

DOI: 10.7652/xjtuxb201708011

采用多载波相位测距的 Wi-Fi 精密定位方法

贺磊南¹, 卢虎¹, 姬正洲²

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 710077, 西安; 2. 空军工程大学理学院, 710051, 西安)

摘要: 针对当前室内无线局域网 Wi-Fi 定位方法误差大、需要额外辅助设备的问题,提出了一种基于多载波相位测距的 Wi-Fi 精密定位方法。在测距环节,通过中国剩余定理求解多载波相位同余式组实现了距离重构,并给出了一种采用同差处理以降低算法噪声敏感性的方法;在定位环节,基于最小测距误差平方和准则,将带有误差的多边测距定位问题转化为受约束的二次最优规划问题,实现了分米级的 Wi-Fi 定位。实验与仿真结果均表明,所提方法的测距精度可达 mm 级,定位精度在 dm 级,较主流 MUSIC Wi-Fi 定位方法 3~5 m 的定位精度提升了 4 倍以上。

关键词: 无线局域网;中国剩余定理;载波相位;二次规划

中图分类号: TN966.2;TN961 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)08-0065-07

A Precise Positioning Method of Wi-Fi Using Multi-Carrier Phase Ranging

He Leinan¹, LU Hu¹, JI Zhengzhou²

(1. College of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

2. Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: A novel precise positioning method of Wi-Fi based on multi-frequency carrier phase range estimation is proposed to solve the problem that the existing indoor Wi-Fi positioning methods are of low positioning accuracy and need extra auxiliary devices. The distance reconstruction is realized in the ranging step by solving the congruence group of multi-carrier phase based on Chinese remainder theorem (CRT), and a method using the common difference process is given to reduce the noise sensitivity of the algorithm. The positioning problem is transformed into a constrained quadratic optimization problem in the positioning phase based on the minimum criterion of square sum of ranging errors. Simulation and experimental results show that the proposed algorithm achieves the accuracy of millimeter resolution and the positioning accuracy is in sub-meter level. A comparison with the MUSIC positioning method with 3-5 meters accuracy shows that the performance of the proposed positioning method is improved by more than 4 times.

Keywords: wireless local network; Chinese remainder theorem; carrier phase; quadratic optimization

近年来,随着全球卫星定位系统(global navigation satellite system,GNSS)的发展,基于位置的服务(location based service,LBS)应用越来越广泛。

然而,在城市峡谷、室内、地下车库等环境中,卫星信号由于受到遮挡无法进行定位,而建筑物内广泛铺设的 Wi-Fi 网络则为此类环境下的定位服务提供了

收稿日期: 2017-01-09。 作者简介: 贺磊南(1993—),男,硕士生;卢虎(通信作者),男,副教授,硕士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61473308,61174194)。

网络出版时间: 2017-05-11 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170511.1927.002.html>

基础信号条件,因而有关 Wi-Fi 网络的定位逐渐成为导航定位领域的研究热点之一^[1]。

目前,Wi-Fi 定位采用的定位方式主要分为指纹法和几何法两类。指纹法通过前期建立的目标区域匹配图谱库和实时指纹信息匹配定位,最高精度可达米级,但该方法实时性较差,一旦应用场景发生中的要素发生改变即需要更新指纹图谱^[2-4]。几何法的定位性能建立在距离测量基础之上,传统测距方法利用接收信号强度探测(received signal strength indication,RSSI)、到达时间(time of arrival,TOA)和到达时间差(time difference of arrival,TDOA)估计距离,其中 RSSI 测距复杂度低,但易受各类因素的干扰发生衰减^[5-6],精度不高;TOA 测距和 TDOA 测距均需额外的时钟同步设备,增加了网络负担^[7-8]。为了获得更高的定位性能,文献[9]利用对数似然函数度量信道状态信息(channel state information,CSI)的相位和幅度,从而展现出高度的空间区分性;文献[10]利用包含有各子载波相位和幅度的 CSI 生成更加精准的位置指纹,设计了细粒度的指纹定位,但是相关研究受限于指纹定位的方式,仅获得略低于 1 m 的平均定位误差;利用载波相位测距的精度可达到毫米级,可有效提高几何法定位的精度,但存在相位模糊的问题^[11]。文献[12-13]提出采用搜索算法解相位模糊,但该算法的运算复杂度高,需要较大的存储空间,不适用于无线网络。文献[14]提出基于中国剩余定理(chinese remainder theorem,CRT)的测距算法,利用 CRT 解算波长和残余距离构建的同余式组恢复距离,但要求频点等间隔分布。文献[15]提出了采用 CRT 的测距改善算法,能够在高噪声情况下应用 CRT 重构距离,但该算法要求余数的误差是参考项的一半。文献[16]提出了基于双频带的 CRT 测距算法,设置高低两个不互质的频带组,提高了算法的抗噪声性能,但该算法占用大量的频带资源,Wi-Fi 环境下易发生通信冲突。

针对上述问题,本文根据 Wi-Fi 信号多信道、OFDM 多子载波调制的特性^[17],在不改变商用硬件结构的前提下,采用 CRT 提出了一种 Wi-Fi 多载波室内定位的新型精确测距方法,并将带有误差的多边测距定位问题转化为受约束的二次最优化问题实施定位解算。理论仿真和实验结果表明,本文所提方法的测距精度可达毫米级,定位精度在分米级,明显优于现有 Wi-Fi 定位方法。

1 Wi-Fi 多载波相位测距算法

国际电工电子工程协会在 802.11n 协议中划分出 2.4 GHz 和 5 GHz 两个独立的频段,每个频段又划分为若干个信道。我国规定 1~13 信道为可用信道,每个信道的宽度是 22 MHz,一个工作带宽可划分为 52 个子载波,这种多信道的体制为多载波相位测距提供了先决条件。

在多载波测距中,由于电磁波的相位呈现周期性,频率为 $f_i (i=1,2,\dots,n$ 为信道数)的信号经距离 x 传播后,相移 φ_i 存在整周跳变, x 是残余距离 r_i 以波长 λ_i 为模的值

$$x \equiv r_i = \frac{\varphi_i \lambda_i}{2\pi} \bmod \lambda_i \quad (1)$$

由式(1)可知,当仅知道 r_i 和 λ_i 时,不能得到准确的 x 值。文献[14]给出了一种基于 CRT 的测距算法。假设未知距离 $x \equiv r_i \pmod{\lambda_i}, i=1,2,3,\dots,n$,当 $\{\lambda_i\}$ 不互质时,假设其最大公约数为 C ,有 $\lambda_i = C\Gamma_i$,最小公倍数为 $N = CM = C \prod_{i=1}^n \Gamma_i$ 。如果 $x < N$,则 x 可以通过以下步骤被唯一地估计出来。

步骤 1 将相移按照式(1)变换为残余距离 r_i 。

步骤 2 根据波长 $\{\lambda_i\}$,分别求 C, Γ_i, N 和 M 。

步骤 3 由 CRT 重构出距离估计的中间量

$$x_0 \equiv \sum_{i=1}^n c_i b_i \pmod{M} \quad (2)$$

式中: $b_i = \text{round}(r_i/C)$,其中 $\text{round}(\cdot)$ 代表就近取整; $Q_i = M/\Gamma_i$; $c_i = Q_i q_i$,其中 q_i 是 Q_i 的模逆,即 $Q_i q_i \equiv 1 \pmod{\Gamma_i}, i=1,2,3,\dots,n$ 。

步骤 4 计算距离的估计值

$$\hat{x} = Cx_0 + e \pmod{N} \quad (3)$$

式中: $e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_i - b_i C)$ 是 r_i 的公共误差。

分析上述的 CRT 测距算法,不难看出系数 c_i 远大于 1,因此上述理论中的 b_i 对于噪声的敏感度高,而 e 对于噪声的敏感度高。为满足不同场景尤其是室内多径、干扰等场景下的高精度测距,提高算法对于噪声的耐受性是十分必要的。根据 CRT 的相关性质,当集合 $\{b_i\}$ 具有相同误差时,可以大幅提高算法的重构性能。本文提出一种对 $\{b_i\}$ 进行同差处理以降低噪声敏感性的算法,具体步骤如下。

步骤 1 计算 b_1 ,具体公式为

$$b_1 = \text{round}(r_1/C) = b_{10} + \Delta b_1 \quad (4)$$

式中: b_{10} 和 Δb_1 分别表示理论 b_1 的值和误差。

步骤 2 由 b_1 推算得到其余的 b_i 并同差处理

$$b_i = \text{round}((r_i - r_1)/C) + b_1 =$$

$$(r_{i0} - r_{10})/C + b_1 + \text{round}((\Delta r_i - \Delta r_1)/C) + b_1 \quad (5)$$

式中:当满足 $|(\Delta r_i - \Delta r_1)/C| < 0.5$ 时, $(\Delta r_i - \Delta r_1)/C$ 近似取为 0,则每个 b_i 都与 b_1 有着相同的误差 Δb_1 。

将 b_i 与 b_1 有相同误差的概率记为 $P\{|(\Delta r_i - \Delta r_1)/C| < 0.5\} = p$,则全体 b_i 误差相同的概率为 $P_i = p^n$ 。假设 $\Delta r_i \sim N(0, \sigma^2)$,那么 $(\Delta r_i - \Delta r_1) \sim N(0, \sigma^2)$,有

$$p = \frac{1}{2\sigma\pi^{1/2}} \int_{-C/2}^{C/2} \exp\left(-\frac{x^2}{(2\sigma)^2}\right) dx = 2\Phi\left(\frac{C}{8^{1/2}\sigma}\right) - 1 \quad (6)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 是标准正态分布函数; p 的值由 C/σ 决定。若 $C = 25, \sigma = 3, k = 4$,有 $p = 0.978\ 8, P_i = 0.917\ 8$ 。另外,文献[18]提出了一种更好的 CRT 理论,分析了基于最大似然估计的 CRT 和它的快速算法,能够适用于实数和大差异误差方差的情况,重构性能更好,若应用于测距将取得良好的效果,但该算法需要误差的统计分布特性作为构建似然函数的先验信息,同时算法的复杂度和存储需求相对于节点能量有限的 wlan 较大。对于该算法在实际环境中的 Wi-Fi 定位应用,本文后续将展开进一步深入研究。

2 Wi-Fi 多载波精密定位

2.1 测距定位模型

基于 Wi-Fi 网络的定位系统包含几个接入点 (access point, AP) 和一个待定位的用户 u ,用户与接入点 AP_j 之间的距离可表示为

$$d_{u,j} = ((x - x_j)^2 + (y - y_j)^2)^{1/2} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

式中: u 表示待定位的用户,其位置坐标为 (x, y) ; (x_j, y_j) 为第 j 个 AP 的坐标,通常假设已知。

根据测距定位原理,在实际的距离测量中还包含有不可避免的测量误差,使得实际的待定位结果为一个多圆相交的区域,如图 1 所示,任何一个位置坐标都不能满足所有定位方程。本文将带有测距误差的定位问题视为一个最优化问题,可表示为

$$\left. \begin{array}{l} \min \mathbf{a}^T \mathbf{x} \\ \text{s. t. } \mathbf{c} \mathbf{x} \leq \mathbf{b} \end{array} \right\} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{x}$ 是优化对象; $\mathbf{a}, \mathbf{c}, \mathbf{b}$ 是优化参数。本文利用最优化理论,在特定的约束条件下寻求满足目标函数的定位最优解。

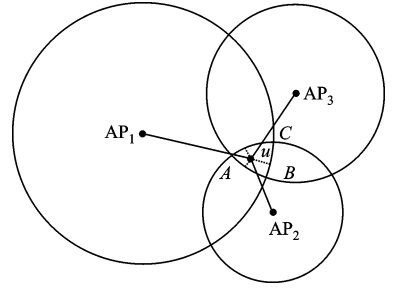


图 1 约束二次最优化定位示意图

2.2 距离预处理的约束二次最优化定位

在得到用户与各 AP 之间的距离之后,采用以下 2 个处理步骤实现定位。

(1)剔除无效距离估计。因室内环境的限制,用户在某些位置接收的信号是由物体反射来的,会导致较大的定位误差,因此需要对距离采取预处理机制。记 AP_m 与 AP_n 之间的距离为 $d_{m,n}$ 。根据用户和 AP 的几何关系,运用三角不等式可知 $|d_{u,m} - d_{u,n}| < d_{m,n}$ 。如果测量的一组距离不满足上述的三角不等式,则认为这个距离是无效的,需剔除。然而,一些信号的反射路径较短仍满足三角不等式,三角约束不能完全剔除无效距离。采用简单的聚类分析进一步剔除无效距离,直接路径的距离估计与真实距离十分接近,误差较小,可聚为一类,而经反射路径的距离估计的误差要大的多,不满足聚类特征。

(2)将定位化为二次最优化问题求解。假设有 3 个 AP 参与定位,如图 1 所示,分别以 3 个 AP 为圆心,以估计距离为半径画圆,3 个圆相交形成图中点 A、B、C 围成的区域,用户的位置必定位于其中,将这个区域称之为有效域 R_A ,即为约束条件。

按照最小误差平方准则,这里目标函数定义为用户到 AP 的测距误差平方和

$$f(x, y) = \sum_{j=1}^n |(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 - d_j^2| \quad (9)$$

式中: $f(x, y)$ 表示以用户为对象的优化目标函数; d_j 为经过预处理后的估计距离。该目标函数的物理意义为假设有效域中存在某一未知节点,当该节点到所有 AP 的欧氏距离与估计距离的误差的平方和最小时,该节点的坐标即为待测节点坐标,达到有效域中的最优解。

至此将求解用户在定位圆围成的区域中的位置问题转化为求解一个约束二次最优化问题,其目标函数和约束条件可描述为

$$\left. \begin{array}{l} \min_{x, y} f(x, y) \\ \text{s. t. } (x, y) \in R_A \end{array} \right\} \quad (10)$$

为避免误差过大产生的有效域不存在的问题,可将约束条件写为另一种形式 $(x-x_j)^2+(y-y_j)^2 \leq d_j^2+2d_j\Delta$ (其中 Δ 为 2 倍的测距标准差),这样,定位圆的半径增大了 $(2d_j\Delta)^{1/2}$,使得定位圆在测距误差较大时仍有交会区域,保证了有效区域的存在。

针对式(10)模型,利用内罚点算法的迭代搜索来求解,采用牛顿法得到每步的迭代步长 $H = \nabla^2 f(x,y)$,具体推导过程参见文献[19]。本文通过调用 MATLAB 中的 fmincon 函数求解 (x,y) ,并不关心具体的求解过程,只关心函数的迭代初值选择有效域顶点中横纵坐标平方和最小的一点作为初值。本文算法完成一次定位评价需调用函数 16 次,平均执行时间为 (0.21 ± 0.03) s。

3 理论分析与定位实验

3.1 基于双 CSI 消除相偏提高相位估计精度

锁相环(phase locked loop, PLL)输出的相位和频率存在随机误差,是影响相位估计精度的主要因素,需要对其消除以提高精度。CSI 是对一条通信链路特性的估计信息,反映信道的时间延迟、幅度衰减和相位偏移的情况。记接收端的相位和频率误差分别为 Φ_i^r, f_i^r ,发射端的为 Φ_i^t, f_i^t ,则接收端和发射端的 CSI 可分别表示为

$$I_i^r(t) = h_{i,0} \exp(j(f_i^r - f_i^t)t + j(\Phi_i^r - \Phi_i^t)) \quad (11)$$

$$I_i^t(t) = h_{i,0} \exp(j(f_i^t - f_i^r)t + j(\Phi_i^t - \Phi_i^r)) \quad (12)$$

802.11 协议定义了一个特殊的机制,允许发射端和接收端之间传输详细的 CSI,同时由于信道具有互易性,因此式(15)、(16)中的无线信道 $h_{i,0}$ 相同^[20]。将在收发两端测量的 CSI 相乘得到

$$h_{i,0}^2 = I_i^r(t) I_i^t(t) = a^2 \exp(-2j\varphi_{i,0}) \quad (13)$$

式中: a 为信号幅度; $\varphi_{i,0}$ 为理论相移。收发两端的 CSI 相乘,有效消除了 PLL 误差,获得了较高精度的估计相位。

3.2 算法性能分析

3.2.1 仿真参数设置 本小节主要验证本文 CRT 算法在已知一组频率及其相应残余相移的基础上,对于距离真值的恢复性能。选取载波频率为 2.412、2.462、5.18、5.825 GHz,每个频点的相移误差为小于 $\pi/2$ 的高斯随机量,考虑 Wi-Fi 测距定位主要应用于室内,具有短距离和低信噪比的特点,仿真的距离分别选取 1、25、50 m,信噪比选取 -10、-5、0、5、10、15、20 dB,相位采样周期为 0.105 1 ms,采用蒙特卡罗法对每个距离进行 1 000 次仿真。

3.2.2 测距精度分析 采用测距误差作为测距算

法精度的性能指标,将本文 CRT 算法与传统的 TOA 测距及 RSSI 测距算法相比较,在接收端完成测相和误码率探测,在不同的信噪比下各进行了 100 次仿真,并取其均值作为最终的测距误差,以提高可信度,仿真结果如图 2 所示。

由图 2 可以看出,在近距离测量时, RSSI 算法的误差较小, TOA 算法由于小值误差的存在导致距离估计误差较大,而本文 CRT 算法的误差较前两种算法更小;远距离测量时, TOA 算法的误差较小, RSSI 算法因为信号衰减缘故,易受噪声干扰,误差较大,本文 CRT 算法的定位精度变化不大,性能较好。因此,本文提出的测距算法的性能优于传统的测距方法。同时在低信噪比区域, CRT 算法也有良好的测距精度,表明本文采用的量测同差处理的降噪方法有效地降低了噪声造成的误差干扰。对比图 2 的 3 个不同距离下的仿真结果可以看出,本文 CRT 算法的精度主要受信噪比的影响,而与要估计的距离值关系不大。

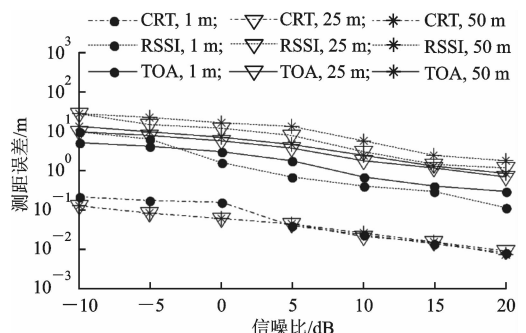


图 2 3 种算法在不同信噪比下的性能比较

3.3 定位实验

3.3.1 实验条件设置 实验系统由 n 个位置已知的 AP、待定位目标用户 u 和定位服务器组成,如图 3 所示。选择 HP Z200 Workstation 为定位服务器、HMUN 220 二代软件无线电平台(Universal Software Defined Peripheral, USRP2)作为 AP,安装支持 802.11n 的 Intel 5300 无线网卡子板,连接 PC 运行,如图 4 所示。Intel 5300 以 30 个子载波组的形式提供无线传输信道的信道状态信息, TNS-CSI Tool 包括所有采集 CSI 数据所需的软件和脚本,本文利用 TNS-CSI Tool 读取和解析信道测量,并实时存储 CSI。在 Win 7 环境下将跳频/同步协议作为驱动补丁写入 USRP2 网卡驱动程序中,以控制 AP 与用户的信道同步,跳频频率与仿真相同。实验区域为常见的室内定位环境,面积为 5 m×12 m,有电脑,座椅及实验设备等物品,如图 5 所示,在

场地随机选取 15 个点作为用户节点的定位实验位置(图中方形点),对其载波相位估计、测距和定位进行实验分析。

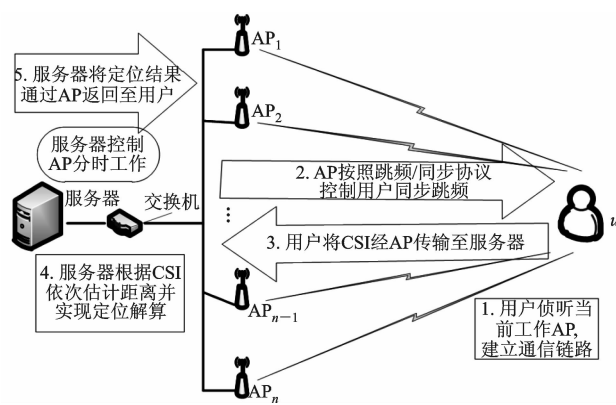
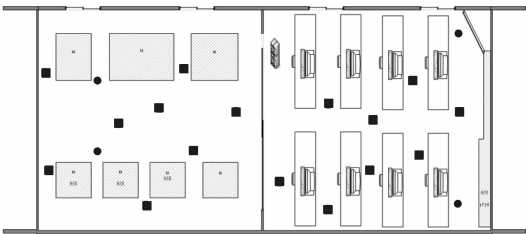


图 3 定位实验系统示意图



图 4 使用 USRP2 平台搭建的接入节点



●:锚接点的部署位置;■:用户节点

图 5 定位实验场景

实验中,服务器通过网关与 AP 连接,并控制 AP 分时工作。根据跳频/同步协议,AP 每 50 ms 执行一次跳频,数据包速率为 20 帧/s,对每个数据包提取 30 个子载波的 CSI,获取相位信息进行测距。用户依次与 4 个 AP 测距通信后,将量测参数数据包通过 AP 传送至服务器,由服务器进行数据处理,实现一次定位解算,并在当前通信 AP 的数据包中加入定位结果,将其返回给用户。

3.3.2 实验结果 使用中心频率为 2.462 GHz 的信道在 15 m 处测距通信 500 次,理论相移为 59.7°,利用 CSI 消除 PLL 误差得到的载波相位的实验结果如图 6 所示。由图 6 可见:原始的相位呈现出很大的随机性,利用此相位得到的估计距离会给测距

算法带来严重的误差干扰;对收发两端的 CSI 相乘处理后的相位则呈现集中的相关性,相位估计的均值为 67.4°。实验结果表明,本文方法有效地消除了 PLL 误差,获取的载波相位精度较高。

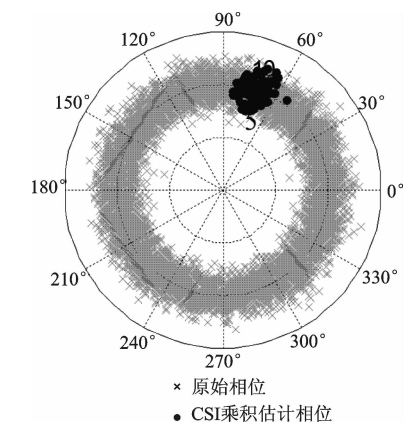


图 6 利用 CSI 消除 PLL 误差得到的载波相位

采用本文方法在不同距离下进行 50 次测距实验,并进行距离预处理,距离估计误差均值的实验结果如图 7 所示。可以看出,1 m 时的测距平均误差为 9 cm,15 m 时为 25 cm,测距精度较高,同时距离的增大减小了信噪比,引起了误差的增大。对比预处理前后的估计距离可以看出,距离预处理后的误差均值有所减小,表明预处理机制有效剔除了错误的距离估计,进一步改善了测距精度。

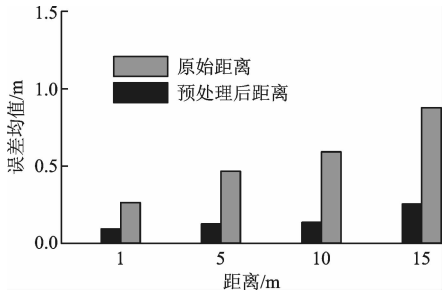


图 7 距离估计误差的均值

图 8 为本文方法与 Synchronicity 系统^[2]和 MUSIC 系统^[21]的定位误差累积分布结果。在每个待定位点分别进行 10 次定位实验,有效的定位结果

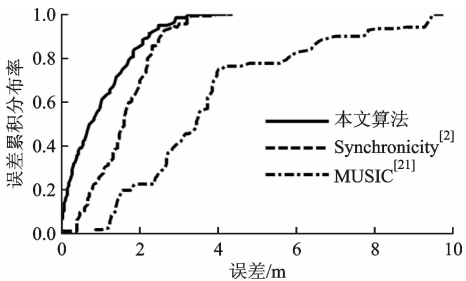


图 8 本文定位方法与现有方法的误差累积分布比较

为 119 个。可以看出,本文方法的中位误差为 0.79 m, Synchronicity 和 MUSIC 的中位误差分别为 1.6 m 和 3.6 m, 本文方法的性能优于其他两者, 实现了 dm 级的高精度定位。本文方法的最大误差为 4.2 m, 这是因为在某些定位执行时, 接收端受到环境因素的影响信噪比较大, 导致距离估计误差增大, 最终引起了定位结果的恶化。本文方法的最大误差与传统基于 RSSI 测距和 TOA 测距的定位方法的平均误差相当, 定位性能得到较大改善。

3.4 误码率性能分析

本文所提出的测距定位方法需要 Wi-Fi 接入点与用户端多个频点协同工作, 为检验其对 Wi-Fi 通信质量的影响, 将误码率作为衡量通信质量的指标, 仿真条件同 3.2 节, 另设单频点的持续时间为 2 ms, 即每 2 ms 进行一次跳频, 通信距离为 10 m, 信噪比为 20 dB。

图 9 显示了一个跳频周期内的误码率分布, 对比只进行通信职能的 Wi-Fi 误码率, 可以看出在一个周期内, 进行定位的 Wi-Fi 有一个误码率值为 0.32 的峰值点, 其余误码率均小于 0.05, 该峰值点即为发射机与接收机执行跳频的时刻, 由于发射机较接收机执行跳频有微小的延时, 从而造成发射机的载波频率与接收机的载波频率不同步, 引起了误码率的增大。同时, 由图 6 还可以看出, 随着发射机的载波频率跳向下一频点, 误码率也随之恢复正常, 并且这一高误码率持续的时间约为 20 μ s, 仅占一个跳频周期的 1%, 表明本文所提测距定位方法不会对 Wi-Fi 通信质量造成较大影响。

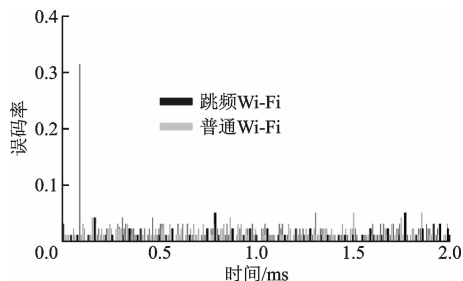


图9 跳频对误码率的影响

4 结束语

本文深入探究了 Wi-Fi 技术体制对定位性能的辅助能力, 通过挖掘 Wi-Fi 多频点测相的优势, 提出了一种 Wi-Fi 多载波精密测距定位方法。本文所提方法与传统 Wi-Fi 定位所采取的 RSSI 和 TOA 测距方法相比有着优异的精度性能, 能将 Wi-Fi 定位

的精度指标提升一个数量级至 dm 级别, 将对室内定位技术的发展起到很好的促进作用。

参考文献:

- [1] ILIEV N, PAPROTNY I. Review and comparison of spatial localization methods for low power wireless sensor networks [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(10): 5971-5987.
- [2] XIONG Jie, JAMIESON K, SUNDARESAN K. Synchronicity: pushing the envelope of fine-grained localization with distributed MIMO [C]//Proceedings of the 1st ACM Workshop on Hot Topics in Wireless. New York, USA: ACM, 2014: 43-48.
- [3] 李季碧, 李宾, 任智, 等. 自适应动态功率控制的机会网络节能高效路由算法 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(12): 49-56.
LI Jibi, LI Bin, REN Zhi, et al. An efficient energy-saving routing algorithm for opportunistic networks with dynamically adaptive power control [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(12): 49-56.
- [4] XIAO Tingting, LIAO Xingyu, HU Ke, et al. Study of fingerprint location algorithm based on Wi-Fi technology for indoor localization [C]//Proceedings of the 10th International Conference on Wireless Communications Network and Mobile Computing. London, UK: IET, 2014: 604-608.
- [5] YAGHOUBI F, ABBASFAR A A, MAHAM B. Energy-efficient RSSI-based localization for wireless sensor networks [J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(6): 973-976.
- [6] 蒋锐, 杨震. 基于质心迭代估计的无线传感器网络节点定位算法 [J]. 物理学报, 2016, 65(3): 030101.
JIANG Rui, YANG Zhen. An improved centroid localization algorithm based on iterative computation for wireless sensor network [J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(3): 030101.
- [7] NGUYEN N H, DOGANCAI K. Optimal geometry analysis for multistatic TOA localization [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(16): 4180-4193.
- [8] SAVIC V, FERRER-COLL J, ANGSKOG P, et al. Measurement analysis and channel modeling for TOA-based ranging in tunnels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(1): 456-467.
- [9] SEN S, RADUNOVIC B, CHOUDHURY R R, et al. You are facing the Mona Lisa: spot localization using PHY layer information [C]//Proceedings of the 10th International Conference on Mobile Systems, Applica-

- tions, and Services. New York, USA: ACM, 2012: 183-196.
- [10] XIAO Jiang, WU Kaishun, YI Youwen, et al. FIFS: Fine-grained indoor fingerprinting system [C]// 2012 21st International Conference on Computer Communications and Networks. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 1-7.
- [11] 杜保强, 刘丹, 王延峰. 基于群周期相位比对的 GPS 载波相位测量方法 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(5): 1086-1092.
- DU Baoqiang, LIU Dan, WANG Yanfeng. GPS carrier phase measurement method based on group-period phase comparison [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(5): 1086-1092.
- [12] 张红敏, 靳国旺, 徐青, 等. 中国余数定理在双基线 insar 相位解缠中的应用 [J]. 测绘学报, 2011, 40(6): 770-777.
- ZHANG Hongmin, JIN Guowang, XU Qing, et al. Application of Chinese remainder theorem in phase unwrapping for dual-baseline in SAR [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2011, 40(6): 770-777.
- [13] HUANG Qian, ZHOU Huiqun, DONG Shaochun, et al. Parallel branch-cut algorithm based on simulated annealing for large-scale phase unwrapping [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(7): 3833-3846.
- [14] WANG Chen, YIN Qinye, CHEN Hongyang. Robust Chinese remainder ranging method based on dual-frequency measurements [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(8): 4094-4099.
- [15] DENG Ping, CUI Yunhe. An improved distance estimation algorithm based on generalized CRT [C]// IEEE Vehicular Technology Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 1-5.
- [16] YANG Bin, WANG Wenjie, XIA Xianggen, et al. Phase detection based range estimation with a dual-band robust Chinese remainder theorem [J]. Science China: Information Sciences, 2014, 57(2): 22302-22310.
- [17] DEEK L, GARCIA-VILLEGES E, BELDING E, et al. Intelligent channel bonding in 802.11n WLANs [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014, 13(6): 1242-1255.
- [18] WANG Wenjie, LI Xiaoping, WANG Wei, et al. Maximum likelihood estimation based robust Chinese Remainder Theorem for real numbers and its fast algorithm [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 63(13): 3317-3331.
- [19] WALTZ R A, MORALES J L, NOCEDAL J, et al. An interior algorithm for nonlinear optimization that combines line search and trust region steps [J]. Mathematical Programming, 2006, 107(3): 391-408.
- [20] GREENGARD L, LEE J Y. Accelerating the nonuniform fast Fourier transform [J]. SIAM Review, 2004, 46(3): 443-454.
- [21] LI Xinrong, PAHLAVAN K. Super-resolution TOA estimation with diversity for indoor geolocation [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2004, 3(1): 224-234.

(编辑 刘杨)

(上接第 64 页)

- CHEN Peng, QIU Ledu, WANG Yu. Joint optimization algorithm of detection threshold and power allocation for satellite underlay cognitive radio [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(6): 31-36.
- [11] YANG X, TANG W, GUO W. Efficient joint resource allocation for OFDM-based cooperative cognitive radio networks with rate-guarantee [J]. KSII Transactions on Internet and Information Systems, 2014, 8(9): 3004-3015.
- [12] LUO F, YE Y, WU B, et al. Power allocation based on fast water-filling for energy efficient OFDM and MI-MO transmissions [C]// Proceedings of 2012 IEEE Global Communications Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 4758-4763.
- [13] MAO J, XIE G, GAO J, et al. Energy efficiency optimization for OFDM-based cognitive radio systems; a water-filling factor aided search method [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2013, 12(5): 2366-2375.
- [14] DONG L, REN G. Optimal and low complexity algorithm for energy efficient power allocation with sensing error in cognitive radio network [C]// Proceedings of 2014 the 6th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 1-5.
- [15] DIGHAM F F, ALOUINI M S, SIMON M K. On the energy detection of unknown signals over fading channels [J]. IEEE Transactions on Communications, 2007, 55(1): 21-24.

(编辑 刘杨)