

容忍多径效应的无线传感网络测距算法*

徐 琨¹, 刘宏立¹, 马子骥¹, 詹 杰²

(1. 湖南大学电气与信息工程学院 长沙 410082; 2. 湖南科技大学物电学院 湘潭 411201)

摘要:在井下巷道环境中,基于RSSI的测距精度会受到多径效应和外部无线干扰的严重影响。针对这一问题,提出了一个新的基于RSSI的测距算法RRRME。该算法针对弯道弯曲面引起的额外衰减,从几何光学的角度来解决多径效应所带来的影响,分别分析了视距和非视距情况下无线信号传输所引起的路径衰减,重构了井下巷道环境中路径衰减和距离之间的函数关系,推导了多条传输路径所导致的测距误差。通过一系列的实测实验,对提出的算法进行验证,详细分析了井下环境中基于RSSI的测距性能,讨论了有重要影响的多径衰减因子和路径损耗因子对测距精度的影响。实验和仿真结果表明,和传统的RSSI测距方法相比,提出的RRRME算法具有更优的测距精度。

关键词:无线传感网络;接收信号强度指示值;测距;多径效应;路径损耗

中图分类号: TP393 TH89 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.99

Multipath-tolerant ranging algorithm in underground tunnel for wireless sensor networks

Xu Kun¹, Liu Hongli¹, Ma Ziji¹, Zhan Jie²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. College of Physics and Electronic Science, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The accuracy of RSSI-based ranging is severely affected by multipath effect and external radio interference in underground mine tunnel environments. To solve this problem, a novel RSSI-based ranging algorithm is proposed which overcomes the multipath effect by applying geometrical optics rules in analyzing RSSI measurements in both Line-of Sight and Non-Line-of-Sight scenario. The proposed algorithm can reconstruct a function for path loss and the physical distance which can help minimize the ranging error caused by multipath transport. Extensive real experiments are conducted in underground tunnel environments and the accuracy of the proposed ranging algorithm is analyzed. The impact of representative system parameters on the ranging, including multipath attenuation factor and path loss exponent, are discussed. Experiment and simulation results demonstrate that the proposed algorithm outperforms conventional RSSI-based ranging method without using any radio map information nor a calibration stage.

Keywords: wireless sensor networks (WSN); received signal strength indicator (RSSI); ranging; multipath effect; path loss

0 引 言

测距技术^[1]是实现无线传感网络^[2-3] (wireless sensor network, WSN) 定位的基础。利用精确的测距技术获取节点之间的距离,再采用三边定位^[4]或最大似然估计^[5]等定位算法可以快速地实现对网络中未知节点的定位。

目前比较常用的测距技术有基于到达时间^[6]、基于到达时间差^[7]、基于到达角度^[8]以及基于接收信号强度指示值^[9] (received signal strength indicator, RSSI) 的测距。其中,基于RSSI的测距方法具有成本低、实现简单、无需添加额外的硬件设施等优点^[10],得到了很多研究人员的关注,已经成为一个研究热点。

在一个理想的空旷环境中,传感节点之间的物理距

收稿日期:2017-07 Received Date: 2017-07

* 基金项目:国家自然科学基金(61771191,61172089,61540012)、中央国有资本经营预算支出(财企[2013]470号)、中央高校基本科研(2014-004)、中国博士后科研基金(2014M562100)、教育部产学研合作协同育人(201601004010)、湖南省科技计划重点(2015JC3053)项目资助

离和 RSSI 值之间是一一对应的单调函数关系,利用这一特性可以准确的计算出节点之间的距离,进而实现网络中未知节点的精确定位^[11]。但是对于井下巷道环境,由于巷道是狭长、弯曲的,巷道内的障碍物和弯曲的墙壁会使传感节点发送的无线信号发生反射、折射以及散射^[12],导致出现多径效应^[13],从而引起较大的测距误差,严重降低测距的精度。而且在基于 RSSI 的测距过程中, RSSI 测量值是仅有的输入值,在存在干扰的情况下,仅仅依靠 RSSI 值求出精确的测距是一件非常有挑战性的任务^[14]。文献[15]针对室内环境,利用实时的 RSSI 值动态的估计最适合监测环境的信道传输模型,精确的计算节点之间的物理距离;文献[16]提出一种基于位置指纹的算法,通过提前部署训练节点,在离线训练阶段建立 RSSI 和距离之间的映射关系,然后通过对比线上数据和线下映射库的关系,得出对应的测距;文献[17]提出了一种应用于室内的 EARIL 算法,该算法利用信标节点之间的 RSSI 变化,建立了一个在线更新路径损耗因子的信号传输模型描述 RSSI 值和不同距离之间的对应关系;文献[18]提出一种基于频域的测距算法。该算法建立了基于 Fredi 的测距框架,采用频率分集的方法克服多径效应对 RSSI 值的影响。目前还很少有文献针对井下巷道中存在的多径效应问题,对无线传感网络中基于 RSSI 的测距算法和测距精度进行研究。

针对井下巷道中存在的多径效应问题,本文提出一种新的容忍多径效应的 RSSI 测距算法(robust RSSI-based ranging with multipath effect, RRRME)。该算法分析了井下巷道中无线信号在弯道弯曲面产生的路径衰减,从几何光学的角度解决了多径效应带来的影响,重构了路径衰减和物理距离之间的对应关系。通过在井下巷道中部署无线传感网络平台对提出的算法进行验证,结果证明提出的算法具有很好的测距性能和精度。

1 问题描述

1.1 井下巷道中的多径效应问题

在实际的井下巷道环境中,巷道是狭长、向下弯曲延伸的,有几十、上百千米长,但是只有几米宽和高,而且会存在很多弯道和障碍物,发送节点和接收节点之间会存在两条或多条物理传输路线,一般将其称为多径效应。产生多径效应的原因有很多种,例如大气波导、折射和反射等。除了视距的传输路径,其他的物理传输路径都统称为非视距的传输路径。

当出现非视距传输时,无线信号的传输方向会在两个不同介质的接触面发生改变,从而导致有部分无线电波会返回到最初的传输介质上。在井下巷道中,由于存

在狭长的巷道,墙面、弯道弯曲面和目标对象上的反射是最典型出现的非视距传输路线。对于每一次反射,部分能量将会被透射,部分将会被反射,还有一部分会被介质吸收。主要针对具有弯道弯曲面的井下巷道环境,考虑由于弯道弯曲面所导致的多径效应,分析弯道弯曲面引起的额外衰减,重构井下巷道环境中路径衰减和距离之间的函数关系。

1.2 网络模型

真实的井下巷道一般是一个拱形的横截面,其内部会存在一些如缆线、管线以及通风口等元素,通常比较复杂。如果分析这么一个复杂的巷道结构,很难清晰地描述其通信特性。因此,为了便于分析,将一个井下巷道的横截面近似表示成一个矩形剖面。一个典型的井下巷道剖面图如图 1 所示。巷道横截面的宽为 w m, 高为 h m, 假设巷道四周墙壁是一个均匀的阻抗表面,它们的相对介电常数为 ϵ_r , 电导率为 σ 。

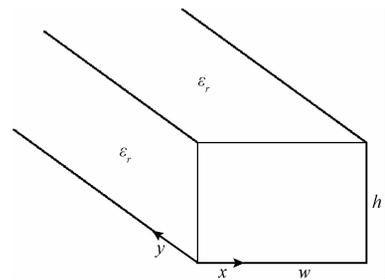


图 1 井下巷道剖面图

Fig. 1 underground profile map

考虑在一个二维空间 \mathbb{R}^2 中,有一个由 N 个终端传感节点和 1 个中心节点组成的无线传感网络,这些节点随机的分布在井下巷道中。中心节点的位置 $\mathbf{u} = (x, y)$, 它以功率 P 周期性地广播一个无线信号给周围的终端传感节点,每个终端传感节点的位置为 $\mathbf{s}_i = (x_i, y_i)$, $i = 1, 2, \dots, N$, 终端传感节点 i 接收到信号后,将得到的 RSSI 值和节点 ID 转发给中心节点。

2 RRRME 测距算法

通过分析井下巷道中无线信号的传输特性,提出采用几何光学理论解决由于弯道弯曲面引起的多径问题。首先考虑最简单的 1 条路径的情况,然后分析 2 条路径的情况,最后扩展到有 N 条路径的通用情况。

2.1 1 条传输路径的情况

对于只有 1 条传输路径的情况,求解节点之间距离的过程比较简单。无线信号在巷道中的传输服从无线通信的基本规律,在传输过程中,无线电波的场能会衰减。

针对一个简单的正弦无线信号,当信号直接传输给目标节点时,将建立一条直射路径。根据费希尔自由空间模型,可以将这条直射传输的信号的能量场强度表示为:

$$E_{\text{Los}}(t) = \frac{\sqrt{G_t G_r P_t}}{4\pi d} \sin\left(\frac{2\pi c}{\lambda} t + \frac{2\pi d}{\lambda}\right) \quad (1)$$

式中: G_t 表示发送天线增益, G_r 表示接收天线增益, P_t 表示发送功率大小, λ 表示无线信号的波长, c 表示光速, d 表示节点之间的欧氏距离, t 表示时间。根据式(1),在只有一条视距路径的情况下,接收节点所接收到的 RSSI 可以表示为:

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

通过对一定采样时间内的值进行取平均值,可以消除快速衰减所带来的影响。对式(2)进行转换和取对数,可以进一步得到距离和信号衰减之间的关系:

$$PL_1 = PL_0 + 10 \cdot n_p \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (3)$$

式中: PL_1 表示视距传输时,距离为 d 的路径衰减大小,单位为 dBm; $d = \|\mathbf{s}_i - \mathbf{u}\|$ 表示节点之间的欧氏距离; PL_0 表示在参考距离为 d_0 时的路径衰减值,一般设 d_0 的大小为 1 m; n_p 表示路径损耗因子,它的大小依赖于测试区域的具体环境,一般取值为[2 ~ 6]; X_σ 表示对数正态的遮蔽效应,它是一个均值为 0,方差为 σ_x^2 的高斯白噪声, $X_\sigma \sim (0, \sigma_x^2)$ 。式(3)中, PL_0 和 n_p 的值主要依赖于采用的硬件设备和环境,可以通过线下的方式提前求出。因此,耗费较少的计算就能求出节点之间的距离,求解过程简单,计算复杂度低。

2.2 2 条传输路径的情况

在井下巷道中,随着巷道的延伸,还会频繁的出现各种弯道,其示意图如图 2(a)所示。无线信号在传输时,会在弯道的弯曲面发生反射和折射。典型的弯道剖面图如图 2(b)所示,仅考虑巷道两侧墙壁弯曲的情况,弯曲处是圆形的,其曲率半径为 r 。对于特高频段(ultra high frequency, UHF)的无线电波,井下巷道的尺寸远大于无线电波的波长,可以将巷道近似的看成一个超大的介质波导,将无线信号在空间中的传输看成一条条和墙壁的掠射角度为 φ 的射线,所有可能的反射路径都可以完成信号的传输。通过计算出射线在弯曲处的反射次数,以及由于每次反射引起的损耗值,可以得出无线信号在巷道弯曲处的额外路径衰减。无线信号在井下巷道中的反射图如图 3 所示。射线在直道中和侧墙形成的掠射角 φ_1 可以表示为:

$$\varphi_1 = \sin^{-1}\left(\frac{m\lambda}{2w}\right) \quad (4)$$

式中: λ 表示发射的无线信号的波长, m 表示模式序号。

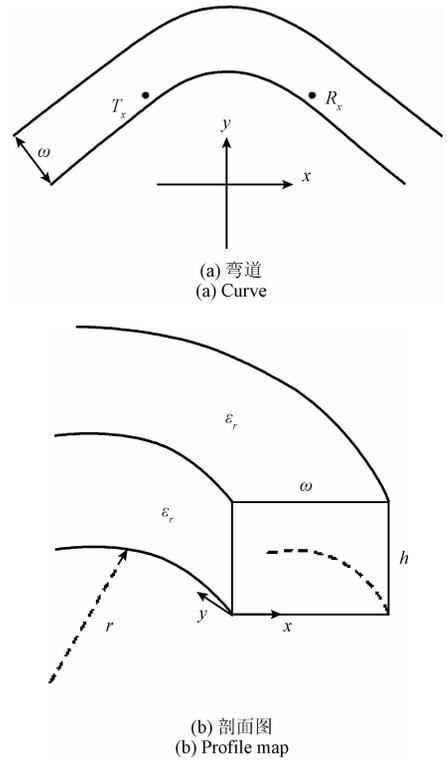


图 2 弯道平面图

Fig. 2 Planar graph of curve

掠射角的大小依赖于曲率半径和巷道横截面的宽度,当射线与墙壁的掠射角 $\varphi = 0$ 时,即直射射线,其对应的传输衰减最小。对于每一条射线,当掠射角较小时,对应的传输衰减较小;掠射角较大时,对应的传输衰减也大;对掠射角很大的射线,可以忽略不计。由于墙壁弯曲的存在,射线从直道传向弯曲的侧墙时,掠射角会变大,会产生较低的反系数和较大的路径损耗。无线信号在弯道弯曲处的反射如图 3 所示。从图 3 中可以看出, $\varphi_2 > \varphi_1$ 。设交点 C_1 的坐标为 (x_1, y_1) ,交点 C_2 的坐标为 (x_2, y_2) ,圆心角为 a ,根据图 3 所示的坐标系 XOY ,可以得到以下的关系式:

$$\begin{cases} y = -\cot\varphi_1 \cdot x \\ \left[x - \left(r + \frac{w}{2}\right)\right]^2 + y^2 = (r + w)^2 \end{cases} \quad (5)$$

根据式(5),可以求得射线和外侧墙壁形成的掠射角 φ_2 为:

$$\varphi_2 = \operatorname{arccot}\left(\frac{\cot\varphi_1 \cdot \left(\left(r + \frac{w}{2}\right) - x_1\right) - y_1}{\left(r + \frac{w}{2}\right) - x_1 + y_1 \cdot \cot\varphi_1}\right) \quad (6)$$

根据式(5)和(6),可以求出射线和内侧墙壁形成掠射角 φ_3 如式(7)。

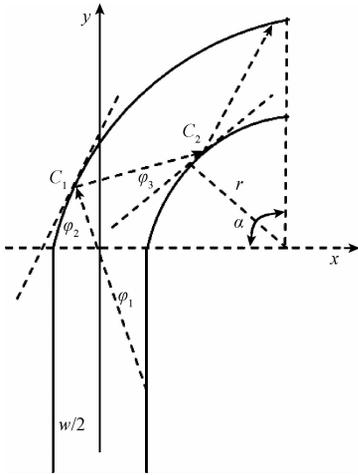


图3 无线信号在弯道弯曲处的反射

Fig. 3 Reflections on roadway curvature

$$\varphi_3 = \arctg \frac{y_2 + \cot(2\varphi_2 - \varphi_1) \cdot \left(\left(r + \frac{w}{2} \right) - x_2 \right)}{\left(\left(r + \frac{w}{2} \right) - x_2 \right) - y_2 \cdot \cot(2\varphi_2 - \varphi_1)} \quad (7)$$

根据式(6)和(7),可以求出两个连续反射之间的距离为:

$$\Delta d = (\varphi_2 - \varphi_3) \cdot \left(r + \frac{w}{2} \right) \quad (8)$$

射线在巷道侧面墙壁经历的反射次数 N_m 可以表示为:

$$N_m = \frac{l_c}{\Delta d} = \frac{\alpha \cdot \left(r + \frac{w}{2} \right)}{\Delta d} \quad (9)$$

式中: l_c 表示曲率半径为 c , 圆心角为 α 的弯曲墙壁的长度。由于弯道弯曲面所引起的非视距传输路径的路径衰减大小为:

$$PL_2 = 10 \cdot N_m \cdot \log_{10} \frac{1}{|R(\varphi_2)|^2} \quad (10)$$

式中: R 表示每条射线在巷道两侧墙壁上的反射系数。

$$R_i = \frac{\cos\theta_i - \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta_i}}{\cos\theta_i + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta_i}} \quad (11)$$

式中: $\theta_i = \frac{\pi}{2} - \varphi_i$, 表示射线射向外墙的人射角。

当存在非视距的传输路径时,弯道弯曲面的存在会增加无线信号在巷道中的传输损耗。因此,当存在两条传输路径时,传输信号的整个衰减值可以表示为:

$$PL = PL_1 + PL_2 = PL_0 + 10 \cdot n_p \cdot \log(d) + 10 \cdot N_m \cdot \log_{10} \frac{1}{|R(\varphi_2)|^2} + X_\sigma \quad (12)$$

2.3 N 条传输路径的情况

假设发送节点和接收节点之间存在任意条传输路

径,可以通过对巷道中多个不同射线取平均值的方式,求出传输信号在遇到弯道弯曲处墙壁时所引起的非视距传输衰减:

$$PL_c = \frac{1}{N} \sum_N 10 \cdot N_m \cdot \log_{10} \frac{1}{|R(\varphi_2)|^2} \quad (13)$$

当发送节点和接收节点之间的距离为 d 时,可以进一步将由于弯道弯曲处所引起的信号衰减表示为:

$$PL_c(d) = PL_c \cdot \frac{d}{r} \quad (14)$$

令 $k = \frac{PL_c}{r}$, 表示由于多径效应所导致的多径衰减因子。

对于巷道内由于弯道弯曲处所导致的非视距传输衰减,可以利用线性的方式简化为:

$$PL_c(d) = kd \quad (15)$$

因此,整个传输信号的衰减可以进一步表示为:

$$PL = PL_0 + 10 \cdot n_p \cdot \log(d) + k \cdot d + X_\sigma \quad (16)$$

根据式(16)中的路径衰减和距离之间的关系,利用最大似然估计法,可以计算出节点间的距离估计值:

$$\hat{d}_i = d_i \cdot \exp(\ln 10 \cdot X_\sigma / 10n_p) \quad (17)$$

令 $q = \ln 10 / 10n_p$, 估计距离 \hat{d}_i 的均值为:

$$\mu_{\hat{d}_i} = E(\hat{d}_i) = d_i \exp \left[\frac{(q\sigma_X)^2}{2} \right] \quad (18)$$

估计距离 \hat{d}_i 的方差为:

$$\sigma_{\hat{d}_i}^2 = E[(\hat{d}_i - \mu_{\hat{d}_i})^2] = d_i^2 \exp(q^2 \sigma_X^2) \cdot [\exp(q^2 \sigma_X^2) - 1] \quad (19)$$

令 $\varepsilon_i = \hat{d}_i - d_i$, 表示接收节点的距离估计误差,根据以上的公式,可以计算出其对应的均方误差。距离估计误差 ε_i 的均方根误差 (root mean square error, RMSE):

$$RMSE = \sqrt{E(\varepsilon_i^2)} = d_i \sqrt{(\exp(\sqrt{2}q\sigma_X)^2 - 2\exp(q\sigma_X/\sqrt{2})^2 + 1)} \quad (20)$$

3 实测实验及分析

为了验证提出算法的测距性能以及相关参数对测距精度的影响,基于一个真实的井下巷道环境进行了一系列的实测实验。

3.1 测试环境与设置

选取湖南省长沙市岳麓山下的地下人防系统作为实验场地。该地下人防系统具有和井下矿山相似的结构,由很多不同长度、不同结构的井下巷道组成。为了使实验具有代表性,选取4个不同的测试地点进行测量,如图4所示。实测区域总长度大约为405 m,存在多个弯道,巷道横截面的宽为2.46 m,高为2.09 m。

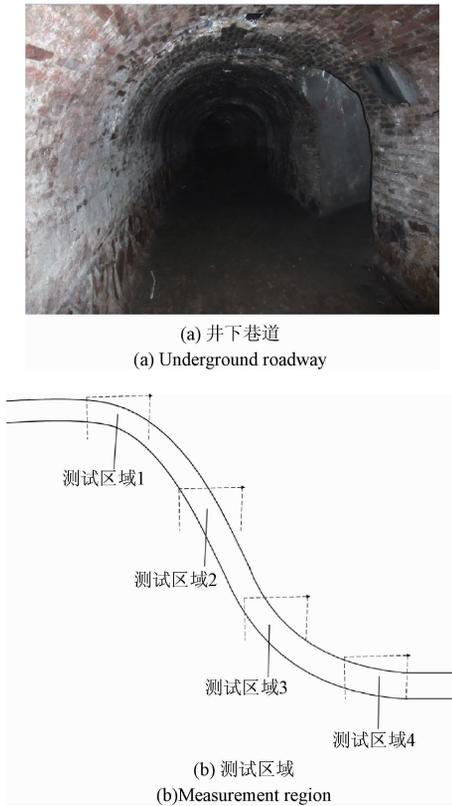


图 4 巷道测试环境
Fig. 4 Measurement environment

采用自制的传感节点组成一个基于 ZigBee 协议的小型网络系统,网络由 10 个终端传感节点和 1 个中心节点组成,中心节点和终端传感节点都采用 CC2530 芯片,选择 2.4 GHz 作为网络的载波频段,装备自制的 $\lambda/4$ 波长的全向天线。为了准确的测量井下巷道区域的信号衰落和路径损耗,设计了如图 5 所示的实验方案。将中心节点随机部署在巷道中,周期性的向周围广播信号,10 个终端传感节点分别沿着巷道的延伸方向放置在中心节点的两侧接收广播的无线信号,终端传感节点和中心节点都固定在一个距离地面为 1.2 m 的三脚架上。终端传感节点向远离中心节点的方向移动,从与中心节点距离为 1 m 处开始采集 RSSI,每隔 0.1 m 作为一个采样点,每个采样点采集 1 000 个 RSSI 值,对每一个测试区域进行 100 次重复实验。为了消除快衰落对实验结果的影响,计算每个采样点的 RSSI 平均值来描述对应的信号衰减特性。

为了评估 RRRME 算法的性能,基于相同的测试平台和环境,对传统的基于 RSSI 的测距算法和文献[17]的 EARIL 算法进行了实测实验,并和 RRRME 算法进行比较。对于 RRRME 算法,在计算距离时,RSSI 测量值是唯一的输入值,不需要任何其他的辅助信息。为了进行公平的比较,对于传统 RSSI 测距方法和 EARIL 算法,也不使用任何其他的信息。在进行实测实验之前,通过在测

试区域部署训练节点,利用训练数据提前计算出当前测试环境中的路径损耗因子和多径衰减因子,设计 500 组实验来验证 RRRME 算法的测距精度。

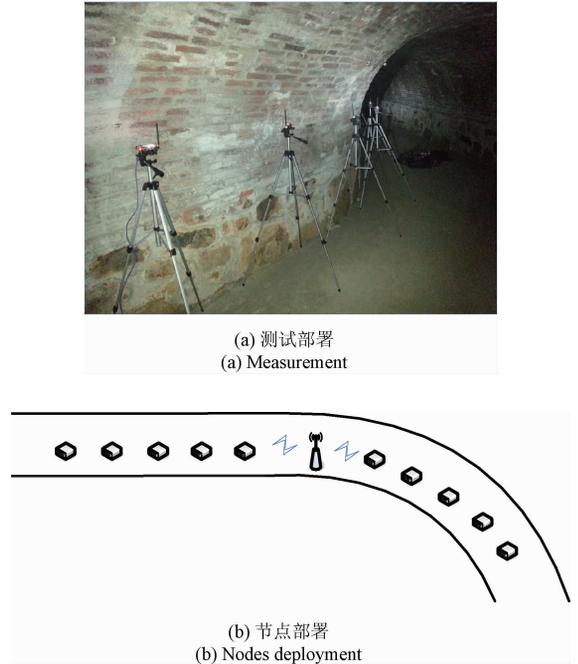


图 5 测量方案
Fig. 5 Measurement scheme

3.2 性能分析

通过分析不同测试区域内的数据,得出了传感节点在不同通信距离下的测距性能。图 6(a)所示为 RRRME 算法在不同通信距离下测距误差的累积分布概率。当终端传感节点与中心节点的通信距离为 10 m 时,80% 的测距误差在 3.15 m 以内,其对应的均方根误差为 2.310 7。当终端传感节点与中心节点的通信距离为 8 m 时,测距误差急剧变小,90% 的测距误差在 1.98 m 以内,对应的均方根误差为 1.224 6。这是因为当节点之间的距离超过 10 m 后,会产生大量的测量噪声,影响测距的精度。当节点间的通信距离越来越小时,测距误差的值越来越小,测距的精度越来越精确。当节点之间的距离为 4 m 时,90% 的测距误差在 0.66 m 以内,对应的均方根误差为 0.476 4。图 6(b)所示为传统 RSSI 测距算法在不同通信距离下测距误差的累积分布概率。传统 RSSI 测距算法没有考虑多径效应带来的影响,实现方法和 3.1 节相同。当终端传感节点与中心节点的通信距离为 10 m 时,90% 的测距误差在 9.34 m 以内,对应的均方根误差为 6.314 9。当节点间的通信距离为 4 m 时,其测距误差依然很大,90% 的测距误差在 3.39 m 以内,其对应的均方根误差为 2.235 5,测距误差仍然非常大,很难为网络中的节点提供准确的测距信息。这是因为弯道中两侧弯曲的墙壁会阻碍传感节点之间信号的直接传输,信号通

过反射传输到接收节点引起较大的多径衰减。图6(c)所示为EARIL算法在不同通信距离下测距误差的累积分布概率。当节点间的通信距离为10 m时,90%的误差在8.88 m以内,对应的均方根误差为6.060 4。当节点间的通信距离为4 m时,90%的测距误差在1.87 m以内,其对应的均方根误差为1.352 0。虽然测距性能相对于传统RSSI测距算法有所提高,但是要明显弱于提出的RRRME算法,这是因为EARIL算法虽然考虑了路径损耗因子的动态变化,但没有考虑弯道弯曲面对信号的阻碍。

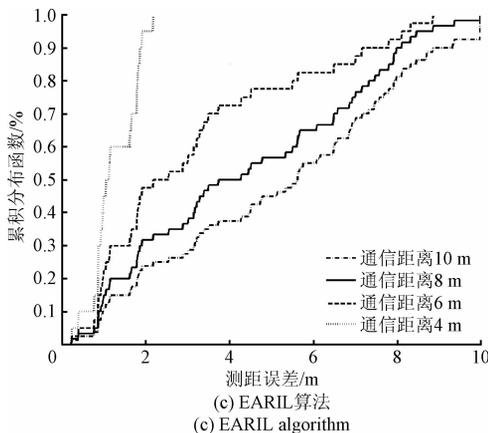
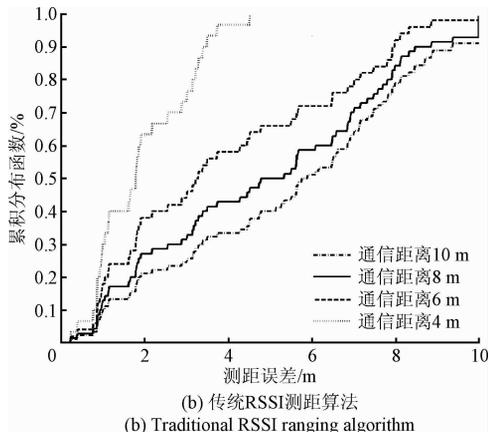
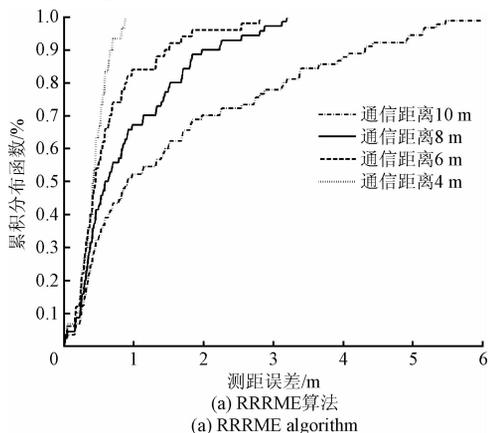


图6 不同通信距离下测距误差累积分布
Fig. 6 Cumulative distribution function of ranging error in different communication distance

RRRME算法和传统RSSI测距算法在4个测试区域的平均测距误差和最大测距误差分别如图7所示。传统RSSI测距算法平均测距误差大于5 m,最大测距误差大于8 m。而RRRME算法的平均测距误差要小于1.5 m,最大测距误差小于4 m。相比传统RSSI测距算法,提出的RRRME算法在平均测距误差和最大测距误差上,测距性能都有显著的提高。

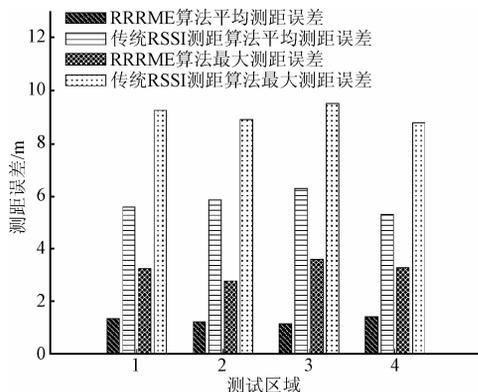


图7 平均测距误差与最大测距误差
Fig. 7 Average ranging error and maximum ranging error

图8所示为在RRRME算法中多径衰减因子值对测距精度的影响。从图8可以看出,当 $k = 0$ 时,测距误差最大,随着 k 值的增大,测距误差开始快速减少,当 k 的大小真实反映墙壁反射引起的额外衰减时,其对应的测距误差最小。当 k 值继续增大,测距误差又开始慢慢增大,这是因为当多径衰减因子过大时,会夸大墙壁弯曲面对信号的影响。

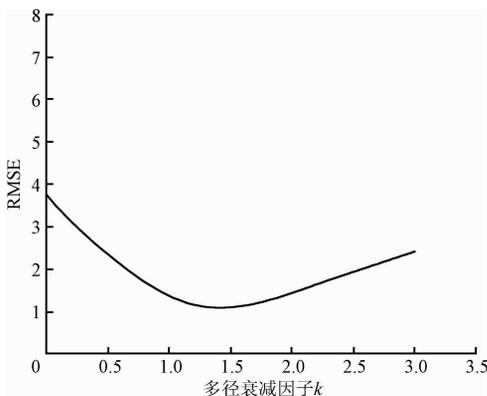


图8 多径衰减因子对测距精度的影响
Fig. 8 Ranging accuracy vs. multipath fading factor

图9所示为不同路径损耗因子 n_p 对测距误差的影响。当路径损耗因子 n_p 的值接近于自由空间的值时,即 $n_p = 2$,测距误差最大,这是因为巷道环境复杂,存在强烈的多径效应,对 n_p 的影响较大。所以在室内环境中,

需要考虑路径损耗因子随环境变化的情况。测距误差先随 n_p 的增大而急剧减少,当 n_p 的值接近真实环境的路径损耗因子时,其测距误差最小,当 n_p 的值继续增大时,测距误差又开始缓慢增大。

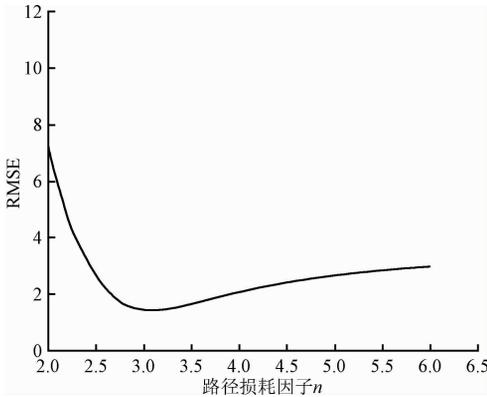


图 9 路径损耗因子对测距精度的影响

Fig. 9 Ranging accuracy vs. path loss factor

图 10 所示为不同路径损耗因子和多径衰减因子对测距误差的影响。从图 10 中可以看出,当 n_p 和 k 的值较小时,测距误差最大,这是因为没有考虑巷道的真实环境。当 n_p 和 k 的值增大时,测距误差最初急剧减少,然后慢慢降到最低值,当继续增大 n_p 和 k 的值时,测距误差又会缓慢增加。

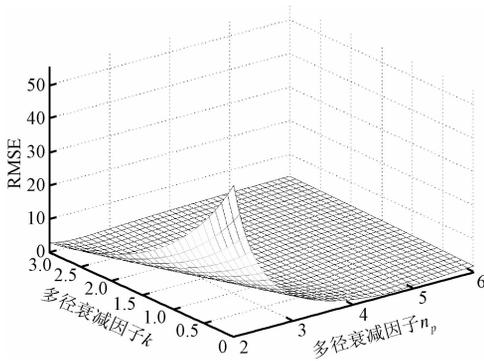


图 10 多径衰减因子和路径损耗因子对测距精度的影响

Fig. 10 Ranging accuracy vs. multipath fading factor and path loss factor

4 结 论

多径效应问题是基于 RSSI 的测距过程中需要解决的一个关键问题。在井下复杂的环境中,由于墙壁,特别是弯道弯曲面的影响,无线信号会通过多条路径传输到传感节点,从而导致多径衰落效应,严重降低测距的精度。针对存在的多径效应问题,本文提出了一个新的鲁棒的 RSSI 测距算法 RRRME,分析了弯道弯曲面对信号

传输的影响,推导了不同传输路径下的路径衰减和距离之间的关系。通过在一个真实的井下巷道中进行一系列的实验,对提出的算法进行验证,并和传统的 RSSI 测距算法进行比较,结果表明所提出的算法具有更好的测距精度。

参考文献

- [1] CHOWDHURY T J S, ELKIN C, DEVABHAKTUNI V, et al. Advances on localization techniques for wireless sensor networks: A survey [J]. Computer Networks, 2016, 110(C): 284-305.
- [2] 郑学理, 付敬奇. 基于 PDR 和 RSSI 的室内定位算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(5): 1177-1185. ZHENG X L, FU J Q. Study on PDR and RSSI based indoor localization algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(5): 1177-1185.
- [3] 卫星, 张芳荣, 段章领, 等. 基于模拟烟火无线传感节点重编程策略[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(3): 537-544. WEI X, ZHANG F R, DUAN ZH L, et al. Simulated annealing based reprogramming scheme of wireless sensor nodes [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(3): 537-544.
- [4] JIANG J A, ZHENG X Y, CHEN Y F, et al. A distributed RSSI-based localization using a dynamic circle expanding mechanism[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(10): 3754-3766.
- [5] LUO X, JIU B, CHEN S, et al. ML estimation of transition probabilities for an unknown maneuvering emitter tracking[J]. Signal Processing, 2015, 109(4): 248-260.
- [6] 张建军, 魏炬熠, 魏振春. 一种能量有效的自适应 WSN 时间同步算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(8): 1220-1227. ZHANG J J, WEI J Y, WEI ZH CH. Energy-effective and adaptive WSN time synchronization algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(8): 1220-1227.
- [7] 刘洲洲, 张亚杰. 伪随机码相关检测的 MDS-MAP 定位算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(2): 245-250. LIU ZH ZH, ZHANG Y J. MDS-MAP localization algorithm based on pseudo random code correlation detection [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(2): 245-250.
- [8] MALAJNER M, PLANINSIC P, GLEICH D. Angle of arrival estimation using RSSI and omnidirectional rotatable antennas [J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(6): 1950-1957.

- [9] 李洪雷, 冷文, 王安国, 等. 基于信号强度的改进室内定位算法[J]. 电子测量技术, 2016, 39(3): 136-140.
LI H L, LENG W, WANG A G, et al. Modified indoor localization algorithm based on received signal strength[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(3): 136-140.
- [10] 王伟, 王召巴. 无线传感器网络抗 Sybil 攻击的 MPRR-RSSI 定位算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(10): 1599-1605.
WANG W, WANG ZH B. Anti-Sybil attack MPRR-RSSI localization algorithm in wireless sensor networks[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(10): 1599-1605.
- [11] LIU C, FANG D, YANG Z, et al. RSS distribution-based passive localization and its application in sensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(4): 2883-2895.
- [12] 张冲, 熊勇, 房卫东, 等. ZigBee 网络性能测试系统研究[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(8): 74-81.
ZHANG CH, XIONG Y, FANG W D, et al. Research of ZigBee network performance test system[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(8): 74-81.
- [13] SUN Z, AKYILDIZ I F. Channel modeling and analysis for wireless networks in underground mines and road tunnels [J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(6): 1758-1768.
- [14] LUO Q, PENG Y, LI J, et al. RSSI-Based localization through uncertain data mapping for wireless sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(9): 3155-3162.
- [15] MAZUELAS S, BAHILLO A, LORENZO R M, et al. Robust indoor positioning provided by real-time RSSI values in unmodified WLAN networks[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2009, 3(5):

821-831.

- [16] LI K, BIGHAM J, BODANESE E L, et al. Outdoor location estimation in changeable environments[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(11): 2072-2075.
- [17] AHN H S, YU W. Environmental-adaptive RSSI-based indoor localization[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2009, 6(4): 626-633.
- [18] ZHAO Y, LIU Y, HE T, et al. FREDI: Robust RSS-based ranging with multipath effect and radio interference[C]. IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM), 2013: 505-509.

作者简介



徐琨, 2002 年于湖南大学获得学士学位, 2006 年于华中科技大学获得硕士学位, 现为湖南大学博士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络定位与追踪、移动互联等。
E-mail: kunxuhnu@sina.com

Xu Kun received his B. Sc. degree from Hunan University in 2002, received his M. Sc. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2006. He is a Ph. D. candidate in the Hunan University. His main research interests include wireless sensor network localization and tracking, mobile internet.



刘宏立 (通讯作者), 分别在 1985 年、1988 年和 2000 年于湖南大学获得学士、硕士和博士学位, 现为湖南大学博士生导师、教授, 主要研究方向为无线通信、无线传感网络、认知无线电等。
E-mail: honglilium@hnu.edu.cn

Liu Hongli (Corresponding author) received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Hunan University in 1985, 1998, and 2000, respectively. Now he is a professor and Ph. D. supervisor in Hunan University. His main research interests include wireless communication theory and its application in wireless sensor networks and cognitive radio.