

文章编号:1001-9081(2016)08-2170-05

doi:10.11772/j.issn.1001-9081.2016.08.2170

# 基于波束成形的 60 GHz 无线局域网络定位算法

刘 兴\*, 张 浩, 徐凌伟

(中国海洋大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

(\*通信作者电子邮箱 liuxing3901@163.com)

**摘要:**针对 60 GHz 信号在非视距(NLOS)环境下测距困难的问题,提出一种基于波束成形的 60 GHz 无线局域网络(WLAN)定位算法。首先,通过借助波束成形技术进行最强路径搜索,波束成形算法将天线的最大增益方向指向接收最强多径信号的方向,在增强搜索鲁棒性的同时扩大了定位覆盖范围;然后,对 NLOS 条件下的时延偏差进行建模,重构 NLOS 测量数据;最后,为进一步提高定位精度,设置检测阈值,引入异常值检测机制。采用 Matlab 仿真平台在 STAs-STAs 信道模型进行仿真,结果表明,NLOS 环境下基于传统相干估计的到达时间(TOA)定位算法的定位误差约为 2 m,定位成功率仅为 0.5%,而采用基于波束成形的 60 GHz 定位算法后,定位误差降低至 1.02 cm,定位成功率高达 94%。因此,波束成形技术为 NLOS 环境下的 60 GHz 定位提供了解决思路,有效地提高了 60 GHz 室内定位精度和定位成功率。

**关键词:**60 GHz 信号; 非视距定位算法; 波束成形; 最强路径搜索; 异常值检测

**中图分类号:** TN92    **文献标志码:**A

## Beamforming based localization algorithm in 60 GHz wireless local area networks

LIU Xing\*, ZHANG Hao, XU Lingwei

(College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao Shandong 266100, China)

**Abstract:** Concerning ranging difficulties with 60 GHz signals in Non Line of Sight (NLOS) conditions, a new positioning algorithm based on beamforming in Wireless Local Area Network (WLAN) was proposed. Firstly, the beamforming technology was applied to search the strongest path by adjusting receiving antennas along the channel path with the maximum power. The searching robustness was enhanced and the location coverage was expanded. Secondly, the time delay bias in NLOS conditions was modeled as a Gaussian random variable to reconstruct the NLOS measurements. Finally, to further improve the positioning accuracy, the outlier detection mechanism was introduced by setting a reasonable detection threshold. The localization simulation experiments were conducted on Matlab using STAs-STAs (STATIONS-STATIONS) channel model, the Time of Arrival (TOA) localization algorithm based on traditional coherent estimation method achieved the average positioning error at about 2 m, and the probability of 1 m localization accuracy was just 0.5% under NLOS conditions, while the proposed algorithm achieved the average positioning error at 1.02 cm, and the probability of 1 m localization accuracy reached 94%. Simulation results show that the beamforming technology is an effective solution to 60 GHz localization in NLOS conditions, and the localization accuracy and the probability of successful localization are effectively improved.

**Key words:** 60 GHz signal; Non Line of Sight (NLOS) positioning algorithm; beamforming; strongest path search; outlier detection

## 0 引言

随着无线定位技术的日趋成熟以及定位精度逐渐提高,用户对于高精度位置服务的需求也在急剧增长<sup>[1-2]</sup>。但是由于技术本身物理性的限制,目前在定位精度、覆盖范围和定位容量等各个方面都存在难以克服的缺陷。

免许可的高达约 7 GHz 的带宽使得 60 GHz 无线通信技术迅速成为当前的研究热点<sup>[3-4]</sup>,在通信方面得到广泛的关注。与超宽带(Ultra Wide-band, UWB)相比,脉冲体制下的 60 GHz 信号具有更高的时间分辨率以及高达 10 W 的发射功率<sup>[5]</sup>,这些优势使得 60 GHz 能够在室内定位和室外定位方面

都表现出比 UWB 更优异的定位潜能,并有望实现 mm 级定位;60 GHz 信号的材料损耗特性更是能够为以房间为单位的网络提供隐私性,且得益于 60 GHz 全球频谱规范,其产品可在全球范围内部署<sup>[6]</sup>。

文献[7]在 60.5 GHz 附近进行接收信号强度指示(Received Signal Strength Indication, RSSI)定位实验,分别在不同的底座材料上、不同的发射器和接收器的相对高度下对发射器和接收器之间的 RSSI 值进行测量,实验表明当底座材料为毫米波吸收器或者将发射器和接收器同时升高 20 cm 时多径效应最弱,并在这两种情况下实现了 3 cm 定位精度。Jafari 等<sup>[8]</sup>则提出了一种新的到达时间差(Time Difference Of

收稿日期:2016-01-15;修回日期:2016-03-17。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41527901, 61301139)。

作者简介:刘兴(1990—),女,山东新泰人,博士研究生,主要研究方向:定位算法、室内定位; 张浩(1975—),男,江苏连云港人,教授,博士,主要研究方向:超宽带通信、卫星导航、水下定位; 徐凌伟(1987—),男,山东高密人,博士研究生,主要研究方向:多人多出通信。

Arrival, TDOA) 获取方法,此方法基于 60 GHz 多入单出 (Multiple Input Single Output, MISO) 系统,可以与通信同时进行,并对非视距 (Non Line of Sight, NLOS) 定位的影响进行了实验验证。文献[9]为 60 GHz 室内定位设计了 40 nm CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 接收器来应对伴随着高带宽带来的基带功率损耗问题,在 4 m 范围内实现 mm 级精度。

目前国际上对于 60 GHz 定位技术的研究较少且相对分散,没有完整的理论体系,因此研究基于 60 GHz 的无线定位技术具有重要的理论指导和实际应用价值。

虽然氧气在 60 GHz 频段对电磁波的吸收达到峰值,但是在室内范围这一衰减可以忽略;但使用 60 GHz 进行定位仍然面临物理性的挑战,原因是 60 GHz 信号具有更大的材料阻挡损耗,在 NLOS 环境下测距困难。波束成形,是指通过对来自各个方向上的信号进行加权处理,形成所需的理想信号。在目前无线通信系统中,波束成形技术是提高网络传输速率、覆盖范围和通信性能的主要手段<sup>[10]</sup>。因此,本文提出一种基于波束成形的 60 GHz 无线局域网络定位算法,通过搜索最大径,结合信道特性实现精确测距,并结合异常值检测机制,进一步提高定位性能。在 802.11ad 标准提出的典型场景下对本文算法进行仿真分析,结果表明本文算法对视距 (Line of Sight, LOS)、NLOS 环境下的定位性能均有提高,LOS 环境下能实现 mm 级定位,NLOS 环境下能实现 cm 级定位,定位性能明显高于传统相干估计算法,且异常值检测机制也在一定程度上提高了定位精度,验证了算法的有效性。

## 1 60 GHz 定位系统模型

与传统的定位技术类似,将 60 GHz 定位系统分为信号发射、信号传输、信号接收、数据处理四大模块分别进行建模分析,如图 1 所示。其中基站和目标节点均可部署发射和接收模块,并均可进行数据处理。当接收端从接收信号中提取出定位所需的到达时间 (Time Of Arrival, TOA)、到达角度 (Angular Of Arrival, AOA) 或者 RSSI 信息后,再由相应的定位算法进行定位,最终得到目标节点的估计位置。

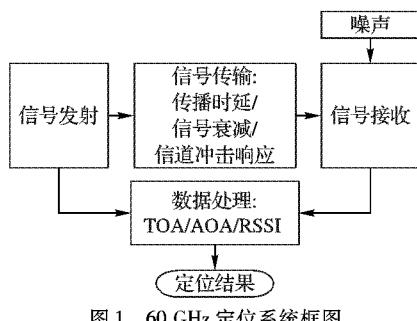


图 1 60 GHz 定位系统框图

### 1.1 60 GHz 发射信号

60 GHz 无线局域网络采用 802.11ad 标准,发射信号使用单载波 60 GHz 信号和正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 60 GHz 信号<sup>[11]</sup>,本文为充分利用 60 GHz 信号超高的时间分辨率的优势,采用单载波 60 GHz,基带脉冲  $p(t)$  采用基本高斯脉冲,信号时域表达式如式(1) :

$$s(t) = p(t) \cos(2\pi f_c t) = \\ A \exp(-2\pi(t/a)^2) \cdot \cos(2\pi f_c t) \quad (1)$$

其中:  $A$  为脉冲能量,  $\alpha$  为脉冲成形因子,  $f_c$  为载波信号中心频率。载波 60 GHz 信号的功率谱密度  $\Phi_{ss}(f)$  为:

$$\Phi_{ss}(f) = \frac{1}{2} [\Phi_{pp}(f - f_c) + \Phi_{pp}(-f - f_c)] \quad (2)$$

其中:  $\Phi_{pp}(f)$  代表基带脉冲  $p(t)$  的频谱。取脉冲成形因子  $\alpha$  为 0.58 ns, 载波中心频率  $f_c$  为 60.5 GHz, 脉冲宽度  $T_m$  为 1 ns, 则归一化后的单载波 60 GHz 信号时频特性如图 2 所示。

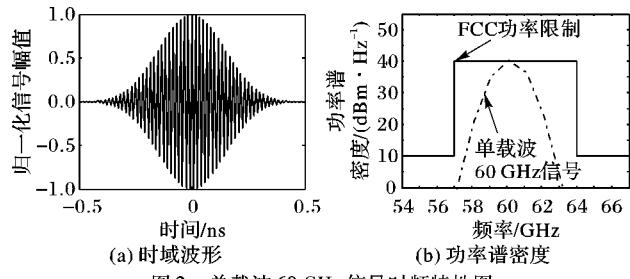


图 2 单载波 60 GHz 信号时频特性图

### 1.2 传输信道模型

802.11ad 标准给出了会议环境、办公环境和生活环境三种典型场景下的信道模型<sup>[11]</sup>,并分别对 LOS 和 NLOS 传播条件下的信号传播路径通过射线追踪的方式进行统计,得出信道的冲击响应以及传播路径损耗模型。通用的信道冲击响应可以表示为:

$$\begin{cases} h(t) = \sum_{i=1}^{n_i} A^{(i)} C^{(i)}(t - T^{(i)}) \\ C^{(i)}(t) = \sum_{k=1}^{n_{ik}} \alpha^{(i,k)} \delta(t - \tau^{(i,k)}) \end{cases} \quad (3)$$

其中:信道冲击响应呈簇到达现象,  $A^{(i)}$  和  $T^{(i)}$  分别代表第  $i$  簇信号的平均增益和到达时延,  $C^{(i)}$  表示第  $i$  簇信号的冲击响应,  $\delta(\cdot)$  表示脉冲函数,  $\alpha^{(i,k)}$  和  $\tau^{(i,k)}$  分别代表第  $i$  簇中第  $k$  条多径信号的幅值和时延。

以会议环境下 STAs-STAs (STAs-STAs) 信道为例,对应的 LOS 和 NLOS 传播情况下的信道冲击响应如图 3 所示。

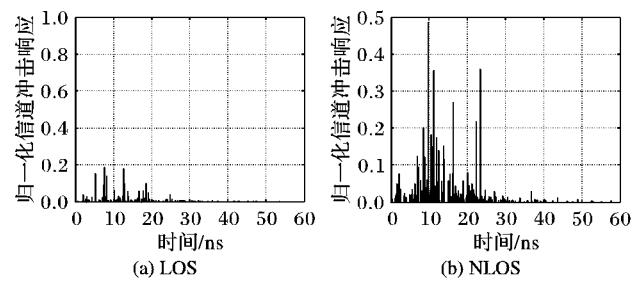


图 3 STAs-STAs 信道冲击响应

当存在 LOS 分量时,首达径即 LOS 路径,信号的强度比多径信号高 1 个数量级以上,可以根据首达信号准确估计出基站和目标节点间的距离;而在不存在 LOS 径的环境中,信号通过反射、散射等路径到达接收端,多径信号的强度相当,由于路径不确定,到达时间也就相对分散,若采用传统相干估计算法,信号在与接收端噪声叠加后,导致最大径信号的偏移,因此估计距离的误差较大,从而直接影响定位性能。

## 2 基于波束成形的定位算法

### 2.1 算法原理

传统的定位算法中,针对 NLOS 的情形,大多采取摒弃法<sup>[12]</sup>,即首先根据先验信息对 LOS/NLOS 测量值进行判断,然后只取 LOS 下的数据,丢弃 NLOS 测量值,这种方法在传统的定位系统中很大程度上提高了定位精度,但 NLOS 丢弃法更适用于节点密度较高、测量数据充足的条件。60 GHz 与窄带信号、甚至与 UWB 都有明显的区别,它具有较高的材料阻挡,一旦信号遇到障碍物,所得到的测量值均为 NLOS 数据,使用 NLOS 丢弃法已经无法完成定位,而大量的实验证明,室内和室外许多材料在毫米波频段范围内的反射性能很好,有些材料的反射系数超过 0.7<sup>[13]</sup>。因此,本文拟通过最强路径搜索来创建链接,解决 NLOS 环境下 60 GHz 无法定位的难题。

从图 3 可以看出,在 NLOS 环境下,多条多径信号的强度相当,这给最强路径的搜索带来模糊性,波束成形技术则提供了解决这个问提的思路。波束成形可以通过对发射或者接收信号进行处理,实现定向信号传输或接收。本文在接收端部署可控定向天线<sup>[14]</sup>,采用基于最大功率搜索的波束成形算法,将天线最大增益方向指向此路径,可以明显提高最强路径的信号强度,增大与其他路径信号的功率差,同时扩大信号的覆盖范围。

使用圆对称高斯函数来描述可控定向天线的瓣增益,表达式如式(4):

$$G(\theta, \varphi) = G_0 \exp(-\alpha\theta^2) \quad (4)$$

其中:  $G_0$  是最大天线增益;  $\theta$  和  $\varphi$  分别表示信号到达俯仰角和方位角;  $\alpha$  是相关系数,由半功率波束宽度 (Half Power Band Width, HPBW) 决定,如式(5)。

$$\alpha = 4 \ln(2)/HPBW^2 \quad (5)$$

将式(4)转换成 dB 的形式为:

$$G = G_0 - 12 \times \left( \frac{\theta}{HPBW} \right)^2 \quad (6)$$

其中,最大天线增益  $G_0$  可以通过近似理想圆形孔径天线计算得到:

$$G_0 = [1.6162/\sin(HPBW/2)]^2 \quad (7)$$

主波束宽度定义为在最大天线增益两侧,增益减小 20 dB 的两点间的夹角,因此式(6)近似为:

$$\theta_{ML} = 2.6 \times HPBW \quad (8)$$

其他方向上的天线增益设置为旁瓣增益级别的常数,以覆盖整个  $4\pi$  角度范围。可以看出,天线的半波束宽度 HPBW 完全决定了天线的模式和波束成形算法中多径信号的权值,也就确定了采用基于最大功率搜索的波束成形算法之后多径信号的强度。

### 2.2 算法流程

步骤 1 对多径信号采用波束成形算法。仍以 1.2 节中会议环境下 STAs-STAs 信道为例,可控定向天线的半波束宽度  $HPBW = 30^\circ$ , 经过波束成形算法之后的信道冲击响应如图 4 所示。不论是 LOS 还是 NLOS 传播环境,采用波束成形算法后最强路径方向上获得比较大的增益,而其他多径信号

方向上的天线增益较小,增强了搜索的鲁棒性。

步骤 2 以系统发射信号为模板信号,通过相关接收<sup>[15]</sup>的方式,搜索最强路径,得到对应的时延信息。最强路径的 TOA 估计值  $\hat{\tau}_{max}$  由式(9)得出:

$$\hat{\tau}_{max} = \arg \max_{\tau} \int r(t)s(t-\tau)dt \quad (9)$$

其中:  $r(t)$  为接收信号;  $s(t)$  为发射信号,如式(1)。

步骤 3 根据最强路径时延  $\hat{\tau}_{max}$  统计规律,设置相应的阈值  $\varepsilon$ , 依据式(10)判别 LOS/NLOS 传播环境。记对目标节点  $j$  的  $K$  次最强路径时延测量值集合为  $\hat{T}_{max} = \{\hat{\tau}_{max}^{(j,1)}, \hat{\tau}_{max}^{(j,2)}, \dots, \hat{\tau}_{max}^{(j,K)}\}$ , 假设其服从高斯分布,方差为  $\sigma^2$ , 记 LOS/NLOS 标志为  $f(\sigma)$ , 取值 1 表示 LOS, 取值 0 表示 NLOS, 则判决公式为:

$$f(\sigma) = \begin{cases} 1, & \sigma < \varepsilon \\ 0, & \sigma \geq \varepsilon \end{cases} \quad (10)$$

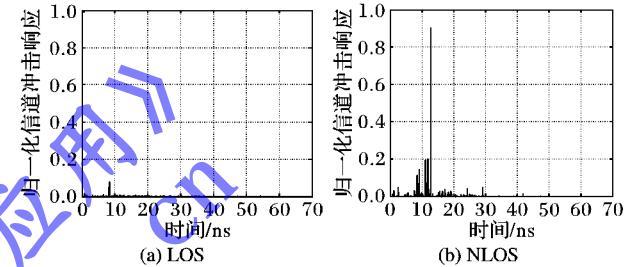


图 4 波束成形 STAs-STAs 信道冲击响应

步骤 4 估计基站与目标节点间的直达距离。

1) 当  $f(\sigma) = 1$ , 传播条件为 LOS 时, LOS 分量即为最强路径,由式(9)得出的 TOA 估计值  $\hat{\tau}_{max}$  即为直达路径时延估计值  $\hat{\tau}$ , 取多次测量平均值,则估计距离  $\hat{d} = c\hat{\tau}_{max}$ 。

2) 当  $f(\sigma) = 0$ , 传播条件为 NLOS 时,不存在 LOS 分量,或者 LOS 路径信号无法检测,最强路径为经过反射、散射等路径到达接收端的信号,估计值  $\hat{\tau}_{max}$  相对直达路径时延  $\hat{\tau}$  存在较大的正偏差。因此,可以构造关于距离的最强路径到达时延随机变量,修正 NLOS 估计误差。在 STAs-STAs 信道中,STAs 均处于同一水平面上,故忽略高度信息。

$$\hat{\tau}_{max} = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}/c + S \quad (11)$$

其中:  $(x, y)$  为目标节点真实坐标;  $(x_i, y_i)$  为第  $i$  个基站的坐标;  $c$  为电磁波在自由空间中的传播速度,取值为  $3 \times 10^8$  m/s;  $S$  为最强 NLOS 路径时延与直达路径时延的差值,服从高斯分布,均值为  $m_{\Delta\tau_{max}}$ , 方差为  $\sigma_{\Delta\tau_{max}}^2$ , 其值可由实验测量统计得出。

因此,NLOS 下的直达距离估计值可以表示为:

$$\hat{d} = c \cdot (\hat{\tau}_{max} - S) \quad (12)$$

步骤 5 提出测量异常值检测机制,设置检测门限  $\xi$ ,当测距误差大于此门限值时,则认为测距失败,丢弃本次测量值,待所有测量值收集完毕后,使用基本的最小二乘估计 (Least Square Estimation, LSE) 法<sup>[16]</sup>给出定位结果。

## 3 仿真结果分析

### 3.1 仿真环境

采用 Matlab 仿真平台在 STAs-STAs 信道模型下对本文提

出的基于波束成形的60 GHz WLAN网络定位算法进行仿真分析,仿真环境为 $10\text{ m} \times 8\text{ m} \times 3\text{ m}$ 的会议室,目标节点MS(Mobile Station)随机分布于会议室中间 $6\text{ m} \times 6\text{ m}$ 、距离地面1 m的工作平台上,而基站BS(Base Station)则位于工作台的4个顶点处。仿真环境平面图如图5所示,接收端Rx接收发射端Tx发射信号经LOS路径、墙壁和天花板一次反射路径、墙壁-墙壁和墙壁-天花板二次反射路径到达的多径信号<sup>[11]</sup>,为简化计算,假设最强路径来自于墙壁或天花板的一次反射路径。

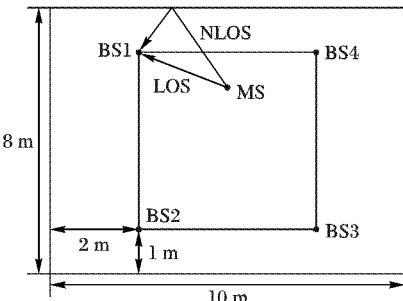


图5 STAs-STAs信道仿真环境平面图

### 3.2 仿真结果

#### 3.2.1 测距性能分析

节点发射信号形式如式(1),信号功率为40 dBm,脉冲宽度为1 ns,载波中心频率为60.5 GHz,采样频率为120 GHz,为波束成形算法提供权值的可控向定向天线的半波束宽度 $HPBW = 30^\circ$ 。假设随机选取的目标节点MS距离基站BS1的真实距离 $d = 4\text{ m}$ ,最强NLOS路径时延与直达路径时延的差值 $S$ 的均值 $m_{\Delta\tau_{\max}}$ 为真实差值,标准差 $\sigma_{\Delta\tau_{\max}} = 0.2\text{ ns}$ ,LOS/NLOS判别阈值 $\varepsilon = 0.5\text{ ns}$ ,异常值检测门限 $\xi = 1\text{ m}$ ,分别在LOS和NLOS传播条件下对传统相干估计算法和本文算法的测距性能进行仿真分析,仿真次数 $N = 100$ ,距离估计误差概率累积分布如图6所示。

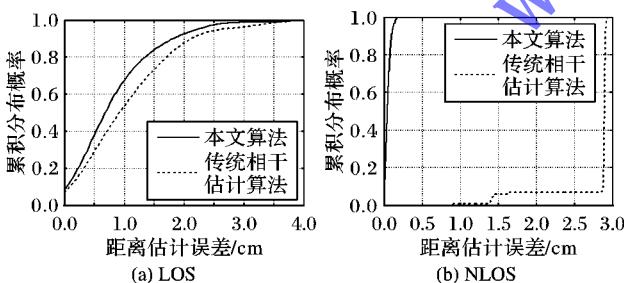


图6 STAs-STAs信道距离估计误差概率累积分布图

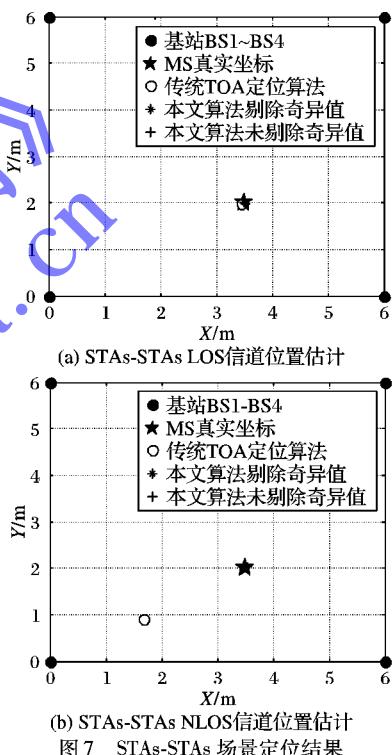
从图6可以看出,在LOS和NLOS信道下,本文算法对测距结果均有提高,在LOS信道下,由于存在直达路径,所以传统相干估计算法已能够取得较好的测距精度,测距误差在2 cm之内的累积概率达88%,基于波束成形的定位算法在一定程度上提高了接收端的信噪比,因此即便在LOS环境下也有约5%的概率提升。而在NLOS信道下,依据本文提出的异常值检测机制,认为测距误差在1 m以上的测量值为异常值,则利用传统相干估计算法进行测距的成功率仅为2%,而本文算法对NLOS测量误差进行修正后,测距误差在10 cm之内的累积概率达90%,误差15 cm之内达98%,测距性能有明显的提升。另一方面,从图6(b)看出,采用传统相干估计算法进行测距时,测距误差分布在2.8~3.0 m的概率约为90%,

为本文对最强路径时延与直达路径时延差值的建模提供实验依据。

由于仿真中假设多径信号仅由墙壁或天花板的一次反射而来,这样接收到的多径信号到达方向间距较大,对角度分辨率的要求较低,因此,即便在可控定向天线的半波束宽度较大的情况下,基于最大功率搜索的波束成形算法也能很好地区分NLOS环境中的多径信号,测距精度较高。但在实际的NLOS环境中,多径来源较多,方向间距变小,需要较窄的天线半波束宽度来提高测距性能。

#### 3.2.2 定位结果

以基站BS2为坐标原点,在工作平台范围内随机产生一个节点作为目标节点MS,采用LSE方法定位,对传统的相干估计算法和本文算法进行比较,仿真次数 $N = 100$ ,定位结果如图7所示。



(a) STAs-STAs LOS信道位置估计  
(b) STAs-STAs NLOS信道位置估计

如图7所示,在LOS环境中,采用本文算法与传统的TOA定位算法所估计的MS坐标与真实坐标非常接近,定位精度较高;而在NLOS环境中,传统TOA定位算法所得到的MS位置估计值严重偏离真实坐标值,本文算法在采用波束成形的基础上对NLOS距离测量值进行修正,从而显著提高了定位精度。

为了对本文算法性能进行定量分析,取位置估计均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)的均值作为定位性能衡量标准:

$$RMSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(x - \hat{x}_i)^2 + (y - \hat{y}_i)^2} \quad (13)$$

其中:  $(x, y)$  为目标节点真实位置,  $(\hat{x}_i, \hat{y}_i)$  为第  $i$  次仿真目标节点的估计坐标。RMSE 仿真结果如表1 所示,使用传统TOA定位算法在NLOS环境下定位失败,而本文算法则实现了cm级定位。

表 1 RMSE 仿真结果

算法	RMSE	
	LOS 环境	NLOS 环境
传统 TOA 定位算法	0.0476	2.1295
本文算法	0.0028	0.0102

进一步降低随机性对定位性能分析的影响, 取定位成功率作为衡量定位性能的另一指标。本文所选用的仿真环境为  $10\text{ m} \times 8\text{ m} \times 3\text{ m}$  的会议室, 因此取定位成功与否的判断阈值为 1 m, 认为定位误差大于 1 m 的定位结果为定位失败。在 LOS 和 NLOS 环境下, 分别采用本文算法和传统 TOA 定位算法进行 1000 次定位仿真实验, 统计结果如表 2 所示。可以看出, 使用传统 TOA 定位算法在 NLOS 环境中几乎无法成功定位, 而本文算法的定位成功率则高达 94%。

表 2 定位成功率仿真结果

环境	传统 TOA 定位算法	本文算法
LOS 环境	98.5	99.0
NLOS 环境	0.5	94.0

## 4 结语

根据 60 GHz 毫米波信号超高的时间分辨率的特点, 本文提出使用 60 GHz 信号进行定位, 并构建了 60 GHz 定位系统框架, 为定位算法研究提供依据。基于波束成形的思想, 本文提出了一种最强路径搜索算法, 波束成形为最强路径的搜索提高了鲁棒性, 通过找到最强信号路径, 结合 60 GHz 室内信道模型对 NLOS 时延偏差进行建模, 从而重构 NLOS 测量数据; 并引入测量异常值检测机制, 通过设置合理的检测门限, 进一步提高定位精度。通过采用 Matlab 仿真平台在 STAs-STAs 信道模型进行仿真分析, 在 LOS 环境下能实现 mm 级定位精度, 在 NLOS 环境下也可实现 cm 级定位精度, 且定位成功率高达 94%, 验证了本文算法的有效性。但是本文算法也存在一定的限制, 对于 NLOS 时延偏差的建模依赖于实验数据的维度, 数据量越大, 建模精度越高, 因此, 如何在独立于实验数据的情况下利用 60 GHz 信号的反射模型提高定位精度是下一步研究的方向之一。

## 参考文献:

- [1] GENTILE C, ALSINDI N, RAULEFS R, et al. Geolocation Techniques: Principles and Applications [ M ]. Berlin: Springer-Verlag, 2013: 1–5.
- [2] 肖竹, 黑永强, 于全, 等. 脉冲超宽带定位技术综述 [ J ]. 中国科学 F 辑: 信息科学, 2009, 39(10): 1112–1124. ( XIAO Z, HEI Y Q, YU Q, et al. Overview of impulse radio ultra-wideband localization technologies [ J ]. Science in China Series F: Information Sciences, 2009, 39(10): 1112–1124. )
- [3] EMAMI S. UWB Communication Systems: Conventional and 60 GHz: Principles, Design and Standards [ M ]. Berlin: Springer-Verlag, 2013: 131–133.
- [4] DANIELS R C, AUSTIN, HEATH R W, Jr. 60 GHz wireless communications: emerging requirements and design recommendations [ J ]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2007, 2(3): 41–50.
- [5] Federal Communications Commission. Electronic code of federal regulations: part 15 — radio frequency device regulations: Subpart F — Ultra-Wideband Operation [ S ]. Washington, DC: U. S. Government Publishing Office, 2006: 501–525.
- [6] RAPPAPORT T S, HEATH R W, DANIELS R C, et al. Millimeter Wave Wireless Communications [ M ]. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2014: 5–6
- [7] FANG H. 60 GHz RSS localization with omni-directional and horn antennas [ D ]. Singapore: National University of Singapore, 2010: 40–48.
- [8] JAFARI A, SARRAZIN J, LAUTRU D, et al. NLOS influence on 60 GHz indoor localization based on a new TDOA extraction approach [ C ]// Proceedings of the 43rd European Microwave Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 330–333.
- [9] REDANT T, AYHAN T, DE CLERCQ N, et al. A 40 nm CMOS receiver for 60 GHz discrete-carrier indoor localization achieving mm-precision at 4 m range [ C ]// Proceedings of the 2014 IEEE International Solid-State Circuits Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 342–343.
- [10] 邹卫霞, 杜光龙, 李斌, 等. 60 GHz 毫米波通信中一种新的波束搜索算法 [ J ]. 电子与信息学报, 2012, 34(3): 683–688. ( ZOU W X, DU G L, LI B, et al. A novel beam search algorithm for 60 GHz millimeter wave communication [ J ]. Journal of Electronics and Information Technology, 2012, 34(3): 683–688. )
- [11] MALTSEV A, ERCEG V, PERAHIA E, et al. IEEE Document 802.11-09/0334r8: Channel models for 60 GHz WLAN systems [ S ]. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 4–6.
- [12] JI Y, YU C, WEI J, et al. Localization bias reduction in wireless sensor networks [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 62(5): 3004–3016.
- [13] WANG L, CHEN J, WEI X, et al. First-order-reflection MIMO channel model for 60 GHz NLOS indoor WLAN systems [ C ]// Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Communication Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 298–302.
- [14] 褚炜. 基于定向天线的无线 Mesh 网络 MAC 机制的研究 [ D ]. 西安: 西安电子科技大学, 2007: 14–19. ( ZHU W. Research on MAC protocols in directional antennas based wireless mesh networks [ D ]. Xi'an: Xidian University, 2007: 14–19. )
- [15] CHEN T, YANG Z, LIU Y, et al. Localization-oriented network adjustment in wireless Ad-Hoc and sensor networks [ J ]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2014, 25(1): 146–155.
- [16] ARABLOUEI R, WERNER S, HUANG Y-F, et al. Distributed least mean-square estimation with partial diffusion [ J ]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(2): 472–484.

## Background

This work is partially supported by the National Natural Science Foundation of China (41527901, 61301139).

**LIU Xing**, born in 1990, Ph. D. candidate. Her research interests include localization algorithm, indoor localization.

**ZHANG Hao**, born in 1975, Ph. D., professor. His research interests include Ultra Wide Band (UWB) communication, satellite navigation, underwater localization.

**XU Lingwei**, born in 1987, Ph. D. candidate. His research interests include Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) communication.