



测绘科学
Science of Surveying and Mapping
ISSN 1009-2307, CN 11-4415/P

《测绘科学》网络首发论文

题目: 蓝牙室内测距模型研究与精度分析
作者: 张亚磊, 王坚, 韩厚增, 杨煜
收稿日期: 2019-10-16
网络首发日期: 2020-11-26
引用格式: 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. 测绘科学. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4415.P.20201125.1837.034.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式 (包括网络呈现版式) 排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊 (网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊 (网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物 (ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

蓝牙室内测距模型研究与精度分析

张亚磊, 王坚, 韩厚增, 杨煜

(北京建筑大学 测绘与城市空间信息学院, 北京 102616)

*通信作者 王坚 教授 E-mail: wangjian@bucea.edu.cn

摘要 针对低功耗蓝牙进行室内定位过程中, 蓝牙信号在室内传播过程中受到多路径、反射、非视距等误差的影响, 导致蓝牙信号值存在波动性、奇异值等问题, 进一步导致测距误差较大。为了验证环境对信号传播的影响, 本文验证了 3 种主要影响因素对信号值的影响, 并提出 3 种滤波方法对采集的初始值进行预处理; 根据实际环境利用最小二乘法分段拟合测距模型; 根据拟合的测距模型与处理后的 RSSI 值, 得到准确的测距信息。实验表明, 利用分段拟合的测距模型和混合滤波方法处理后的强度值, 测距精度得到了明显的提高。

关键词 RSSI; 低功耗蓝牙; 高斯滤波; 中值滤波; 分段拟合

中图分类号 P228 文献标志码 A

Research and precision analysis of indoor ranging model based on Bluetooth

ZHANG YaLei, WANG Jian, HAN HouZeng, YANG Deng

(School of Geomatics and Urban Spatial Informatics, BeiJing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China)

Abstract Aiming at the problem that the Bluetooth signal value existed fluctuation and singular value due to the influence of multipath, signal reflection and NLOS, et al. in the process of indoor positioning, therefore, Bluetooth ranging error was large. In order to verify the influence of environmental factors on Bluetooth signal propagation, three experiments with different environmental influence factors were designed. Firstly, three filtering methods were proposed to preprocess the initial values of Bluetooth signals. Then, least square method was used to fit the ranging model in different segment according to the actual environment. Finally, accurate ranging information was obtained according to the fitted ranging model and the processed RSSI value. The final experiments showed that using the segmented-fitting ranging model and the intensity value processed by the hybrid filtering method, the ranging accuracy had been significantly improved.

Key words RSSI; low power bluetooth; Gaussian filtering; median filtering; piecewise fitting

0 引言

随着智能手机的普及和城市化的发展, 人们对于室内定位的需求逐渐增大^[1], 为室内用户提供精确的位置成为了研究热点。室内定位技术包括蓝牙、超宽带(ultra wide band,UWB)、WiFi 等方法, 在这诸多的方法中, 蓝牙定位是可行性以及实用性较高的方法, 低功耗蓝牙(Bluetooth low energy, BLE)是蓝牙 4.0 的核心技术, 它具有成本低、功耗低、连接快等特点^[2], 这些特点极大地推动了蓝牙室内定位的发展。测距是室内定位的前提, 目前大多数室内定位通过测距的方式来实现的, 因此, 室内定位的精度直接取决于测距精度的高低。但是由于室内环境较为复杂, 低功耗蓝牙信号的传播受到反射、多路径、天线增益、非视距等因素的影响^[3], 导致利用接收信号强度指示(Received Signal Strength Indication, RSSI)进行测距出现了较大的误差。文献[4]针对这一问题, 考虑到测距的随机误差和系统误差, 提出了 3 种减小测距误差的方案: 离群 RSSI 值处理, 在线建模和误差补偿。通过在不同条件下的大量实验, 证明了所提出的 3 种方法与典型处理相比具有更好的测距性能^[4]。但是其 3

收稿日期: 2019-10-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41874029); 北京建筑大学研究生创新项目(PG2019054)

作者简介: 张亚磊(1995—), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 主要研究方向为室内定位技术。mail: 790350304@qq.com

网络首发时间: 2020-11-26 10:44:49 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4415.P.20201125.1837.034.html>

种方法都未对原始信号强度值进行滤波处理以及建模的时候没有考虑距离的增加对模型测距精度的影响；文献[5]采用粒子滤波模型对原始数据进行滤波预处理，然后又利用了 BP 人工神经网络对距离进行估计，实验表明，RSSI 测距精度以及抗干扰能力得到了提高^[5]。但是在粒子滤波处理原始数据的过程中需要用大量的样本数量才能很好的近似系统地后验概率密度，从而加大了算法的复杂性，造成了滤波实时性不佳的问题；陶文献[6]针对室内环境下基于接收信号强度指示的测距技术存在非视距和多径传输的影响，测距误差比较大的问题，采用多重滤波算法对采集的 RSSI 进行数据滤波处理，采用最小二乘法对信号衰减模型的参数进行拟合，得到满足具体环境的参数值。但是在实际环境中，蓝牙信号传播超过一定的距离之后，RSSI 值小幅度减小对应的距离就会增加很多，因此仅进行一段最小二乘拟合其模型的拟合精度也会降低；文献[7]通过实验比较单一滤波的效果，综合单一滤波的优势，提出了一种基于狄克逊检验法滤波、中位值滤波及高斯滤波的混合滤波算法，虽然有效地剔除异常 RSSI 值，使测距误差减小。但是该滤波算法中的狄克逊检验法在滤波过程中需要反复地进行查表，加大了算法的复杂性。

本文针对在室内采集蓝牙信号的过程中由于环境的复杂性，强度值存在波动性和呈现无规律的奇异值，导致利用 RSSI 进行测距的误差增大等问题以及上述研究存在的不足开展研究。对于强度值受到环境的干扰问题，提出了 3 种不同的滤波方法对初始值进行处理；为了使测距模型更加符合具体的实际环境，实验中使用最小二乘法优化模型参数，利用该方法进行分段拟合测距模型，得出准确的模型，最终提高了测距的精度。

1 蓝牙测距原理

近几年的研究发现，在实际环境中，无线信号的传播存在一定的规律，即随着接收节点与蓝牙节点之间距离的增大，其接收的信号强度呈对数函数的形式衰减^[8]。

在理想的状态下，如果忽略系统硬件带来的信号损耗，则蓝牙节点距接收节点为 d 处的接收功率 $P_r(d)$ 服从 Friis 传播，见式 (1)^[9]。

$$P_r(d) = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 P_t G_t G_r \quad (1)$$

式中： $P_t(d)$ 为蓝牙节点的发射功率； G_t 和 G_r 分别为发射节点和接收节点的天线增益值； λ 为无线传感器发射的信号波长。

在考虑信号衰减效应的情况下，且假设发射节点和接收节点的天线增益是相等的，那么由式 (1) 可得对数路径损耗模型^[10]。

$$P_r(d) = P_t(d_0) - 10n \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + \varepsilon \quad (2)$$

式中： $P_r(d)$ 表示蓝牙发射节点与接收节点距离为 d 时，所接收到的信号强度； d 为发射节点与接收节点两者之间的实际距离； d_0 为参考距离； $P_t(d_0)$ 是两者为参考距离时的信号强度； ε 为服从 $(0, \sigma^2)$ 的高斯分布随机噪声向量， σ 的值与具体的环境密切相关^[11]； n 表示的是路径损耗指数，其值的大小与室内环境与建筑有关，属于经验值； ε 表示误差项，是遮蔽因子。在实际应用过程中，可忽略遮蔽因子，故可采用简化后模型，见式 (3)^[12]。

$$RSSI = A - 10n \lg(d) \quad (3)$$

式中： $RSSI = P_r(d)$ ； $A = P_t(d_0)$ 。式 (3) 为利用 RSSI 测距的经典模型，它表示 RSSI 值与信号传输距离 d 之间的函数关系。常数 A 和路径损耗指数 n 都是经验值，其取值与无线传感器属性及室内环境有很大的关系。

2 RSSI 信号滤波

在实际测距情况下,受多路径、非视距等因素的影响,使接收到的 RSSI 值存在很大的波动性,导致偏离真实值。因此,在代入公式计算前需要对数据进行滤波处理,来提高 RSSI 测距精度。针对原始数据的波动现象,本文分别采用均值滤波、高斯滤波以及中值滤波与高斯滤波混合的数据处理方法处理原始数据^[13],得到最终的 RSSI 值。

2.1 均值滤波

平均值滤波^[14]是指在某一位置节点处采集 n 个 RSSI 值,求出这 n 个数据的平均值,见式(4)。

$$RSSI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n RSSI_i \quad (4)$$

采用平均值滤波方法处理 RSSI 数据操作简单,易于实现。当样本数据很大时, RSSI 波动较小时,信号的平滑度很高。但是,当信号强度值受环境干扰波动较大时,使用此方法处理强度值的可信度并不高。

2.2 中值滤波

中值滤波是一种非线性数据滤波方法,在一维数据的情况下,中值滤波器是一个包含奇数个数据的窗口^[15],通过处理之后,将该窗口的中间值作为最终结果输出。设在距离发射节点 d 处接收到的信号强度分别为 $RSSI_1$ 、 $RSSI_2$ 、 $RSSI_3$ 、 $RSSI_n$, n 是该滤波器窗口的长度,对这一序列进行中值滤波处理。首先将该序列中的强度值按数值的大小进行排列,然后取中间值作为滤波后结果输出。见式(5)。

$$\hat{R}_d = Med\{RSSI_1, RSSI_2, RSSI_3, \dots, RSSI_n\} \quad (5)$$

中值滤波在较大程度上消除了异常值对最终测量结果的影响,但是在采样数目较少的情况下, RSSI 值的波动较大时,中值滤波的方法的滤波结果并不是很有效。

2.3 中值-高斯混合滤波

研究发现 RSSI 测量值的随机分布近似符合高斯分布模型的。利用高斯滤波模型可以更好地拟合 RSSI 值在实际环境中的分布,从而可以消除那些小概率的 RSSI 值。利用高斯滤波模型对 RSSI 值进行滤波处理的设计过程为:首先建立高斯模型,从采集的 RSSI 测量值中选取高概率的发生值,然后对选取的数据求平均值,得到的 RSSI 值暂时作为最终的 RSSI 样本值。其模型的高斯概率密度函数见式(6)~式(8)^[16]。

$$F(RSSI) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(RSSI-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

式中:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n RSSI_i \quad (7)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (RSSI_i - \mu)^2 \quad (8)$$

式中: $RSSI_i$ 为第 i 个 RSSI 强度值; n 为采集的数量; μ 是正态分布中的位置参数,主要用来描述分布中数据的趋势; σ 表示数据离散程度。

区间 $(\mu - \sigma \leq RSSI_i < \mu + \sigma)$ 的概率见式(9)。

$$P(\mu - \sigma \leq RSSI_i < \mu + \sigma) = F(\mu + \sigma) - F(\mu - \sigma) = \phi(1) - \phi(-1) = 2\phi(1) - 1 = 0.6826 \quad (9)$$

其中, 正态分布函数见式 (10)。

$$F(RSSI) = \int_{-\infty}^{RSSI} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\xi-\mu)^2}{2\sigma^2}} d\xi \quad (10)$$

标准正态分布函数见式 (11)。

$$\phi(RSSI) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{RSSI} e^{-\frac{\xi^2}{2}} d\xi \quad (11)$$

由式 (9) 可知, 高概率 RSSI 值发生的区间是 $(\mu - \sigma \leq RSSI_i < \mu + \sigma)$, 其发生的概率为 0.6826, 把这个范围内的 RSSI 测量值全部取出, 求得平均值作为高斯滤波器的输出。但仅仅使用高斯滤波并不能完全消除数据的波动情况, 因此在 RSSI 信号预处理中仅仅使用高斯滤波的效果并不佳。

考虑到测距算法的复杂性、可行性以及弥补高斯滤波和中值滤波单独用于数据处理的缺陷, 本文采取一种将中值滤波与高斯滤波两种滤波方法同时利用到原始数据的处理中, 将采集的原始数据先进行高斯滤波去除较大的跳变值, 使得数据整体处于一个相对稳定的状态; 将高斯滤波处理之后的数据再进行中值滤波, 根据实际情况选择合适的窗口大小进行处理, 最终得到一组稳定、平滑的数据。

3 模型参数的优化

利用式 (3) 进行计算距离前, 需要解决一个主要的问题, 即确定常数 A 和路径损耗指数 n 的值。 A 和 n 的值主要取决于实验所在的实际环境, 一旦环境发生改变, 其相应的值也会发生变化。为了让 RSSI 测距模型更加真实地反映实际室内环境的传播特性, 保证测距的精度, 需要对常数 A 和路径损耗指数 n 进行优化, 得出符合该室内环境的参数值。

通过最小二乘原理^[11]来估计常数 A 和路径损耗指数 n 的值, 根据滤波处理之后的 RSSI 测量值, 得到 $\overline{RSSI_{di}}$ 与距离 d_i 对应的数据, 见式 (12)。

$$\overline{RSSI_{di}} = A - 10n \lg d_i \quad (12)$$

则有式 (13)。

$$KX = B \quad (13)$$

$$\text{式中: } K = \begin{bmatrix} 1 & -10 \lg d_1 \\ 1 & -10 \lg d_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & -10 \lg d_i \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} \overline{RSSI_{d1}} \\ \overline{RSSI_{d2}} \\ \vdots \\ \overline{RSSI_{di}} \end{bmatrix}; \quad X = \begin{bmatrix} A \\ n \end{bmatrix}。$$

根据最小二乘原理, 可求出参数 X 的估计值, 见式 (14)。

$$\hat{X} = (K^T K)^{-1} K^T B \quad (14)$$

通过式 (14) 可以求出模型参数估计值 \hat{A} 、 \hat{n} , 通过最小二乘曲线拟合法, 得到的方程即是 RSSI 测距模型^[17]。

4 实验与分析

4.1 实验场景

为了验证混合滤波数据处理方法的可行性, 对 3 组不同距离处的 RSSI 值进行了滤波处理对比。

通过利用最小二乘法拟合的 RSSI 路径损耗模型，进一步分析 3 种滤波处理后测距误差。

本文实验采用千寻公司生产的芯片为 CC2640 的蓝牙信标作为信号发射节点。实验过程中，将发射节点的功率调节为 0 dBm，信号发射频率调为 3 次/s。接收节点为安卓 8.1.0 版本的智能手机，安装开发的蓝牙信号强度采集软件完成 RSSI 值的采集工作。实验地点为北京建筑大学测绘学院楼 3 层走廊，实验场景见图 1。



图 1 实验场景
Fig.1 Experimental Scene

实验内容包括：①采集原始数据，利用 3 种数据滤波方法分别对原始数据进行滤波处理，并分析对比滤波前后的 RSSI 值；②利用最小二乘法对滤波后的 RSSI 值进行参数拟合，得出当前环境下的路径损耗模型；③采用得到的路径损耗模型进行测距估计，得到位置节点的估计距离，最后得到 3 种滤波方法的测距误差进行对比分析。实验的技术路线见图 2。

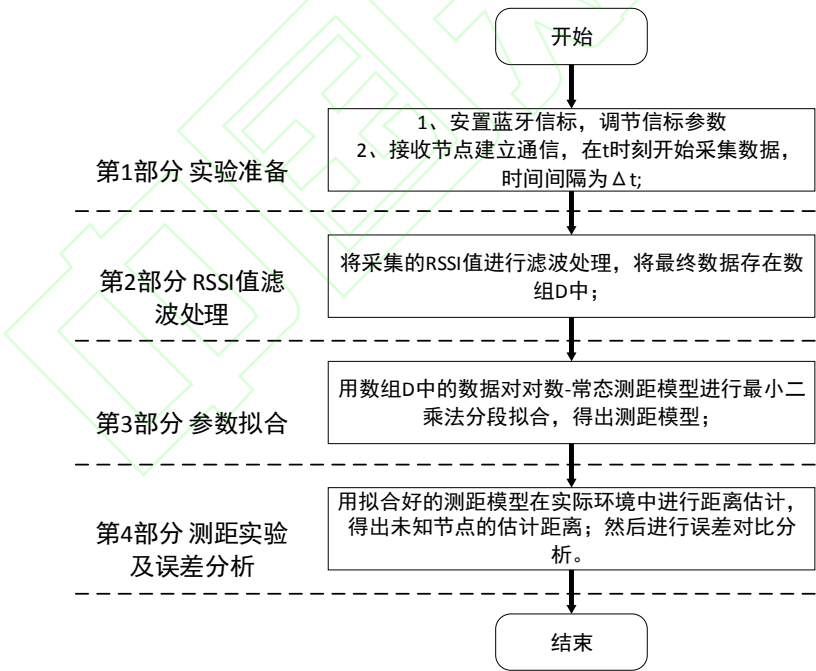


图 2 技术流程
Fig.2 Technical Flow Chart

4.2 节点的布设对 RSSI 信号值的影响

蓝牙信号在室内传播过程中都会受到多路径、折射、反射等因素的干扰，同时，无线传感器本身的布设方式对信号的传输也会产生一定的影响。本文选取 3 个环境影响因素，研究了其对蓝牙信号传播的影响。

4.2.1 节点布置的密度对信号值的影响

在室内定位过程中,在一定范围内布置蓝牙信标的密度对定位结果也会产生一定的影响。本文为了研究蓝牙信标的布置密度对信号传播带来的影响,做了以下实验分析。①选择3个相同属性的蓝牙信标同时放在1.0 m的范围内,且距接收节点距离为3.0 m处的采样点进行数据采集;②将3个蓝牙信标之间的间隔设为1.0 m,对其中一个信标进行数据采集,采集步骤同上。两种情况下RSSI值分布情况见图3。

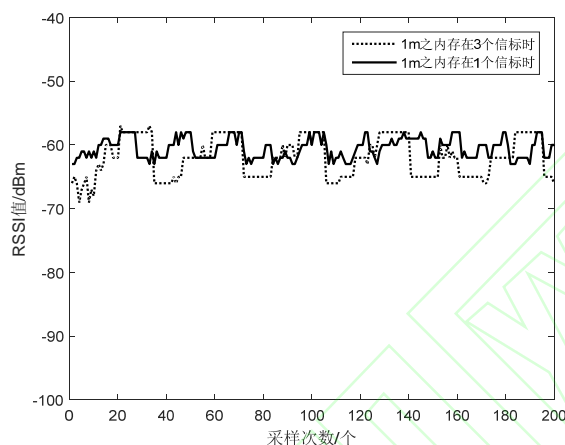


图3 一定范围内不同的节点布置密度
Fig. 3 Different Node Layout Density Within a Certain Range

由图3可以看出,当在1.0 m范围内仅仅布置一个蓝牙信标时,接受的信号RSSI值大致趋于稳定状态,RSSI值在均值-60.58 dBm的上下波动;当在1.0 m的范围内同时放置多个蓝牙信标时,信号值出现了跳变值增多,且RSSI值出现了衰减的情况。通过此实验发现,蓝牙信号在传播过程中会受到其他蓝牙信号的干扰,导致信号值出现衰减、突变的问题。因此,当使用蓝牙进行室内定位的过程中,要合理地控制一定范围内蓝牙信标的数量,以避免彼此之间造成信号干扰。

4.2.2 接受节点离墙壁的距离对信号值的影响

为了验证实验环境下墙壁对蓝牙信号的影响,将发射节点的高度调节为1.5 m处,且布置在靠近墙壁的位置处,分别将该接收节点分别布置在贴近墙壁和距离墙壁1.0 m处,与发射节点的距离为3.0 m处进行数据采集。这两种情况下RSSI值的分布见图4。

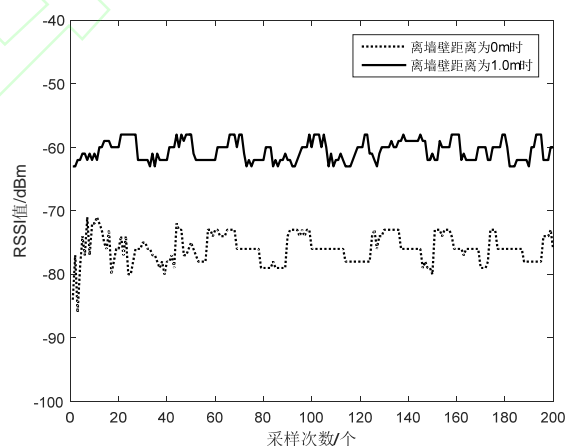


图4 接收节点离墙壁不同距离
Fig.4 Receiving Nodes at Different Distances from the Wall

由图 4 可以看出, 当把信标布设在靠近在墙壁的位置, 同时接收节点也靠近墙壁时, 靠近墙壁接收信号相比距离墙壁 1.0 m 距离接收信号其 RSSI 值出现了大幅度的衰减。信号值受到墙壁的折射、反射等影响, 接收节点所收到的 RSSI 值整体出现强度降低的情况, RSSI 值在 -80 dBm 附近波动, 且信号值波动较大, 并且出现了较大的跳变值。当距离墙壁 1.0 m 距离接收信号时, RSSI 值在均值 -60.58 dBm 的附近浮动, 没有较明显的跳变值, 所以墙壁对蓝牙信号的传播有很大的影响。因此, 在进行蓝牙室内定位的过程中, 当将发射节点布设在墙壁上时, 应该考虑墙壁对蓝牙信号接收的影响。

4.2.3 节点布设的高度对信号值的影响

在北京建筑大学 F 楼 3 层走廊内进行试验, 选取发射节点高度分别为 0、1.3 m, 且距接收节点距离为 3.0 m 处的采样点进行数据采集。在该采样点采集 200 组实验数据, 图 5 展示了两种情况下 RSSI 值的分布情况。

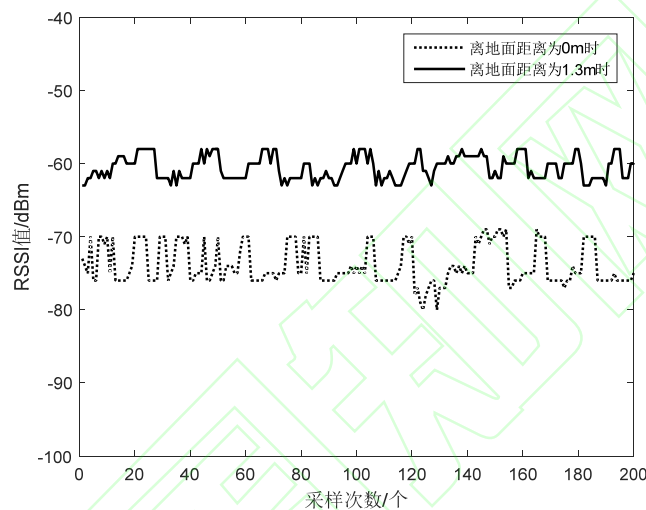


图 5 发射节点离地面不同高度
Fig.5 The Launch Node at a Different Height from the Ground

由图 5 可以看出, 当信标放置于离地面高为 0 m 时, 接收到的 RSSI 值在 -65 dBm~-70 dBm 波动, RSSI 值整体减弱了大概 15 dBm, 且 RSSI 值信号变化起伏较大, 某些 RSSI 值跳变到 -80 dBm 附近; 当信标放置于离地面高为 1.3 m 时, RSSI 值大致稳定在均值 -60.58 dBm 附近, 且波动相对小很多, 没有较突出的跳变值。这主要是因为地面对信号的折射、反射等因素导致的。因此, 在进行蓝牙室内定位的过程中, 不要将信标布设在离地面较近的地方, 可以减少地面对信号的影响。

4.3 滤波算法的数据处理实验

在本实验场中选择一个特定的锚节点, 分别在与锚节点距离为 3.0、6.0、9.0 m 处各采集 300 组数据进行分析。利用高斯滤波以及中值滤波与高斯滤波的混合滤波数据处理方法分别对数据进行滤波处理。其结果见图 6。

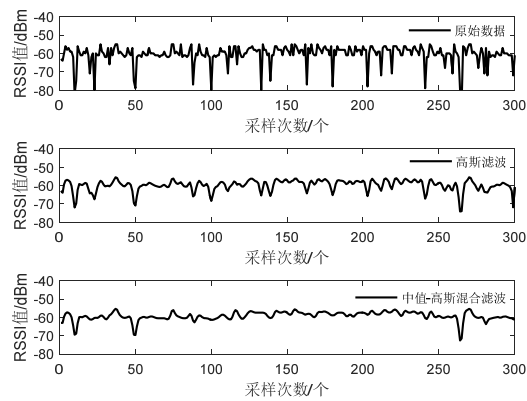
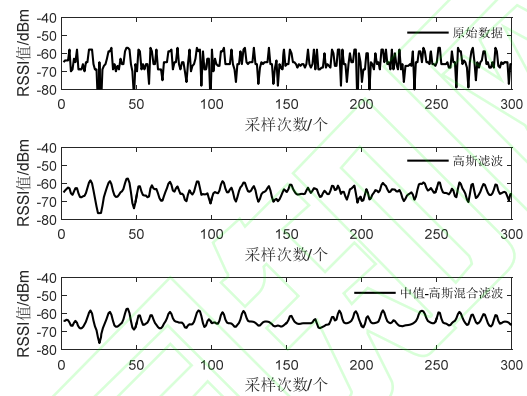
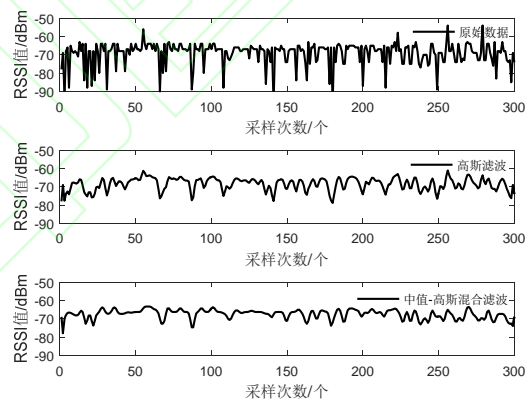
(a) $d=3.0$ m 时滤波算法对比(b) $d=6.0$ m 时滤波算法对比(c) $d=9.0$ m 时滤波算法对比

图 6 不同距离处接受的强度数据滤波处理
Fig.6 Intensity Data Filtering at Different Distances

从图 6 可以看出,受环境的影响所采集的蓝牙信号强度值存在个别突变点、数据存在较大的波动。采用高斯滤波对数据进行处理后,在一定程度上使得原始数据上的突变点变得平滑。但是数据仍然存在波动性较大的问题,而且对允许范围内的大范围波动数据也难以消除。利用中值滤波与高斯滤波结合的数据处理方法进行滤波处理,有效地消除了原始 RSSI 值的突变点,使得 RSSI 值平滑、准确地输出。

4.4 RSSI 测距实验

4.4.1 最小二乘分段拟合的测距模型建立

在实际环境中，蓝牙信号传播超过一定的距离之后，RSSI 值小幅度减小对应的距离就会增加很多，因此模型的拟合精度也会降低，为了提高测距模型的精确度，本文选择对测距模型进行分段拟合。实现步骤如下。

1) 将蓝牙基站放置在距离地面 1.2 m 的三脚架上，并且保证基站与手机处于相同的水平线上。采集数据过程中，改变手机与基站之间的距离，使这两者之间的距离依次为 0.3、0.6、0.9、…、12.0 m，在各个距离节点处使用信号采集软件分别采样 100 组 RSSI 值。采用中值滤波与高斯滤波结合的数据处理方法对原始数据进行滤波，得到距离一一对应的 RSSI 值，见表 1。

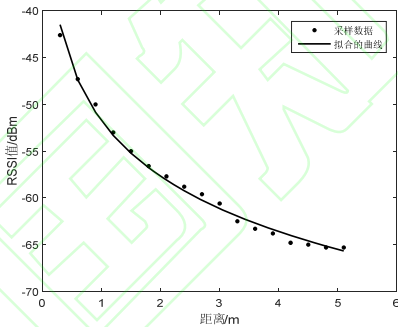
2) 分析信号传播曲线特性，划定合理的分段阈值，在本次实验中发现，当信号传播到 5 m 左右时，信号的增减幅度开始变大，5 m 之后，距离随 RSSI 变化较大，且可以确定 5 m 处的 RSSI 值约为 -65.2 dBm，所以可以选择强度值为 -65.2 dBm 为阈值。

3) 按照确定的阈值，将测距模型一分为二，通过对滤波处理后的 RSSI 小于阈值的训练样本和大于阈值的训练样本分别用 Matlab 进行最小二乘拟合，得到了一个分段的测距模型，拟合结果见图 7。

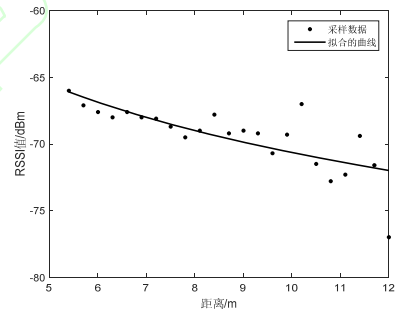
表1 实验数据处理结果

Tab.1 Experimental Data Processing Results

距离/m	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	...
信号强度/dBm	-42.6	-47.3	-50.0	-53.0	-55.0	-56.6	-57.7	-58.3	-59.6	...



(a) 小于阈值的 RSSI 测距模型



(b) 大于阈值的 RSSI 测距模型

图 7 RSSI 值与距离的关系
Fig.7 The Relationship between RSSI Values and Distance

根据采集的数据分段拟合得到两个测距模型，分别小于阈值的测距模型和大于阈值的测距模型，见式 (15)、式 (16)。

$$RSSI = -51.757 - 19.663 \lg(d) \tag{15}$$

$$RSSI = -53.632 - 17.008 \lg(d) \tag{16}$$

4.4.2 测距误差分析

本文以距锚节点 1~10 m 距离处接受的信号强度值作为本次测距实验的研究数据, 其中各个节点处的实测 RSSI 值见图 8。

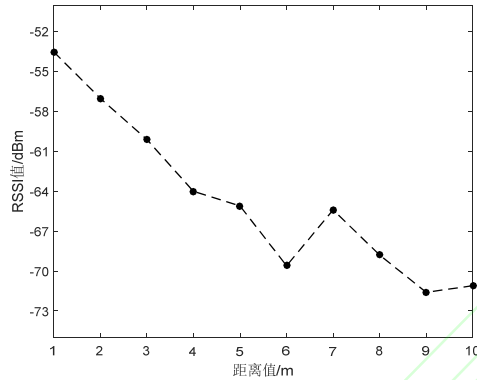


图 8 距发射节点 1~10 m 处的强度值
Fig.8 Intensity Value from 1 to 10 m from the Transmitting Node

从图 8 中可以看出, 蓝牙信号在楼道内受到楼道内多路径、人员遮挡、墙壁反射等复杂环境的影响, 当接受节点距锚节点越远的时候, 其强度值波动的越大, 尤其是在 5 m 之后数据更是出现了大幅度的跳变现象。因此, 在构建测距模型之前应该对原始数据进行滤波处理, 消除噪声对测距的影响; 在构建测距模型时采用分段拟合的方法进行, 以提高模型的拟合精度; 滤波之后的数据结合分段拟合的测距模型, 得到 1~10 m 的测距误差曲线见图 9。

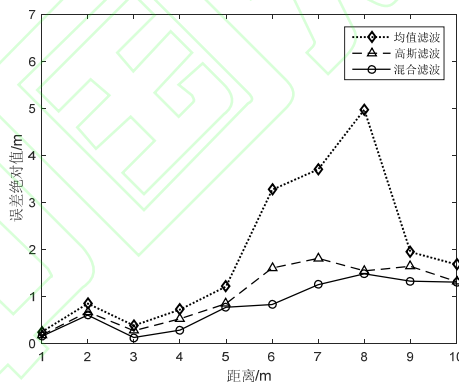


图 9 三种滤波测距误差绝对值比较
Fig.9 Comparison of Absolute Values of Three Kinds of Filter Ranging Errors

由图 9 可知, 未经任何滤波方法处理的原始数据, 仅仅求均值得到最终的强度值, 其测距误差最大达 4.972 6 m, 平均误差为 1.894 4 m; 经过高斯滤波处理后的数据, 其测距误差介于均值滤波与混合滤波之间, 最大误差为 1.807 2 m, 平均误差为 1.036 6 m; 而经过中值滤波与高斯滤波的混合滤波处理后, 其测距误差最大为 1.320 8 m, 平均误差为 0.807 5 m。由此可以看出, 采用混合滤波对原始数据进行处理后, 明显地提高了 RSSI 测距的精度。

5 结束语

本文对基于蓝牙的 RSSI 测距原理以及室内环境下 3 种典型因素对蓝牙信号的影响做了分析, 提出了较为合理的蓝牙节点部署方式; 采用高斯滤波与中值滤波混合处理数据的方法, 对采集的蓝牙信号强度值进行滤波处理; 针对实验的实际环境, 提出了基于最小二乘分段拟合的测距模型建立方法,

提高了测距模型的拟合精度。实验结果表明, 本文所提出的测距改进方法能准确有效地输出信号强度值, 提高了基于蓝牙的 RSSI 测距精度, 为后续的定位工作提供了保障。



参考文献

- [1] 陈国良, 张言哲, 汪云甲, 等. WiFi-PDR 室内组合定位的无迹卡尔曼滤波算法[J]. 测绘学报, 2015, 44(12): 1314-1321.
(CHEN GuoLiang, ZHANG Yanzhe, WANG Yunjia, et al. Unscented Kalman filter algorithm for WiFi-PDR integrated indoor positioning [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(12):1314-1321.)
- [2] FARAGHER R, HARLE R. Location fingerprinting with bluetooth low energy beacons[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(11):2418-2428.
- [3] CANTON PATERNA V, CALVERAS AUGÉ A, PARAGELLS ASPAS J, et al. A bluetooth low energy indoor positioning system with channel diversity, weighted trilateration and Kalman filtering[J]. Sensors, 2017, 17(12):2927.
- [4] CHE Z, JIN R, HE Q, et al. Experimental evaluation of reducing ranging-error based on receive signal strength indication in wireless sensor networks[J]. IET Wireless Sensor Systems, 2015, 5(5):228-234.
- [5] 赵珊, 付敬奇. 基于粒子滤波模型的 RSSI 测距优化研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(3): 122-126.
(ZHAO Shan, FU Jingqi. Study of RSSI ranging optimization techniques based on particle filter model [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(3): 122-126.)
- [6] 陶佳峰, 杨晓洪, 王剑平, 等. 基于 RSSI 的室内测距模型优化技术[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(1): 24-26.
(TAO Jiafeng, YANG Xiaohong, WANG Jianping, et al. Model of indoor distance measurement optimization techniques based on RSSI [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2017, 36(1): 24-26.)
- [7] 倪晓军, 高雁, 李凌峰. 基于 RSSI 的混合滤波算法[J]. 计算机科学, 2019, 46(8): 133-137.
(NI Xiaojun, GAO Yan, LI Lingfeng. Hybrid filtering algorithm based on RSSI [J]. Computer Science, 2019, 46(8): 133-137.)
- [8] 陈群, 高星伟, 郭杭, 等. ZigBee 网络中 RSSI 的测距模型分析[J]. 测绘科学, 2012, 37(5): 40-41, 77. (CHEN Qun, GAO Xingwei, GUO Hang, et al. Analysis of RSSI ranging model at ZigBee network [J]. Science of Surveying and Mapping, 2012, 37(5): 40-41, 77.)
- [9] 万群, 郭贤生, 陈章鑫. 室内定位理论、方法和应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 80.
(WAN Qun, GAO Xiansheng, CHEN Zhangxin. Indoor positioning theory, method and application [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2012: 80.)
- [10] 张鹏, 周建国, 冯欣, 等. 接收信号强度测距法无线室内定位解算方法研究[J]. 测绘科学, 2014, 39(4): 13-16.
(ZHANG Peng, ZHOU Jianguo, FENG Xin, et al. RSSI ranging based wireless indoor positioning solutions [J]. Science of Surveying and Mapping, 2014, 39(4): 13-16.)
- [11] 陶为戈, 朱映华, 贾子彦. 基于 RSSI 混合滤波和最小二乘参数估计的测距算法[J]. 传感技术学报, 2012, 25(12): 1748-1753.
(TAO Weige, ZHU Yihua, JIA Ziyan. A distance measurement algorithm based on RSSI hybrid filter and least square estimation [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(12): 1748-1753.)
- [12] BLASIO G D, QUESADAARENCIBIA A, GARCIA C R, et al. Study on an indoor positioning system for Harsh environments based on Wi-Fi and bluetooth low energy[J]. Sensors, 2017, 17(6):1299.
- [13] PEREIRA PIRES R, GRACIOLI G, WANNER L, et al. Evaluation of an RSSI-based location algorithm for wireless sensor networks[J]. IEEE Latin America Transactions, 2011, 9(1):830-835.
- [14] 章浙涛, 朱建军, 匡翠林, 等. 不同噪声下几种滤波方法的比较研究及改进[J]. 大地测量与地球动力学, 2014, 34(1): 127-130.
(ZHANG Zhetao, ZHU Jianjun, KUANG Cuilin, et al. Comparative study and improvement on several de-noising methods for different noise [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 34(1): 127-130.)
- [15] SHAN L L, YANG Y B, ZHU X, et al. Research on digital image mixed noise filtering algorithm[J]. Geospatial Information, 2018, 22(7): 13-15.
- [16] 梁敏, 马凯. 基于高斯滤波的回波信号去噪方法的研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2017, 40(1): 40-42. (LIANG Min, MA Kai. Study on the method of echo signal denoising based on Gauss filter [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2017, 40(1): 40-42.)
- [17] 岳俊梅, 彭新光, 李庆义, 等. 基于 RSSI 测距的煤矿井下定位研究[J]. 煤炭工程, 2018, 50(8): 122-125.
(YUE Junmei, PENG Xinguang, LI Qingyi, et al. Research of underground coal mine positioning based on RSSI ranging [J]. Coal Engineering, 2018, 50(8): 122-125.)