

基于蓝牙RSSI的三角定位测距

李博韬, 柯思悦, 刘佳*

武汉商学院信息工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2022年11月5日; 录用日期: 2022年12月5日; 发布日期: 2022年12月13日

摘 要

在疫情防控常态下, 保持安全距离成为了最重要的社交礼仪, 特别是在一些人口比较密集、人流量比较大的场所, 这些地方疫情防控比较困难, 而且防控所需要的人力资源也会更多, 基于公共场所对人群保持社交距离提醒的考虑, 本文设计了一种基于蓝牙RSSI的三角定位测距方式。具体是通过蓝牙设备定位结合三角定位测距算法来实现, 蓝牙设备功耗低, 成本低廉, 使用方便, 且在众多室内定位技术中, 蓝牙具有独特的优势。

关键词

蓝牙, RSSI, 测距

Triangulation Ranging Based on Bluetooth RSSI

Botao Li, Siyue Ke, Jia Liu*

School of Information Engineering, Wuhan Business University, Wuhan Hubei

Received: Nov. 5th, 2022; accepted: Dec. 5th, 2022; published: Dec. 13th, 2022

Abstract

Under the normal situation of epidemic prevention and control, maintaining security distance has become the most important social etiquette, especially in some places with relatively dense population and large flow of people. These places are more difficult to prevent and control the epidemic, and the human resources required for prevention and control will be more. Based on the consideration of social distancing reminders for people in public places, this paper designs a triangulation ranging method based on Bluetooth RSSI. It is realized by Bluetooth device positioning combined with triangulation ranging algorithm. Bluetooth device has low power consumption, low cost and convenient use, and among many indoor positioning technologies, Bluetooth has unique advantages.

*通讯作者。

Keywords

Bluetooth, RSSI, Ranging

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究背景以及意义

自 2019 年 12 月以来, 新冠病毒爆发以来, 国内外无不开始研发针对于疫情的产品, 其中包括红外测温、戴口罩人脸识别、智能机器人等, 而在目前疫情常态化下, 保持社交距离成为了一种新的礼仪。而在一些人流量大, 人口比较密集的场所如火车站、商场等如果不采取正确的防疫措施提醒, 无疑加大疫情防控的困难, 而且人们的安全也可能得不到保障。基于公共场所对人群保持社交距离提醒的考虑, 本文设计了一种基于蓝牙 RSSI 的三角定位测距方式, 具体是通过蓝牙设备定位结合三角定位测距算法来实现。如果这个问题能够被解决, 那么志愿者与基层工作者的工作量也会大大减轻, 人们的安全也会得到一定的保障, 而且这些人力资源可以产生更多的价值。

2. 国内外研究现状

2.1. 国内研究现状

国内的遥感中心组织的“室内定位导航比测”, 展现出现阶段国内室内定位技术的研究现状。香港科技大学提出了基于 RFID 的 LARMARC 系统用来定位; 北京邮电大学提出了一种基于 TC-OFDM 的室内定位系统。张鸿洋等人通过优化权重参数, 提高了算法的定位精度, 根据基站的距离来确定权重, 在计算目标节点的位置时, 引入修正系数, 利用 RSSI 系数之和来改善近节点的影响, 弱化远节点的影响。李轶等人提出了一种基于密度的聚类算法聚类点密度的加权质心定位算法, 选择参数构建定位三角形的集合, 选取定位效果较好的一部分三角形对未知节点进行定位, 并对所得的初始定位结果进行 DBSCAN 聚类, 将聚类后每个簇的核心点个数作为权值, 采用加权质心定位算法得到未知节点的位置坐标。刘雨等人变提出了一种改进的四边加权质心算法[1], 对所求的四个坐标进行权值修正得到目标节点的坐标, 最后结合最小二乘法辅助定位, 进一步降低定位误差。马学森等人针对定位过程中环境干扰的问题, 提出了一种基于环境感知的定位算法, 这种算法的优点是能够因为环境感知低, 以此减少定位误差, 缺点是环境因素多, 适应范围有限。张楠提出了一种改进的高斯混合滤波的加权质心定位算法, 对数据进行高斯混合滤波, 采用 EM 算法对 RSSI 信号值进行聚类和优化, 将改进算法权值设为目标节点初始坐标和实际坐标之间误差值的倒数。任晓奎等人通过改进动态损耗因子和权重系数而提出了一种新的质心定位算法, 首先根据路径损耗模型加权修正出损耗因子, 使用动态损耗因子先估计出目标节点的位置, 再通过最优权重因子来重新估计目标节点的位置。

2.2. 国外研究现状

2011 年谷歌利用 Wi-Fi 技术和基站发布了室内地图, 包括商场、车站等室内环境。2013 年苹果发布了 iBeacon 协议, 多家大型零售行业沃尔玛、家乐福等在店内都用上了 iBeacon 技术。加拿大 Calgary 大学利用无线信号, 结合传感器和特定的环境, 为用户提供了精确的定位技术。英国剑桥大学提出了基于

红外的 Active Badge 室内定位系统, 微软公司提出了基于接收信号强度指示的 RADAR 室内定位系统; 苹果公司提出了基于无线局域网的 iBeacon 室内定位系统。针对定位精度低, 稳定性不好的问题, Kim 等人提出了一种用交叉点阈值来补偿定位精度, 提出的基于测试节点的 WCL 算法, 在整个区域内提供了更高精度的定位信息, 同时减少了物理锚节点的数量。Shah 等人根据信号强度模型和三维测量技术来增加更精确的距离, 其思想基本上是基于系统的三维质心限制, 考虑用三角金字塔代替三圆相交法进行三维定位。Alfakih 等人研究了在室内环境中利用 Wi-Fi 信号强度进行设备定位, 提出了一种新的概率指纹算法, 采用高斯混合模型逼近移动用户从多个接入点接收到的信号强度的概率分布, 然后利用这个概率分布来改进移动用户的位置估计。Tuncer 提出了一种将确定未知位置传感器的质心定位方法转化为智能质心定位的方法, 该方法采用模糊逻辑和遗传算法, 其中参考节点被分配了权重值, 以增加高值 RSSI 节点的定位精度, 利用遗传算法调整模糊系统输出隶属度函数的基值, 使定位误差较小。Uradzinski 等人提出一种新的基于 RSSI 指纹数据库的室内定位方法, 该方法无需测距, 提出的指纹数据库定位方法可以提供更准确的定位结果。

2.3. 研究内容

由于目前室外定位精度普遍很高, 而室内因为障碍物、噪音等多种因素的影响导致定位精度并不高, 因此本文将研究重心放在室内基于蓝牙的定位技术及定位算法的选择与应用上, 旨在设计出一种室内定位可行度较高的方法, 后续测试也都会在室内进行。

3. 常见的测距技术

3.1. AOA 技术

AOA (到达角交汇定位) 技术, 该技术主要为在两个以上位置设置方向性或者阵列天线以获取终端发射的无线电波信号角度信息, 通过交汇法估计出终端的位置。特点是系统的结构简单, 但是需要天线阵列具有高度灵敏度和高空间分辨率。所以 AOA 技术虽然结构简单, 但是在城市蜂窝定位系统并未得到应用[2]。图 1 为图片解释。

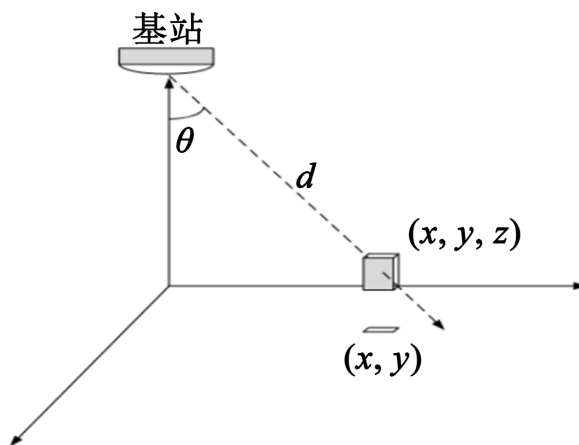


Figure 1. AOA schematic

图 1. AOA 示意图

3.2. RSSI 技术

RSSI (接收信号强度法) 全称为 Received Signal Strength Indication, 是通过发射器发射信号到接收器,

如果两者越相近则信号强度越强，两者越远则信号强度衰减越多，而根据这三者得关系就能够计算出他们之间的距离。

超宽带信号的信道比模型表达式为： $P_d = P_0 - 10 \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) - X_\delta$ 。

3.3. TDOA 技术

Time Difference of Arrival 到达时间差，意为利用时间差来进行定位，通过信号到达测试点的时间，利用信号到各个测试点的距离就能够确定信号的位置。通过各个信号到达各个测试点的绝对时间差，距离差就是双曲线，而交点就是信号的位置[3]。

而 TDOA 的模型方程为：

$$\begin{cases} r_{21} = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} \\ r_{n1} = \sqrt{(x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 + (z_n - z)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} \quad (n \gg 4) \end{cases}$$

3.4. RFID 射频识别技术

用 RFID 来实现定位是通过人员佩戴有源手环、胸牌卡片等来实时显示人员在三维立体上的点位，定位精度 < 1~5 米，而且能够在短时间内得到信息，但是因为 RFID 技术不能够整合到移动设备当中，而且作用距离短，用户的隐私得不到保障。

4. 距离测量算法

4.1. 三边定位算法

三边定位测距算法是通过信号源到各个点位的距离，但是需要 ≥ 3 个点位才能确定出信号点的位置，这就是三边定位法，具体实例如图 2 所示。

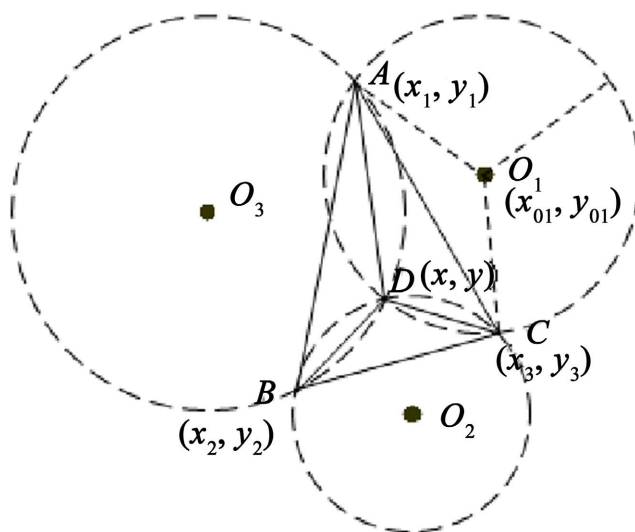


Figure 2. Schematic diagram of triangulation ranging algorithm
图 2. 三边定位算法示意图

首先需要建立节点与未知节点方程组：

$$\begin{cases} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 = d_1^2 \\ \vdots \\ (x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 = d_n^2 \end{cases}$$

简化后得出

$$AX = b$$

其中

$$A = \begin{pmatrix} 2(x_1 - x_n) & 2(y_1 - y_n) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_{n-1} - x_n) & 2(y_{n-1} - y_n) \end{pmatrix}, b = \begin{pmatrix} x_1^2 - x_n^2 + y_1^2 - y_n^2 + d_n^2 - d_1^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 + y_{n-1}^2 - y_n^2 + d_n^2 - d_{n-1}^2 \end{pmatrix}$$

利用最小二乘法解出方程得

$$X = (A^T A)^{-1} A^T b$$

4.2. AOA 定位算法

据图 3 所示:

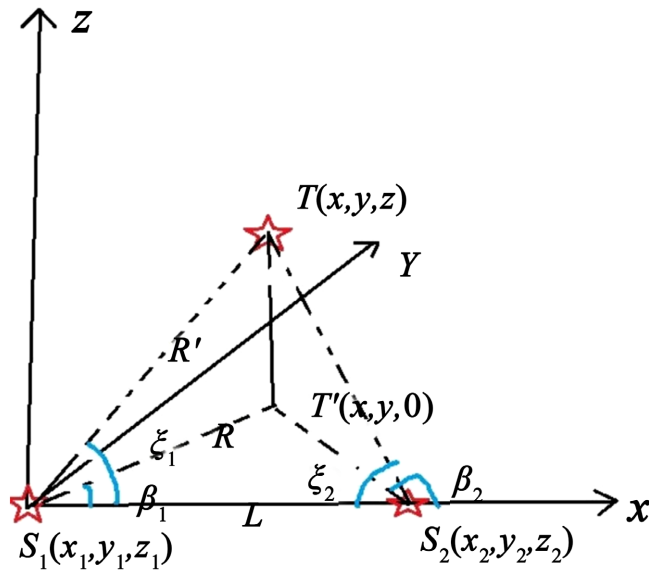


Figure 3. AOA algorithm schematic

图 3. AOA 算法原理图

$$\tan \beta_1 = \frac{y - y_1}{x - x_1}, \text{ 相对于站 } S_1 \text{ 的方位角。}$$

$$\tan \beta_2 = \frac{y - y_2}{x - x_2}, \text{ 相对于站 } S_2 \text{ 的方位角。}$$

$$\tan \xi_1 = x = \frac{z - z_1}{\sqrt{(x - x_1)^2 - (y - y_1)^2}}, \text{ 相对于站 } S_1 \text{ 的俯仰角。}$$

$$\tan \xi_2 = x = \frac{z - z_2}{\sqrt{(x - x_2)^2 - (y - y_2)^2}}, \text{ 相对于站 } S_2 \text{ 的俯仰角。}$$

由已知条件结合基站坐标, 可求得两基站间的距离:

$$L = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}$$

在 $\Delta S_1 T' S_2$ 中, 由正弦定理可得:

$$\frac{\sin(\beta_2 - \beta_1)}{L} = \frac{\sin(\pi - \beta_2)}{R} = \frac{\sin \beta_2}{R}$$

$$R = \frac{L \sin \beta_2}{\sin(\beta_2 - \beta_1)}$$

在 $\Delta S_1 T' T$ 中, 得 T 距 S_1 的距离:

$$R' = \frac{R}{\cos \xi_1}$$

联立以上方程可解得:

$$x = R' \cos \xi_1 \cos \beta_1;$$

$$y = R' \cos \xi_1 \sin \beta_1;$$

$$z = R' \sin \xi_1 + z_1。$$

4.3. 基于 TOA/TDOA 的定位算法

基于 TOA 算法, 因为无线信号传播的速度是一定的, 所以可以通过节点发送信号到接收节点时传播时间的长短可以确定节点间的距离, 具体原理看图 4。

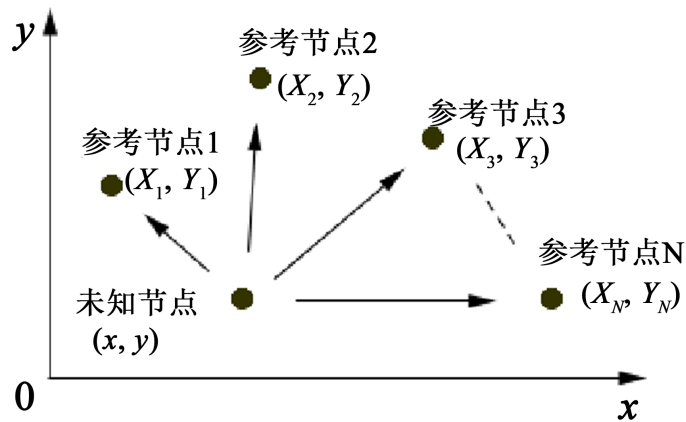


Figure 4. TDOA algorithm solution schematic
图 4. TDOA 算法求解示意图

点 $M(x, y)$ 为未知节点, 点 $A(x_1, y_1)$, $B(x_2, y_2)$, $C(x_3, y_3)$ 为参考节点。在 T_0 时刻, 未知节点 M 向参考节点 A , B , C 发送信号, 点 A , B , C 收到信号的时间分别为 T_1 , T_2 , T_3 。电磁波在空气中的传播速度记为 v , 设点 M 到点 A , B , C 的距离分别为 d_1 , d_2 , d_3 , 根据距离、速度与时间的关系可得:

$$d_1 = v(T_1 - T_0)$$

$$d_2 = v(T_2 - T_0)$$

$$d_3 = v(T_3 - T_0)$$

由两点间的距离公式可得:

$$d_1 = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} = v(T_1 - T_0)$$

$$d_2 = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} = v(T_2 - T_0)$$

$$d_3 = \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} = v(T_3 - T_0)$$

对上式进行求解即可得到未知节点 $M(x, y)$ 的坐标。

基于 TDOA 算法, 因为在网络中, 每个节点距离信号接受点的距离是不同的, 所以在信号传输的过程中, 产生了时间差, 根据时间差以及电磁波的传播速率, 我们可以计算出各节点之间的距离差值, 从而可以判断出接收节点的位置。

如参考图 5:

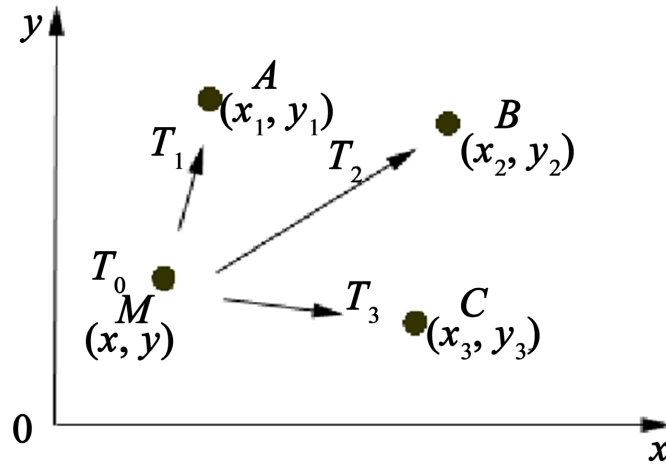


Figure 5. Principle of positioning algorithm based on TOA

图 5. 基于 TOA 的定位算法原理图

$$d_1 = \sqrt{(x - X_1)^2 + (y - Y_1)^2}$$

当参考节点为 i 时, 参考节点 i 与未知节点间的距离为:

$$d_i = \sqrt{(x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2}$$

将未知节点与参考节点 i 间的距离 d_i 和未知节点与参考节点 1 间的距离 d_1 的差值表示为 d_{i1} , 得:

$$d_{i1} = d_i - d_1 = \sqrt{(x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2} - \sqrt{(x - X_1)^2 + (y - Y_1)^2}$$

v 为电磁波在自由空间中的传播速度, T_{i1} 为未知节点发送的信号到达第 i 个参考节点与发送信号到达第 1 个参考节点的时间

4.4. RSSI 测距算法

关于 RSSI 测距可以用三边质心算法来实现测距, 因为需要三个以上的节点, 所以要确定距离需要获

得 3 个或者以上节点的距离, 较为传统的质心算法就是先找到信号接受点到最近的三个信号发射节点的位置进行估计, 但是因为环境或者设备的干扰故不采用传统的质心算法来实现测距。

为了使精度更高, 可以利用神经网络来预测出数据, 通过多次测试让数据更加有效。

5. 低功耗蓝牙技术

低功耗蓝牙技术, 是蓝牙 4.0 最重要的特色。传统的蓝牙续航一直是一个问题, 一个电池一般只能够连续工作一天, 这对实际的应用很不利。

由此可见蓝牙的低功耗技术的重要, 其实诺基亚早在 2004 年就推出了蓝牙低端扩展技术, 这也是低功耗蓝牙技术的前身, 后来围绕该技术创造了 Wibree 技术, 在 2007 年时, 蓝牙技术联盟正式宣布将 Wibree 技术纳入蓝牙技术的大旗, 也就是现在的低功耗蓝牙技术。

目前低功耗蓝牙具有: 低成本、低功耗、连接节点不受限、响应速度快、支持 IPV6、支持 Mesh 组网的特点。

6. 蓝牙 RSSI 设计实现

本次系统设计将采用智能手机作为信号接收节点, 搭载蓝牙芯片的嵌入式设备来作为信号发射器, 通过手机安装软件来收集信号, 完成 RSSI 的采集工作。主要是为了在疫情常态化下对室内定位的追踪和实时位置, 整个测试环境设备包括两个部分: 三个蓝牙信号发射基站, 一台智能手机作为信号接收器。

首先三台搭载蓝牙的设备先开启蓝牙, 像智能手机发起连接请求, 通过在智能手机上下载蓝牙调试助手 App 开启手机蓝牙, 进行检测, 待手机接收到信号之后通过 App 的后台算法根据蓝牙设备所发送的信号进行分析。

具体思路是通过手机下载蓝牙调试助手 App 开启手机蓝牙, 同时开启嵌入式设备蓝牙作为信号发射器, 通过 App 后台算法根据蓝牙信号的强度 RSSI 值计算出距离, 当 RSSI 值超出预先设定的阈值时, 就会震动提醒。

我们将实验环境布置在宿舍楼里, 分别在各处布置信号发射器这是, 三个蓝牙设备在距离接收点 1 米与 0.3 m 以内时的 RSSI 值, 因为不同的设备芯片也不一样所以有轻微误差。图 6 信号强度值。

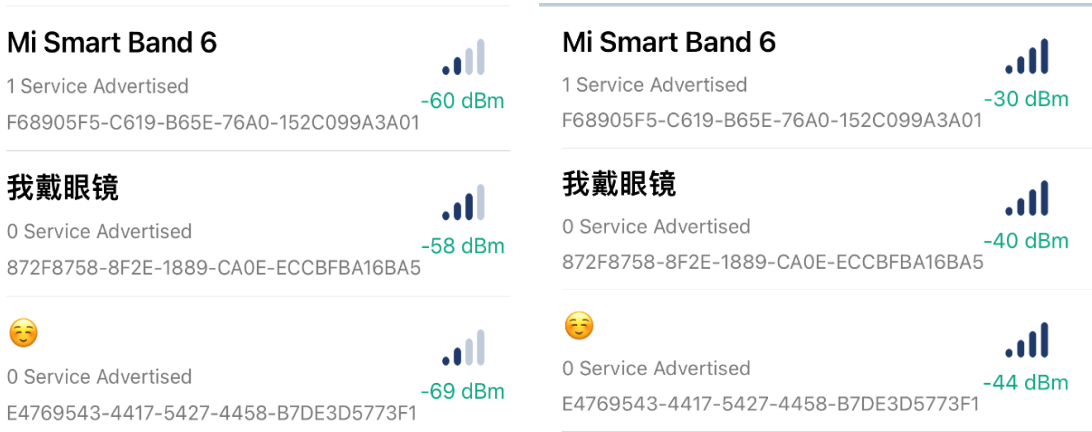


Figure 6. Signal strength
图 6. 信号强度

我们根据多次测量, 将数据经过均匀计算如表 1 所示。

Table 1. RSSI test data
表 1. 测试数据

信号发射器	0.3 m 以内	1 m	2 m	3.5 m
1 号发射器	30~35 dBm	55~60 dBm	72~75 dBm	95~100 dBm

本文采用对数 - 常态分布模型来计算传播时候的损耗有：

$$p_{ik} = p(d_0) - 10n_p \log_{10} \left(\frac{d_{ik}}{d_0} \right) + X_\sigma$$

d_0 为信号参考传输距离； $p(d_0)$ 为接收信号的强度； n_p 为衰减指数， d_{ik} 为节点 i 和 k 的欧氏距离； X_σ 为均值是 0、方差是 σ 。

在实际使用过程当中，可以多次获得同一节点的信号来降低误差值[4]。

并且可以由上式推导出距离公式：

$$\tilde{d}_{ik} = 10^{\frac{p(d_0) - p_{ik} + X_\sigma}{10n_p}},$$

求和节点误差与未知节点修正距离为：

$$c_i = \frac{\sum_{i \neq k} |\tilde{d}_{ik} - d_{ik}|}{\sum_{i \neq j} h_{ik}}$$

$$d_{2ij} = h_{ij} c_i$$

因此结合以上公式可以得出：

$$C = d_{1ij} + d_{2ij}$$

式里： d_{2ij} 、 d_{ij} 为节点 i 与未知节点 j 的修正距离与估算距离。综上所述，为了能够更直观地看出 RSSI 值在传播过程中随距离而导致信号强度的衰减，我们将多次实验数据进行拟合如图 7 所示。

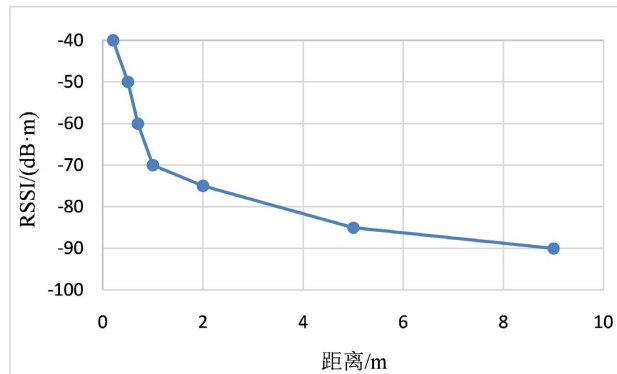


Figure 7. The signal strength varies with distance
图 7. 信号强度随距离产生变化

为了保证定位的结果不会受到特殊因素的影响，因此在本次检测的基础上又进行了一次静态点测试，静态点测试是在接收点前方的 1*1 米的区域内等间隔取了 15 个点进行测试[5]，具体测试图如下图 8。

为了保证定位结果不受特殊因素的影响，在每个测试点持续采样 15 s，共 15 个数据包。分别绘制了仅使用 AOA 的三角定位算法和 RSSI 定位算法的静态点坐标显示图。

从图 9 中可以看出, 使用 AOA 定位算法, 当在接收点附近的, 边界区域误差较大。其中, 仅 AOA 定位算法的最大与最小整体误差分别为 0.25 m、0.04 m, 平均整体定位误差为 0.09 m。RSSI 定位算法的最大与最小整体误差分别为 0.14 m、0.05 m, 平均整体定位误差为 0.06 m。RSSI 定位算法的性能明显优于仅 AOA 定位算法的估计性能。

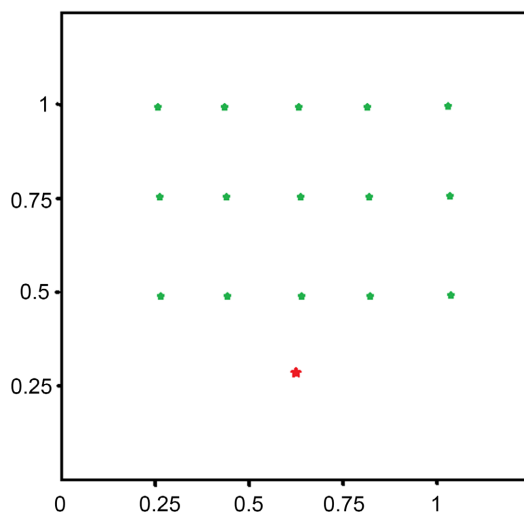


Figure 8. Static point test diagram

图 8. 静态点测试图

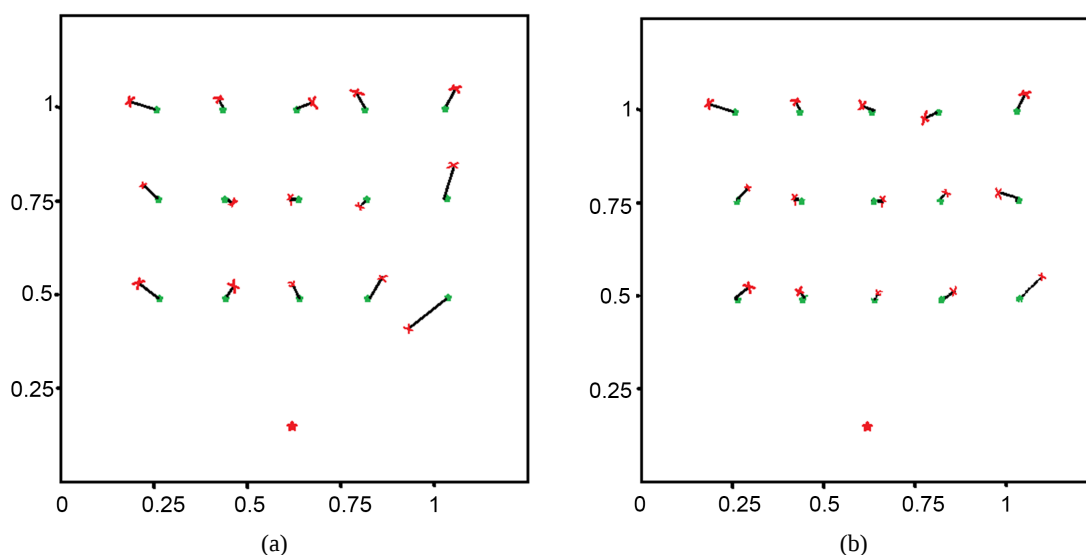


Figure 9. (a) Angle of arrival algorithm; (b) Received signal strength indicator algorithm

图 9. (a) AOA 算法; (b) RSSI 算法

7. 结语

本文研究了基于蓝牙 RSSI 的测距方式, 整个方案的介绍均在文中做了详细地分析与规划, 并说明了定位测试的环境与测试方案, 在室内环境下对定位精度进行了统计与分析, 定位的平均精度在 0.06 m, 也验证了蓝牙 RSSI 算法进行室内定位的有效性。经过实际验证, 蓝牙 RSSI 测距方案在疫情常态化下完成了基本预期的效果, 对于本方案的一些不足, 也可以通过文中其他方案进行改进, 让蓝牙 RSSI 测距方

案能够更好地运用于不同的场景中。相信通过大家的努力，一定可以战胜疫情。

基金项目

本论文获得项目编号为 202111654150 武汉商学院 2021 年度大学生创新创业训练项目《敬疫远之》的研究资助。

参考文献

- [1] 胡斌斌, 倪晓军. 基于 RSSI 测距室内定位改进质心算法[J]. 计算机技术与发展, 2017, 27(9): 133-136+140.
- [2] 华茹园. 蓝牙 RSSI 室内定位算法研究与系统实现[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2021.
<https://doi.org/10.27397/d.cnki.gxaku.2021.000917>
- [3] 张亚磊, 王坚, 韩厚增, 杨煜. 蓝牙室内测距模型研究与精度分析[J]. 测绘科学, 2021, 46(3): 1-7+66.
<https://doi.org/10.16251/j.cnki.1009-2307.2021.03.001>
- [4] 吴之舟, 张玲华. 基于加权和 RSSI 测距的 DV-Hop 定位算法[J]. 数据采集与处理, 2021, 36(6): 1217-1225.
<https://doi.org/10.16337/j.1004-9037.2021.06.015>
- [5] 刘盼. 基于蓝牙 5.1 的室内定位系统的研究与实现[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2021.
<https://doi.org/10.27466/d.cnki.gzzdu.2021.004859>