

# 基于中国剩余定理的 Wi-Fi 室内精密定位新方法

贺磊南<sup>1</sup>, 卢 虎<sup>1</sup>✉, 姬正洲<sup>2</sup>

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

**摘要** 针对当前室内无线局域网 Wi-Fi 定位方法定位精度不高的问题, 提出了一种基于中国剩余定理的 Wi-Fi 室内载波相位精密定位新方法。该方法通过深入探究 Wi-Fi 技术体制对于提升测距性能的潜在辅助效能, 在不改变商用硬件结构的前提下, 根据 Wi-Fi 信号多频调制的特性, 利用多个频点的载波相位测量值构建同余式组, 并基于中国剩余定理进行解算实现测距, 有效消除了载波相位测距中的整周模糊度, 并对所提方法的测距精度、噪声敏感等问题进行了分析, 给出了一种提升测距精度并降低噪声敏感性的方法。根据实际定位应用需求, 分别配置载波频率、SNR、和量测距离, 搭建仿真系统, 该方法与现有的 RSSI 和 TOA 测距各进行 100 次对比仿真实验, 仿真结果表明, 在 20 dB SNR 和 25 m 量测距离的条件下, 所提方法的平均测距精度为 8.8 mm, 明显优于现有通用 Wi-Fi 定位方法, 具有很好的理论和实际应用价值。

**关键词** 无线局域网; 中国剩余定理; 载波相位; 整周模糊度

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.06.012

**中图分类号** TN966.2; TN961 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)06-0070-06

## A New Method in Wi-Fi Indoor Localization Based on Chinese Remainder Theorem

HE Leinan<sup>1</sup>, LU Hu<sup>1</sup>✉, JI Zhengzhou<sup>2</sup>

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

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

**Abstract:** Aimed at the problem that the localization accuracy of current indoor Wi-Fi positioning method is low a new method of Wi-Fi indoor carrier phase precise location based on Chinese remainder theorem is proposed. According to the characteristics of Wi-Fi signal multi-frequency modulation, the proposed algorithm explores the potential auxiliary efficiency of Wi-Fi technology to improve the indoor ranging performance without changing the structure of commercial hardware. The congruence group is constructed by using the carrier phase measurement of multiple frequency points, and solving the group to measure distance based on Chinese Remainder Theorem, thus effectively eliminating the integer ambiguity in the carrier phase ranging. On the basis of analyzing the ranging accuracy and the noise sensitivity, a method is presented reduce noise sensitivity. According to the actual positioning application requirements, the carrier frequency, SNR, and measurement distance are respectively configured to build a simulation system. This method is compared with the existing RSSI and TOA for 100 simulation experiments. The simulation re-

收稿日期: 2017-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(61174194; 61473308)

作者简介: 贺磊南(1993—), 男, 陕西西安人, 硕士生, 主要从事多源导航信息融合研究. E-mail: leinanhe@163.com

通信作者: 卢 虎(1975—), 男, 陕西西安人, 副教授, 主要从事全源导航研究. E-mail: 10956087@qq.com

**引用格式:** 贺磊南, 卢虎, 姬正洲. 基于中国剩余定理的 Wi-Fi 室内精密定位新方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(6): 70-75. HE Leinan<sup>1</sup>, LU Hu, JI Zhengzhou. A New Method in Wi-Fi Indoor Localization Based on Chinese Remainder Theorem [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(6): 70-75.

sults show that the average ranging accuracy of the proposed method is 8.8 mm under the condition of 20 dB SNR and 25 m measurement distance. The method is superior to the existing universal Wi-Fi positioning method and is of great value to application in terms of theory and practice.

**Key words:** wireless sensor network; Chinese remainder theorem; carrier phase; integer ambiguity resolution

Wi-Fi 定位技术可以弥补传统卫星导航无法应用于室内的不足,随着移动互联网普及、物联网应用兴起,作为物联网和位置大数据基础的室内定位技术,渐渐成为刚需,基于 Wi-Fi 定位技术无线局域网已广泛用于包括小型商业、应急救援、交通、医疗、军事、科技以及日常生活在内的多个领域,并对亚米级定位精度的性能需求日益迫切<sup>[1]</sup>。

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。指纹法需要前期建立目标区域庞大的匹配图谱库及放置数量众多的 Wi-Fi 热点,最高精度可达米级,但该方法实时性较差,一旦应用场景中的要素发生改变即需要更新指纹图谱<sup>[2-5]</sup>;几何法的定位性能建立在精确距离测量基础之上,其中接收信号强度探测(Received Signal Strength Indication, RSSI)测距易受各类因素的干扰发生衰减<sup>[6-8]</sup>,精度不高,时间到达估计(Time of Arrival, TOA)和到达时间差估计(Time Difference of Arrival, TDOA)测距均需要终端增添额外时钟同步设备,效费比较低<sup>[9-11]</sup>。为了获得更高的测距定位性能,国内外学者在该领域进行了大量研究,主要有引入多源信息辅助<sup>[12-13]</sup>和提升滤波算法<sup>[8-9,14]</sup>两大类方法,但是相关研究均未能将精度提升至分米级,对于绝大多数室内十米级的小尺度场景而言,Wi-Fi 定位性能仍有很大的提升空间。如何深度挖掘和利用无线局域网的普遍性以及 Wi-Fi 技术体制中信号的特殊性,以实现室内分米级的精准定位是本文研

究的出发点。

## 1 系统模型

目前, Wi-Fi 定位研究中,无论采用指纹法还是几何法,都将 Wi-Fi 信号等同于传统陆基无线电导航定位体制(VOR、DME、MLS)中的导航信标信号,并未深入探究 Wi-Fi 通信 OFDM、MIMO 等通信体制对于提升测距性能的潜在辅助效能,有鉴于此,本文根据 Wi-Fi 信号多频点调制的特性<sup>[16]</sup>,在不改变商用硬件结构的前提下,提出了一种基于中国剩余定理(Chinese Remainder Theorem, CRT)<sup>[17-18]</sup>的可用于 Wi-Fi 室内定位的新型精确测距方法,该方法利用多个频点的测相值实施距离估计,并对所提方法的测距精度、噪声敏感等问题进行了仿真分析,给出了一种提升高精度测距并降低噪声敏感性的方法,在各频点测相误差的差值小于 $\frac{\pi}{2}$ 时能够大幅降低测距算法的噪声敏感性。研究表明,本文所提方法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,具有很好的具有很好的理论和实际应用价值。

IEEE 802.11 系列标准对无线局域网的物理层(PHY)和接入控制层(MAC)进行了规范,在通用的 MAC 层下制定了多个 PHY 层,以适应多种无线传输环境,各主流协议的性能对比分析见表 1。

表 1 802.11 系列标准技术指标

Tab. 1 802.11's standard index

版本	802.11b	802.11a	802.11g	802.11n	802.11ac
频段/ GHz	2.4	5	2.4	2.4/5	2.4
调制	DSSS	OFDM	OFDM/DSSS	MIMO-OFDM	MIMO-OFDM
天线	1×1 SISO	1×1 SISO	1×1 SISO	4×4 MIMO	8×8 MIMO

从表 1 可以明显看出,现在绝大多数 Wi-Fi 硬件所支持的多载波 PHY 技术,并未在现有指纹定位和几何定位中获得充分利用,为使研究更具有代表性,本文以当前 Wi-Fi 硬件制造厂商普遍采用的主流 802.11n 协议为例开展研究。

假设 Wi-Fi 无线网络中有数个接入节点(Access Point, AP)和 1 个用户节点。若用户节点能够精确测得每个 Wi-Fi AP 与自身之间的距离,那么

即可得到自身的位置信息。利用双频载波相位进行精密测距定位的方法,在传统卫星导航领域已有诸多研究成果<sup>[19-20]</sup>,如窄巷法,宽巷法等,由于卫星导航信号的频点均是精心挑选出来的,相关研究成果并不具有普适性,且现有方法解相位模糊度的方法实时性不强,并不适用于室内定位场景,因此有必要针对 Wi-Fi 的多频特点,深入挖掘多频载波定位体制的物理内涵,提出一种具有通用意义的载波相位

测距定位方法。

根据电磁波在空间传播的性质,设频率为  $f_i$  的 Wi-Fi 信号在距离为  $d$  的直线传播后相移  $\varphi_{i,0}$  可表示为:

$$\varphi_{i,0} = \frac{df_i}{c2\pi} \pmod{2\pi} \quad (1)$$

式中: $c$  为光速;下标“0”表示理想相位偏移。显然,  $\varphi_{i,0}$  取值总是介于  $[0, 2\pi]$  之间。由于,频率为  $f_i$  信号的相位的整周期跳变部分无法直接量测,因此由相移  $\varphi_{i,0}$  解算出的接入点与用户距离估计  $D_{i,0}$  是真实距离  $d$  以波长  $\lambda_i$  ( $\lambda_i = \frac{c}{f_i}$ ) 为模的值:

$$D_{i,0} = \frac{\varphi_{i,0}\lambda_i}{2\pi} \equiv d \pmod{\lambda_i} \quad (2)$$

假设  $f_i = 2.5$  GHz ( $\lambda_i = 12$  cm),若用户端相位为  $\pi/2$ ,由于不能得到准确的整周跳变,所以只能得到以  $2\pi$  为模的相位值。也就是说,距离测量结果合

理取值可以是  $\frac{\pi}{2} \frac{\lambda}{2\pi} + n\lambda$  即 3 cm、15 cm、27 cm 等。

显然,用户终端不能只在单一的频率点上通过测相的方式来得到自身与接入点间的距离。但若位置已知的 Wi-Fi AP 可以发射多频信号(设为  $f_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )),通过 MAC 协议控制 Wi-Fi AP 与用户终端在几个特定频率点间同步通信,即可得到多组 Wi-Fi 无线信道的相位测量信息,用这些不同频点的相位信息进行距离估计,则只有唯一的值满足所有测量结果,从而精确量测得到用户节点与某个 AP 之间的距离。

如图 1 所示,图中的每一小格代表 802.11n 中 OFDM 载波的波长,对于 0.6 m 的距离,若选用  $\{2.412, 2.462, 5.18, 5.3, 5.825\}$  GHz 多个信号频率进行距离估计,每个频点都有多个估计量,显然,仅有 0.6 m 能够同时满足所有频点的估计结果。

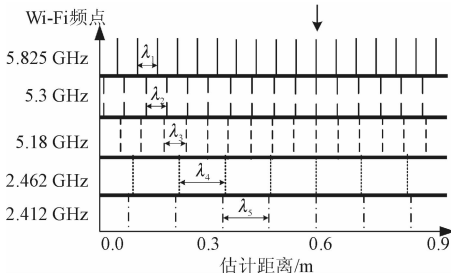


图 1 CRT 测距算法原理图

Fig. 1 CRT ranging algorithm theory

设一组不同频率所对应的相位为  $\{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n\}$  则其与距离的关系为:

$$d = k_i\lambda_i + D_{i,0}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

其中  $k_i$  为一个未知的整数,该方程组的解即为去除

了整周模糊度的用户与 AP 间的距离。

由中国剩余定理(CRT)可知,对两两互素的正整数有同余式组:

$$\begin{cases} x = r_1 \pmod{d_1} \\ \vdots \\ x = r_i \pmod{d_i} \end{cases} \quad (4)$$

对于模  $D = d_1 d_2 \dots d_i$  有唯一解:

$$x = \frac{D}{d_1} x_1 r_1 + \dots + \frac{D}{d_i} x_i r_i \pmod{D} \quad (5)$$

式中: $x_i$  是同余式  $\frac{D}{d_i} x_i r_i \equiv 1 \pmod{d_i}$  的解。

因此,可以采用 CRT 对观测到的多个 Wi-Fi 相位和频率数据进行处理,通过对多个波长值及其对应的残余距离值构建同余式组,并求公共解,得到准确的位置估计量,避免了传统方法中的解整周模糊度问题。需要指出的是,根据 CRT 相关理论,对一组不同 Wi-Fi 频率的信道进行观测,若这组频率相对应的波长是互质的或是有较小的最大公约数(LCM),则对于被除数即距离的恢复效果最好。

由表 1 可知,IEEE 802.11n 划分了 2 个独立的频段:2.4 GHz 和 4.9/5.8 GHz。每个频段又划分为若干个信道,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。图 2 给出了 2.4 GHz 频段下的 Wi-Fi 信道划分示意图,其中我国规定可用的信道有 1~13 信道。802.11 调制方式中,这种离散的不等间隔的频率分布为 CRT 提供了很好的先决条件,而这些多频信息在现有 Wi-Fi 定位技术研究中,未被很好利用。

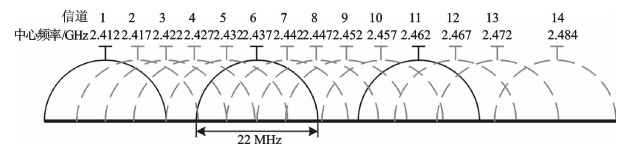


图 2 2.4 GHz 频段的信道划分

Fig. 2 Channel distribution of 2.4 GHz frequency

上面构建了测距数学模型,要在商用 Wi-Fi 网卡上实现必须确保发射机和接收机的频率是在多个频点之间同步跳变的。我们使用一个由 AP 发射机驱动的跳频协议。在向下一频点转换之前,发射机首先广播一个包含需要跳向的频点的指令数据包。接收机接收到这个数据包之后返回一个获知的回答数据包,然后跳向下一频点。发射机在接收到这个回答数据包之后也立即跳向下一频点。在任何一个频点,如果发射机或接收机在给定的频点持续时间内没有接收到回答数据包或是指令数据包,则它们会跳向一个指定的缺省频率,再次执行跳频协议,以此作为故障安全机制。

## 2 基于中国剩余定理的 Wi-Fi 载波相位测距算法

### 2.1 算法描述

利用 CRT 重构距离,要求输入的余数与除数必须是整数,但距离  $d$  一般是一实数。因此在应用 CRT 进行测距定位时,首先需要将“除数”(波长)和“余数”(直接估计距离)量化为整数。

$$\Lambda_i = \left[ \frac{\lambda_i}{u} \right], \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$r_{i0} = \left[ \frac{D_{i0}}{u} \right] = \left[ \frac{\varphi_{i0} \lambda_i}{2\pi u} \right], \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

式中: $u$  代表量化因子; $[\cdot]$  代表取最接近的整数值。在实际应用中,因为噪声干扰的原因,测量值是有误差的,将实际的测量值记为:

$$r_i = r_{i0} + \Delta r_i \quad (8)$$

式中: $\Delta r_i$  是第  $i$  个频点对应的余数的误差。当除数  $\Lambda_i$  不互质时,假设其最大公约数(GCD)为  $C$ , 且有  $\Lambda_i = C\Gamma_i$ , 其中  $\Gamma_i$  互质即:

$$(\Gamma_i, \Gamma_j) = 1, \quad i \neq j \quad (9)$$

式中: $(\cdot)$  代表 GCD。 $\{\Lambda_i\}$  的 LCM 为  $N = CM =$

$$C \prod_{i=1}^n \Gamma_i.$$

可以将利用 CRT 进行距离估计的方法进行如下描述:

假设  $x \equiv r_i \pmod{\Lambda_i}, i = 1, 2, \dots, n$ , 为量化后的未知距离。如果  $x < N$ , 则  $x$  可被唯一地估计出来:

$$x \equiv Cx_0 + e \pmod{N} \quad (10)$$

式中:

$$x_0 \equiv \sum_{i=1}^n c_i b_i \pmod{M} \quad (11)$$

$$c_i = Q_i q_i \quad (12)$$

$$Q_i = M/\Gamma_i \quad (13)$$

式中: $q_i$  是  $Q_i$  的模逆,即  $Q_i q_i \equiv 1 \pmod{P_i}, i = 1, 2, \dots, n$ 。有关  $q_i$  的计算可以使用扩展欧几里得算法或是其他一些改进的算法,文献[18]有详细的计算方法,不再赘述。注意到  $c_i$  的值由  $P_i$  所决定而非测量数据,因此在计算  $c_i$  时,可通过对工作频率进行选择得到更高的计算效率。式(9)中的  $b_i$  为:

$$b_i = [r_i/C] \quad (14)$$

式中: $[\cdot]$  代表取最接近的整数值。 $e$  是  $r_i$  的公共余数,通过下式计算:

$$e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_i - b_i C) \quad (15)$$

上述扩展 CRT 的闭式运算得到了整数  $x$  的唯一解。最终,即可计算出关于距离的估计值:

$$\hat{d} = xu \quad (16)$$

综上,基于 CRT 的载波相位测距算法的步骤归纳为:

**步骤 1** 初始化,并将频率和相移变换为波长  $\lambda_i$  和残余距离值  $r_i$ ,再除以量化因子  $u$  并取整,以满足 CRT 的要求;

**步骤 2** 根据这组波长的 GCD,将波长进行处理,使其互质,计算互质处理后的波长的 LCM;

**步骤 3** 按照 2.1 节式(16)所描述的方法,对  $b_i$  进行处理,得到有相同误差的残余距离;

**步骤 4** 累加计算  $x$  值,累加次数为频点的数量,每次的累加值为  $Q_i \times q_i \times b_i$ ;

**步骤 5** 计算  $x$  除以  $N$  的余数 LCM,将该值乘以量化因子  $u$ ,即可得到距离  $d$  的估计值。

### 2.2 提升算法噪声耐受性的改进措施

分析上文 CRT 测距算法,不难看出  $b_i$  的系数  $c_i$  远大于 1,因此上述理论中的  $b_i$  对于噪声的敏感度高,而  $e$  对于噪声的敏感度低。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  $b_i$  具有相同的测距误差时,可以大幅减少噪声对于测距精度的影响。于是问题就转化为如何设计算法使得  $b_i$  的测距误差的值相同。

如果用式(11)计算  $b_1$ ,可得到  $b_1 = [r_1/C] = b_{10} + \Delta b_1$ 。其余的  $b_i$  采用式(14)进行计算:

$$b_i = (r_{i0} - r_{10})/C + b_1 + (\Delta r_i - \Delta r_1)/C \quad (17)$$

因为噪声的存在使得  $b_i$  有着随机的误差。如果  $(\Delta r_i - \Delta r_1)/C$  项不引入误差,则  $b_i$  与  $b_1$  将有相同的误差。这里在算法中对  $b_i$  进行如下的处理:

$$b_i = \text{round}((r_i - r_1)/C) + b_1 = (r_{i0} - r_{10})/C + b_1 + \text{round}((\Delta r_i - \Delta r_1)/C) + b_1 \quad (18)$$

当满足  $|(\Delta r_i - \Delta r_1)/C| < 0.5$  时,  $(\Delta r_i - \Delta r_1)/C$  即被近似取为 0,有:

$$b_i = (r_{i0} - r_{10})/C + b_1 = b_{i0} + \Delta b_i \quad (19)$$

由式(17)可以表明每个  $b_i$  都与  $b_1$  有着相同的误差,最终的误差是  $\Delta b_1$  而非  $\sum_{i=1}^n c_i \Delta b_i$ 。

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

$$p = \frac{1}{2\sigma\sqrt{\pi}} \int_{-C/2}^{C/2} \exp\left(-\frac{x^2}{(2\sigma)^2}\right) dx = 2\Phi\left(\frac{C}{2\sqrt{2}\sigma}\right) - 1 \quad (20)$$

式中: $\Phi(\cdot)$  是标准正态分布函数; $p$  的值由  $C/\sigma$  决定。若  $C = 25, \sigma = 3, k = 4$ , 有:  $p = 0.9788, P_i = 0.9178$ 。

### 3 仿真与实验分析

#### 3.1 算法性能仿真分析

##### 3.1.1 仿真参数设置

本小节主要验证 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。仿真条件设置如下:

任意选择 IEEE802.11n 协议所分配的频点中 4 个互质的频点  $\{2.412, 2.462, 5.18, 5.825\}$  GHz (对应波长  $\{0.1244, 0.1219, 0.0579, 0.0515\}$  m),选取每个频点的相移误差为小于  $\pi/2$  的高斯随机量,量化步长  $u=0.0001$  m,  $GCD=1$ 。考虑 Wi-Fi 测距定位主要应用于室内,具有短距离和低 SNR 的特点,仿真的距离分别选取 1 m、25 m、50 m, SNR 选取  $-10, -5, 0, 5, 10, 15, 20$  dB,采用蒙特卡罗法,并对每个距离进行 1000 次仿真。具体参量设置见表 2。

表 2 仿真参量设置

Tab. 2 Simulation parameter settings

参量名称	参量值
载波频率/GHz	2.412, 2.462, 5.18, 5.825
SNR/dB	-10, -5, 0, 5, 10, 15, 20
数据率/Mbps	20
信道模型	AWGN
相位采样周期/ms	0.1051
带宽/GHz	1

##### 3.1.2 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,并与传统的 TOA 测距及 RSSI 测距相比较,其数据来源于文献[7]和文献[10]。在接收端完成测相和 (Bits Error Rate, BER) 探测,在不同的 SNR 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。

根据图 3 仿真结果,本文提出的基于 CRT 的 Wi-Fi 载波相位测距算法的性能优于传统的测距方法。在近距离测量时, RSSI 误差较小, TOA 由于小值误差的存在导致距离估计误差较大,而 CRT 的测距误差较前 2 种算法更小,见图 3(a)。远距离时, TOA 误差较小, RSSI 因为信号衰减缘故,易受噪声干扰,测距误差较大, CRT 的定位精度变化不大,性能较好,见图 3(c)。同时在低 SNR 区域 CRT 也有良好的测距精度,表明本文采用的降噪处理有效地降低了噪声造成的误差干扰。对比图 3(a)、(b)、(c) 3 个不同距离下的仿真结果,可看出当 SNR 为 20 dB,量测距离分别为 1 m、25 m、50 m 时,本文

所提方法的平均测距精度分别为 9.1 mm、8.8 mm、7.2 mm,表明基于 CRT 的 Wi-Fi 载波相位测距算法精度主要受 SNR 因素的影响,而与要估计的距离值关系不大。

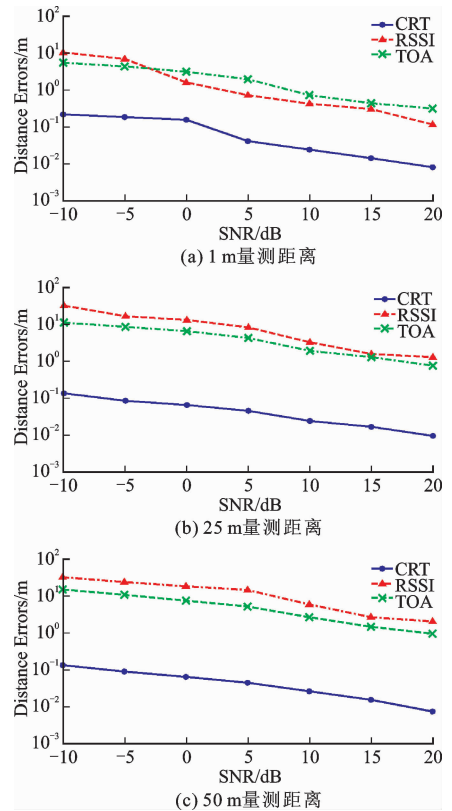


图 3 基于 CRT 的载波相位测距算法与传统 TOA 及 RSSI 在不同 SNR 下的性能比较

Fig. 3 Performance comparison of CRT-Based ranging, TOA and RSSI in different SNR

#### 3.2 BER 的仿真分析

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 主要职能的通信质量影响,可将误码率 BER 作为通信质量的指标,仿真条件同表 2,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,数据速率为 20 Mbps,信噪比为 20 dB。

图 4 为一个跳频周期内的 BER 分布,对比只进行通信职能的 Wi-Fi BER,可以看出在一个周期内,进行定位的 Wi-Fi 有一个 BER 值为 0.32 的峰值点,其余 BER 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 BER 的增大。同时由图 4 还可以看出随着发射机的载波频率跳向下一频点, BER 也随之恢复正常,并且这一高 BER 持续的时间约为 20  $\mu$ s,仅占一个跳频周期的 1%,较低的 BER 占据了绝大部分时间,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。

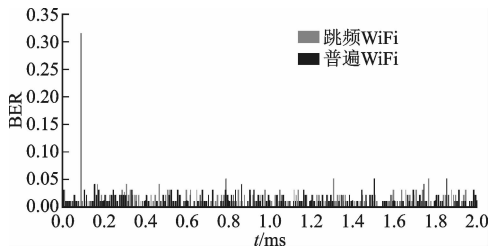


图4 跳频对 BER 的影响

Fig. 4 Influence of frequency hopping to BER

## 4 结语

本文深入探究 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,提出了一种基于 CRT 的 Wi-Fi 载波相位精密测距定位方法,利用 CRT 重构出距离量测值,并给出了降低噪声敏感性的方法。在满足不同频点的测相误差的差值小于  $\pi/2$  的情况下,所提方法能够克服载波相位测距常见的相位模糊问题,能将 Wi-Fi 定位的精度指标提升一个数量级至分米级别,将对室内定位技术的发展起到一定的促进作用。

### 参考文献(References):

- [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] LIU X Y, AERON S, AGGARWAL V, et al. Adaptive Sampling of RF Fingerprints for Fine-Grained Indoor Localization [J]. *Hungarian Journal of Industry & Chemistry*, 2015, 58(3): 1-16.
- [3] JIN Y Y, SOH W S, WONG W C. Indoor localization with Channel Impulse Response Based Fingerprint and Nonparametric Regression [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(3): 1120-1127.
- [4] CASO G, LUCA D N, BENEDETTO M G D. A Mixed Approach to Similarity Metric Selection in Affinity Propagation-Based Wi-Fi Fingerprinting Indoor Positioning [J]. *Sensors*, 2015, 15(11): 27692-27720.
- [5] XIAO T T, LIAO X Y, HU K, et al. Study of Fingerprint Location Algorithm Based on Wi-Fi Technology for Indoor Localization [C]//10th International Conference on Wireless Communications Network and Mobile Computing. Beijing, China: IET, 2014: 604-608.
- [6] 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.
- [7] VIANI F, LIZZI L, ROCCA P, et al. Object Tracking through RSSI Measurements in Wireless Sensor Networks [J]. *Electronics Letters*, 2008, 44(10): 653-654.
- [8] 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): 030101-1-030101-8.

- JIANG R, YANG Z. An Improved Centroid Localization Algorithm Based on Iterative Computation for Wireless Sensor Network [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(3): 030101-1-030101-8. (in Chinese)
- [9] ZHAUNG Y, LI Y, QIL N, et al. A Two-Filter Integration of MEMS Sensors and WiFi Fingerprinting for Indoor Positioning [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(13): 5125-5126.
- [10] NGUYEN N H, DOGANCA Y K. Optimal Geometry Analysis for Multistatic TOA Localization [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(16): 4180-4193.
- [11] HUANG B Q, XIE L H, YANG Z. TDOA-Based Source Localization with Distance-Dependent Noises [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(1): 468-480.
- [12] 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.
- [13] LI Y, ZHUANG Y, LAN H Y. Self-Contained Indoor Pedestrian Navigation Using Smartphone Sensors and Magnetic Features [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(19): 7173-7182.
- [14] LI Y, ZHUANG Y, LAN H Y, et al. An Improved Inertial/Wi-Fi/Magnetic Fusion Structure for Indoor Navigation [J]. *Information Fusion*, 2016, 34: 101-119.
- [15] XIONG J, 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. Maui, USA: ACM, 2014: 43-48.
- [16] DEEK L, GARCIAVILLEGES E, BELDING E, et al. 802.11n: Intelligent Channel Bonding in 802.11n WLANs [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2014, 99(6): 1242-1255.
- [17] 张红敏,靳国旺,徐青,等. 中国余数定理在双基线 SAR 相位解缠中的应用 [J]. *测绘学报*, 2011, 40(6): 770-777.
- ZHANG H M, JIN G W, XU Q, 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. (in Chinese)
- [18] DING C, PEI D, SALOMAA A. Chinese Remainder Algorithm [J]. *Aiche Journal*, 2015, 19(5): 1065-1067.
- [19] ALKAN R M, ÖCALAN T. Usability of the GPS Precise Point Positioning Technique in Marine Applications [J]. *Journal of Navigation*, 2013, 66(4): 579-588.
- [20] HUANG Y M, OLESEN A V, WU M P, et al. SGA-WZ: a New Strapdown Airborne Gravimeter [J]. *Sensors*, 2012, 12(7): 9336-48.
- [21] LI X R, PAHLAVAN K. Super-Resolution TOA Estimation with Diversity for Indoor Geolocation [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2004, 3(1): 224-234.

(编辑:徐楠楠)