

文章编号 1004-924X(2012)06-1406-08

草原环境地表无线信道的路径损耗建模

王代华^{1*}, 宋林丽¹, 孔祥善², 张志杰¹

- (1. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;
2. 中国兵器工业集团公司 北方自动控制技术研究所, 山西 太原 030006)

摘要:针对无线传感器网络研究对地表无线信道路径损耗预测的需求,以草原地表环境为研究对象,测量了2.4 GHz无线信号的传播特性,并用最小二乘法对测量数据进行了线性回归。结果表明,基于对数距离的路径损耗模型仍适用于地表无线信道的路径损耗建模,且双斜率模型的拟合精度优于单斜率模型。突变点的位置取决于天线高度,突变点前的路径损耗指数小于2,突变点后的路径损耗指数在3~4之间。通过对比远场的路径损耗预测值与实测值,进一步验证了双斜率模型的预测精度优于单斜率模型。最后,对传统模型与所得双斜率模型进行了性能对比,证实了传统模型无法用于地表环境,进而说明所得模型对无线传感器网络研究更具实际意义。

关键词:地表无线信道;路径损耗模型;双斜率模型;单斜率模型;无线传感器网络

中图分类号: TN925 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122006.1406

Path loss modeling for near-ground wireless channel in grassland environment

WANG Dai-hua^{1*}, SONG Lin-li¹, KONG Xiang-shan², ZHANG Zhi-jie¹

- (1. Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement of the Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. North Automatic Control Technology Institute, China North Industries Group Corporation, Taiyuan 030006, China)

* Corresponding author, E-mail: wangdaihua@nuc.edu.cn

Abstract: As path loss prediction for a near-ground wireless channel is an essential issue in most research activities of wireless sensor networks, this paper measures and analyzes the transmission characteristics of a 2.4 GHz wireless signal in a grassland environment and performs a linear regression for collected data based on the least square method. The results indicate that the log-distance based model is still suitable for the path loss modeling in the near-ground wireless channel, and the fitting accuracy of the two-slope model is better than that of the one-slope model. Furthermore, the breakpoint position is determined by the antenna height, and the path loss indexes are less than 2 or between 3 and 4 before or after the breakpoint. With comparison of the predicted path loss and the measured path loss in a far-field, it proves that the prediction accuracy of the two-slope model is superior to that of the

收稿日期:2011-10-31;修订日期:2012-01-30.

基金项目:仪器科学与动态测试教育部重点实验室青年基金资助项目(No. 2011YF003)

one-slope model. Finally, the performance of the generic models and the proposed two-slope model is compared, which suggests that the generic models are not suitable for research activities in the near-ground environment and the proposed model has a more practical value for research on wireless sensor networks.

Key words: near-ground wireless channel; path loss model; two-slope model; one-slope model; wireless sensor network

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)作为一种新型的综合网络信息系统,凭借其自组织、低功耗、无需布线、智能性强等优点^[1],为工业、农业、军事和自然环境等的分布式监控提供了有力手段。WSN的许多应用都是将传感器节点布设于地表或低空物体上^[2],用来实现对布设环境中物理信号的实时监测。然而,当前针对WSN的研究主要以能量和资源受限为前提,重点研究上层路由和组网以及接入协议^[2-5],涉及物理底层尤其是信道基础的研究较少。多数研究成果均基于天线高度在数米甚至数十米范围的假设,这与实际应用情况存在较大差距。无线通信系统的工作性能很大程度上依赖于其工作环境。因此,能量和资源受限的WSN更需要一个能准确描述地表无线信道传播特性的模型,从而为实现低冗余、高能效并满足一定QoS的网络系统规划奠定良好基础。

随着WSN的逐步应用,针对地表无线信道传播特性的研究开始引起国内外学者的重视。文献[6]是较早开展地表无线信道特性研究的工作之一,Foran等针对士兵在匍匐地面情况下的通信需求,测量和分析了915 MHz无线信号在天线高度为3、15和28 cm时的传播特性。2005年,Joshiet等针对战场传感器网络的通信需求,分别测量和分析了300和1900 MHz无线信号的窄带和宽带特性,选取的天线高度分别为0.75、1.15和1.55 m^[7]。Martinez-Sala等采用实验方法研究了868 MHz无线信号在3种地表环境下的路径损耗模型^[8]。2008年,Phaebua等研究了433 MHz无线信号在停车场环境下沿地面传播的特性,选取的天线高度分别为1.2、1.8和2.4 m^[9]。

2009年,Meng等建立了森林环境下240和700 MHz无线信号的路径损耗模型,选取的天线高度为2.15 m^[10]。国内可查到的地表无线信道传播特性的研究工作很少。2008年,沈杰等对433 MHz无线信号在野外地表环境下的传播特性进行了测定与分析,选取的天线高度分别为25 cm、45 cm和1 m^[2]。2010年,刘卉等针对小麦田的3个典型生育期进行了无线信号传播性能试验,研究了天线高度对2.4 GHz无线信道传播特性的影响,选取的天线高度在0.25~2 m^[11]。文韬等测量了橘园中433 MHz信号的传播特性,选取的天线高度为0.75~1.5 m^[1]。可以看出,虽然国内外学者对地表无线信道的传播特性进行了一些研究工作,但在数厘米天线高度下的研究工作很少,尤其是对2.4 GHz地表无线信道的传播特性缺乏足够的认识。

本文针对上述问题,结合作者开发的WSN的实际应用环境,开展了草原环境下地表无线信道传播特性的试验研究。该WSN用于某靶场的弹药爆炸威力测试,传感器节点布设在爆炸区域内的地面上,天线暴露在地面上的高度仅为3 cm。低天线高度会带来严重的信号衰减^[8],因此地表无线信道的路径损耗预测成为网络规划和节点设计的关键问题。事实上,不同的信道模型适用于不同的应用环境,可查到的文献表明,目前没有合适的模型可用于天线在数厘米高度情况下的路径损耗预测。因此,本文在实际应用环境下开展了2.4 GHz无线信号地表传播特性的测定试验,分析得出了路径损耗的双斜率模型。建模过程中,合理确定突变点位置具有重要意义。突变点将信道划分成2个不同的传播空间,它不仅决定了2个空间的范围,对确定每个空间的路径损耗也至关重要,对建模质量有直接影响。

2 地表环境及测试方案

某靶场的草原环境地形平坦开阔,沙土地面上覆盖着低矮杂草,四处散布着高度约 40 cm 的灌木丛。对传统模型而言,该草原环境可以看作一个准理想的自由空间,收发信机存在视距(line-of-sight, LOS)路径。然而,地表无线信号传播对信道的考察较以往的研究要求更微观化。对极低天线高度而言,地面的微小起伏以及覆盖的植被都会阻挡传感器节点间的传播路径,形成非视距(non-line-of-sight, NLOS)通信。在这种情形下,无线信号的传播机制复杂多变,来自地面和植被的反射、散射和吸收会使无线信号严重衰落。因此,信道测量和建模是无线系统设计和网络规划的基础和前提。

无线信道最重要的特性之一是路径损耗,本文以建立地表环境的路径损耗模型为目的,进行了信号强度测量。发射机直接采用传感器节点中的无线模块,工作在 2.4 GHz 频率,发射功率为 19 dBm。接收机由手持式频谱分析仪和便携式计算机组成,频谱分析仪负责接收和采集信号强度数据,计算机负责采集数据的存储。采用一对垂直极化全向天线作为收发天线,分别通过低损耗同轴电缆与发射机和接收机连接,增益为 2 dBi。测量过程中,发射机位置固定不变,接收机沿直线一直测量到距离发射机 100 m 的位置,前 10 m 每隔 1 m 作为一个测点,之后每隔 2 m 为一个测点,一次测量过程共计 55 个测点,每个测点重复采集 200 次信号强度数据。由于传感器节点在实际应用中位置固定,因此接收机在测量信号强度时也保持静止状态。另外,测量过程中周围环境无运动物体,因此可以假设测量环境是一个缓慢的时变信道^[12]。

测量试验中,发射机天线高度分别设置为 3 cm 和 1 m,接收机天线高度分别设置为 1 m 和 2 m,重点进行了天线高度不对等情况下的信号强度测量,同时测量了天线高度都为 1 m 时的信号强度数据以进行性能对比。每次测量过程的试验场景严格固定。由于无线信道的传播特性会随天气条件而变化,单次测量过程均选择在晴朗天气的同一时间段进行,试验现场的温差小于 4 °C,湿

度变化小于 3%。每次测量过程的天气条件基本一致,尽量减小自然环境差异对信道衰落特性的影响。

3 信道建模及分析

一次测量过程结束后,首先对原始数据进行预处理:检查原始数据并剔除奇异点;求取各测点数据的均值,减小快衰落影响;计算各测点处的路径损耗值。初步分析表明,地表无线信道的路径损耗与对数距离遵循线性关系,因此可以采用对数距离路径损耗模型对数据进行建模处理。

3.1 路径损耗建模

对数距离路径损耗模型将路径损耗表示成对数距离的线性函数,利用路径损耗指数来表征信道衰减的快慢程度^[13]。假设有 m 个样本点,距离分别是 d_1, d_2, \dots, d_m , 对应的路径损耗值分别是 $L(d_1), L(d_2), \dots, L(d_m)$, 建立双斜率(two-slope)对数距离路径损耗模型:

$$L(d_i) = \begin{cases} L(d_b) + 10n_1 \lg(d_i/d_b) + \epsilon_{1i}, & d_i \leq d_b \\ L(d_{b+1}) + 10n_2 \lg(d_i/d_b) + \epsilon_{2i}, & d_i > d_b \end{cases}, \quad i=1, 2, \dots, m \quad (1)$$

式中,突变点 d_b 将模型分为前后两部分, $L(d_b)$ 和 $L(d_{b+1})$ 为突变点前后的路径损耗值, n_1 和 n_2 是两部分的路径损耗指数。 ϵ_{1i} 和 ϵ_{2i} 是两组 0 均值的高斯随机变量,标准差分别为 σ_1 和 σ_2 。突变点 d_b 的位置由计算确定。

假设 $\hat{L}(d_i)$ 是样本点 $L(d_i)$ 的回归值,采用最小二乘法进行线性回归,要求残差平方和 $Q(b, n_1, n_2)$ 达到最小:

$$Q(b, n_1, n_2) = \sum_{i=1}^b [L(d_i) - L(d_b) - 10n_1 \lg(d_i/d_b)]^2 + \sum_{i=b+1}^m [L(d_i) - L(d_{b+1}) - 10n_2 \lg(d_i/d_b)]^2, \quad (2)$$

式中 $Q(b, n_1, n_2)$ 是 b, n_1 和 n_2 的函数,通过调整这 3 个参数使 $Q(b, n_1, n_2)$ 最小。由于 b 是未知的突变点位置,回归过程中对 b 从 2 到 $m-1$ 进行顺序遍历,选取 $Q(b, n_1, n_2)$ 最小时的 b 作为突变点位置,从而确定模型的相关参数。

利用回归剩余标准差和相关系数来验证回归结果的优劣。剩余标准差给出了路径损耗的测量值和预测值的平均变差,作为所得模型预测路径

损耗的精度指标,其值越接近于 0 表明模型的预测精度越高。按突变点前后分别定义为:

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^b [L(d_i) - \hat{L}(d_i)]^2}{b-2}}, \quad (3)$$

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=b+1}^m [L(d_i) - \hat{L}(d_i)]^2}{m-b-2}}. \quad (4)$$

相关系数是路径损耗的测量值和预测值之间相关关系的统计指标,取值在 0~1,越接近于 1 表明二者的相关程度越高,所得模型也就越能真实地反映信道质量。按突变点前后分别定义为:

$$R_1^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^b [L(d_i) - \hat{L}(d_i)]^2}{\sum_{i=1}^b [L(d_i) - \bar{L}(d_i)]^2}, \quad (5)$$

$$R_2^2 = 1 - \frac{\sum_{i=b+1}^m [L(d_i) - \hat{L}(d_i)]^2}{\sum_{i=b+1}^m [L(d_i) - \bar{L}(d_i)]^2}, \quad (6)$$

式中, $\bar{L}(d_i)$ 是测量值的均值。

单斜率(one-slope)对数距离路径损耗模型与双斜率模型类似,但没有突变点,即:

$$L(d_i) = L(d_0) + 10n \lg(d_i/d_0) + \epsilon_i, \quad (7)$$

式中, n 为路径损耗指数, d_0 是发射机近处的参考点(取 1 m), $L(d_0)$ 是参考点 d_0 处的路径损耗值。单斜率模型的残差平方和 $Q(n)$ 、剩余标准差 σ 和相关系数 R^2 的计算式不需要两部分,相对简单,此处省略,单斜率模型的回归直线图也省略。

路径损耗的散点图及双斜率模型的回归直线如图 1~3 所示,计算得到的模型参数见表 1。从图 1~3 可以看出,回归直线与测量值之间存在较

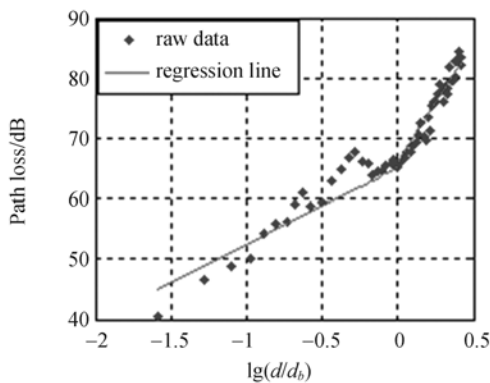


图 1 测量数据及回归直线 ($h_t = h_r = 1$ m)
Fig. 1 Measured data and regression line ($h_t = h_r = 1$ m)

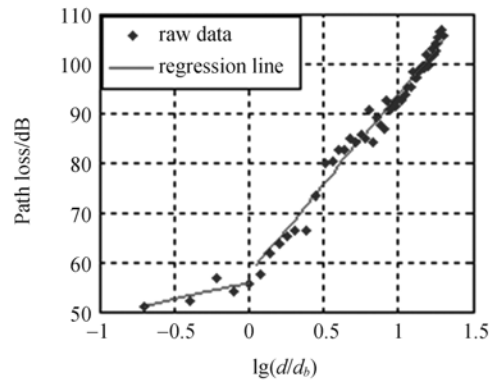


图 2 测量数据及回归直线 ($h_t = 3$ cm, $h_r = 1$ m)
Fig. 2 Measured data and regression line ($h_t = 3$ cm, $h_r = 1$ m)

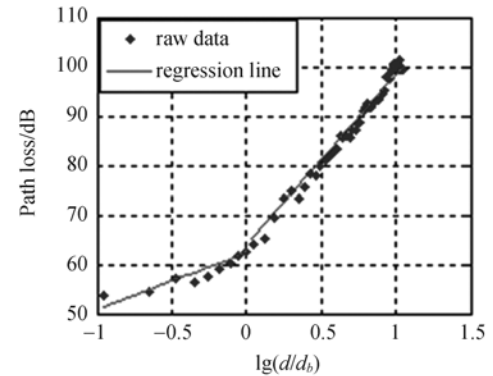


图 3 测量数据及回归直线 ($h_t = 3$ cm, $h_r = 2$ m)
Fig. 3 Measured data and regression line ($h_t = 3$ cm, $h_r = 2$ m)

表 1 模型参数

Tab. 1 Model parameters

模型	发射天线高度(h_t) vs 接收天线高度(h_r)			
	1 m vs 1m	3 cm vs 1 m	3 cm vs 2 m	
单斜率	n	1.90	2.48	2.08
	$L(d_0)$ /dB	40.51	51.08	53.56
	σ /dB	3.02	5.19	5.59
	R^2	0.91	0.89	0.85
	d_{max} /m	7 507	346	810
	n_1	1.26	0.65	1.14
双斜率	n_2	3.93	3.62	3.43
	$L(d_b)$ /dB	65.03	55.69	62.36
	$L(d_{b+1})$ /dB	66.09	57.57	64.04
	σ_1 /dB	2.98	1.37	1.39
	σ_2 /dB	1.51	1.90	1.42
	R_1^2	0.84	0.65	0.80
Plane-Earth	R_2^2	0.93	0.98	0.98
	d_b /m	38	5	9
	d_{max} /m	627	182	259
ITU-R	d_{max} /m	708	123	173
自由空间	d_{max} /m		794	4 983

好的拟合关系,这一点可从表 1 中的统计参数得到验证。双斜率模型的标准差(σ_2)要比单斜率模型的标准差(σ)小 1.51~4.17 dB。同时,双斜率模型的相关系数(R_2^2)也比单斜率模型的相关系数(R^2)更接近于 1。另外,图 1~3 中的第一段回归直线与测量值的拟合效果较差,表 1 中的 R_1^2 也证实了这一点。这主要是因为突变点离发射机很近,突变点前的样本点太少,而且近场测量数据的波动较大,这给线性拟合带来较大误差。但从传感器网络规划和覆盖范围预测的角度而言,研究的重点在于远场的路径损耗分析。所以,对于地表无线信道,双斜率模型较单斜率模型有更好的拟合精度。

从图 1~3 还可以看出,每组测量数据中都存在一个特定的突变点将数据分为 2 段,每段对应不同的衰减斜率,而且不同天线高度下的突变点位置不同。通常,如果收发信机存在 LOS 径,则突变点的位置可由下式估算^[14]:

$$d_b = (4h_t h_r) / \lambda. \quad (8)$$

在 2.4 GHz 频率下,对于天线高度分别为 $h_t = h_r = 1$ m, $h_t = 3$ cm, $h_r = 2$ m, $h_t = 3$ cm, $h_r = 1$ m 3 种情况,由式(8)算得的突变点位置分别为 32、1.92 和 0.96 m。这与表 1 中的遍历结果存在差距,原因是地表环境下突变点离发射机很近,并不能满足式(8)的应用条件 $d_b \gg h_t, h_r$ 。但式(8)仍可在一定程度上用于验证遍历结果。从表 1 可得,突变点位置取决于天线高度,天线高度降低则突变点向发射机靠近,这是因为天线高度降低会导致更大的菲涅尔区被地面及植被阻挡,分割不同衰减斜率的突变点自然会移向发射机。

路径损耗指数是表征信道衰减程度的关键指标。表 1 可得,单斜率模型的路径损耗指数(n)的取值在 2 左右,范围在 1.90~2.48,与自由空间模型的路径损耗指数相当($n=2$)。显然,这一衰减速率对地表无线信道而言是偏低的,因为地表无线信道较自由空间复杂的多。因此,可推断单

斜率模型会给地表无线信道的路径损耗预测带来很大误差。

对双斜率模型而言,其路径损耗指数在突变点前(n_1)小于 2,突变点后(n_2)在 3~4。鉴于远场的路径损耗预测是信道建模的主要目的,图 4 根据突变点后的模型参数画出了 3 组不同天线高度下的路径损耗特性曲线。可以看出,天线高度为 $h_t = 3$ cm, $h_r = 1$ m 时的路径损耗大于 $h_t = 3$ cm, $h_r = 2$ m 时的路径损耗,大于 $h_t = h_r = 1$ m 时的路径损耗。在 100~400 m,当发射天线高度固定在 3 cm 时,接收天线从 2 m 下降至 1 m 会使路径损耗增加 4.8~5.9 dB,仍大致遵循天线高度减半路径损耗增加 6 dB 的规律。但当接收天线高度固定在 1 m 发射天线高度从 1 m 下降至 3 cm 时,路径损耗增加 20.1~22 dB,不再满足上述规律。

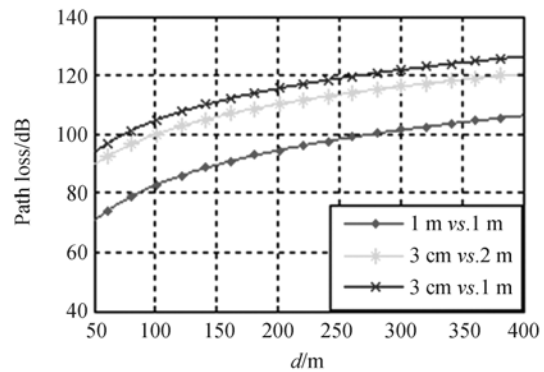


图 4 不同天线高度下远场的路径损耗特性曲线

Fig. 4 Path loss curves for far-field with different antenna heights

3.2 模型验证

为了进一步验证模型的有效性,采用同样方法测量了 3 组天线高度下发射机远场的信号强度,将算得的路径损耗值与模型的预测值进行了对比,如表 2 所示。PL 是测量得到的路径损耗值, Δ_1 、 Δ_2 分别是测量值与单斜率模型、双斜率模型预测值的差值。结果表明, Δ_2 的绝对值在 0.55

表 2 远场路径损耗预测值与测量值对比

Tab. 2 Comparison between predicted path loss and measured path loss in far-field

	h_t vs. h_r								
	1 m vs. 1 m			3 cm vs. 1 m			3 cm vs. 2 m		
d/m	200	400	600	150	180	200	150	180	200
PL/dB	90.99	108.41	113.74	113.04	112.83	114.92	108.46	109.81	112.21
Δ_1/dB	6.76	18.46	20.45	7.99	5.82	6.77	9.64	9.34	10.79
Δ_2/dB	-3.44	2.14	0.55	2.00	-1.08	-0.64	2.51	1.14	1.98

~3.44 dB,而 Δ_1 的值在 5.82~20.45 dB,单斜率模型的预测误差远大于双斜率模型。表 1 中的 d_{max} 参数(最大传播距离)同样说明了这一点。 d_{max} 是在发射功率为 19 dBm 接收灵敏度为 -95 dBm 条件下算得的,可以看出,单斜率模型预测的最大传播距离大约是双斜率模型的 2~12 倍。因此,可以得出结论:对于地表无线信道,双斜率模型较单斜率模型有更好的路径损耗预测精度。

3.3 传统模型及性能对比

考虑到草原环境的地形平坦开阔,自由空间(Free-Space)模型^[15]用来与所得双斜率模型进行对比,表示为:

$$L_{FS} = 32.45 + 20\lg(f) + 20\lg(d), \quad (9)$$

式中, f 是无线电波频率(单位 MHz), d 是收发天线间的距离(单位 km), L_{FS} 即该距离处的路径损耗值。

当无线电波在近地面传播且存在 LOS 径时, Plane-Earth 模型比自由空间模型有更高的预测精度^[7,10]。Plane-Earth 模型^[16]考虑了天线高度和地面反射等的影响,表示为:

$$L_{PE} = 40\lg(d) - 20\lg(h_t) - 20\lg(h_r), \quad (10)$$

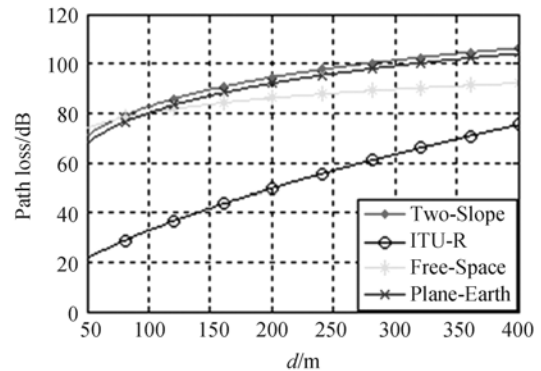
式中, h_t 和 h_r 分别是发射天线和接收天线的高度(单位 m), d 是收发天线间的距离(单位 m), L_{PE} 即该距离处的路径损耗值。该模型的使用条件为 $d \gg h_t, h_r$ 。

ITU-R 模型是在树林环境下经试验测定得到的经验模型^[17]。由于地表环境存在植被等的遮挡,该模型也可用于性能对比,表示为:

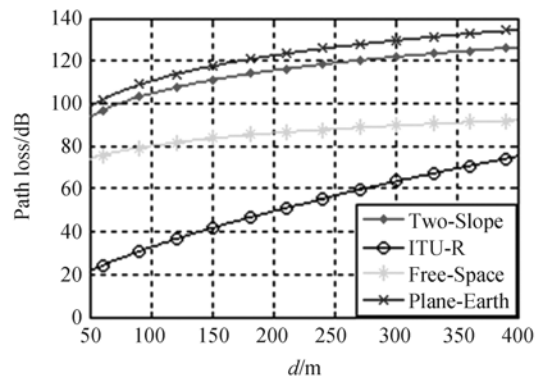
$$L_{ITU-R} = 0.2 \times f^{0.3} \times d^{0.6}, \quad (11)$$

式中, f 是 UHF 频段的无线电波频率(单位 MHz), d 是收发天线间的距离(单位 m)。

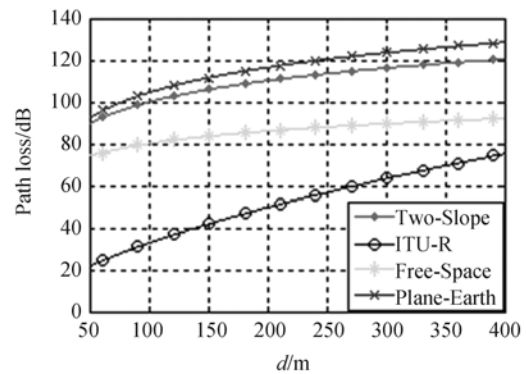
图 5 为双斜率模型(突变点后)与上述传统模型的路径损耗特性曲线。从图 5(a)可以看出, Plane-Earth 模型的预测曲线接近双斜率模型的预测曲线,两者差值为 2.1~2.63 dB。这是因为天线高度都为 1 m 时,收发信机之间存在 LOS 径,双径传播是无线电波的主要传播机制,而 Plane-Earth 模型是基于双径传播机理的模型^[16],所以其预测值与双斜率模型接近。但当天线高度降低后,其预测误差明显增大。在图 5(b)和(c)中,发射天线高度由 1 m 下降到 3 cm 后, Plane-Earth 模型在 100~400 m 的路径损耗预测值要比双斜率模型高出 4.54~8.1 dB。这主要



(a) $h_t = h_r = 1$ m



(b) $h_t = 3$ cm, $h_r = 1$ m



(c) $h_t = 3$ cm, $h_r = 2$ m

图 5 所得模型与传统模型对比曲线

Fig. 5 Comparison between proposed models and generic models

是因为天线高度降低后 LOS 径消失,但 Plane-Earth 模型并未考虑地表环境的其它传播机制,如由灌木丛引起的前向散射^[10],这导致该模型的预测值偏高。与此相反,自由空间模型在 100~400 m 的路径损耗预测值要比双斜率模型低 19.8~34.3 dB。这说明:虽然草原地形平坦开阔,但

其地表环境远非自由空间。ITU-R 模型的预测效果最差,其在 100~400 m 的路径损耗预测值比双斜率模型小 40 dB 以上,说明其不适用于地表无线信道的路径损耗特性表征。表 1 中的 d_{\max} 参数也验证了这 3 种传统模型的不适用性。自由空间模型预测的最大传播距离远大于双斜率模型。在天线高度都为 1 m 时,Plane-Earth 模型的预测值较接近双斜率模型。但是,在极低天线高度下($h_t=3$ cm),Plane-Earth 模型由于未考虑地表无线信道的其它传播机制而产生了过低的预测值。ITU-R 模型则因未考虑天线高度的影响致使预测值偏差太大。

4 结 论

针对 WSN 在地表应用环境下的路径损耗预

测需求,对 2.4 GHz 无线信号在草原地表环境下的传播特性进行了测量和分析。利用最小二乘法对样本数据进行了线性回归。结果表明,地表无线信道的路径损耗仍符合对数距离的线性衰减规律,而且双斜率模型较单斜率模型具有更高的拟合精度。由于极低天线高度的影响,双斜率模型的突变点离发射机很近,距离取决于天线高度的变化。突变点前的路径损耗指数小于 2,突变点后的路径损耗指数在 3~4 之间。通过远场的路径损耗实测数据验证了所得模型的有效性,并与传统模型进行了性能对比。结果表明,虽然草原地形平坦开阔,但传统模型对其地表无线信道的路径损耗预测误差很大。为了提高预测精度,基于实测数据的路径损耗建模更具实际意义,可为 WSN 的网络规划和性能仿真提供依据。

参考文献:

- [1] 文韬,洪添胜,李震,等. 橘园无线传感器网络不同节点部署方式下的射频信号传播试验[J]. 农业工程学报, 2010,26(6):211-215.
WEN T, HONG T SH, LI ZH, *et al.*. Test of wireless sensor network radio frequency signal propagation based on different node deployments in citrus orchards [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010,26(6):211-215. (in Chinese)
- [2] 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.
SHEN J, YAO D Y, HUANG H Q, *et al.*. Measurement and analysis of radio channel model for near-ground wireless sensor network [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1): 141-149. (in Chinese)
- [3] 鲁琴,罗武胜,胡冰. 无线传感网基于邻居簇的 JPEG2000 多节点协同实现[J]. 光学精密工程, 2010,18(1):240-247.
LU Q, LUO W SH, HU B. Multi-node cooperative JPEG2000 implementation based on neighbor clusters in wireless sensor networks [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(1):240-247. (in Chinese)
- [4] 付耀先,姜华,刘海涛. 基于无线传感网扩频通信的跨层 CSMA 多用户接入[J]. 光学精密工程, 2008,16(2):325-332.
FU Y X, JIANG H, LIU H T. Cross-layer CSMA multi-user access based on spreading communication system in wireless sensor network [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(2):325-332. (in Chinese)
- [5] 刘桂雄,张晓平,周松斌. 基于最小二乘支持向量回归机的无线传感器网络目标定位法[J]. 光学精密工程, 2009,17(7):1766-1773.
LIU G X, ZHANG X P, ZHOU S B. Target localization in wireless sensor networks based on LSSVR [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7): 1766-1773. (in Chinese)
- [6] FORAN R A, WELCH T B, WALKER M J. Very near ground radio frequency propagation measurements and analysis for military applications [C]. *Proceedings of IEEE Military Communications Conference, Atlantic City, USA: MILCOM*, 1999:336-340.
- [7] JOSHI G G, DIETRICH C B, ANDERSON C R, *et al.*. Near-ground channel measurements over line-of-sight and forested paths [J]. *IEEE Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation*, 2005,152(6):589-596.
- [8] MARTINEZ S A, MOLINA G P J M, EGEA L E, *et al.*. An accurate radio channel model for wireless sensor networks simulation [J]. *Journal of Communications and Networks*, 2005,7(4):1-6.
- [9] PHAEBUA K, PHONGCHAROENPANICH C, TORRUNGRUENG D, *et al.*. Short-distance and near-

- ground signal measurements in a car park of wireless sensor network system at 433 MHz [C]. *Proceedings of 5th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, Krabi, Thailand: EC-TI-CON, 2008:241-244.
- [10] MENG Y S, LEE Y H, NG B C. Empirical near ground path loss modeling in a forest at VHF and UHF bands [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2009,57(5):1461-1468.
- [11] 刘卉,汪懋华,孟志军,等. 农田环境中短程无线电传播性能试验[J]. *江苏大学学报*, 2010,31(1):1-5.
- LIU H, WANG M H, MENG ZH J, *et al.*. Performance assessment of short-range radio propagation in crop fields [J]. *Journal of Jiangsu University*, 2010,31(1):1-5. (in Chinese)
- [12] SOHRABI K, MANRIQUEZ B, POTTIE G J. Near ground wideband channel measurement in 800-1000 MHz [C]. *Proceedings of IEEE 49th Vehicular Technology Conference*, Houston, USA, 1999:571-574.
- [13] PHAIBOON S, PHOKHARATKUL P, SOMKU-ARNPANIT S. New upper and lower bounds line of sight path loss model for mobile propagation in buildings [J]. *International Journal of Electronics and Communications*, 2008,62(3):207-215.
- [14] GOLDSMITH A. *Wireless Communications* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [15] LAVERGNAT J, SYLVAIN M. *Radio-wave Propagation: Principles and Techniques* [M]. New York: Wiley, 2000.
- [16] PARSONS J D. *The Mobile Radio Propagation Channel* [M]. New York: Wiley, 2000.
- [17] CCIR. Influences of terrain irregularities and vegetation on troposphere propagation [R]. Geneva: CCIR, 1986.

作者简介:



宋林丽(1978—),女,山西临汾人,博士研究生,讲师,2005年于中北大学获得硕士学位,主要从事光通信与光电检测等方面的研究。E-mail: solili@163.com



孔祥善(1985—),男,山东曲阜人,工程师,2011年于中北大学获得硕士学位,主要从事无线通信与通信控制方面的研究。E-mail: hailan_392@163.com

通讯作者:



王代华(1977—),男,山东日照人,博士研究生,讲师,2005年于中北大学获得硕士学位,主要从事无线通信网络与智能传感器系统方面的研究。E-mail: wangdaihua@nuc.edu.cn

导师简介:



张志杰(1965—),男,山西太原人,博士,教授,博士生导师,1998年于北京理工大学获得博士学位,主要从事无线通信、信息理论与信号处理等方面的研究。E-mail: zhangzhijie@nuc.edu.cn

(本栏目编辑:李自乐)