

基于无线传感器网络的室内无线信道测量与分析*

杨 旸, 黄河清, 沈 杰, 王营冠

(中国科学院 上海微系统与信息技术研究所 无线传感器网络与通信重点实验室, 上海 200050)

摘要: 首次针对无线传感器网络的典型室内应用环境——室内停车场对信道传播特性进行测定, 通过线性回归对室内无线信道传播模型的衰减因子等参数进行拟合, 并与室外测量结果进行对比, 归纳出室内与室外环境中无线信号的传播具有不同特征, 但仍然可用对数阴影单折线/双折线模型进行拟合, 为室内无线传感器网络系统的研究与实现提供重要参考。

关键词: 无线传感器网络; 室内; 无线传播信道测试; 线性回归

中图分类号: TN915; TP393.06 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2010)04-1448-04

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2010.04.067

Indoor wireless channel measurements and analysis based on WSN

YANG Yang, HUANG He-qing, SHEN Jie, WANG Ying-guan

(Key Laboratory of Wireless Sensor Network & Communication, Shanghai Institute of Microsystem & Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: This paper presented a recent measurement result that for the first time provided an analysis of the propagation channels in an indoor parking environment, which was a typical indoor environment of the wireless sensor network application system. This paper obtained the attenuation and other factors by using linearity regression. Further, also measured the path loss in some outdoor environments, then compared the results. The measurement results indicate the different characteristics of the wireless propagation channels between indoor and outdoor environments, but the single or double regression model is still acceptable. The analysis result has important significance for research and implementation of the indoor wireless sensor network system.

Key words: wireless sensor network(WSN); indoor; wireless propagation channels measurement; linearity regression

无线传感器网络(WSN)在军事国防、环境监测、抢险救灾和区域远程控制等诸多领域具有广泛的应用前景。其中,无线信道传播模型是无线传感器网络方案设计和实现的基础与难点,特别是在网络方案的规划、仿真和优化阶段,无线信道传播模型对节点覆盖范围、邻居节点度等重要网络参数有着直接影响,获得能真实反映实际无线信道特征的信道模型是设计高效可靠的无线传感器网络方案的前提。同时,许多无线传感器网络系统都需要提供基于位置信息的服务,而提供该服务的关键技术之一,定位技术中基于接收信号强度指示(received signal strength indication, RSSI)的定位方法,也是通过信号衰落与距离之间的关系来实现测距的。

对无线信道模型的研究,传统集中于给定范围内平均接收场强的预测和特定位置附近的场强变化,前者为大尺度衰落模型,后者为小尺度衰落模型。由于大尺度衰落模型表征的是信号衰落与距离之间的关系,不论是考虑节点的覆盖范围、邻居节点度等网络参数,还是通过传输信号进行测距,大尺度衰落模型都是研究的基础。从自由空间传播模型发展至今,较有代表性的研究成果包括对数距离路径损耗模型、对数正态阴影模型等,这些都是大尺度衰落模型,但这些研究多针对于室外空

旷环境下的大尺度无线信道传播特性。而室内环境作为人们活动最多的区域,同时也是传感器网络应用最广泛的场景,尚缺乏成熟的无线信道模型。

与室外环境相比,室内的多障碍物环境以及地面、天花板和墙壁等结构会造成接收信号为不同方向的多种信号的合成,因此节点在极小范围内移动时,会引起瞬时接收场强的快速波动,即小尺度衰落。此合成接收信号中反射信号、散射信号和绕射信号等分量所占比例,远大于室外环境中相同距离处的接收信号情况,因此室内环境中的小尺度衰落对平均接收场强测定的影响远大于室外环境,从而大大提高了测定室内大尺度衰落模型的难度。

1 相关研究介绍

目前,针对无线传感器网络的应用环境,特别是室内应用环境下的无线信道模型研究已有一定的进展。

Cox 等人^[1]首先在 AT&T 贝尔实验室对大量家用和办公室建筑周围及内部路径损耗进行了仔细的研究, Molkdar^[2]和 Hashemi^[3]也提出了各种室内无线信道传播模型的研究结果。这些研究结果均基于对数距离路径损耗模型,针对各种建筑物

收稿日期: 2009-09-28; 修回日期: 2009-10-30 基金项目: 中国科学院信息基地资助项目(KGCX2-YW-110-1); 上海新泰研究与发展课题基金资助项目(074GQA1001)

作者简介: 杨旸(1985-),女,江西景德镇人,博士研究生,主要研究方向为基于无线传感器网络的定位技术、无线传感器网络协议(youcyang@gmail.com); 黄河清(1981-),男,助理研究员,博士,主要研究方向为无线传感器网络拓扑、协议及体系架构; 沈杰(1980-),男,副研究员,博士,主要研究方向为无线传感器网络协议、无线传感器网络标准化; 王营冠(1970-),男,研究员,博士,主要研究方向为无线传感器网络协议。

内分隔的损耗和衰减因子进行归纳,在一定程度上解决了室内无线信号传播的估计问题。但是这些经典模型,对于当前室内无线传感器网络应用系统的设计和实现,并不具有针对性的指导意义。

首先,不同频段上归纳出来的无线信道传播模型及对应的参数必然有所不同,而无线传感器网络常用的通信频段有别于传统无线通信系统。其次,对于传感器节点来说,天线高度在室内环境下极大地影响了无线信号的衰落情况,而现有的室内无线信道传播模型研究并未针对不同天线高度对传播信道进行过相关研究。

Zhao 等人^[4]初步将实际信道测试纳入了无线传感器网络的研究中,指出在无线传感器节点的传播范围内,接收信号处于时变和不稳定状态。Martinez-sala^[5]、Joshi^[6]和 Sohrabi^[7]等人也分别从不同的方面针对无线传感器网络的信号传播模型进行了测定,但测试参量完整性和分析方面尚存不足。沈杰等人^[8]针对无线传感器网络的野外地表无线信号传播模型进行了较为详细的测定与分析,通过拟合实验结果,得出适应传感器网络的无线信道传播模型仍可用对数阴影单折线模型或双折线模型进行表征,但并未就室内环境进行相应的测定。

Wyne 等人^[9]虽然针对无线传感器网络进行了室内无线信道测量,但其测量环境为 $6 \times 3 \text{ m}^2$ 的办公室。一方面,这种环境中只能进行小范围、小距离的收发信号测量,难以得到规律性的结论;另一方面,现有的无线传感器网络应用系统较常布设在停车场、超市、博物馆等内部空间范围较大的室内场馆,其无线信道传播特性必然有别于文献[9]的测试结果。

本文选取室内停车场这一较有代表性的无线传感器网络室内应用场景作为测试环境,根据无线传感器网络节点的无线信道特性,选取较常用的频段和天线高度,进行有针对性的平均接收场强测量。然后,基于对数阴影单折线和双折线模型对测量结果进行拟合分析,归纳出对应频点和天线高度的模型拟合参数,并通过与相同无线参数设置下的室外无线信道测量结果进行对比分析,比较基于无线传感器节点的室内信道与室外信道特征的共性和差异性,为室内无线传感器网络的相关研究和应用提供重要依据。

2 室内信道测试

2.1 测试条件

2.1.1 测试环境

针对无线传感器网络的广泛应用,其工作环境存在多样性和差异性,存在大量不同种类、需要表述特征的信道。一般来说,无线传感器网络的室内应用较常布设在停车场、展馆、超市等空间内,其一般特征为:相比一般室内环境空间较大(百米)、屋顶较高、地势平坦、有障碍物等。因此选取室内停车场这一典型室内应用环境进行无线信道测试,以期有效考察这一典型室内场景中,中心频率和天线高度对于路径损耗的影响,并通过与室外环境中的测量结果进行对比分析,归纳出室内环境中,基于无线传感器网络应用的一些信道特征。

本次测试的室内停车场为半封闭空间,近似矩形范围,且有间隔的支撑物如圆柱等,车辆比较稀疏。

该室内停车场的平面图如图 1 所示。

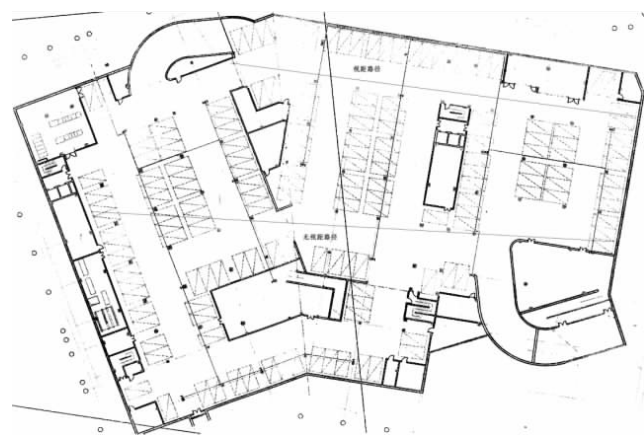


图1 停车场平面图

考虑到在室内无线传感器网络应用中,节点之间的通信存在视距与非视距通信两种情况,因此分别针对这两种场景进行无线信道测试。测试场景情况分别如图 2、3 所示。



图2 停车场视距场景



图3 停车场非视距场景

2.1.2 测试参数

针对无线传感器网络中信号的传输特性,选用如表 1 所示的通信参数进行信道测试。

表 1 信道测试参数设置

参数	取值	参数	取值
中心频率	434/780 MHz	调制方式	BPSK
带宽	200 kHz	数据速率	160 kbps
发射功率	10 dBm		

2.1.3 测试方法

本次测试主要针对大尺度衰落,即测量路径损耗与收发节点距离之间的关系。为提高测量精度,在路径损耗模型中采用信号发生器(Agilent E4433B)在测试频点上产生功率为 10 dBm 的恒定单载波信号,采用手持式频谱分析仪(R&S FSH3)沿直线接收信号。

测试中假设收发节点均为静止状态,且周围没有大量的运动物体。每个测试点在以其为圆心半径 20 cm 内选取五个点,每个点连续采集 100 组数据,以消除小尺度衰落的影响,使测量尽可能在平均意义上反映大尺度路径损耗的特征。

由于停车场环境限制,视距场景中测试的最大收发距离为 80 m,非视距场景中测试的最大收发距离为 100 m。收发节点距离在 1 ~10 m 内时采用 0.5 m 的测量步进,10 ~50 m 内时采用 1 m 的步进,50 ~100 m 内时采用 2 m 的步进。

另外,本次测试根据无线传感器网络的典型应用特征,分别针对 20、80 和 140 cm 三种不同的天线高度设置进行相应的信道测试。

2.2 测试结果

测试信号传输的中心频率设为 434 MHz,天线高度分别设为 20、80 和 140 cm 时,停车场视距场景中的信号衰落情况与收发节点距离之间的关系分别如图 4(a1) ~ (a3) 所示,图中圆圈标志不同收发距离处的信号衰落测量值;非视距场景中,对应测试参数设置前提下的信号衰落测试结果分别如图 4(b1) ~ (b3) 所示。

测试信号传输的中心频率设为 780 MHz,天线高度分别设

为 20、80 和 140 cm 时, 停车场视距场景中的信号衰落情况与收发节点距离之间的关系分别如图 5(a1) ~ (a3) 所示; 非视距场景中, 对应测试参数设置前提下的信号衰落测试结果分别如图 5(b1) ~ (b3) 所示。

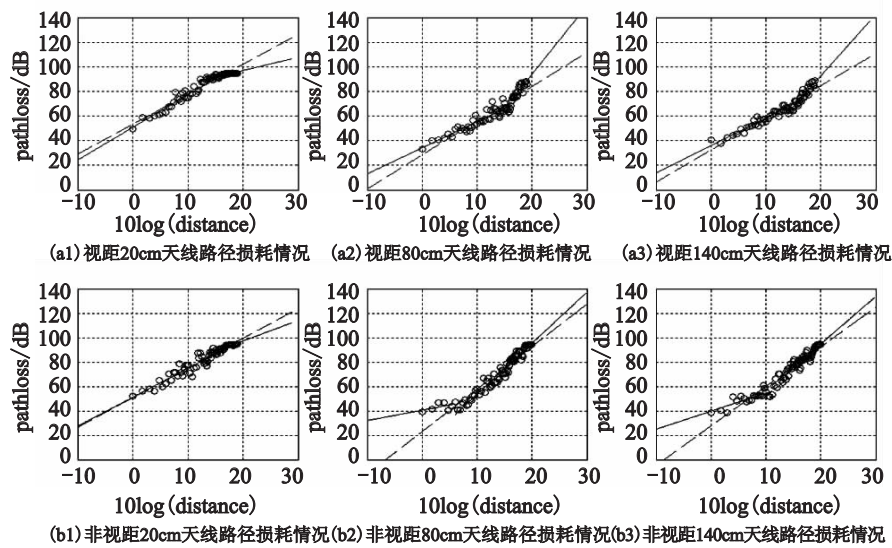


图4 中心频率434 MHz停车场路径损耗测量值与拟合结果示意图

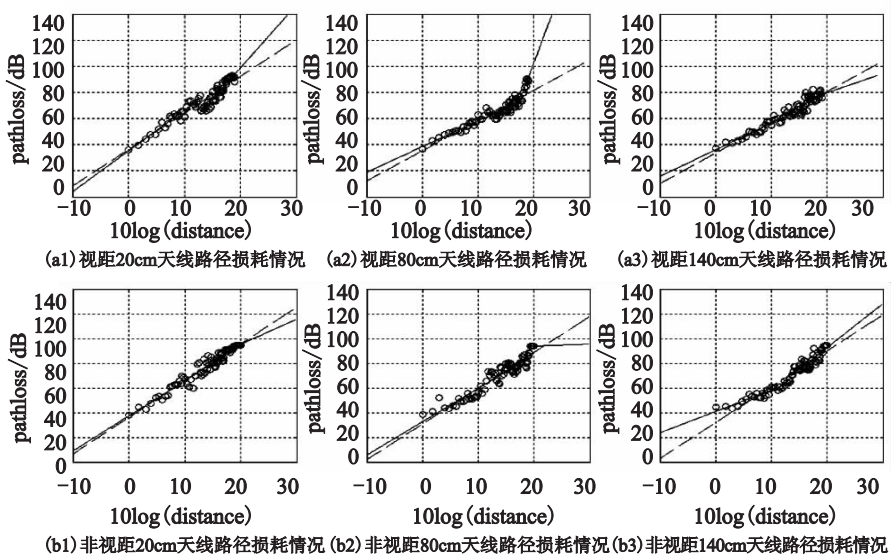


图5 中心频率780 MHz停车场路径损耗测量值与拟合结果示意图

2.3 测试分析

从图 4、5 中可以看出, 尽管在中心频率、天线高度、视距与非视距等不同的测试条件下, 实测的路径损耗值与距离间的变化关系还是基本符合线性对数关系的。

采用经典的对数阴影单折线模型式 (1) 和对数阴影双折线模型式 (2) 对测试结果通过回归处理算法^[8]进行拟合, 单折线和双折线的拟合结果在图 4、5 中分别通过虚线和实线标志出来。

$$L(d) = L_0 + 10n \log_{10}(d) + X \quad (1)$$

$$L(d) = \begin{cases} L_{b1} + 10n_1 \log_{10}(d) + X_1 & d < d_b \\ L_{b2} + 10n_2 \log_{10}(d) + X_2 & d \geq d_b \end{cases} \quad (2)$$

其中: n 为衰减因子; L_0 、 L_{b1} 和 L_{b2} 均代表距离发射点 1 m 处的路径损耗值; X 表示由于阴影衰落引起的零均值高斯分布随机变量; d_b 为双折线距离损耗模型的突变点, 通常认为 d_b 与第一菲涅耳区的被阻挡距离 d_f 基本一致。

$$d_f = \sqrt{(h_T^2 - h_R^2)^2 - 2(h_T^2 + h_R^2)(\frac{h_T}{2})^2 + (\frac{h_T}{2})^4} \quad (3)$$

其中: $h = h_T + h_R$, $h = h_T - h_R$, h_T 、 h_R 为收发节点的天线高度。

利用最小二乘法, 保证每个收发节点距离值上的路径损耗测量值与待拟合的路径损耗模型值偏差的平方和最小, 即保证 m 个收发距离分别为 d_1, d_2, \dots, d_m 的实测路径损耗值 $L(d_i)$ 与单折线或双折线的理论计算值

$$l(d_i) = L_0 + 10n \log_{10}(d_i) + X \quad (4)$$

或

$$l(d_i) = \begin{cases} L_{b1} + 10n_1 \log_{10}(d_i) + X_1 & d_i < d_b \\ L_{b2} + 10n_2 \log_{10}(d_i) + X_2 & d_i \geq d_b \end{cases} \quad (5)$$

的偏差的平方和 $Q(L_{b1}, L_{b2}, n_1, n_2)$ 最小, 其中 Q 为

$$Q(L_b, n) = \sum_{i=1}^m (L(d_i) - L_0 - 10n \log_{10}(d_i))^2 \quad (6)$$

$$Q(L_{b1}, L_{b2}, n_1, n_2) = \sum_{i=1}^b (L(d_i) - L_{b1} - 10n_1 \log_{10}(d_i))^2 + \sum_{i=b+1}^m (L(d_i) - L_{b2} - 10n_2 \log_{10}(d_i))^2 \quad (7)$$

对 Q 分别取 L_0 、 n 或 L_{b1} 、 L_{b2} 和 n 的偏导, 并令其等于零, 即可以通过测试样本值求出对应参数的拟合值。其中对于双折线方程, 可先令突变点 b 从 1 到 m 进行遍历, 再取所有遍历结果中 Q 最小的情况下的 b 值作为所需的突变点。

中心频率为 434 MHz 时, 各测试场景中经回归处理后拟合得到的参数值如表 2 所示。其中 s 和 d 分别为单折线模型和双折线模型的回归剩余标准差^[8]。

表 2 434 MHz 室内信道参数拟合值

参数	天线高度 / cm	场景					
		视距传输			非视距传输		
		20	80	140	20	80	140
单折线回归对数模型	n	2.43	2.77	2.61	2.43	3.48	3.24
	L_0	53.3	28.4	32.4	50.8	23.0	27.6
	回归剩余标准差 s	2.88	4.67	3.64	3.00	5.00	4.22
	X 均值	2.32	3.88	2.85	2.29	4.00	3.20
	X 标准差	2.86	4.64	3.61	2.98	4.97	4.19
	$d_b(m)$	16	41	24	26	4	13
双折线回归对数模型	n_1	2.65	2.12	2.23	2.37	0.85	1.48
	n_2	1.08	5.57	4.98	1.68	4.17	3.87
	回归剩余标准差 d	1.64	3.07	2.38	2.56	3.22	2.97
	X 均值	1.26	2.31	1.93	2.04	2.63	2.26
	X 标准差	1.84	3.08	2.37	2.86	3.21	2.95
	$d_b(m)$	16	41	24	26	4	13

中心频率为 780 MHz 时, 各测试场景中经回归处理后拟合得到的参数值如表 3 所示。

表 3 780 MHz 室内信道参数拟合值

参数	天线高度 / cm	场景					
		视距传输			非视距传输		
		20	80	140	20	80	140
单折线回归对数模型	n	2.80	2.31	2.35	2.97	2.90	2.91
	L_0	36.2	35.3	33.6	36.1	30.8	31.9
	回归剩余标准差 s	4.17	4.29	3.24	3.31	4.68	4.28
	X 均值	3.49	3.26	2.61	2.56	3.98	3.55
	X 标准差	4.14	4.26	3.22	3.29	4.65	4.26
	$d_b(m)$	19	62	39	50	84	22
双折线回归对数模型	n_1	3.12	1.97	2.04	2.84	2.71	1.73
	n_2	4.80	11.4	1.46	2.04	0.17	3.55
	回归剩余标准差 d	2.82	2.65	2.80	2.90	3.97	3.11
	X 均值	2.27	2.06	2.24	2.29	3.36	2.55
	X 标准差	2.81	2.65	2.80	3.17	4.14	3.17
	$d_b(m)$	19	62	39	50	84	22

为更好地比较分析室内与室外环境中无线信道的特征, 在所有测试参数均相同的前提下, 测试了两组室外环境(草地与公路)中视距传输时的信号衰落情况, 分别如表 4 和 5 所示。因为信号中心频率较低, 或天线高度较低时, 信号衰落更严重, 所以在 434 MHz 的频率上, 未对天线高度为 20 cm 的情况进行信道测试。

表4 草地信道参数拟合值

参数	天线高度 / cm	中心频率 / MHz				
		434		780		
		80	140	20	80	140
单折线回归对数模型	n	3.28	2.73	3.97	3.21	2.35
	L_0	36.38	31.49	34.32	26.66	36.89
	回归剩余标准差 s	3.68	4.01	3.73	2.78	3.17
	X 均值	2.30	3.07	3.02	2.14	2.51
	X 标准差	3.66	3.99	3.70	2.77	3.15
双折线回归对数模型	n_1	2.89	0.55	2.54	1.63	1.52
	n_2	3.45	3.02	3.56	3.68	2.70
	回归剩余标准差 d	3.40	3.38	2.78	1.56	2.06
	X 均值	2.71	2.80	2.33	1.19	1.66
	X 标准差	3.45	3.35	2.81	1.56	2.09
	$d_b(m)$	3	6.5	9	8.5	30

表5 公路信道参数拟合值

参数	天线高度 / cm	中心频率 / MHz				
		434		780		
		80	140	20	80	140
单折线回归对数模型	n	2.18	2.05	2.72	2.56	2.10
	L_0	47.38	41.32	41.12	32.35	41.93
	回归剩余标准差 s	3.06	3.46	2.80	3.63	3.51
	X 均值	2.15	2.94	2.33	2.94	2.63
	X 标准差	3.04	3.44	2.78	3.61	3.49
双折线回归对数模型	n_1	2.18	2.05	2.72	2.56	2.10
	n_2	47.38	41.32	41.12	32.35	41.93
	回归剩余标准差 d	3.06	3.46	2.80	3.63	3.51
	X 均值	2.15	2.94	2.33	2.94	2.63
	X 标准差	3.04	3.44	2.78	3.61	3.49
	$d_b(m)$	2.18	2.05	2.72	2.56	2.10

结合表2、3中的室内无线信道参数拟合结果,与表4、5中的草地和公路的无线信道参数拟合结果进行对比分析,可以归纳出以下规律:

a) 不论在哪种场景中,在相同的通信参数设置的前提下,非视距场景中信号衰减系数 n 必然大于视距场景中信号衰减系数,这主要是由于非视距场景中不存在主径信号而造成的。

b) 测试中使用的频段为434或780 MHz这样的低频频段,从表2、3中可以看出,频率的改变对信号衰减的影响并不明显,但中心频率越低,信号衰减越严重。

c) 天线高度高于140 cm时,室外的信道衰减模型逼近自由空间衰落模型,此时公路上434 MHz信号的衰减因子为2.05,而室内信号衰减仍然较严重,对应室内视距传输中的衰减因子为2.61。

当天线高度小于140 cm时,以至无法保证室外环境中收发节点之间为视距传输,而室内接收信号为各种多径信号的叠加信号,因此相同距离处的接收信号强度会优于室外场景,最后导致根据测试数据进行拟合,得到的衰减因子也会小于室外场景,如80 cm天线时,室内视距传输时434 MHz信号的衰减因子为2.77,对应室外草地的衰减因子为3.28。

d) 室外环境中,随着天线高度的增加,衰减因子不断减少,这种趋势在距离发射端较远时更为明显。但在室内环境中,反射信号主要为地面反射和天花板反射两者构成,天线高度增加,地面反射波的影响在减弱,衰减因子减小,但当天线高

度增加到一定程度后,天花板反射波的影响增强,因而衰减因子反而增强。当地面反射波和天花板反射波叠加为最大值时,衰减因子最小,反之,当地面反射波和天花板反射波叠加为最小值时,衰减因子最大。也即,室内环境中反射波的影响无法通过增加天线高度来减弱,故双折线距离损耗模型更适应于室内信道环境。这一点可以通过比较表2、3中双折线回归对数模型和单折线的回归剩余标准差得到。显然,双折线回归对数模型的回归剩余标准差要小于单折线的回归剩余标准差。

e) 室内环境中障碍物的存在引起阴影衰落,相较之室外环境存在更多的反射、绕射和散射信号,且由于室内复杂的传播环境,小尺度衰落更为严重,因此图4、5中的路径损耗测量值存在较多抖动,同时还表现在表2、3中的室内阴影衰落引起的高斯随机变量 X 的标准差大于表5中室外公路上相同条件下的 X 的标准差。

表4中,草场环境中信号的小尺度衰落也很严重,这是由于草场环境中起伏的地势和草,对信号造成了严重的散射。

f) 在双折线距离损耗模型拟合中,突变点的不规律性较强,与天线高度、中心频率等诸多因素相关,但是当地面不平整时,第一菲涅耳区间很容易被阻挡,由此导致突变点更靠近发射端,故通常情况下,草地的突变点最近,室内次之,公路的突变点距离发射端最远。

3 结束语

基于传统无线信道模型进行无线传感器网络的研究和实现必然会因为信道模型的差异性而带来仿真结果可信度的下降,甚至会影响无线传感器网络方案的设计效果。因此无线信道模型是无线传感器网络研究和实现的基础。为了有效研究和设计室内环境中的无线传感器网络,本文利用停车场这一典型的无线传感器网络室内应用环境,基于无线传感器网络的传输特性,从天线高度、中心频点、视距与非视距等特性的差异性入手,进行了更有针对性的室内无线信道测量,并与相同测试条件下的室外信道测试结果进行对比分析。从测量和线性回归算法对样本的拟合结果可以看出,室内信道衰落情况更为复杂,小尺度衰落更为严重。由于室内结构的复杂性,天线高度对信道衰落的影响并不具有渐变规律性,却仍能采用对数阴影模型进行拟合,并且其中双折线模型更符合室内的无线信道特征。这些结论对室内无线传感器网络的研究和实现具有重要的参考价值。

针对无线传感器网络的室内应用,还需要进行大量的测定和分析工作,以实现室内无线信道更精准的建模,下一步工作的主要研究方向为:

a) 当前工作只针对室内停车场这种单一的典型室内应用场景进行了无线信道的测试,不同的室内结构必然会对信道传播模型造成极大的影响,今后需要提取各种不同的典型室内环境及其环境特征,以期研究环境特征与信道变化特征之间的对应规律。

b) 室内无线传感器网络通常应用在高密度且动态的障碍物环境中,需要研究障碍物密度等参数与阴影方差之间的关系,并进一步深入研究双折线模型中的突变点与室内环境的各种因素之间的关系。

c) 研究室内复杂环境下多径引起的小尺度衰落特性,以及各种抗衰落技术来减少小尺度衰落的影响。(下转第1454页)

略不计,而通信的能耗主要是节点接收和发送信号的能耗。

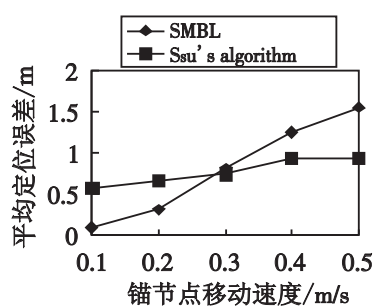


图5 锚节点移动速度对定位精度的影响

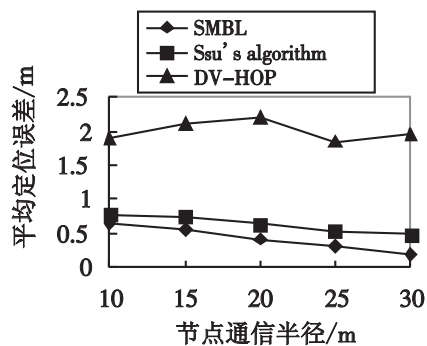


图6 通信半径对定位精度的影响

图 7 中表示了 SMBL 算法和文献[11]中的算法在能量消耗方面的特性。节点数量为 50,通信半径为 10 m,移动速度为 0.1 m/s。图 7 中显示,广播时间间隔增加的同时,数据包接收数量明显下降,尤其当间隔时间由 0.1 提高到 0.3 时。由文献[11]中的实验结果可知,Ssu 的算法在能耗方面保持了很低的水平。SMBL 算法和 Ssu 的算法中节点接收数据包的数量是基本相当的。因此 SMBL 算法在能量消耗方面也具有很好的性能。此外 SMBL 算法只用了一个锚节点,所以在成本上较 Ssu 的算法还是有优势。

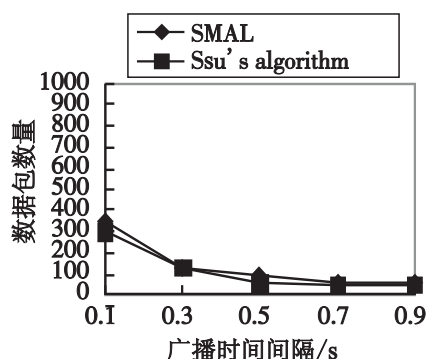


图7 节点接收数据包的平均数量

3 结束语

本文提出了一种基于单移动锚节点的定位算法 SMBL 算法。这种算法具有如下优点:a)这种算法在定位的过程中,不需要测距设备的支持,因此很大程度上降低了成本;b)对网络的拓扑结构没有要求,这使该算法具有更强的适应性。仿真研究表明,SMBL 算法在定位的精度和能耗方面都有着良好的性能。

(上接第 1451 页)

参考文献:

- [1] OX D C, MURRAY R R, NORRIS A W. Measurements of 800 MHz radio transmission into buildings with metallic walls[J]. Bell Systems Technical Journal, 1983, 62: 2695-2717.
- [2] MOLKDAR D. Review on radio propagation into and within buildings [J]. IEE Proceedings, 1991, 138(1): 61-73.
- [3] HASHEMI H. The indoor radio propagation channel[J]. IEE Proceedings, 1993, 81(7): 943-968.
- [4] ZHAO J, GOVINDAN R. Understanding packet delivery performance in dense wireless sensor networks[C] //Proc of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Los Angeles: Association for Computing Machinery, 2003: 1-13.
- [5] MARTINEZ-SALA A, MOLINA-GARCIA-PARDO J M, EGEA-LOPEZ E, et al. An accurate radio channel model for wireless sensor networks simulation: communication and signal processing in sensor networks[J]. Journal of Communication and Networks, 2005, 7(4): 401-407.

参考文献:

- [1] KYILDIZ I F, SU W L, SANKARASUBRAMANIAM Y, et al. A survey on sensor networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40: 102-114.
- [2] OU C H, SSU K F, JIAU H C. Range-free localization with aerial anchors in wireless sensor networks[J]. Journal of Distributed Sensor Networks, 2006, 20(1): 1-21.
- [3] SICHITU M L, RAMADURAI V. Localization of wireless sensor networks with a mobile beacon[C] //Proc of IEEE Conference on Mobile Ad hoc and Sensor Systems. Fort Lauderdale: IEEE Press, 2004: 174-183.
- [4] YU G G, YU F Q, FENG L. A three dimensional localization algorithm using a mobile anchor node under wireless channel[C] //Proc of IEEE Conference on Neural Networks. Hong Kong: IEEE Press, 2008: 477-483.
- [5] OU C H. Range-free node localization for mobile wireless sensor networks[C] //Proc of IEEE Conference on Wireless Pervasive Computing. Santorini: IEEE Press, 2008: 535-539.
- [6] MUNIR S A, YU W B, MA J. Efficient minimum cost area localization for wireless sensor network with a mobile sink[C] //Proc of IEEE Conference on Advanced Information Networking and Applications. Niagara Falls: IEEE Press, 2007: 533-538.
- [7] HU Z, GU D B, SONG Z X, et al. Localization in wireless sensor networks using a mobile anchor node[C] //Proc of IEEE Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Xi'an: IEEE Press, 2008: 602-607.
- [8] YU G G, YU F Q, FENG L. A localization algorithm using a mobile anchor node under wireless channel[C] //Proc of IEEE Conference on Robotics and Biomimetics. Sanya: IEEE Press, 2007: 1104-1108.
- [9] KIM K, LEE W. MBAL: a mobile beacon-assisted localization scheme for wireless sensor networks[C] //IEEE Computer Communications and Networks. Honolulu: IEEE Press, 2007: 57-62.
- [10] SSU K F, OU C H, JIAN H C. Localization with mobile anchor points in wireless sensor networks[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2005, 54(3): 1187-1197.
- [11] ZHANG R B, ZHANG L L, FENG Y B. Very low energy consumption wireless sensor localization for danger environments with single mobile anchor node[J]. Wireless Personal Communications, 2008, 47: 497-521.
- [6] JOSHI G G, DIETRICH C B, ANDERSON C R, et al. Near-ground channel measurements over line-of-sight and forested paths[J]. IEE Proceedings, 2005, 152(6): 589-596.
- [7] SOHRABI K, MANRIQUEZ B, POTTIE G J. Near ground wideband channel measurement in 800-1000 MHz[C] //Proc of IEEE Vehicular Technology Conference. Amsterdam: [s. n.], 1999: 571-574.
- [8] 沈杰,姚道远,黄河清,等.野外地表无线传感网信道传播模型的测定与分析[J].光学精密工程,2008,16(1):141-149.
- [9] WYNE S, SANTOS T, TUFVESSON F, et al. Channel measurements of an indoor office scenario for wireless sensor applications [C] //Proc of 2007 IEEE Global Telecommunications Conference. Washington DC: [s. n.], 2007.
- [10] BAI H, ATIQUZZAMAN M. Error modeling schemes for fading channels in wireless communications: a survey[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2003, 5(2): 1-9.
- [11] CAVERS J K. Mobile channel characteristics[M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2000.