

## 室内无线传感器网络信道传输模型及统计分析

田勇<sup>1,2</sup>, 唐祯安<sup>1</sup>, 喻言<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学 电子科学与技术学院, 辽宁 大连 116024; 2. 大连东软信息学院 电子工程系, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 无线传感器网络在室内的应用越来越广泛, 然而相应的无线信道衰落模型的研究却尚未成熟. 为此, 针对典型的住宅和办公环境进行了无线传感器节点的信道传输衰落特性测试, 并对测试数据进行了拟合和建模. 拟合结果表明, 在大尺度衰落的情况下, 所提出的三阶多项式对数距离路径损耗模型能够更好地表征室内环境下的信道衰落情况, 对研究室内无线传感器网络的关键技术具有重要的参考价值.

**关键词:** 室内; 无线传感器网络; 信道衰落模型; 三阶多项式

**中图分类号:** TN915

**文献标志码:** A

## Transmission model and statistical analysis for indoor wireless sensor network channels

TIAN Yong<sup>1,2</sup>, TANG Zhen-an<sup>1</sup>, YU Yan<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Department of Electronic Engineering, Dalian Neusoft University of Information, Dalian 116024, China.

Correspondent: YU Yan, E-mail: yuyan@dlut.edu.cn)

**Abstract:** Wireless sensor networks are more widely used in indoor environments. However, the study of wireless channel fading model is not yet mature. Therefore, for the typical office and residential environments, the fading characteristics of channel transmission for wireless sensor nodes are tested, the testing data are fitted, and the corresponding model is presented. The fitting results show that, in the case of large-scale fading, the proposed three-order polynomial logarithmic distance path loss model can better characterize the channel fading in the indoor environment. The proposed model and analytical results have important significance for the key technology of indoor wireless sensor networks.

**Key words:** indoor; wireless sensor network; channel fading model; three-order polynomial

### 0 引言

近年来无线传感器网络已成为无线研究领域的热点之一<sup>[1]</sup>. 随着无线传感器网络的快速发展, 它们越来越多地应用于室内环境的数据感知及传输, 例如安全监控、仓库管理和远程健康护理等领域<sup>[2]</sup>. 然而, 由于室内的环境较为复杂, 无线传感器网络室内应用的众多技术仍有待研究. 信道传输模型是研究的基础与难点, 例如无线传感器网络的容量、可靠性、能量消耗等都依赖于反映实际情况的传感器节点间的信道传输模型<sup>[3]</sup>. 另外, 信道传输模型也是无线传感器网络的节点覆盖范围、邻居节点度、定位测距等研究的重要基础<sup>[4]</sup>.

目前, 已有一些学者针对室内环境下的无线传感器网络信道传输模型进行了研究. Martinez等<sup>[5]</sup>对无

线传感器网络在室外环境下的信道传输特性进行了深入研究, 使用了双折线对数距离路径损耗模型, 并给出了不同场景下的模型参数, 同时指出无线传感器网络信道传输的模型参数依赖于其应用的不同场景. Wyne等<sup>[6]</sup>对无线传感器网络室内办公环境下的信道传输进行了测量, 并对测试的数据进行了详细的分析, 但其主要对 $6 \times 3 \text{ m}^2$ 办公环境下的小尺度衰落进行了研究, 根据单折线对数距离路径损耗模型对大尺度衰落进行了参数拟合, 并研究了参数的分布情况. 张先毅<sup>[7]</sup>和杨旸<sup>[4]</sup>等对办公环境和停车场等无线传感器网络应用的典型室内环境的信道传输特性进行了测量和拟合, 得到了测量场景下大尺度衰落的衰落因子等参数, 拟合模型同样采用经典的单折线或双折线对数距离路径损耗模型.

**收稿日期:** 2013-03-10; **修回日期:** 2013-11-07.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(61131004, 51108060); 辽宁省教育厅科学研究项目(L2013518).

**作者简介:** 田勇(1975—), 男, 副教授, 博士, 从事无线传感器网络的研究; 唐祯安(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 从事集成电路设计、传感器及其应用等研究.

国内外学者对无线传感器网络信道传输模型的研究仍处于探索阶段,尤其是表征信号衰落与距离之间关系的大尺度衰落模型,还在应用移动无线电传播领域中经典的单折线或双折线对数距离路径损耗模型.本文对室内住宅和办公环境下无线传感器网络的信道传输特性进行了测试,深入地研究了路径衰落与节点距离之间的关系.研究发现:在无线传感器网络室内大尺度衰落的情况下,本文所提出的三阶多项式对数距离路径损耗模型能够更好地表征信道衰落情况.

## 1 测试环境和方法

本文选取了典型的住宅和办公环境进行信道传输特性测试,以便能够更加有效地反映室内信道传输的一般规律.测试传感器节点采用 CrossBow 公司的 Pro 2110 套件.测试中选取的信号中心频率为 2.4 GHz,最大数据传输速率为 250 kbps,发射节点的输出功率为 3.2 dBm.测试过程中发射和接收节点都处于静止状态,并且没有运动物体的干扰.每个测试点记录 100 组数据,使测试数据尽量在平均意义上接近真实情况.测试场景包括同一房间和由一面墙壁分隔的不同房间,每类场景中,节点距离地面的高度分别为 0.4 m, 0.8 m 和 1.2 m.因为本文主要研究大尺度衰落,所以每种场景都从收发节点为 1 m 开始测量,到最远距离 8 m 结束,步长为 0.1 m.

## 2 单折线和双折线模型

经典的单折线和双折线对数距离路径损耗模型分别为<sup>[4-5]</sup>.

$$L(d) = L_0 + 10n \log_{10}(d) + X_{\sigma}(\mu, \sigma); \quad (1)$$

$$L(d) = \begin{cases} L_{b1} + 10n_1 \log_{10}(d) + X_{\sigma_1}(\mu_1, \sigma_1), & d \leq d_b; \\ L_{b2} + 10n_2 \log_{10}(d) + X_{\sigma_2}(\mu_2, \sigma_2), & d > d_b. \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $d$  表示收发节点之间的距离;  $L(d)$  表示距离发射节点为  $d$  的接收节点的接收路径损耗值;  $n$ 、 $n_1$  和  $n_2$  为衰减因子;  $L_0$ 、 $L_{b1}$  和  $L_{b2}$  表示距离发射点 1 m 处的路径损耗值;  $X_{\sigma}$ 、 $X_{\sigma_1}$  和  $X_{\sigma_2}$  表示阴影衰落引起的均值  $\mu$ 、 $\mu_1$  和  $\mu_2$  为零的高斯分布随机变量,其标准差分别为  $\sigma$ 、 $\sigma_1$  和  $\sigma_2$ ;  $d_b$  表示双折线模型的突变点.

## 3 测试结果及分析

### 3.1 测试结果

按照要求对各场景进行测试,得到了多组测试数据,结果如图 1、图 2 所示.图 1(a)~(c) 和图 1(d)~(f) 分别是住宅环境下同一房间和不同房间场景中的 3 种不同节点高度的路径损耗与 10 倍收发节点对数距离之间的关系,图中的小圆圈表示测试数据;图 2 是

办公环境的相应数据.

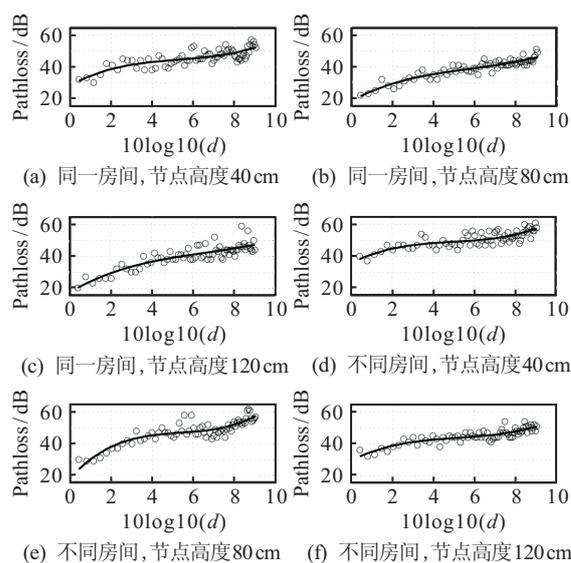


图 1 住宅环境下不同场景的路径损耗测量值及拟合结果

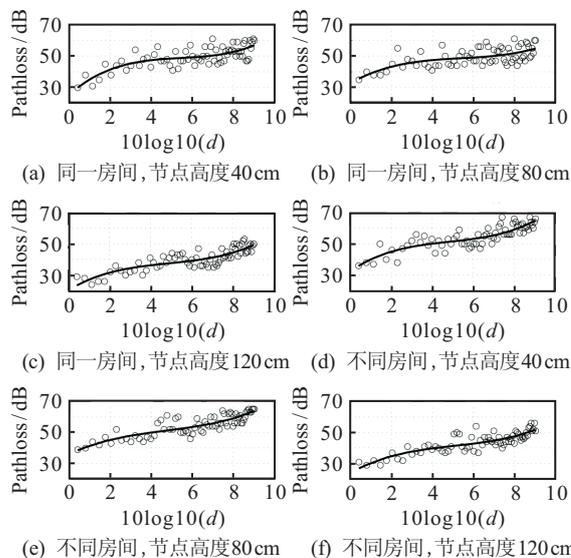


图 2 办公环境下不同场景的路径损耗测量值及拟合结果

从住宅和办公环境下各场景的路径损耗测试数据可以看出:

1) 在两种场景中,相同条件下不同房间的路径损耗大于同一房间的路径损耗.这是因为不同房间场景中存在墙壁的分隔,所以没有主信号<sup>[4]</sup>.

2) 在住宅环境中,节点高度为 40 cm 的路径损耗大于高度为 80 cm 和 120 cm 的路径损耗.这是因为室内反射信号主要由地面和天花板反射构成,节点高度为 40 cm 时,地面反射造成的信号衰减较为严重.

3) 在办公环境中,节点高度为 120 cm 的路径损耗小于高度为 40 cm 和 80 cm 的路径损耗.这是因为在节点高度为 40 cm 和 80 cm 时,发射节点与接收节点之间有办公位置隔板阻挡,造成信号传输时有较大的衰减,而节点高度为 120 cm 时,收发节点之间没有阻挡.

4) 所有测试数据的波动都比较大. 这是因为室内不同位置的家具、墙壁和物品各不相同, 存在不同的反射、绕射和散射等信号, 同时信道的传输还与节点的高度、传输的频率和人的运动等因素密切相关.

### 3.2 测试结果拟合

为了更精确地反映室内无线传感器网络信道传输的路径损耗与节点距离之间的关系, 本文利用最小二乘法对测试数据进行了从一阶到六阶的多项式拟合, 拟合模型表示为

$$L(d) = a_i x^i + \dots + a_1 x^1 + L_0 + X_\sigma(0, \sigma),$$

$$x = 10 \log_{10}(d), i = 1, 2, \dots, 6. \quad (3)$$

其中  $a_i, \dots, a_1$  为模型的衰减系数. 按照式 (3) 对住宅和办公环境下的测试数据进行拟合, 得到的三阶多项式拟合曲线如图 1 和图 2 所示, 参数如表 1 所示.

表 1 住宅和办公环境下三阶多项式模型参数拟合值

场景	参数	同一房间			不同房间		
		0.4 m	0.8 m	1.2 m	0.4 m	0.8 m	1.2 m
住宅	$a_3$	0.07	0.05	0.04	0.08	0.15	0.07
	$a_2$	-1.19	-0.92	-0.87	-1.20	-2.47	-1.09
	$a_1$	7.24	7.02	7.64	6.69	14.2	6.55
	$L_0$	28.3	18.7	17.1	35.6	18.3	29.4
	$\sigma$	3.27	2.19	3.57	2.99	3.31	2.28
办公	$a_3$	0.12	0.08	0.09	0.11	0.07	0.08
	$a_2$	-1.97	-1.24	-1.35	-1.56	-0.97	-1.18
	$a_1$	11.4	7.40	7.91	8.92	6.25	7.44
	$L_0$	25.7	32.9	20.4	32.5	36.1	24.1
	$\sigma$	4.36	4.56	3.62	3.88	3.66	3.48

### 3.3 拟合结果分析

#### 3.3.1 拟合多项式模型的最佳阶数

为了更准确地分析拟合曲线的拟合优度, 本文采用如下方法进行拟合优度检验.

Step 1: 计算拟合曲线的卡方量  $\chi^2$  表示为

$$\chi^2 = \frac{S_E}{\sigma^2} = \frac{\sum_{j=1}^N (L_j - \hat{L}_j)^2}{\sigma^2}. \quad (4)$$

其中:  $S_E$  为残差平方和,  $N$  为样本测量值的个数,  $L_j$  为第  $j$  个测量值,  $\hat{L}_j$  为第  $j$  个拟合值.

Step 2: 计算约化的  $\chi^2$  值  $\chi_r^2$ , 判断拟合优度.

$$\chi_r^2 = \frac{\chi^2}{N - m}. \quad (5)$$

其中:  $N - m$  为拟合的自由度,  $m$  为拟合模型中参数的个数. 因为  $\chi_r^2$  的数学期望是 1, 所以当  $\chi_r^2 \approx 1$  时, 可以认为拟合的质量已经比较好了, 但是更小的  $\chi_r^2$  值仍然表示拟合优度更好.

按照上述方法求得的住宅和办公环境下各种场景的  $\chi_r^2$  值如表 2 所示. 从表 2 可以看出, 所有场景拟合结果的  $\chi_r^2$  值均小于 1. 这说明各阶多项式模型对实验数据的拟合都是可以接受的, 但是三阶多项式模型

的拟合效果好于一阶多项式模型. 另外,  $\chi_r^2$  只能作为判断拟合多项式模型阶数的参考, 本文采用  $F$  检验来确定此阶数.

表 2 各场景的  $\chi_r^2$  值

场景	参数	同一房间			不同房间		
		0.4 m	0.8 m	1.2 m	0.4 m	0.8 m	1.2 m
住宅	一阶	0.7960	0.9142	0.9105	0.6870	0.9694	0.6719
	二阶	0.7424	0.8564	0.8399	0.6373	0.7815	0.6174
	三阶	0.7004	0.8020	0.8346	0.5859	0.6334	0.6047
	四阶	0.6804	0.7966	0.8354	0.5946	0.6201	0.6040
	五阶	0.6660	0.7866	0.8451	0.5938	0.6167	0.5953
	六阶	0.6498	0.7839	0.8374	0.5755	0.6110	0.5994
办公	一阶	0.9131	0.9771	0.9566	0.8415	0.9704	0.8224
	二阶	0.8700	0.9232	0.8938	0.7892	0.9189	0.7745
	三阶	0.8247	0.9014	0.8426	0.7757	0.8739	0.7293
	四阶	0.8066	0.8845	0.8072	0.7647	0.8741	0.7278
	五阶	0.8190	0.8731	0.7858	0.7461	0.8833	0.7356
	六阶	0.8070	0.8463	0.7550	0.7510	0.8902	0.7432

将阶数为  $k$  的拟合  $\chi^2$  量记为  $D_k$ ,  $D_k$  服从自由度为  $N - k - 1$  的  $\chi^2$  分布. 同样,  $D_{k+1}$  表示阶数为  $k+1$  的拟合  $\chi^2$  量, 服从自由度为  $N - k - 2$  的  $\chi^2$  分布. 令统计量为

$$F = \frac{(D_k - D_{k+1})(N - k - 2)}{D_{k+1}}. \quad (6)$$

近似地服从自由度为  $(1, N - k - 2)$  的  $F$  分布. 统计量  $F$  的数学期望为

$$E(F) = \frac{N - k - 2}{N - k - 4}. \quad (7)$$

如果计算得到的  $F$  值比其数学期望值大得多, 则说明  $k$  阶多项式模型拟合不够好, 需要增加阶数; 否则, 说明  $k$  阶和  $k+1$  阶多项式模型拟合都很好, 采用  $k$  阶拟合即可.  $F$  的累积分布函数为

$$P(F \leq F_\alpha) = 1 - \alpha = \int_0^{F_\alpha} p(F; 1, N - k - 2) dF. \quad (8)$$

由  $F$  的累积分布函数和选择的显著水平  $\alpha$  定出拒绝域  $(F_\alpha, +\infty)$ , 如果计算的  $F$  值落在拒绝域内, 则将多项式阶数由  $k$  增加到  $k+1$ , 继续计算; 否则,  $k$  即为最佳阶数.

取显著水平  $\alpha = 0.05$ , 各阶多项式模型对应的拒绝域临界值  $F_\alpha$  如表 3 所示, 各场景的  $F$  值如表 4 所示. 从表 3 和表 4 可以看出: 住宅和办公环境下的 12 种场景中, 经过  $F$  检验共有 4 种场景拟合采用多项式模型的最佳阶数为二阶, 而其他 8 种场景的最佳阶数为三阶. 因此, 拟合多项式模型的最佳阶数为三阶.

表 3 各阶多项式模型对应的拒绝域临界值

	一阶	二阶	三阶	四阶	五阶
$F_\alpha$	3.9840	3.9863	3.9886	3.9909	3.9934

表 4 各场景的  $F$  值

场景	参数	同一房间			不同房间		
		0.4 m	0.8 m	1.2 m	0.4 m	0.8 m	1.2 m
住宅	一阶	5.9116	5.5873	6.7132	6.3024	17.3424	7.0019
	二阶	5.0143	5.5502	1.4250	6.8793	16.6708	2.4021
	三阶	2.9418	1.4405	0.9367	0.0321	2.4134	1.0753
	四阶	2.4077	1.8303	0.2566	1.0900	1.3577	1.9470
	五阶	2.5905	1.2225	1.5833	3.0301	1.5976	0.5717
办公	一阶	4.3637	4.9748	5.7739	5.5079	4.8046	5.2029
	二阶	4.6829	2.6154	5.0754	2.1700	4.4571	5.1553
	三阶	2.4803	2.2619	3.8940	1.9423	0.9777	1.1367
	四阶	0.0138	1.8528	2.7679	2.6271	0.3298	0.3110
	五阶	1.9549	3.0207	3.6123	0.5754	0.5003	0.3410

### 3.3.2 三阶多项式对数距离路径损耗模型

能够更好地表征室内无线传感器网络信道传输路径损耗与节点距离之间关系的三阶多项式对数距离路径损耗模型表示为

$$L(d) = a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x^1 + L_0 + X_\sigma(0, \sigma). \quad (9)$$

该模型的最大路径损耗不能超过发射节点的输出功率, 因此, 如果路径损耗达到此输出功率, 再增加收发节点之间的距离已无意义。

### 3.3.3 三阶多项式模型与双折线模型比较

研究表明, 双折线模型比单折线模型更适合室内信道环境<sup>[4]</sup>, 因此, 需要将提出的三阶多项式模型与双折线模型进行比较. 模型拟合性能可以用拟合精度指标  $R_{NL}$ <sup>[8]</sup>来衡量,  $R_{NL}$  定义为

$$R_{NL} = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^N (L_j - \hat{L}_j)^2}}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (L_j)^2}}. \quad (10)$$

两种模型  $R_{NL}$  的比较如表 5 所示. 从表 5 可以看出, 所有场景中, 提出的三阶多项式模型的  $R_{NL}$  都大于双折线模型. 这说明三阶多项式模型对于测试数据的拟合精度高于双折线模型。

表 5 模型  $R_{NL}$  值的比较

场景	参数	同一房间			不同房间		
		0.4 m	0.8 m	1.2 m	0.4 m	0.8 m	1.2 m
住宅	三阶	0.9291	0.9448	0.9133	0.9416	0.9317	0.9497
	双折线	0.9242	0.9392	0.9061	0.9376	0.9158	0.9442
办公	三阶	0.9132	0.9087	0.9115	0.9298	0.9338	0.9214
	双折线	0.9061	0.9054	0.9064	0.9238	0.9299	0.9166

在不同的环境中信道传输路径损耗模型的参数需要重新确定, 拟合模型的计算量非常重要. 本文提出的三阶多项式模型只需对测试数据进行 1 次拟合, 就可以得到所需参数. 而双折线模型需要令突变点  $d_b$  从 1 到  $N$  进行遍历, 对测试数据进行拟合, 再从计算得到的拟合偏差平方和中选择最小值对应的  $d_b$  为最终的突变点, 共需进行  $N$  次拟合<sup>[4]</sup>. 因此, 三阶多项式

模型不仅拟合精度高于双折线模型, 而且拟合的计算量也远小于双折线模型。

## 4 结 论

本文对室内住宅和办公环境下无线传感器网络的信道传输特性进行了测试. 对测试数据的拟合结果表明: 在无线传感器网络室内大尺度衰落的情况下, 三阶多项式对数距离路径损耗模型与单折线和双折线模型相比, 能够更好地表征信道衰落与收发节点距离之间的关系, 对无线传感器网络室内应用的关键技术研究具有重要的参考价值。

### 参考文献(References)

- [1] Tian Y, Tang Z A. Wireless meter reading based energy-balanced steady clustering routing algorithm for sensor networks[J]. Advances in Electrical and Computer Engineering, 2011, 11(2): 9-14.
- [2] Akyildiz I F, Melodia T, Chowdhury K R. A survey on wireless multimedia sensor networks[J]. Computer Networks, 2007, 51(4): 921-960.
- [3] Molisch A F, Mehta N, Yedidia J, et al. Performance of fountain codes in collaborative relay networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2007, 6(11): 4108-4119.
- [4] 杨旸, 黄河清, 沈杰, 等. 基于无线传感器网络的室内无线信道测量与分析[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(4): 1448-1451.  
(Yang Y, Huang H Q, Shen J, et al. Indoor wireless channel measurements and analysis based on WSN[J]. Application Research of Computers, 2010, 27(4): 1448-1451.)
- [5] Martinez S A, Molina G P J, Egea L E, et al. An accurate radio channel model for wireless sensor networks simulation[J]. J of Communications and Networks, 2005, 7(4): 1-7.
- [6] Wyne S, Singh A P, Tufvesson F, et al. A statistical model for indoor office wireless sensor channels[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2009, 8(8): 4154-4164.
- [7] 张先毅, 王英龙, 郭强, 等. 无线传感器网络室内信道模型的研究[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(12): 4713-4715.  
(Zhang X Y, Wang Y L, Guo Q, et al. Research of indoors channel fading model in wireless sensor networks[J]. Application Research of Computers, 2009, 26(12): 4713-4715.)
- [8] 张世强. 曲线回归的拟合优度指标的探讨[J]. 中国卫生统计, 2002, 19(1): 9-11.  
(Zhang S Q. Approach on the fitting optimization index of curve regression[J]. Chinese J of Health Statistics, 2002, 19(1): 9-11.)

(责任编辑: 齐 霖)