

文章编号 1004-924X(2008)01-0141-09

野外地表无线传感网信道传播模型的测定与分析

沈 杰,姚道远,黄河清,马 奎,刘海涛

(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:针对三种典型传感网的野外布设环境,对地表低空收发天线的路径损耗特性进行了现场实验测定,并对测试结果进行了线性拟合分析和建模。测试和拟合结果表明,地表无线信道与传统蜂窝无线信道模型存在较大差别,但仍可采用单折线或双折线模型进行表征,同时得出了一些有助于研究和设计无线传感网的信道传播特性和规律。所得的分析结果有助于深入研究野外地表无线传感网络,提高其仿真实际有效性。

关 键 词:无线传感网;信道传播模型;低空地表传播;计算机仿真

中图分类号:TN915 **文献标识码:**A

Measurement and analysis of radio channel model for near-ground wireless sensor network

SHEN Jie, YAO Dao-yuan, HUANG He-qing, MA Kui, LIU Hai-tao

(*Key Laboratory of Wireless Sensor Network & Communication, Institute of
Micro-system and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*)

Abstract: Most Wireless Sensor Networks (WSNs) assume that sensor nodes are scattered on the ground, which is hard to characterize the radio propagation properties by real measurements. So the path loss model of the near-ground propagation in suburban areas is measured, and useful model parameters are obtained by linearity regression. The irregularity of near-ground radio propagation is measured, and its impact on the design of MSNs is also analyzed. The experimental results indicate that the near-ground radio channel model is more different from traditional one, but can be characterized by the single and double regression models also. The model can satisfy the requirement of high precise simulation of WSN in suburban area.

Key words: wireless sensor network; radio channel model; near-ground propagation; computer simulation

1 引 言

无线传感网是一种具有广泛应用前景的新型

综合信息网络系统,该项研究的最大挑战是在能量和硬件资源受限的前提下,使网络生存时间最大化,并满足一定的 QoS 要求。因此,网络通信协议必须追求最小冗余设计,也可称之为能量有

收稿日期:2007-03-19;修订日期:2007-08-29.

基金项目:中国科学院知识创新工程基金资助项目(No. KG CX2-YW-110-1)

效性设计。而无线信道传播模型是整个无线网络中通信方案和网络协议设计的基础与难点,它主要包括路径损耗模型和小尺度衰落模型。在网络的规划、仿真和优化阶段,路径损耗模型的研究是最重要的问题之一,它影响着节点覆盖范围和邻居节点度等重要网络参数。

无线信道极大程度地依赖于他工作的环境,由于无线传感网未来可能工作在几乎每一个能想象到的环境中,将存在大量不同种类需要表述特征的信道。无线传感网的许多应用都将大量的传感节点布设于地表或低空物体上,从而实现了对布设环境中物理信号的监测。事实上,这些新的环境和应用将对传统的无线信道建模形成许多挑战。如大面积无线传感节点在野外复杂环境中沿地表布设,必然会造成大量不对称链路和阴影衰落分布,或因地表传播的不确定因素而无法采用已有的信道传播模型来准确预测节点之间的连通度及链路质量。另外,如无线传感网中的路由、节点定位和目标跟踪等问题^[1],也常将传统路径损耗模型与相对距离严格相关起来。因此,能量和资源受限的无线传感网络更需要一个能准确表述实际无线信道路径损耗、色散、时变和空变等特性的模型,从而实现低冗余、高能效、并满足一定 QoS 的网络通信系统的设计。

国际上对无线传感网的研究经过五、六年的快速发展,研究范围已经非常广泛^[1]。早期的研究主要以能量有效性和资源受限为前提,结合自组网技术,重点研究上层的路由和组网以及接入协议。而大量的仿真研究往往是在很多假设条件下进行的,这使得许多的研究成果与实际应用有着较大的差距,尤其是关于无线传感网物理底层的研究,在先前的研究中往往受到忽略,使得有关无线传感网信道传播模型至今仍缺乏有效的研究。近来一些论文^[2]指出了这一问题,即要设计低冗余、高能效的无线传感器网络,并在仿真研究阶段准确评估网络协议的性能,必须对应用环境中的信道传播模型有较为真实的了解。

在早期有关蜂窝无线信道传播模型的研究中^[3],其考察模型主要为收发节点的天线高度在数米到数十米范围之间,信号覆盖范围在 1 km 以上。而对于贴近地表,高度在数十厘米左右,传播范围在百米内的收发天线的路径损耗模型却由于没有相应的应用驱动,缺乏有效的测量和分析。

近来,对于估计和测量实际地表路径损耗模型的需求不断增长,这是因为,在网络能量受限条件下,地表低空近距离传播对路径损耗的考察较以往的研究要求更微观化和精确化。另外由于传感节点的资源 and 能耗问题,一般节点通信间距在百米以内。文献[4]中,作者初步将实际信道测试引入无线传感网的研究中,指出在无线节点的传播范围内,接收信号处于时变和不稳定状态,但尚未对其原因做深入分析。文献[5]主要分析了无线传感网中不规则无线传播对路由层协议的影响,文献[6-8]则分别从不同的角度对无线传感网的传播信道进行测定,但测试参量的完整性和分析方面尚存在不足。

综上所述,无线传感网信道传播模型的研究需要从以下几方面入手:

(1)确定无线传感网的典型应用环境和布设方式,从网络实际典型应用的角度出发来分析信道传播模型。

(2)无线传感网中,沿地表低空传播对无线信号的影响是否仍基本符合传统信道传播模型的特征,如有区别,应如何从数学上进行建模和分析。

(3)从实测所得一般性信道传播模型出发,分析对于能量受限的无线传感网协议设计的影响因素,如协议的某些重要性能指标等。

(4)利用所得分析结果,与网络仿真软件相结合,如 ns-2^[9], QualNet^[10]等,进行基于符合实际的信道传播模型的无线传感网络仿真平台搭建,并以此为基础,仿真并设计符合实际布设条件的,低冗余、高能效的无线传感网络系统。

本文的主要研究对象为野外环境中沿地表大规模随机布设的无线传感网络,该网络类型是无线传感网应用中最典型和最复杂的网络模型之一,仔细研究野外布设环境中无线传感网的信道传播模型特点有助于优化网络通信方案的设计。本文主要对野外典型环境中沿地表布设的无线收发节点间百米范围内的路径损耗模型进行了测定和分析,同时实际测定了其他一些与网络设计相关的信道参量,为无线传感网的相关研究提供了重要依据。

2 测试方案描述

一般来说,无线传感网在布设区域中希望能

获取的信息量具有高价值性,且节点本身具有一定的隐蔽性,因此,对于野外布设环境,在特征上可提炼为:地形环境较为复杂,小范围内(百米)地势较为平坦,有低矮障碍物稀疏分布,如土堆、杂草、树木等。但这种地形环境中,直接测量低空天线传播模型有一定的困难,难以直接得出有用的模型以进行后续的分析,特别是不同障碍物引起的阴影衰落方差值等。因此,在测试方案中选取了三种不同的测试场景,以有效地考察不同场景差异特征对于路径损耗的影响,同时三种场景对于无线传感网的某些应用也有直接的指导意义,如野地目标跟踪、道路监控、生态监控等。另外,在测试中假设收发节点均处于静止状态,并且周围没有大量运动物体,从而使测量更能在平均意义上反映路径损耗的特征。三种测试场景选取如下:(1)郊外无建筑物分布的野草地,地面较为平坦,有稀疏的小土堆和杂草分布;(2)平坦水泥公路;(3)郊外起伏较大地面,收发节点间基本为非视距通信。前两种场景主要测试和分析不同天线高度、地形对路径损耗模型的影响,节点间主要为视距传播。第三种场景主要同前两种场景进行对比,分析非视距传播情况下低空天线的传播特性。对于其他一些影响传播的较复杂的因素将在后续的测试中进行。另外以第一种场景为典型场景,测定链路特性与网络设计中相关的重要参数指标:不规则和非对称链路分布。本试验中,根据无线传感网在野外的典型应用,分别选取了25 cm、45 cm、100 cm三种不同的天线高度设置。

测试传感节点主要由 Chipcon 公司的 CC1100 通信芯片和 TI 的 MSP430 微控制器组成。由于野外环境需考虑电磁波传播的绕射能力,测试方案中选取了 433 MHz 频段进行测试。但为了提高测量值的精确度及方便测试数据记录和分析,在路径损耗模型及不规则性测试中采用了信号发生器(Agilent E4433B),在 433 MHz 上产生一个功率为 10 dBm 的恒定单载波信号,接受设备为手持式频谱分析仪(R&S FSH3),沿直线测试;而在非对称链路分布测试中,选用测试传感节点。收发天线采用了两个 $\lambda/4$ 单极全向天线,通过低损耗的射频同轴电缆与收发设备相连。

由于本测试主要考察无线信号在信道中传播的相对衰落特性,因此以上设置能够有效获得预期实验结果。

3 测试结果及分析

本节主要对不同实验设置下测试所得数据进行回归处理,以拟合地表无线信道模型,同时进一步探讨和无线传感网设计相关的一些问题。

3.1 路径损耗模型测试和分析

路径损耗模型测定主要是为了分析地表低空收发天线间的损耗模型与传统路径损耗模型间的差异性,如自由空间模型、双射线传播模型、对数模型等,从而得到有效的地表低空路径损耗模型,为无线传感网的研究打下基础。图1中的不同曲

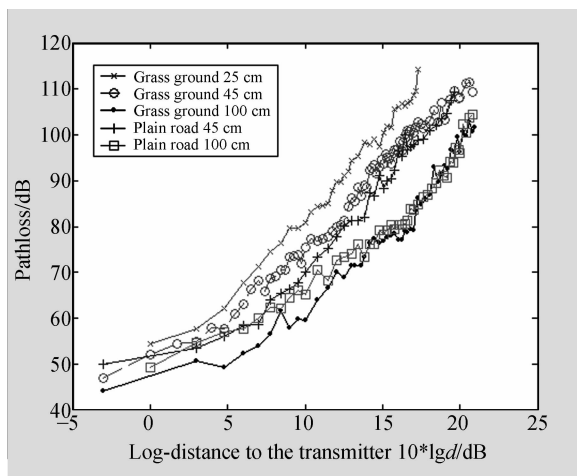


图1 草地、公路上不同天线随高度变化路径损耗图
Fig. 1 Log-distance path loss due to different antenna heights on grass ground and plain road, respectively

线表示了在地表和公路两种场景中,不同天线高度的实测路径损耗值与对数距离间的变化关系。图示各种测试场景下,发射功率、接收和测试手段均相同。图中各距离测点值为空间和时间的样本均值,测试中各采样点的样本容量为50。由图中可以看出,虽然天线高度非常接近地表,但在百米左右的传播范围内,路径损耗值仍基本服从与对数距离尺度呈线性关系的分布,这使得采用传统的对数化距离回归处理成为可能。同时,从

图中可以看到,天线高度越高路径损耗相对越小,这种趋势在距离发射端较远时更为明显。图中的曲线波动主要是由测试环境中障碍物的存在引起的阴影方差分布造成的。

根据以上的测试结果和分析,可采用线性回归的方法来拟合低空地表天线传播的路径损耗模型。在传统路径损耗模型中常采用单折线对数距离模型和双折线对数距离模型。典型的双射线模型^[3]便是采用双折线对数距离模型。两种路径损耗模型分别表示如式(1),(2):

$$L(d) = L_0 + 10n \lg 10d + X_\sigma, \quad (1)$$

$$L(d) = \begin{cases} L_{b1} + 10n_1 \lg d + X_{\sigma 1} & d \leq d_b \\ L_{b2} + 10n_2 \lg d + X_{\sigma 2} & d > d_b \end{cases}, \quad (2)$$

$$d_i = \sqrt{(\Sigma^2 - \Delta^2)^2 - 2(\Sigma^2 + \Delta^2)(\lambda/2)^2 + (\lambda/2)^4}. \quad (3)$$

其中 n 代表斜率, L_0, L_{b1}, L_{b2} 代表发射 1 m 距离处的路径损耗值, $\Sigma = h_T + h_R, \Delta = h_T - h_R, h_T, h_R$ 为收发天线高度。 d_b 代表突变点位置, 在传统双射线模型中认为 d_b 与第一菲涅耳区被阻挡距离 d_i 基本一致, 突变点前的斜率为 2, 突变点后的斜率为 4。 X_σ 代表由阴影衰落引起样本标准差, 一般认为符合零均值的高斯分布。

为了较为准确地建立地表低空天线路径损耗模型, 在数据回归处理中, 采用最小二乘法准则分别对单折线和双折线模型进行了回归处理, 以确定何种模型更符合实际信道。由于 d_b 为未知离散突变点距离, 因此以双折线模型的回归处理算法为例, 分析如下:

设现有 m 个实测距离样本点为 d_1, d_2, \dots, d_m , 可得路径损耗的样本方程为:

$$L(d_i) = \begin{cases} L_{b1} + 10n_1 \lg d_i + X_{\sigma 1} & d_i \leq d_b \\ L_{b2} + 10n_2 \lg d_i + X_{\sigma 2} & d_i > d_b \end{cases}. \quad (4)$$

($i = 1, 2, \dots, m$)

根据最小二乘法原则, 须使路径损耗的观察值 $L'(d_i)$ 与式(4)的偏差的平方和 $Q(L_{b1}, L_{b2}, n_1, n_2)$ 为最小, 其中 Q 可表示为:

$$Q(L_{b1}, L_{b2}, n_1, n_2) = \sum_{i=1}^b (L(d_i) - L_{b1} - 10n_1 \lg d_i)^2 + \sum_{i=b+1}^m (L(d_i) - L_{b2} - 10n_2 \lg d_i)^2. \quad (5)$$

由于式中 b 为未知突变点序号, 而其决定了两段折线的端点位置, 对 b 从 1 到 m 进行顺序遍历, 分别求双线性方程中的系数 L_{b1}, L_{b2}, n_1, n_2 , 从而得到对应 Q 值, 再取对应最小 Q 值的样本点序号 b 。双线性方程系数求解可对 Q 分别取关于 L_{b1}, L_{b2}, n_1, n_2 的偏导数, 并令其等于零。整理可得以下表达式:

$$\begin{cases} n_1 = \frac{l_{10 \lg d, L(d)}(1, b)}{l_{10 \lg d, 10 \lg d}(1, b)} \\ L_{b1} = \frac{1}{b} \sum_{i=1}^b L(d_i) - \frac{1}{b} n_1 \sum_{i=1}^b 10 \lg d_i \\ n_2 = \frac{l_{10 \lg d, L(d)}(b+1, m)}{l_{10 \lg d, 10 \lg d}(b+1, m)} \\ L_{b2} = \frac{\sum_{i=b+1}^m L(d_i)}{m-b} - \frac{n_2 \cdot \sum_{i=b+1}^m 10 \lg d_i}{m-b} \end{cases}, \quad (6)$$

其中,

$$l_{x,y}(a, b) = \sum_{i=a}^b x_i \cdot y_i - \frac{\sum_{i=a}^b x_i \cdot \sum_{i=a}^b y_i}{b-a+1}, \quad (7)$$

$$l_{x,x}(a, b) = \sum_{i=a}^b x_i^2 - \frac{(\sum_{i=a}^b x_i)^2}{b-a+1}. \quad (8)$$

单折线回归步骤与双折线相似, 但无需求解突变点 d_b , 其线性方程系数 L_0, n 的求解不再详述。各场景选取的拟合模型依据回归剩余标准差 σ 进行判定, 取剩余标准差较小的为相应拟合模型。单折线回归剩余标准差表示如下:

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{l_{L(d), L(d)}(1, m) - n l_{10 \lg d, L(d)}(1, m)}{m-2}}. \quad (9)$$

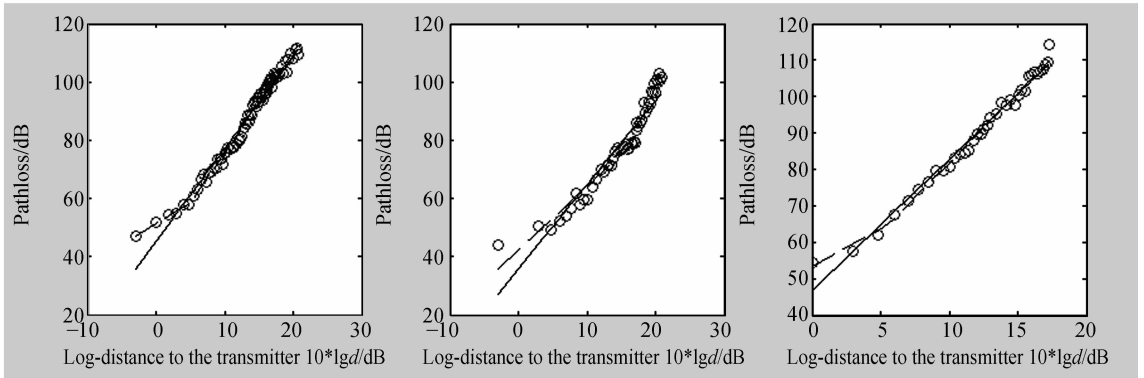
双折线回归剩余标准差表示如下:

$$\sigma_d = \left(b \sqrt{\frac{l_{L(d), L(d)}(1, b) - n_1 l_{10 \lg d, L(d)}(1, b)}{b-2}} + (m-b) \sqrt{\frac{l_{L(d), L(d)}(b+1, m) - n_2 l_{10 \lg d, L(d)}(b+1, m)}{m-b}} \right) / m. \quad (10)$$

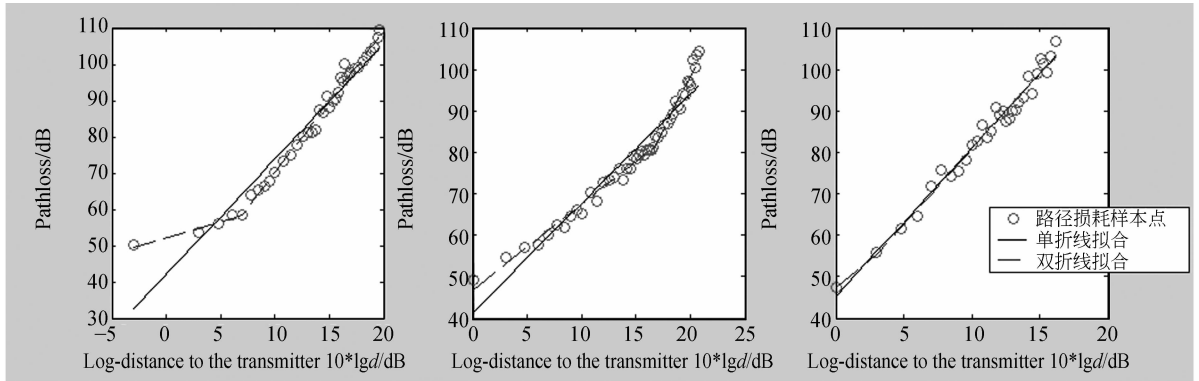
若 $\sigma_s \leq \sigma_d$, 则该场景选取单折线模型, 若 $\sigma_s > \sigma_d$, 则选取双折线模型。

阴影衰落引起的样本标准差 X_σ 可表示如下:

$$X_\sigma = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (L'(d_k) - L(d_k))^2}. \quad (11)$$



(a)草地 45 cm 天线 (b)草地 100 cm 天线 (c)草地 25 cm 天线
 (a)45 cm height antenna on grass ground (b)100 cm height antenna on grass ground (c)25 cm height antenna on grass ground



(d)平坦公路 45 cm 天线 (e)平坦公路 100 cm 天线 (f)草地非视距通信
 (d)45 cm height antenna on plain road (e)100 cm height antenna on plain road (f)HLDS of grass ground

图 2 六种不同测试场景中路径损耗测量值与拟合结果示意图

Fig. 2 Regression results and measurement values of path-loss in six different scenes

根据以上回归处理算法对 6 种测试场景模型进行拟合处理,其拟合结果如图 2 所示。各测试场景的参数经归纳分析,如表 1 所示。

由上图回归结果来看,天线高度相对较高(45 cm、100 cm),存在 LOS(Line of Sight)径的情况下,以最小回归剩余标准差来判别回归值的准确度,双折线模型要优于单折线模型,且突变点离发射端远。但对于几乎贴近地表的 25 cm 天线高度,同样由回归剩余标准差可知更适合采用单折线模型,这个结论在草地非视距场景中进一步得到验证,且突变点非常接近发射端。

另外对于阴影衰落引起的标准差 X_σ 是否符合零均值高斯分布,可根据式(11)得到 X_σ 标准差的统计均值 u_σ 和统计方差 σ_σ (见表 1)。以草地

非视距单折线模型、草地 45 cm 天线双折线模型及公路 45 cm 天线双折线模型为例,各自阴影标准偏差分布如图 3 所示。其中各标准偏差的平均值 u_σ 附近均以较大概率出现,因此,地表低空天线阴影标准差仍基本可以采用 0 均值的高斯分布来进行建模。

从图 2 还可以看出各双折回归直线的突变点产生了较大的差异。地表低空天线传播情况下,突变点值均大于蜂窝系统中的双射线模型(如式(3)),双射线模型中突变点为第一菲涅耳区被阻挡距离的推导是基于条件 $h_T h_R \gg \lambda$,而在地表低空情况下,该条件不能满足。另外,经分析可知,突变点值不仅由收发天线高度和波长决定,并且也与路面地形相关。当地面不平整,起伏较大

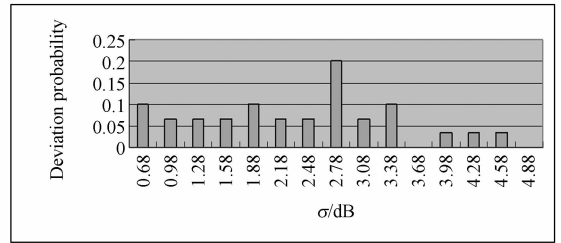
时,第一菲涅耳区间更容易被阻挡,且有可能导致更高阶菲涅耳区间的阻挡,由此导致突变点更靠近发射端。从表 1 可知,由于公路较草地平整,第一菲涅耳区间不易被阻挡,因此,在相同天线高度下,公路的突变点比草地较远。

表 1 各测试场景中,参数归纳分析表

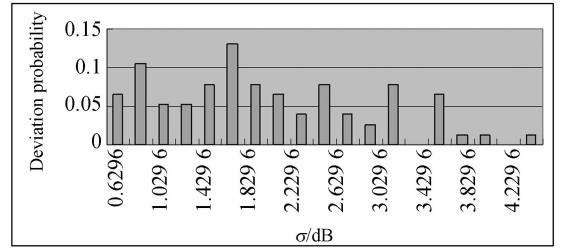
Tab. 1 Measured parameters in different scenes

	草地	草地	草地	公路	公路	草地
	25 cm	45 cm	100 cm	45 cm	100 cm	非视距
单折线回归对数模型						
N	3.6	3.16	2.87	3.19	2.63	3.58
L_0	46.8	45.5	35.6	42	40.3	45.2
回归剩余标准差 σ_s	2.01	2.46	4.4	4.13	3.42	2.05
X_σ 均值	1.70	2.48	3.83	3.33	3.02	2.58
X_σ 标准差	1.40	1.58	2.67	3.05	2.05	1.17
d_{\max}	31.6	50.1	165.9	66.1	173.8	33.9
N_1	2.09	1.40	2.19	0.88	2.07	2.89
N_2	3.85	3.43	5.44	3.90	5.14	3.68
双折线回归对数模型						
回归剩余标准差 σ_1	2.22	0.74	2.91	1.03	1.3	0.34
回归剩余标准差 σ_2	1.34	1.67	1.66	1.56	1.65	2.10
X_σ 均值 u_σ	1.35	2.06	2.72	1.82	1.71	2.53
X_σ 标准差 σ_σ	0.85	0.95	1.23	1.45	0.81	1.18
突变点/m	4.0	3.0	44.0	5.0	46.0	4.0
d_{\max}	30.9	53.7	107.2	58.2	109.7	33.1
传统双射线						
d_{\max}	63	126	252	126	252	63
自由空间模型						
d_{\max}	457	531	1660	794	966	550

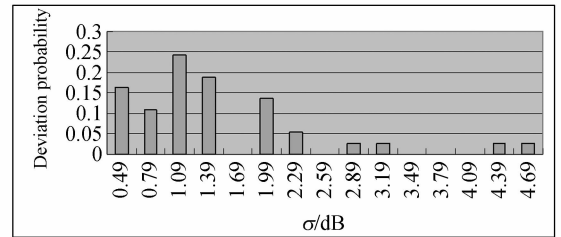
由表 1 各模型的损耗指数比较可以看出,对于草地 25 cm 天线和草地非视距情况下,单折线的损耗指数均为 3.6 左右,该指数表征了在完全贴近地表及 NLOS 情况下,远场和近场均存在较大的衰落特征。草地和公路在 45 cm、100 cm 天



(a) 不平整地面
(a) NLOS



(b) 草地 45 cm 天线
(b) 45 cm height antenna on grass ground



(c) 公路 45 cm 天线

(c) 45 cm height antenna on road

图 3 不同场景下天线阴影标准偏差分布

Fig. 3 Distribution of shadowing deviation in different scenes

线两种场景下,由于天线间存在 LOS 径,且地面较为平坦,因此双径电波叠加特征较为明显。但与传统双射线模型明显区别的是,在突变点前后,并不符合原来的损耗指数衰减。在蜂窝网双射线模型中常采用式(12)来建模损耗指数^[9]。

$$\gamma = a - bh_b + c/h_b + x\sigma_r, \quad (12)$$

其中, h_b 为基站天线高度,式(12)成立的条件为 $10 \text{ m} \leq h_b \leq 80 \text{ m}$, a, b, c , 为环境常数。 x 为零均值高斯分布 $N[0, 1]$, σ_r 为损耗指数的标准偏差。由表 1 所得分析结果可知,在地表低空天线传播情况下,突变点与损耗指数值相互关系较为复杂,

而不能以传统公式(3)、(12)建模。突变点与损耗指数的公式化模型,尚有待进一步测试和分析。

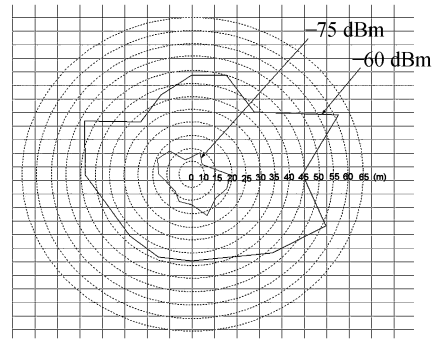
在一定的发射功率和接收灵敏度前提下,路径损耗值决定了最大的节点传播距离 d_{\max} 。表 1 中分别计算了发射功率 10 dBm,接收灵敏度为 -90 dBm时,各种路径损耗模型下节点的最大传播距离(不考虑阴影方差前提下)。可以看出,在地表低空传播条件下,传统双射线模型和自由空间模型与实际测定模型的最大传播距离相差极大。其中双射线模型的不准确性主要来自突变点的计算问题,由此可见突变点的建模在地表低空传播模型中的重要性。若在仿真试验中采用两种传统模型建模,则必然得到与实际不符的结果,从而严重影响上层协议的设计和分析。

3.2 不规则电波传播测试

在地表低空天线传播情况下,由于直直径和发射径均非常接近地表,所以会引起许多不确定性的衰落。而在无线传感网络仿真中,节点邻居度和干扰对上层协议设计有重要影响,常用统一的传播半径来计算节点邻居度和干扰,认为一发射节点的有效覆盖范围和干扰范围为一规则圆形。对场景一中节点的覆盖范围测试如图 4 所示。另外,不规则电波传播对于协议的影响还体现在不对称链路分布上。所谓不对称链路,可定义为收发节点双向通信时,帧正确接收率的差值,若双向帧正确接收率差值大于某一门限,则一般不应作路由选择。场景一中,采用传感节点分别测试了在 100 cm 和地表放置,0 dBm 和 10 dBm 不同发射功率设置情况下,节点间不对称链路分布,如图 5 所示。

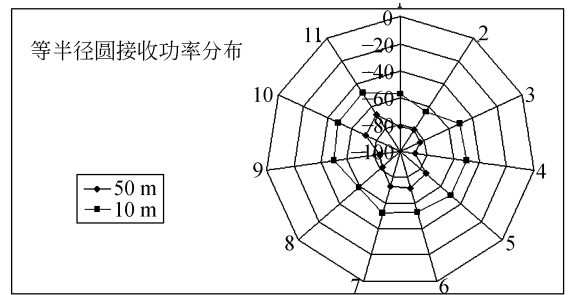
由图 4(a)、(b)测试结果可以看出,在较为平坦的草地环境中地表低空天线的不规则传播特性。在同一接收功率指标下,不同方向半径差最大差值为 25 m。相同半径圆周上,最大接收功率差值为 16 dBm。因此,在能量受限的无线传感网络研究中,如不能较为准确地建立路径损耗模型,将对上层协议的设计存在重大的影响。

由图 5 可知,在草地 100 cm 天线高度和 10 dBm 发射功率情况下,基本不存在不对称链路;在草地 100 cm 天线,0 dBm 发射功率情况下,



(a) 10 dBm 发射功率, -75 dBm、-60 dBm 接收功率传播半径分布(等接收功率线)

(a) Distribution of propagation radius of 10 dBm Tx power and -75 dBm, -60 dBm Rx power



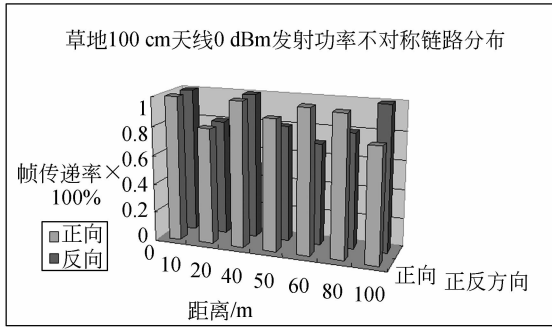
(b) 10 dBm 发射功率, 10 m、50 m 等半径圆接收功率分布(等半径线)

(b) Distribution of Tx power of 10 dBm, Rx power of 10 m, 50 m equal radius

图 4 草地 45 cm 天线不规则电波传播分布示意图
Fig. 4 Distribution of irregular radio propagation of 45 cm high antenna on grass ground

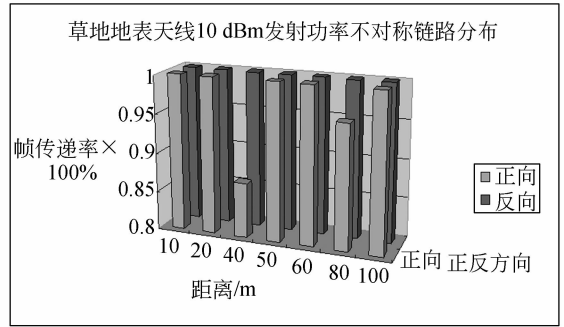
由于较低的发射功率,因此在传播距离较远的地方不对称链路分布明显;在草地地表放置节点,10 dBm 发射功率情况下,由于天线高度较低,在某些位置因阴影深衰落会造成不对称链路;在草地地表放置节点,0 dBm 发射功率情况下,不对称链路分布较为明显,链路质量较差。最恶劣的情况下,双向链路有 30% 的帧正确接收率差值。

由以上情况分析可知,为了在实际环境中有效地布设传感节点,使网络能正常工作,在网络设计初期,必须对信道传播特征有较为全面的测定。另外,在网络高效协议设计时,必须基于符合实际的信道模型。



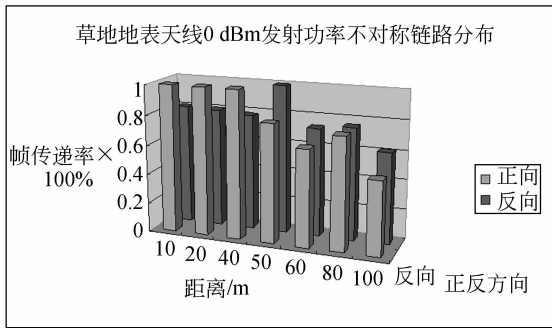
(a) 草地 100 cm 天线 0 dBm 发射功率

(a) 0 dBm Tx power of 100 cm height antenna on grass ground



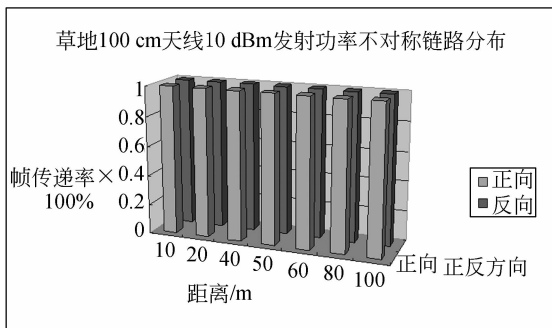
(d) 草地地表放置节点 10 dBm 发射功率

(d) 10 dBm Tx power of ground placement on grass ground



(b) 草地地表放置节点、0 dBm 发射功率

(b) 0 dBm Tx power of ground placement on grass ground



(c) 草地 100 cm 天线 10 dBm 发射功率

(c) 10 dBm Tx power of 100 cm height antenna on grass ground

图 5 不同场景下不对称链路分布

Fig. 5 Distribution of asymmetric link in different scenes

4 结 论

大多已有无无线传感网的研究都基于传统的路径损耗模型和其他一些信道假设条件,但由于路径损耗模型对网络仿真结果有着重要的影响,采用与实际不符的模型必然降低仿真结果的可信度甚至得出错误的结论。调研显示,迄今仍没有完善的针对无线传感网布设环境的信道传播模型,尤其是地表低空布设的无线传播信道。为了有效研究和设计野外地表随机布设的无线传感网,本文针对几种典型的无线传感网应用场景进行了更为完善的测试和分析。采用基于最小二乘法准则的线性回归算法对样本数据进行拟合分析,从而得出了有关地表低空路径损耗模型的一些有意义的结论。由分析结果可知,对数高斯阴影分布的分析模型仍适用于地表低空信道中,但是由于极低的天线高度及沿地表传播,从而对突变点以及前后的损耗指数产生了极大的影响,从而证明了现有模型的不适用性。完全贴近地表的传播模型应采用单折线损耗模型,而相对较高、存在 LOS 径的低空传播模型应采用双折线损耗模型,本文同时给出了各典型场景中的模型参数。另外从节点最大传播范围说明了传统路径损耗模型在地表低空情况下的不适用性。但对于突变点与损耗指数的数学模型,有待进一步深入研究,以给出更为

精确的解析表达式。

另外,针对无线传感网的仿真研究,本文还对地表低空无线传播的不规则性和不对称链路分布做了测试,从而定性地说明了在无线传感网研究中,建立与实际相符的信道传播模型的重要性。

有关野外地表无线传感网信道传播模型的测定还有待进一步完善,同时还需测定有关小尺度衰落特性,从而为设计高能效的通信方案打下基础。要设计低冗余、高能效的无线传感网络,并在仿真研究阶段准确评估网络协议的性能,必须对

应用环境中的信道传播特性建立符合实际的模型,并基于该模型建立整个无线传感网络仿真研究平台。

5 致 谢

中科院上海微系统与信息技术研究所微系统信息网研发中心为本次测试提供了完善的测试仪器和平台。特别感谢为枯燥无味的野外测试和数据分析工作付出无数心血和汗水的同事们。

参考文献:

- [1] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, *et al.*. Wireless sensor networks: a survey[J]. *Computer Networks*, 2003, 38: 393-422.
- [2] KOTZ D, NEWPORT C, GRAY B, *et al.*. Experimental evaluation of wireless simulation assumptions[C]. *Proceedings of ACM/IEEE MSWiM 2004, Venice, Italy*, 2004: 50-57.
- [3] THEODORE S R. *Wireless Communication Principles and Practice*[M]. Publishing Housing of Electronics Industry, 2001.
- [4] ZHAO J, GOVINDAN R. Understanding packet delivery performance in dense wireless sensor networks[C]. *Proceedings of ACM SenSys 2003, Los Angeles, California*, 2003: 1-13.
- [5] GANG Z, TIAN H, KRISHNAMURTHY S, *et al.*. Impact of radio irregularity on wireless sensor networks[C]. *MobiSYS04, Boston, Massachusetts, USA*, 2004: 125-138.
- [6] MARTINEZ A, MOLINA J M, EGEA E. An accurate radio channel model for wireless sensor networks simulation [J]. *Journal of Communications and Networks*, 2005, 7(4): 78-85.
- [7] JOSHI G G, DIETRICH C B, ANDERSON C R, *et al.*. Near-ground channel measurements over line-of-sight and forested paths[C]. *IEEE Proceedings of Microwave Antennas Propagation*, 2005, 152(6):589-596.
- [8] SOHRABI K, MANRIQUEZ B, GREGORY J P. Near ground wideband channel measurement in 800-1000 MHz [C]. *IEEE Vehicular Technology Conference*, 1999, 1: 571-574.
- [9] NS-2 simulator[EB/OL]. 2001, <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.
- [10] Qualnet[EB/OL]. <http://www.qualnet.com>.

作者简介:沈杰(1980—),男,博士研究生,主要从事无线传感器网络、扩频通信、嵌入式系统等方面的研究。E-mail: sqinghe@mail.sim.ac.cn

刘海涛(1968—),男,博士生导师,研究员,主要从事无线传感器网络、无线通信、小卫星通信与控制等方面的研究。E-mail: lht@mail.sim.ac.cn