利用 TOA 的时延分布先验知识来估计  $r_{i,LOS}$ 。

### 4 最小二乘的三维定位算法

将式 (10) 中的  $r_{i,LOS}$  代替式 (5) 中的  $r_i$ , 得

$$\left(\frac{ct_{i,m}-a}{k+1}\right)^2 - \left(\frac{ct_{1,m}-a}{k+1}\right)^2 + K_1 - K_i = -2(x_i - x_1)x - 2(y_i - y_1)y - 2(z_i - z_1)z, \quad (i=2, 3, \dots, M) \quad (11)$$

此时

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \left(\frac{ct_{2,m}-a}{k+1}\right)^2 - \left(\frac{ct_{1,m}-a}{k+1}\right)^2 + K_1 - K_2 \\ \left(\frac{ct_{3,m}-a}{k+1}\right)^2 - \left(\frac{ct_{1,m}-a}{k+1}\right)^2 + K_1 - K_3 \\ \vdots \\ \left(\frac{ct_{M,m}-a}{k+1}\right)^2 - \left(\frac{ct_{1,m}-a}{k+1}\right)^2 + K_1 - K_M \end{bmatrix},$$

将  $\mathbf{b}$  带入式 (6), 再利用式 (7) 的最小二乘法进行求解, 得到 MT 的三维位置的最小二乘解  $\mathbf{X}$ 。

综合上述分析, 可设计基于线性回归与最小二乘法的三维几何定位算法如下:

**Step 1** 根据式 (8) 计算 1~2 个测试终端到各个基站的测量距离误差  $r_{i,N}(i=1, 2, \dots, M)$ ;

**Step 2** 计算式 (9) 中的线性回归系数  $k$  与  $a$ ;

**Step 3** 根据式 (10) 计算待定位终端 MT 到基站  $BS_i$  的近似真实距离  $r_{i,LOS}(i=1, 2, \dots, M)$ , 并带入式 (5) 得出式 (11) 中的  $\mathbf{b}$ ;

**Step 4** 将  $\mathbf{b}$  带入式 (7), 计算出 MT 的三维位置坐标  $\mathbf{X}$ 。

## 5 实验结果

选取中国移动在某城市市区中心的 10 个 4G 基站, 并假设每个基站的通信半径为 200 m (超过范围虽然有测量数据, 但无效)。以该地的一个地标建筑的地平面为  $xOy$  平面, 建立局部空间三维坐标系。根据已有的基站数据库将基站的小区全球认证码翻译成经纬度信息, 并确定它们在该局部坐标系中的三维几何位置如表 1 所示。转换两个测试终端 (苹果 6s 手机) 上由全球定位系统 (global positioning system, GPS) 应用程序 (application, APP) 海拔表所获取的经纬度及海拔高度数据, 为该终端在这个局部坐标系中的三维几何位置, 如表 2 所示。

如第 2 章所述, 假设测量的 TOA 误差  $t_{i,\epsilon} \sim N(0, \sigma_i^2)$ 。由于无法对  $\sigma$  进行准确建模, 因此认为它是均匀分布于 0 和  $\max$  之间的随机变量, 其中  $\max$  为确定的一个数值, 这里假设  $\max=1$  ns, 且  $\max$  包含了基站计时与终端计时所使用的时钟同步误差。从基站的定位测量单元得到测试终端到达表 1 中各个基站的

TOA 如表 3 所示。对这两个测试终端到各个基站的测量距离的误差与真实距离之间的线性回归系数  $k$  与  $a$  的计算结果如表 4 所示。

表 1 基站的三维几何位置坐标

Table 1 3D position coordinates of base stations m

BS	$x$	$y$	$z$	BS	$x$	$y$	$z$
1	402.19	380.52	3.26	6	-67.41	157.58	4.90
2	-56.01	258.54	4.93	7	172.00	277.76	2.71
3	-126.38	76.09	4.96	8	-321.66	253.43	4.90
4	75.41	375.90	4.43	9	-261.95	136.74	5.48
5	29.48	112.22	4.67	10	-373.51	391.84	4.75

表 2 测试终端的三维几何位置坐标

Table 2 3D position coordinates of test terminals m

MT	$x$	$y$	$z$
1	-204.97	170.30	1.83
2	-31.12	290.04	1.17

表 3 测试终端到各基站的 TOA

Table 3 TOAs from test terminals to base stations

BS	TOA	
	MT <sub>1</sub>	MT <sub>2</sub>
1	0.000 002 554 680 06	0.000 001 760 866 34
2	0.000 000 690 245 33	0.000 000 160 458 44
3	0.000 000 488 045 54	0.000 000 932 620 72
4	0.000 001 382 494 38	0.000 000 545 427 06
5	0.000 000 960 702 20	0.000 000 746 670 53
6	0.000 000 549 860 21	0.000 000 548 089 02
7	0.000 001 558 323 97	0.000 000 810 746 62
8	0.000 000 543 350 29	0.000 001 129 685 72
9	0.000 000 265 628 82	0.000 001 101 281 15
10	0.000 001 108 034 34	0.000 001 419 815 60

表 4 两个测试终端的线性回归系数  $k$  与  $a$

Table 4 Linear regression coefficients  $k$  and  $a$  of the testing terminals

MT	$k$	$a$
1	0.191 40	0.506 22
2	0.191 35	0.570 71

分别选取测试终端 MT<sub>1</sub>、MT<sub>2</sub> 到各个基站的 TOA 中较小的 4 至 9 个, 对 MT<sub>1</sub>、MT<sub>2</sub> 进行定位, 定位误差均值与选取的 TOA 数目之间的关系如表 5 和图 3 所示。根据图 3 和表 5 可知, 在实际应用中采用 5 个 TOA 值进行定位, 既能降低计算复杂度、减少测量数据又能达到比较高的定位精度。线性回归系数  $k$  与  $a$  分别取表 4 中 2 组值的平均值。对 100 个终端中的每一个, 选取该终端到各个基站的 TOA 较小的 5 个基站, 对该终端进行定位。本文算法和文献 [9] 中算法 (假设 TOA 的测量误差服从正态分布  $N(0, 0.5)$ ) 的定位误差如表 6 所示, 其中部分终端的真实位置 (计算方法同表 2) 如表 7 所示, 两种算法的定位位置如表 8 所示。

表 5 选取的 TOA 数目与定位误差

Table 5 Selected TOA numbers and locating errors

基站数	误差均值	误差方差	基站数	误差均值	误差方差
4	1.738 1	0.690 9	7	0.596 3	0.064 4
5	0.558 4	0.044 2	8	0.535 2	0.056 6
6	0.521 3	0.044 4	9	0.570 0	0.057 1

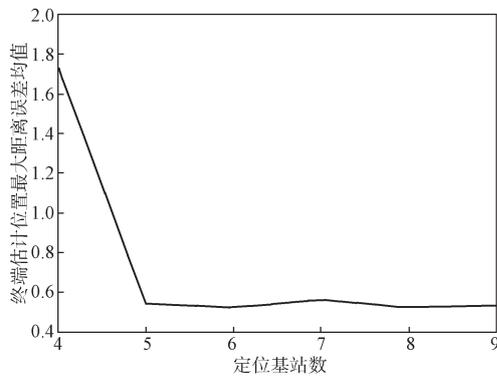


图 3 选取的 TOA 数目与定位误差均值关系图

Fig. 3 Relationship between selected TOA numbers and mean values pf positioning errors

表 6 选取 5 个 TOA 时两种算法的定位误差

Table 6 Positioning errors between two algorithms with five selected TOAs

算法	最小误差	最大误差	均值	方差
本文算法	0.042 3	1.996 0	1.132 8	0.242 8
文献 [7] 算法	3.909 8	622.670 4	59.835 5	8 432.381 3

表 7 部分终端真实位置

Table 7 Real position of partial terminals m

终端 序号	真实坐标			终端 序号	真实坐标		
	x	y	z		x	y	z
1	-0.28	-194.22	1.25	6	81.84	85.48	1.92
2	377.07	-310.91	1.69	7	-191.02	-140.12	1.54
3	110.24	72.73	1.27	8	-310.91	345.40	1.60
4	-43.02	-319.59	1.58	9	-56.88	123.00	1.61
5	317.56	-368.33	1.45	10	-40.60	-19.87	1.86

表 8 两种算法对表 7 中终端的定位位置

Table 8 Two algorithms for locating terminals in table 7 m

终端 序号	本文算法定位坐标			文献 [9] 算法定位坐标		
	x	y	z	x	y	z
1	-0.52	-194.64	1.27	11.28	-180.78	60.19
2	377.76	-311.59	1.75	419.25	-330.60	0
3	110.16	72.62	1.14	118.92	69.89	93.25
4	-43.11	-319.29	1.68	-30.41	-332.98	0
5	318.94	-369.20	1.39	304.45	-363.47	-48.81
6	81.44	85.18	1.77	119.19	117.16	0
7	-190.81	-139.96	1.58	-223.49	-142.19	71.23
8	-310.85	345.32	1.66	-294.72	360.28	0
9	-56.73	122.92	1.63	-85.14	79.71	18.46
10	-41.08	-19.55	1.96	-45.24	-35.30	-86.42

由表 6 和表 8 可知, 本文的定位算法显著优于文

献 [9] 中的定位算法。

## 6 结论

本文提出了一种非视距无线环境下, 基于线性回归与最小二乘法的三维定位算法, 通过实例对该算法进行了检验, 并与文献 [9] 的算法进行了比较, 可得出如下结论:

1) 不仅不需要 TOA 的先验统计特征知识, 而且在实际应用中只需要采用 5 个基站进行定位就能得到高精度的定位结果, 其定位最大误差在 2 m 以内;

2) 线性回归与最小二乘定位算法基本上克服了 NLOS 传播误差的影响, 各项定位精度指标达到了实用化的程度;

3) 如果能进一步控制基站计时与终端计时所使用的时钟同步误差, 则本算法可以适用于任何环境中的任何信道模型的基于 TOA 的移动终端定位;

4) 本文算法的可实现性强, 将有可能被部署到现代商业通信网络中, 从而可带来较大的社会和经济效益。

## 参考文献:

[1] REED J H, KRIZMAN K J, WOERNER B D, et al. An Overview of the Challenges and Progress in Meeting the E-911 Requirement for Location Service[J]. IEEE Communications Magazine, 1998, 36(4): 30-37.

[2] 屈保平, 裘著有, 陈长衍. 一种 NLOS 环境下基于散射模型的 TOA 定位方法 [J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(5): 27-30.

QU Baoping, XI Zhuyou, CHEN Changyan. A Method for TOA Location Based on Scattering Models in NLOS Environments[J]. Fire Control & Command Control, 2014, 39(5): 27-30.

[3] 郇 曦. 基于单 / 多次散射路径识别的 NLOS 环境定位技术研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2018.

WU Xi. Research on NLOS Environmental Location Technology Based on Single/Multiple Scattering Path Identification[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

[4] 王 群, 钱焕延, 张 亮. 车联网定位与位置感知技术研究 [J]. 南京师大学报 ( 自然科学版 ), 2015, 38(1): 66-74.

WANG Qun, QIAN Huanyan, ZHANG Liang. Localization and Nodes Location-Aware in Internet of Vehicles[J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition), 2015, 38(1): 66-74.

[5] 肖 竹, 王 东, 李仁发, 等. 物联网定位与位置感知研究 [J]. 中国科学 ( 信息科学 ), 2013, 43(10):

- 1265-1287.  
XIAO Zhu, WANG Dong, LI Renfa, et al. Localization and Nodes Location-Aware in Internet of Things[J]. Scientia Sinica(Informationis), 2013, 43(10): 1265-1287.
- [6] ZHAO J Z, XI W, HE Y, et al. Localization of Wireless Sensor Networks in the Wild: Pursuit of Ranging Quality[J]. ACM Transactions on Networking, 2013, 21(1): 311-323.
- [7] 肖竹, 陈杰, 王东, 等. 严重遮挡非视距环境下的三维定位方法[J]. 通信学报, 2015, 36(8): 68-75.  
XIAO Zhu, CHEN Jie, WANG Dong, et al. Three-Dimensional Localization Under Severely Obstructed NLOS Environment[J]. Journal on Communications, 2015, 36(8): 68-75.
- [8] 常戎, 吕善伟. 适用于NLOS传播环境的几何定位方法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(9): 2212-2216.  
CHANG Rong, LÜ Shanwei. A Geometrical Position Location Method Suitable for NLOS Environment[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(9): 2212-2216.
- [9] 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.  
ZHANG Jianwu, TANG Bing, QIN Feng. Application of Chan Location Algorithm in 3-Dimensional Space Location[J]. Computer Simulation, 2009, 26(1): 323-326.
- [10] 颜俊, 陈亮, 吴乐南. 基于信号检测法的NLOS识别[J]. 信号处理, 2009, 25(12): 1848-1852.  
YAN Jun, CHEN Liang, WU Lenan. NLOS Identification Via Signal Detection Algorithm[J]. Signal Processing, 2009, 25(12): 1848-1852.
- [11] 过传龙, 陈隆亮. NLOS环境下信道估计辅助的精确TOA估计[J]. 电脑知识与技术, 2016, 12(8): 32-35.  
GUO Chuanlong, CHEN Longliang. NLOS Channel Estimation Aided Precise TOA Estimation[J]. Computer Knowledge and Technology, 2016, 12(8): 32-35.
- [12] YU K G, DUTKIEWICZ E. Geometry and Motion-Based Positioning Algorithms for Mobile Tracking in NLOS Environments[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 11(2): 254-263.
- [13] 华惊宇, 郑志龙, 周凯, 等. NLOS无线环境中运用最优化原理的定位算法[J]. 浙江工业大学学报, 2014, 42(1): 93-98.  
HUA Jingyu, ZHENG Zhilong, ZHOU Kai, et al. Optimization Theory Based Localization Algorithm in the NLOS Wireless Environment[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2014, 42(1): 93-98.
- [14] 崔玮, 吴成东, 张云洲, 等. 基于高斯混合模型的非视距定位算法[J]. 通信学报, 2014, 35(1): 99-106.  
CUI Wei, WU Chengdong, ZHANG Yunzhou, et al. GMM-Based Localization Algorithm Under NLOS Conditions[J]. Journal on Communications, 2014, 35(1): 99-106.

(责任编辑: 邓光辉)