

文章编号: 2095-2163(2019)06-0171-07

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

不规则针叶林中不同方向无线信号传播特性

陈明, 李东虎, 杨靖

(贵州大学 电气工程学院, 贵阳 550025)

摘要:为解决针叶林中无线传感器网络节点部署、网络规划、定位等问题,以不规则马尾松为研究对象,研究 433 MHz 无线信号在不同方向的传播特性。实地测量了 12 个方向、8 个高度、9 个通信半径的接收功率。对实验采样数据进行回归分析,建立环境因素的路径损耗模型。结果表明,在不同接收角度上、不同接收高度上,路径损耗符合对数衰减模型,当 $h = 2.0$ m 时,路径损耗最小,等通信半径上接收功率封闭曲线畸变程度最小。为野外不规则针叶林环境中无线传感网络的部署、网络规划、定位提供理论依据。

关键词:无线传感网络; 433 MHz 无线信号; 针叶林

Characteristics of wireless signal propagation in different directions in irregular coniferous forest

CHEN Ming, LI Donghu, YANG Jing

(Electrical Engineering College, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

[Abstract] In order to solve the problems of node deployment, network planning and location of wireless sensor networks in coniferous forests, the propagation characteristics of 433 MHz wireless signals in different directions were studied with irregular Pinus massoniana as the research object. The received power of 12 directions, 8 altitudes and 9 communication radius was measured in the field. Regression analysis is made on the experimental data, and the path loss model of environmental factors is established. The results show that the path loss conforms to the logarithmic attenuation model at different receiving angles and different receiving heights. When $h = 2.0$ m, the path loss is the smallest, and the distortion degree of the receiving power closed curve is the smallest at the same communication radius. It provides a theoretical basis for deployment, network planning and location of wireless sensor networks in irregular coniferous forest environment.

[Key words] wireless sensor network; 433 MHz wireless signal; coniferous forest

0 引言

随着通信技术不断发展,无线通信技术在环境监测领域^[1-2]、智能家居^[3]、林业领域均有应用^[4-5]。无线电波在自由空间传播,通过无线信道实现信息交换。因其功耗低,无线信号在传播过程容易受天气、地形、温度、环境等因素的影响。为了能将无线传感器网络更好地应用于林业领域,研究人员对无线传感器网络在林业方面的应用做了研究。冯鹏飞等^[6]研究了人工白皮松林中不同频率无线信道在针叶林中的传播特性,得出 433 MHz 频段无线信号优于其它频段的结论。刘海洋等^[7]研究了 433 MHz 无线信号在人工中龄樟子松林中的传播特性,得出不同密度中龄樟子松中最佳天线高度、传播距离分布特征。但樟子松林为人工林,排列较为整齐,不能很好地适用于野外不规则松林环境。郭秀明等^[8]

研究了 2.4 GHz 无线信号在苹果园中不同高度的传播特性,得出在每一个水平高度层上,路径损耗符合对数衰减模型。由于苹果树属于人工种植经济果木,树木间的排列较为整齐,树冠较低,树木生长条件较为理想,和野外的林地环境相差较大。文韬等^[9]研究了按需要排布的盆栽柑橘在不同植被深度、天线高度、通信距离下 433 MHz 无线信号衰减情况,建立环境因素、传播距离间线性模型,得出不同天线高度、植被深度、通信距离共同作用下的最佳天线高度参照表,为无线传感器网络的部署提供理论依据。但盆栽体积较小,树高较低,实验属于理想实验,并不能很好地表征野外自然生长的环境。周建军等^[10]研究了 2.4 GHz 无线信号在番茄连栋温室中不同生长阶段(花期、初果期)、方向、高度上的衰减情况,得出在不同时期 2.4 GHz 无线信号路径损耗均符合对数衰减,在同一高度行方向路径损耗

作者简介: 陈明(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向:智能感知与自主控制;李东虎(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向:控制工程;杨靖(1973-),男,博士,教授,主要研究方向:物联网技术、无线传感网络、计算机控制技术。

通讯作者: 杨靖 Email: 2873546749@qq.com

收稿日期: 2019-09-20

最小,同一方向上节点高于冠层以上损耗小。李萍萍等^[11]研究 2.4 GHz 无线信号在青椒不同方向、不同角度下的传播特性,得出在不同方向和角度下路径损耗均符合对数衰减模型。

综上所述,现有的研究都是在较为理想的人工环境下得出,没有考虑到不规则针叶林环境中,不同传播方向对路径损耗影响情况。因此研究无线传感器网络在不规则针叶林中不同方向的路径损耗情况很有必要。为解决无线传感器网络在不规则松林环境下部署问题,研究了 433 MHz 无线信号在松林中不同方向的路径损耗情况。测试了 12 个方向、8 个高度、9 个通信半径的接收功率,对测试结果进行分析和处理。结果表明在同一高度和通信半径不同接收角度上,接收功率形成的封闭曲线并不是一个标准的圆,不同方向上存在不同程度的畸变;同一方向不同高度上路径损耗符合对数衰减,为进一步研究无线传感网络在野外不规则松林中节点部署提供理论依据。

1 材料与方方法

1.1 实验环境

测试地点位于贵州省贵阳市花溪区郊区地势较为平坦的马尾松林。由于其生长状态无人工干预,因此树木的排列不规则,马尾松树的树高均大于 10 m,在树的底层为低矮灌木丛及杂草,灌木在 1.6 m 及以下均有分布,但大部分灌木主要集中在 0.75 m 附近,灌木叶层主要集中在这一高度。因为其排列是无规律的分布在不同方向上,在不同的传播方向上对无线信号的影响均存在差异,这导致无线信号在马尾松林中会同时存在着直射、反射、折射、绕射等多种传播。因此,在传播过程中就会存在反射波、折射波、绕射波、直波以及这些波的合成波。

考虑到实际应用环境是不规则分布的树林和灌木丛,采用绕射能力较强的长波,由于空气分子原子密度不够,容易产生绕射,但穿透能力较弱。松林中的树木、灌木、杂草等都能影响无线信号的反射以及折射。

1.2 路径损耗模型

在无线信号传播过程中由于环境影响,会随着传播距离的增加接收功率会存在不同程度的损耗。在传播过程中路径损耗是衡量传播性能的重要指标之一,可以通过路径损耗(Path loss)来进行表征,计算公式(1)所示:

$$PLS = P_T - P_R, \quad (1)$$

其中, PLS 为传播过程中的路径损耗值(单位 dB); P_T 为发射端的发射功率值(单位为 dBm); P_R 为接收端的接收功率值(单位为 dBm)。接收机在自由空间中的接收功率如计算公式(2)所示:

$$P_R(d) = K \frac{P_T G_T \lambda^2 G_R}{4\pi d^2 4\pi}. \quad (2)$$

其中, K 为环境损耗因子; P_R 为接收功率(单位为 dBm); P_T 为发射端的发射功率(单位为 dBm); G_T 为发射天线增益; G_R 为接收天线增益(单位为 dB); λ 为波长(单位为 m); d 为收发天线间的距离(单位为 m);该模型为理想模型,要求在传输过程中为视距、无空间、折射、叠加、反射波,这样的传播环境在实际中很难满足。因此,要研究无线信号在不规则松林环境下对无线信号传播的影响,就需要对不同天线高度、不同接收角度以及不同的水平接收距离变化后无线信号接收功率进行测试和分析。得出无线信号在不规则松林环境下不同方向的传播特性。

1.3 试验场及实验方法

由于马尾松在各个方向的排列不同,为了更好地体现自然生长的针叶林环境对无线信号传播特性的影响。选取马尾松林较为中间的位置为发射节点位置,以发射节点为圆心,在水平面内选取 12 个不同的方向、8 个不同的高度、9 个通信半径。分别将收发天线放在高度可调节的三脚架上,发射端放在圆心位置固定不动,接收端放在三脚架上,分别以 1 m、5 m、10 m、15 m、20 m、25 m、30 m、35 m、40 m 为半径,以 30° 为步进,沿逆时针方向在 360° 范围内,测试不同高度、方向和通信半径上的接收功率。收发天线位置示意图如图 1 所示,图中只画出接收半径为 5 m 的示意图。



图 1 433 MHz 无线信号在不规则针叶林中测试方案

Fig. 1 433 MHz Wireless signal test scheme in irregular coniferous forest

本次测试设备及相关参数见表 1。

表 1 实验设备性能参数表

Tab. 1 Performance parameter table of experimental equipment

名称	厂商或性能参数
测试节点/生产商	nRF905/NORDIC 公司
节点工作频率	433.103-433.153 MHz
节点灵敏度	-90 dBm
节点发射功率	0 dBm
天线/增益	全向天线/3 dB
频谱仪/灵敏度	UTS1030/-130 DdBm
可升降三脚架/数量	最高可升高至 1.75m/2 个

测试步骤如下:

- (1) 将收发天线高度调至 0.25 m。
- (2) 移动接收天线, 使收发天线水平距离为 1 m, 接收角度为 0° 的位置上。
- (3) 利用手持式频谱仪测试该位置无线信号的接收功率。
- (4) 沿逆时针方向, 以 30° 为步长, 重复步骤 (3)

进行测试, 完成该接收半径下接收功率的采集。

(5) 以 5 m 为步长, 重复骤 (2) ~ (4) 操作, 完成这一高度下样本点接收功率的采集。

(6) 收发天线高度以 0.25 m 为步长, 重复步骤 (2) ~ (4) 操作, 完成所有样本点接收功率的采集。

2 结果分析

2.1 同一天线高度不同接收角度对无线信号传播特性的影响

在自然生长状态下的不规则针叶林中, 会对无线信号的路径损耗造成不确定的影响。在无线传感网络的仿真实验中常采用概率感知模型, 认为节点的感知半径和通信半径都是一个规则的圆形。但本次研究是以发射节点为圆心, 收发天线高度距地相同时, 以 30° 为步进, 在 360° 圆周内对无线信号进行测试, 结果如图 2 所示。

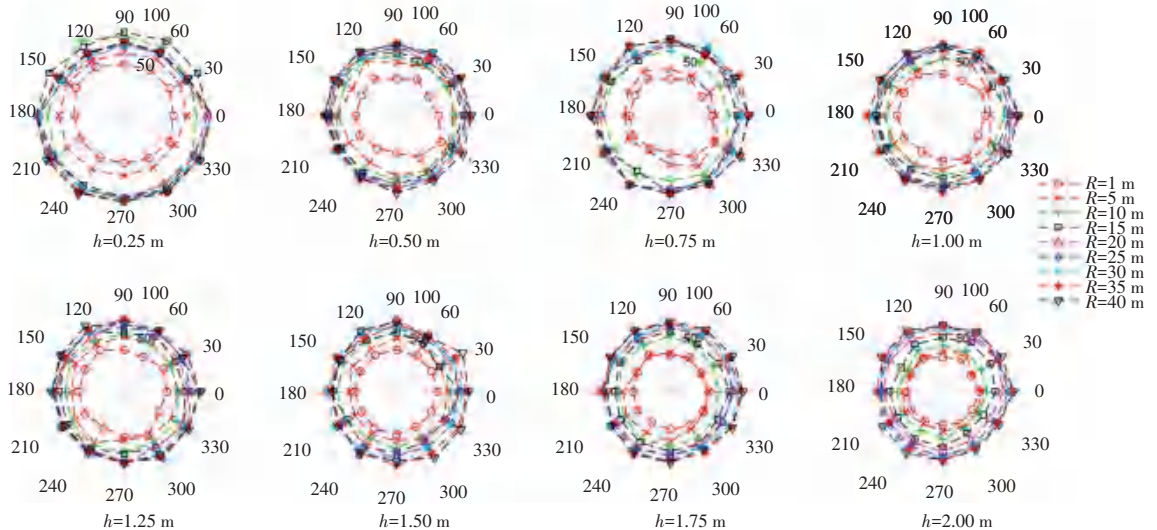


图 2 同一接收高度不同接收角度路径损耗

Fig. 2 Path loss at different receiving angles and the same receiving height

由图 2 可知, 由于树木和灌木丛的分布不规则, 导致无线信号的等通信半径的接收功率封闭曲线并不是一个规则的圆形, 在同一高度下, 不同的接收角度, 路径损耗不同。接收高度为 0.25 m 时, 在 210° ~ 300° 之间, 路径损耗最为严重, 接收距离在 10 m 时已经衰减到 -90 dBm。当高度为 0.5 m 时, 路径损耗在 1 m ~ 5 m 之间较为严重, 因为在这一范围内, 大部分灌木丛叶层主要集中在这高度。在 240° ~ 330° 间, 损耗较为严重, 接收距离在 10 m ~ 15 m 间已经衰减到最低。当高度为 0.75 m 时, 虽然存在不同程度的畸变, 但是畸变程度减小, 在 5 m ~ 10 m 之

间衰减较为严重, 在 270° ~ 300° 之间稍大, 主要是在这一范围内, 部分灌木丛集中在这高度。当 1.0 m < h < 1.75 m 时, 随着天线高度的增加, 在不同高度、不同接收角度依然存在畸变, 因为大多数树木、部分灌木丛叶层在这高度范围内有分布, 但是树木的排列不规则, 导致对无线信号的折射、反射也不规则。在同一接收距离, 不同的接收角度路径损耗并不是一个规则的圆形, 在不同方向上会因为树木及灌木的排列情况和深度不同出现不同程度的畸变。当 h = 2 m 时, 损耗最小, 图形的畸变程度也最小, 此时无线信号的衰减主要受树干的影响。

总之,在野外排列不规则的针叶林中,无线信号在不同的传播方向上接收功率存在着差异,在同一接收半径上,接收功率形成的图形并不是一个规则的圆,在不同的接收半径和不同的接收高度上都存在着不同程度的畸变。随着天线高度的增加,畸变程度减小,当天线高度 $h = 2.0 \text{ m}$ 时,图形畸变程度

最小。

2.2 同一接收角度不同接收天线高度对无线信号传播特性的影响

针叶林中同一接收角度不同接收高度的路径损耗曲线如图3所示。

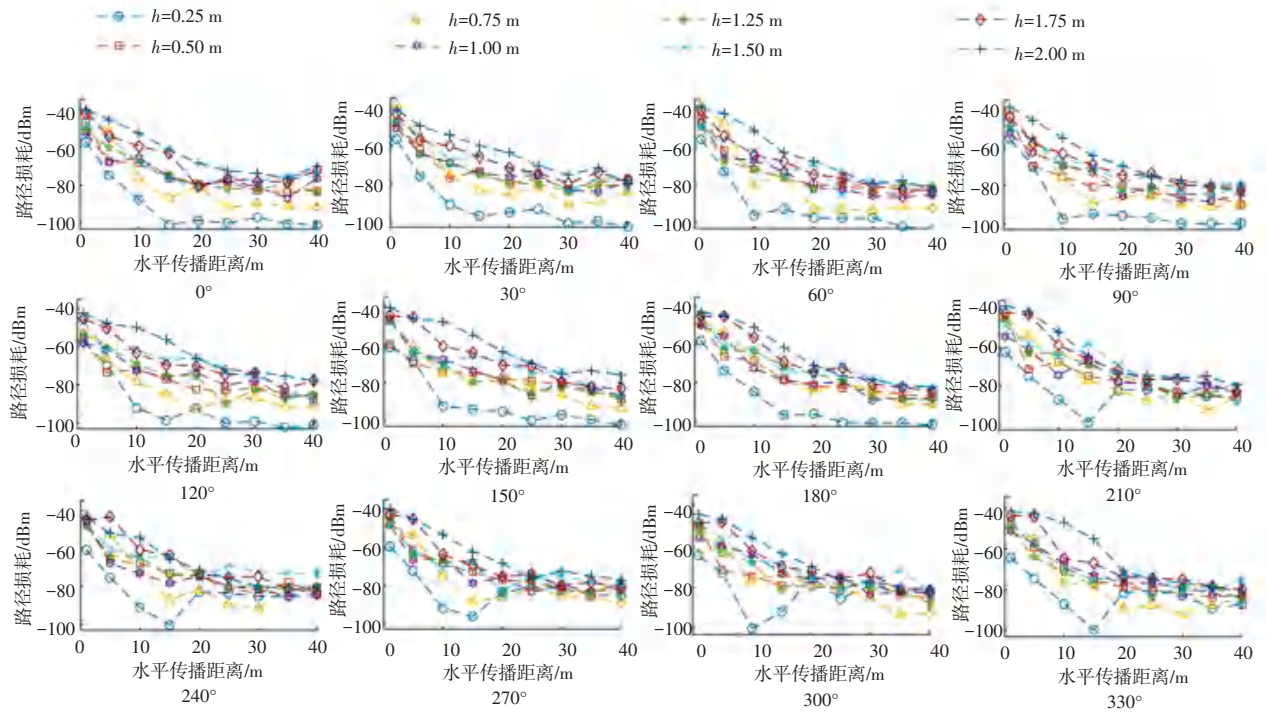


图3 同一接收角度不同接收高度路径损耗

Fig. 3 Path loss at different receiving heights and the same receiving angle

由图3可知,当天线高度 $h = 0.25 \text{ m}$ 时,路径损耗主要受地面和杂草的影响。在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 之间路径损耗趋势基本相同,水平距离在 10 m 附近时接收功率已经衰减到 -90 dBm ,曲线波动较小,在这一角度范围内杂草分布较为均匀。在 $210^\circ \sim 330^\circ$ 度之间,水平传播距离在 $10 \sim 15 \text{ m}$ 之间路径损耗较为严重,曲线波动较大。因为在这个角度范围内,树木、灌木丛比较密集,导致路径损耗较大。当天线高度 $0.25 \text{ m} < h < 2.0 \text{ m}$ 时,路径损耗值随着天线高度的增加有所降低,总体上符合对数衰减模型。总之,在不规则的针叶林中,不同的接收角度上,路径损耗基本符合对数衰减,在不同的天线高度和方向上,路径损耗曲线会存在不同程度的波动。随着天线高度的增加,路径损耗有所减少,当天线高度 $h = 2.0 \text{ m}$ 时,在不同的接收方向上路径损耗、曲线波动都为最小。

2.3 路径损耗模型回归分析

路径损耗是衡量无线信号传播特性优劣的关键

性指标,在不规则的针叶林中,无线信号传输容易受杂草、灌木和树木的影响发生折射、反射和绕射。随着距离的增加,折射、反射和绕射对无线信号传播影响较大。在距离发射端较远处,信号到达接收端时可能经过多次折射、反射和绕射。随着天线高度的增加路径损耗降低,当天线高度高于灌木丛高度后,路径损耗低于有灌木丛阻挡时的路径损耗。在不规则针叶林中对数路径距离损耗模型如公式(3)所示。

$$P_R = A - 10n \cdot \lg d. \quad (3)$$

其中, P_R 为接收机的实际测量值(单位为 dBm); A 为模型参数; n 为与环境有关的路径损耗因子; d 为收发天线间的水平传播距离(单位为 m)。研究表明,在农业和林业环境中,无线信号的衰减都可以用该模型来预测^[12-14]。

用式(3)对无线信号的传播特性进行分析,就需要确定 A 和 n 的值。利用最小二乘法对实测值进

行曲线拟合,相关参数见表 2 ~ 表 4,其中 R^2 为相关系数,是理论计算值和实际测量值之间的相关性指标,其值越接近 1 相关性越高。

各个方向上拟合相关系数 R^2 见表 1, 环境影响因子见表 2,模型参数见表 3。

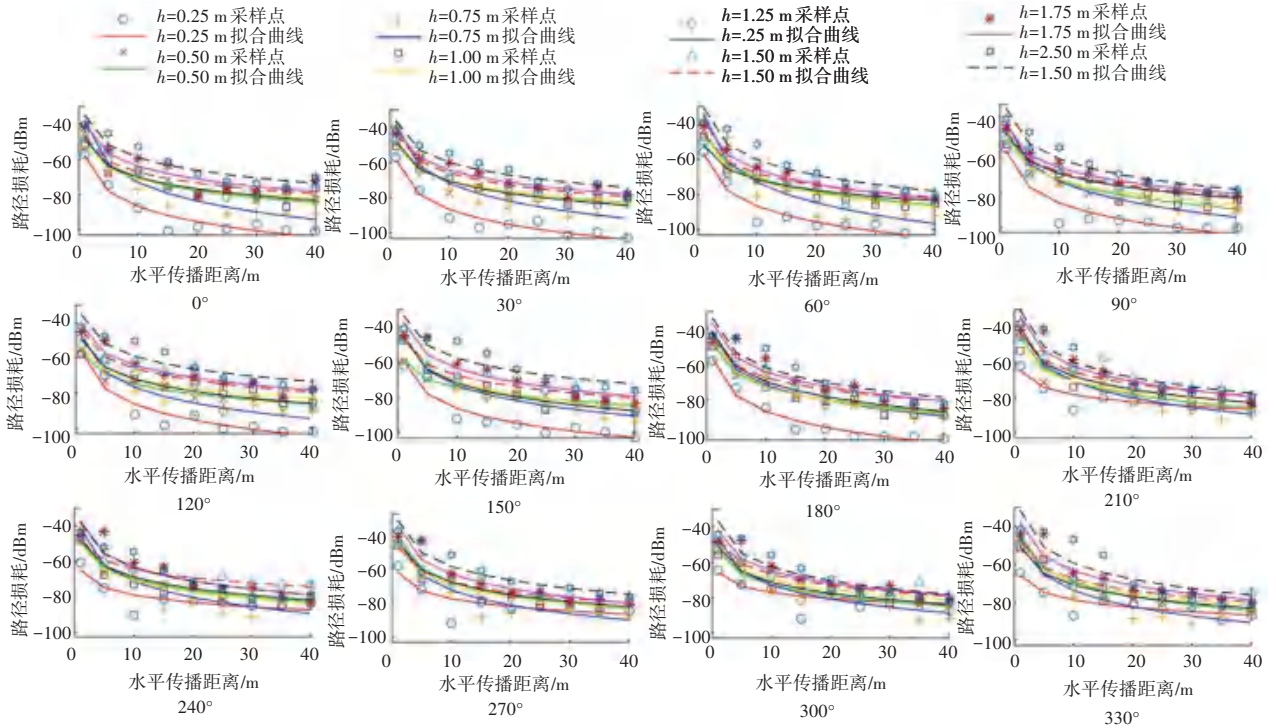


图 4 收发天线高度距地高度相同时不同接收角度路径损耗拟合曲线关系图

Fig. 4 Fitting curve of path loss for different receiving angles at the same height from ground to transceiver antenna

表 2 不同方向及高度相关系数 R^2

Tab. 2 Various directions and high correlation coefficient R^2

角度 R^2 高度	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0
0°	0.929 0	0.968 7	0.920 4	0.870 8	0.944 1	0.826 8	0.854 9	0.875 4
30°	0.952 7	0.897 8	0.930 3	0.951 4	0.973 1	0.910 3	0.950 0	0.891 9
60°	0.934 4	0.982 2	0.887 7	0.963 7	0.939 8	0.847 0	0.865 7	0.865 7
90°	0.893 2	0.965 6	0.938 8	0.914 2	0.913 9	0.915 5	0.978 7	0.920 1
120°	0.917 9	0.945 6	0.945 9	0.871 5	0.881 9	0.839 1	0.915 6	0.826 2
150°	0.905 3	0.932 0	0.955 1	0.943 6	0.981 7	0.864 3	0.862 0	0.816 2
180°	0.967 4	0.981 6	0.913 7	0.924 9	0.935 0	0.924 1	0.838 4	0.818 4
210°	0.810 3	0.934 0	0.924 3	0.869 4	0.910 8	0.787 6	0.879 8	0.872 4
240°	0.706 8	0.951 7	0.865 4	0.932 9	0.963 8	0.911 8	0.841 5	0.892 4
270°	0.759 1	0.992 2	0.852 1	0.912 4	0.883 2	0.892 2	0.900 4	0.890 4
300°	0.743 7	0.914 7	0.911 5	0.865 7	0.903 7	0.910 3	0.855 4	0.862 6
330°	0.778 0	0.985 5	0.873 9	0.949 1	0.936 5	0.925 4	0.881 5	0.774 4

由表 2 可知,在不同方向和高度上,拟合相关系数都存在一定差异,当 $h = 0.25$ m 时,在 $240^\circ \sim 300^\circ$ 之间相关系数较小,主要是因为在此范围内,水平距离为 10~15 m 间灌木和杂草较为密集,无线信号的传播受到绕射、折射和反射的影响较大。当天线高

度为 $0.5 \text{ m} < h < 1.5 \text{ m}$ 时,虽然相关系数在各个方向均不相同,但相对其它高度较大。当天线高度在 $1.75 \text{ m} < h < 2.0 \text{ m}$ 时,相关系数有所减小,因为在这一天线高度范围内,水平传播距离大于 40 m。在同一方向不同天线高度和同一高度不同方向上路径

损耗依然符合对数衰减。

表3 不同方向及高度环境因子 n

Tab. 3 Different directions and higher environmental factor n

角度 n 高度	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0
0°	12.495 4	9.889 2	15.180 8	8.196 4	9.399 9	8.757 7	9.376 5	8.432 1
30°	12.262 4	8.873 9	14.332 3	8.715 7	9.808 3	9.676 8	9.791	8.231
60°	12.941 8	11.241 6	16.923 3	10.951 6	8.668 8	9.771 3	8.804 7	9.804 7
90°	12.900 6	11.540 5	14.640 1	10.025 9	9.993 1	9.935 3	9.519 9	9.46
120°	12.944 1	8.048 9	12.790 1	7.714 1	9.923 8	9.559	10.024 7	8.276
150°	11.891 2	6.922 4	12.376 6	10.562 5	11.274 1	9.129 6	9.384 2	8.517 2
180°	12.996 4	10.583 5	12.716 2	11.612 6	12.161 3	9.527 9	9.921 1	9.163 8
210°	11.918 6	10.797 6	13.417 4	8.503 8	10.767 9	9.648	9.342 3	9.696 3
240°	10.132 3	9.327 2	13.139 7	9.465 2	9.359 4	7.208 8	9.388 8	8.158 3
270°	12.382 1	11.033 8	12.150 6	9.373 2	9.952 0	8.498 1	9.791 8	8.336 5
300°	11.999 2	8.591 7	11.39	8.118 8	8.911 7	8.813 6	9.859 1	8.265 2
330°	10.663 6	10.663 3	12.223 5	9.096 5	8.772 6	8.936 7	8.994 9	8.151 3

由表3可知,在不同的方向和高度上环境影响因子 n 都存在一定的差异,主要是树木和灌木的排列不规律,树高不整齐。 n 值越大,路径损耗越大。当 $h = 0.25$ m 时,此时无线信号主要受到地面、杂草和低矮灌木的折射和反射, n 值较大,路径损耗较为严重。在 $h < 0.75$ m 时, n 值相对于其它高度较

大,主要是在这一高度范围内,灌木分布较多,对无线信号的反射和折射较大,导致无线信号衰减较为严重。当 $h > 1.0$ m 后,随着高度的增加, n 值减小,路径损耗值减小,但是在同一高度不同方向上依然存在差异。

表4 不同高度及接收方向模型参数 A 值

Tab. 4 Model parameters A of different heights and receiving directions

角度 A 高度	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0
0°	-57.13	-46.73	-41.10	-52.19	-50.93	-47.80	-42.24	-40.44
30°	-57.05	-48.24	-38.85	-50.71	-47.23	-46.31	-43.41	-41.27
60°	-56.03	-43.60	-38.18	-47.31	-49.53	-49.75	-41.17	-39.21
90°	-55.32	-43.66	-40.66	-52.78	-49.44	-49.27	-43.91	-38.53
120°	-57.33	-55.22	-45.35	-57.95	-52.97	-47.00	-45.39	-42.43
150°	-61.27	-59.85	-46.99	-47.58	-45.80	-47.48	-44.77	-40.62
180°	-57.74	-48.73	-47.66	-49.75	-44.38	-47.63	-45.36	-43.12
210°	-61.97	-43.30	-44.79	-53.66	-44.53	-47.90	-41.60	-37.96
240°	-60.91	-48.15	-42.69	-46.47	-47.95	-47.41	-45.29	-43.51
270°	-59.61	-42.89	-48.25	-48.04	-45.88	-48.64	-42.69	-39.72
300°	-64.60	-49.79	-50.49	-55.79	-52.87	-48.97	-48.70	-44.33
330°	-64.36	-46.38	-48.86	-51.62	-50.63	-47.29	-43.93	-41.67

由表4可知,当天线高度为 $h = 0.25$ m 时,模型参数较小,主要是受到地面、杂草和灌木多种因素影响。随着高度增加,模型参数 A 值增加,但是在同一高度不同方向上依然存在差异。

3 结束语

本文研究了 433 MHz 无线信号在不规则针叶林中传播特性,分析了传播方向对无线信号的影响,通过实地测试和对数据回归分析,得出如下结论:

(1) 在排列不规则的针叶林中,同一天线高度,

不同的接收角度上,433 MHz 无线信号路径损耗符合对数衰减模型。

(2)天线高度一定时,在同一接收半径上,接收功率形成的封闭曲线并不是一个标准的圆,不同方向上存在差异,图形存在不同程度的畸变。

(3)在同一接收角度不同的接收高度,路径损耗均符合对数衰减。在同一接收角度上,随着高度增加路径损耗减小。

(4)当天线高度 $h = 2.0$ m 时,路径损耗最小,图形的畸变程度最小。

为减少底层复杂环境和接收方向对无线信号传播特性的影响。在排列不规则针叶林中部署无线传感器网络节点时,节点高度应高于灌木高度。

参考文献

- [1] Kodali, Ravi Kishore, Soratkal, Sreerama. Trust modle for WSN [C]. 1st International conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology, 2015: 903-906.
- [2] SHEN J, MOLISHCH A F. Indirect path detection based on wireless propagation measurements [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(12): 4482-4493.
- [3] LU Jing, LU Dianjie, HUANG Xiaoxia. Channel Model for Wireless sensor networks in Forest Scenario [C]. IEEE 2010 2nd International Asia conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, 2010: 476-479.
- [4] 卢书海,刘帅,李建军,等. 物联网关键技术及其在林业中的应用[J]. 中南林业科技大学学报,2012,32(11):181-185.
- [5] 冯鹏飞,于新文,张旭. 北京地区不同植被类型空气负离子浓度及其影响因素分析[J]. 生态环境学报,2015,24(5):818-824.
- [6] 冯鹏飞,于新文,张旭. 不同频率无线信道在针叶林中的传播特性[J]. 福建农林大学学报(自然科学版),2016,45(6):713-718.
- [7] 刘海洋,于新文,张旭,等. 无线信号在针叶林中的传播性质[J]. 林业工程学报,2016.1(3):127-132.
- [8] 郭秀明,赵春江,杨信廷,等. 苹果园中 2.4GHz 无线信道在不同高度的传播特性[J]. 农业工程学报,2012,28(12):195-200.
- [9] 文韬,洪添胜,李震,等. 橘园无线传感网络不同节点部署方式下的射频信号传播实验[J]. 农业工程学报,2010,21(6):211-215.
- [10] 周建军,王秀,李素,等. 番茄连栋温室内无线信号传播特性[J]. 江苏农业科学,2018,46(2):170-173.
- [11] 李萍萍,彭玉礼,王纪章. 温室青椒中 2.4GHz 无线信号传播特性研究[J]. 农业机械学报,2014,45(2):251-255.
- [12] MOHAMMED S. Al-Basheir, Raed M. Shubair, Sami M. Sharif. Measurements and analysis for signal attenuation through date palm trees at 2.1 GHz frequency [J]. Sudan Engineering Society Journal, 2004, 52(45): 17-22.
- [13] PARSONS J D. The Mobile Radio Propagation Channel [M]. Chichester, U.K: Wiley, 1996.
- [14] Joaquim A. R. Azevedo, Filipe E. S. Santos. An empirical propagation model for forest environments at tree trunk level [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 56(6): 2357-2367.

(上接第 170 页)

- [5] LV Yisheng, DUAN Yanjie, KANG Wenwen, et al. Traffic flow prediction with big data: a deep learning approach [J]. IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(2): 865-873.
- [6] HUANG W, SONG G, HONG H, et al. Deep architecture for trafficflow prediction: Deep belief networks with multitask learning [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 5(15):2191-2201.
- [7] FU R, ZHANG Z, LI L. Using lstm and gru neural network methods for traffic flow prediction [J]. Youth Academic Conference of Chinese Association of Automation, 2017,324-328.
- [8] FENG X, GUO J, QIN B et al. 2017. Effective deep memory networks for distant supervised relation extraction. In International Joint Conference on Artificial Intelligence, 19-25.
- [9] SIMONOVSKY M, KOMODAKIS N. Dynamic edge-conditioned filters in convolutional neural networks on graphs. In: Proc. of the CVPR. 2017. 29-38.
- [10] DEFFERRARD M, BRESSON X, VANDERGHEYNST P. Convolutional neural networks on graphs with fast localized spectral filtering. In: Proc. of the NIPS. 2016, 3844-3852.
- [11] XU X Y, LIU J, LI H Y, et al. Analysis of subway station capacity with the use of queueing theory [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 38:28-43.
- [12] ZHANG J P, WANG F Y, WANG K F, et al. Data-driven intelligent transportation systems: A survey. IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, 2011,12(4):1624-1639.
- [13] WILLIAMS BM, HOEL LA. Modeling and forecasting vehicular traffic flow as a seasonal arima process: Theoretical basis and empirical results. Journal of Transportation Engineering, 2003,129(6):664-672.
- [14] VAN LINT H, VAN HINSBERGEN C. Short-term traffic and travel time prediction models. Transportation Research E-circular, 2012, 22(1):22-41.
- [15] WILLIAMS B M, HOEL L. A. 2003. Modeling and forecasting vehicular trafficflow as a seasonal ARIMA process: Theoretical basis and empirical results. Journal of transportation engineering 129(6):664-672.