



变电站内 2.4 GHz 无线信道路径损耗建模

李强¹, 张洪欣¹, 罗佳祺¹, 陆阳², 李建岐², 吕英华¹

(1. 北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876;

2. 全球能源互联网研究院, 北京 102209)

摘要: 为了评估变电站内电磁干扰对电力通信系统的干扰, 采用频域测量方法对某市 110 kV 变电站、220 kV 变电站的 2.4 GHz 电磁波路径损耗进行了测量和分析。针对测量数据, 分别利用最小均方差和累积法对路径损耗模型中路径损耗指数和标准差相关参数进行估计, 并建立了路径损耗模型, 仿真结果表明, 模型估计结果与测量值相差不大。另外, 搭建了 ZigBee 仿真系统, 在信噪比为 5 dB 和 10 dB 的情况下, 仿真出误码率随距离的变化关系, 为通信设备布置在变电站环境中提供了研究依据。

关键词: 短距离无线通信; ZigBee; 变电站; 路径损耗模型; 最小均方差; 累积法; 信噪比; 误码率

中图分类号: TN925

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016195

Modeling of the 2.4 GHz wireless channel path loss in substation

LI Qiang¹, ZHANG Hongxin¹, LUO Jiaqi¹, LU Yang², LI Jianqi², LV Yinghua¹

1. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

2. Global Energy Interconnection Research Institute, Beijing 102209, China

Abstract: In order to assess the influence of electromagnetic interference in the substation of the electric power communication system, frequency measurement method was adopted to obtain the data of 2.4 GHz electromagnetic wave path loss of the substation of 110 kV and 220 kV in a certain city. By using the method of minimum mean square error (MMSE) and cumulative sum (CUSUM) to estimate the parameters of path loss model such as path loss index and the standard deviation, the path loss model was set up according to measured data, respectively. The simulation results show that the gap between estimation results and the measured values is not big. In addition, a ZigBee simulation system was constructed to simulate the relationship of bit error rate (BER) varies with distance in two cases of the signal to noise ratio (SNR) at 5 dB and 10 dB respectively. A research basis for short distance wireless communication devices decorated in the substation environment was provided.

Key words: short distance wireless communication, ZigBee, substation, path loss model, minimum mean square error, cumulative sum, signal to noise ratio, bit error rate

收稿日期: 2016-04-11; 修回日期: 2016-07-08

基金项目: 国家电网公司科技项目“电力复杂电磁环境下高可靠短距离无线通信关键技术研究”(No.SGRIXTKJ [2015]-796); 国家自然科学基金资助项目 (No.61571063)

Foundation Items: State Grid Corporation of China (SGCC): Research on Key Technologies of High Reliability and Short Distance Wireless Communication in Power Complex Electromagnetic Environment (No.SGRIXTKJ [2015]-796), The National Natural Science Foundation of China (No.61571063)

1 引言

随着我国社会经济的发展,用电量不断增长,电网规模不断扩大,用户对电力供应质量的要求越来越高,电力发展面临着巨大的挑战^[1]。我国电力行业紧随欧美发达国家和地区电网智能化的发展趋势,着力技术创新,在智能电网发展模式、基础理论、技术体系以及智能设备等方面开展了大量的研究和探索工作。

智能电网的实现,首先要解决的是电网中各个环节重要运行参数的在线监测和实时信息提取问题,无线传感器网络作为智能信息感知的末端,已成为推动智能电网发展的重要技术手段^[2]。

然而变电站内电磁环境复杂,高压变电站在运行时会产生电磁干扰^[3,4],无线传感单元放置在变电站中将受到不同程度电磁干扰的影响,这种影响会使通信出现误码或者分组丢失现象^[5],严重时会造成通信的中断。2.4 GHz 作为无线传感网络广泛使用的频段,目前在电力系统复杂电磁环境的应用中尚缺乏有效的评估模型和分析手段。在对变电站内电磁波路径损耗进行测量和分析的基础上,提出并建立了针对 2.4 GHz 的无线通信路径损耗模型。

2 无线信道测量方案

无线信道的测量方式主要可以分为直接脉冲测量、扩频滑动相关器测量和频域测量^[6]。本文的研究采用了频域测量法。

2.1 直接脉冲测量

直接脉冲测量是一种简易的时域信道测量方法,该方法能够快捷地测量出信道的功率延迟分布。原理是用一个宽带脉冲型双静态雷达,重复发射相同宽度的脉冲,接收端用一个带通滤波器接收信号,利用包络检波器检测信号后进行放大,并显示和存储在数字高速示波器上。其缺点是对发射源和接收端同步的要求较高。

2.2 扩频滑动相关器测量

扩频信道检测系统的优点是尽管所探测的信号为宽带信号,接收机可以用一个宽带混频器加一个窄带接收机来检测发送信号。与直接脉冲系统相比,该系统可以有效滤除边带噪声,提高了系统的动态范围,从而在相同的发射功率下扩大了测试系统的覆盖范围。缺点是电路实现技术比较复杂,对同步的要求很高。

2.3 频域测量

频域测量技术,通常采用矢量网络分析仪对信道环境进行逐个频点的扫频测量,通过频域扫频的方式,可以得到全频带的频域响应,其特点是简单易行。采用信号源和频谱仪在频域对变电站内主要设备附近信号的接收功率进行了测量。

首先选择某市 110 kV 和 220 kV 的变电站进行测量,以 220 kV 变电站为例,其环境分布主要由开关区、变压器区、电容器区、通信室和主控室组成,其中,变压器区是主要敏感区域,部署 1 号、2 号、3 号变压器。测试点布局如图 1 所示。

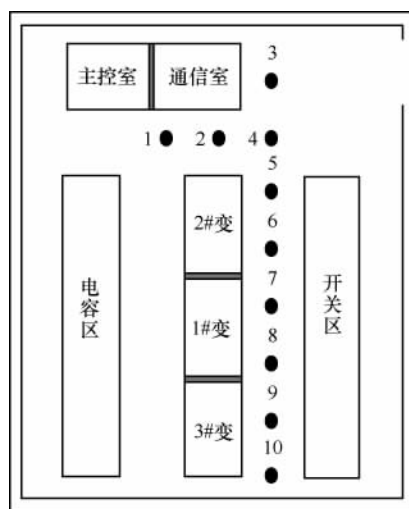


图 1 220 kV 变电站测量布局

在测量过程中,发射设备放置在变电站的通信室内,位置固定不变,接收设备放置在变电站内主要敏感设备附近。发射设备由信号源和发射天线组成,信号源采用 AV1441A 射频信号发生器,发射功率设为 0 dBm,发射天线采用 2.4 GHz 单极子天线,接收设备由是德科技公司的频谱分析仪 N1996A 和接收天线组成,检波方式采用峰值检波,RBW (resolution bandwidth) 设为 10 kHz,VBW(video bandwidth) 设为 100 kHz,接收天线使用 Ainfoinc 公司生产的对数周期天线,型号为 DS-3300。带宽覆盖范围为 30 MHz~3 GHz。

3 信道模型

基于电波传播模型^[7],接收信号的功率随距离对数衰减,这种模型被称为对数距离路径损耗模型^[8],该损耗模型计算式如下:



$$PL(d)=PL(d_0)+10n\lg\left(\frac{d}{d_0}\right)+X_\sigma \quad (1)$$

其中, n 为路径损耗指数, 表明路径损耗随距离增长的速率, 它与周围的环境和建筑物类型有关; X_σ 是均值为 0、标准差为 σ 的高斯随机变量, 用来修正估计值与测量值之间的误差; $PL(d)$ 为发射端到接收端的路径损耗, 单位为 dB; d 是收发天线之间的距离; d_0 为发射天线距离参考点的距离; $PL(d_0)$ 为参考点损耗值。 $PL(d_0)$ 除了可以利用实地测试得到之外, 还可以用自由空间损耗公式来确定^[9], 公式如下:

$$PL(d_0)=20\lg\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right) \quad (2)$$

其中, $\lambda=c/f$, 即电磁波的波长 λ 等于光速 c 除以频率 f 。

设 P_t 是发射功率, P_r 为接收功率, $P(d_0)$ 为参考点接收功率, 则有:

$$P_r(d)=P_t-PL(d)=P_t-PL(d_0)-10n\lg\left(\frac{d}{d_0}\right)-X_\sigma \quad (3)$$

设参考点的接收功率 $P_r(d)-PL(d_0)=P(d_0)$, 得:

$$P_r(d)=P(d_0)-10n\lg\left(\frac{d}{d_0}\right)-X_\sigma \quad (4)$$

4 参数估计法

在对数距离路径损耗模型中的损耗指数 n 和标准差 σ , 这两个参数不能通过仪器直接测量得到, 通常需要用参数估计法, 利用测量数据进行计算而得出^[10], 常用的参数估计法有线性回归预测法^[11]、最小均方差^[9]、最大似然估计法^[12]、矩估计^[13]和累积法^[14], 本文采用最小均方差和累积法计算路径损耗指数 n 和标准差 σ , 并建立路径损耗模型, 对结果进行比较。

4.1 最小均方差

最小均方差是利用测量值和估计值的均方差最小来计算路径损耗 n 的值。设测量值和估计值的方差和为 $J(n)$, 则:

$$J(n)=\sum_{i=1}^k [P_{r-\text{meas}}(i)-P_{r-\text{est}}(i,n)] \quad (5)$$

其中, $P_{r-\text{meas}}$ 是接收功率测试值, $P_{r-\text{est}}$ 为接收功率估计值。令式(5)的微分等于零, 即:

$$\frac{dJ(n)}{dn}=0 \quad (6)$$

解方程求出 $n=n_0$, 则均方差为:

$$\sigma^2=\frac{J(n_0)}{k} \quad (7)$$

标准差为:

$$\sigma=\sqrt{\frac{J(n_0)}{k}} \quad (8)$$

4.2 累积法

累积法的概念是由意大利数学家 Marchsi P 在 1778 年提出^[15,16]。我国学者曹定爱进一步推出了累积算子的各阶通式, 简化了累积法的计算。其基本原理如下。

给定序列 $\{x_i; i=1, 2, \dots, n\}$, 累积和的计算公式为:

$$\sum_{i=1}^n {}^{(1)}x_i = x_1 + x_2 + \dots + x_n = \sum_{i=1}^n x_i \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n {}^{(2)}x_i = x_1 + (x_1 + x_2) + (x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n {}^{(1)}x_j \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n {}^{(k)}x_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n {}^{(k-1)}x_j \quad (11)$$

式(9)、式(10)、式(11)分别是序列 $\{x_i; i=1, 2, \dots, n\}$ 的一阶、二阶和 k 阶累积算子, 本文利用二阶累积算子来求解路径损耗指数。根据式(4)的模型, 可以得到一阶、二阶累积和算子如下:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n {}^{(1)}P_r(d_i) = P(d_0) \times \sum_{i=1}^n i - 10n \times \sum_{i=1}^n \lg\left(\frac{d_i}{d_0}\right) \\ \sum_{i=1}^n {}^{(2)}P_r(d_i) = P(d_0) \times \sum_{i=1}^n {}^{(2)}i - 10n \times \sum_{i=1}^n \lg\left(\frac{d_i}{d_0}\right) \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{令 } X = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n {}^{(1)}i & \sum_{i=1}^n \lg\left(\frac{d_i}{d_0}\right) \\ \sum_{i=1}^n {}^{(2)}i & \sum_{i=1}^n \lg\left(\frac{d_i}{d_0}\right) \end{bmatrix}, \text{ 则 } Y = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n {}^{(1)}P_r(d_i) \\ \sum_{i=1}^n {}^{(2)}P_r(d_i) \end{bmatrix},$$

$A = \begin{bmatrix} P(d_0) \\ 10n \end{bmatrix}$, 当 $\det(X)$ 不等于零时, 可得: $A = X^{-1}Y$, 即可求出路径损耗指数 n 的值。

5 数值结果与分析

本文信道模型所用的数据在某变电站内测量得到, 测量数据见表 1。

把表 1 的数据分别带入最小均方差和累积法的计算过程中得到路径损耗指数 n 和标准差 σ , 见表 2。

在自由空间中, 通常取路径损耗指数等于 2, 通过对实际测量数据的分析和研究表明, 在变电站内这种特殊环境下, 电磁波的路径损耗有可能小于自由空间的损耗指数。这种现象主要是电磁波的同相叠加导致。

表 1 变电站测量数据

距离/m	110 kV 接收功率/dBm	220 kV 接收功率/dBm
3	-67.94	-48.56
6	-70.88	-61.17
9	-75.41	-70.38
12	-77.75	-73.56
15	-79.01	-80.09
18	-80.59	-84.95
21	-82.16	-89.09
24	-83.54	-92.12
27	-84.96	-94.56
30	-86.51	-97.12

表 2 变电站损耗指数参数结果

变电站	估计方法	路径损耗 n	标准差 σ
110 kV 变电站	最小均方差	0.79	1.37
	累积法	0.92	2.08
220 kV 变电站	最小均方差	2.23	1.98
	累积法	2.35	2.13

将以上两种方法计算得到的路径损耗指数 n 和标准差 σ 带入路径损耗模型式(1)中,路径损耗曲线和测量数据离散点的对比如图 2、图 3 所示。

从图 2 和图 3 所示的曲线中可以看出,最小均方差和累积法算出的路径损耗,随着距离的增加,差距越来越明显。尤其在 110 kV 变电站内,距发射点 30 m 处,最小均方差和累积法相差 3.7 dB。总体来说,两个算法求出的路径损耗相差不大。

在通信的过程中,接收信号会随着传输距离的增加而发生变化,信噪比也会随之发生改变,从而影响误码率的

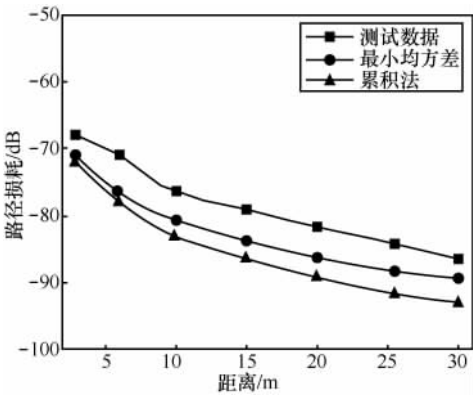


图 2 110 kV 变电站测量数据与回归曲线比较

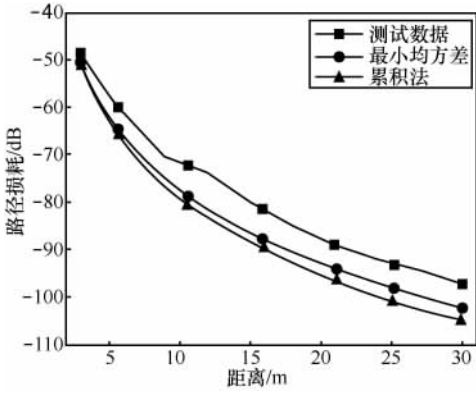


图 3 220 kV 变电站测量数据与回归曲线比较

变化。本文搭建 ZigBee 仿真系统,以发射功率为 0 dBm,初始信噪比分别设为 $SNR=5$ dB 和 10 dB,在这两种情况下,保持其背景白噪声不变。仿真出误码率与传输距离的关系曲线如图 4 所示。

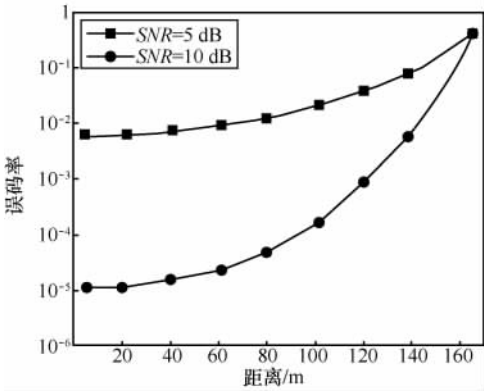


图 4 误码率随距离的变化

可以看出,在理想信道条件下,系统误码率会随着信号传输距离的增加而急剧增加。对比初始信噪比分别为 5 dB 和 10 dB 两种情况下,信噪比越大,通信质量越好。在实际中可以引申为,发射信号功率越大,传输距离越远。但增加发射功率对系统能耗要求将变高,工程成本将会提高。而且由图 4 中两条曲线对比可看出,当超出一定距离界限时,发射信号功率的提高对通信质量的提升并不明显。

6 结束语

在短距离无线通信的组网过程中,无线通信性能受到多种因素的影响,然而变电站内电磁环境复杂,要将短距离无线通信设备布置在变电站内,建立路径损耗模型,估算覆盖范围,评估通信系统的性能非常重要。



采用频域测量方法对某市 110 kV、220 kV 变电站进行了 2.4 GHz 频率的测量,并利用测量数据建立了路径损耗模型,在建模的过程中采用最小均方差和累积法对路径损耗指数和标准差进行估计,结果表明随着距离的增加,模型与测量值会有一定的误差,但只要在可接受的范围内,模型具有一定的预测意义。

另外,在 110 kV 变电站的路径损耗模型的建模中,出现路径损耗指数小于自由空间损耗指数的值,很大程度上是由于变电站内,地形地貌、建筑物类型以及一次二次设备所引起的电磁波同相叠加所导致的结果,这种特性为特定环境、具体的变电站、短距离无线通信覆盖规划提供了研究依据和指导方向。

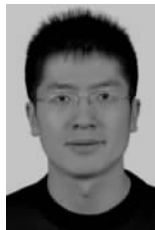
参考文献:

- [1] 李彦旭. 基于 ZigBee 的无线通信模块射频电磁场抗干扰性能研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2012: 1.
LI Y X. Research on anti-disturbance performance of ZigBee wireless communication module under radio frequency electromagnetic field[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2012: 1.
- [2] 陈超群. 无线传感网络在智能变电站中的应用研究[D]. 昆明: 云南大学, 2013: 4.
CHEN C Q. The application study of wireless sensor network in intelligent substation[D]. Kunming: Yunnan University, 2013: 4.
- [3] 嵇建飞, 杨逸飞, 袁宇波, 等. 智能变电站就地智能设备电磁兼容抗扰度试验分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 998-1007.
JI J F, YANG Y F, YUAN Y B, et al. Experimental analysis of EMC immunity for field installed intelligent equipment of intelligent substation[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 998-1007.
- [4] 黄益庄. 变电站智能电子设备的电磁兼容技术[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(15): 6-9.
HUANG Y Z. EMC technology for IED in substations[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(15): 6-9.
- [5] 李继琨. 物联网无线温度传感单元在变电站中的电磁兼容性研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2012: 1.
LI J K. Research on the electromagnetic compatibility of wireless sensor temperature unit of the internet of things in substation [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2012: 1.
- [6] RAPPAPORT T S. Wireless communications: principles and practice second edition[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2013: 131.
- [7] 扈罗全, CHEN Y F, 陆全荣等. 一种新的无线电波传播路径损耗模型[J]. 中国电子科学研究院学报, 2008(1): 40-43.
HU L Q, CHEN Y F, LU Q R. Novel path loss model for propagation of radio waves [J]. Journal of CAET, 2008 (1): 40-43.
- [8] PHAIBOON S, PHOKHARATKUL P, SOMKUARNPANIT 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.
- [9] 岳恭平. 基于 MMSE 法的室内通道无线损耗研究[J]. 信息传输与接入技术, 2009, 35(2): 31-33.
YUE G P. Study on path loss of wireless signaling in indoor streets based on MMSE [J]. Information Transmission and Access Technology, 2009, 35(2): 31-33.
- [10] CUI Y N, WANG G T, YANG R H, et al. Study on the estimation of the path loss exponent and standard deviation based on cumulative-sum method [C]//The 15th Conference on the Wireless Across the Taiwan Straits, September 12-17, 2010, Kunming, China. New Jersey: IEEE Press, 2010: 198-202.
- [11] 何一, 王永生, 张亚妮, 等. 超宽带室外信道路径损耗统计模型分析[J]. 导弹与制导学报, 2008, 28(4): 1-4.
HE Y, WANG Y S, ZHANG Y N, et al. A statistical path loss model for UWB outdoor channel[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2008, 28(4): 1-4.
- [12] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计 (第三版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 180-185, 294-303.
SHENG Z, XIE S Q, PAN C Y. Probability and mathematical statistics(3rd edition)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001: 180-185, 294-303.
- [13] 崔燕妮, 张兴辉, 杨荣光, 等. 基于对数距离路径损耗模型下的路径损耗指数研究[C]//全国第十三届微波集成电路与移动通信学术会议, 10月 15-19 日, 2012, 杭州, 中国. [S.l.:s.n.], 2010: 267-271.
CUI Y N, ZHANG X H, YANG R G, et al. Research on path loss index based on log distance path loss model [C]//The Thirteenth National Conference on Microwave Integrated Circuits and Mobile Communication, October 15-19, 2010, Hangzhou, China. [S.l.:s.n.], 2010: 267-271.
- [14] 曹定爱. 累积法理论[M]. 北京: 科学社会出版社, 2011.
CAO D A. Cumulation method theory [M]. Beijing: Science and Society Press, 2011.
- [15] 石照耀, 谢华鲲, 费业泰. 累积法的基本原理及其在测量数据中的应用[J]. 光学精密工程, 2000, 8(1): 87-88.
SHI Z Y, XIE H K, FEI Y T. The basic principle of cumulation method and its application in measurement data [J]. Optical Precision Engineering, 2000, 8(1): 87-88.
- [16] 陈国强, 黄俊杰. 普通累积法的实现方法研究[J]. 现代计算机, 2008(279): 26-27.
CHEN G Q, HUANG J J. Research on the realization method of common cumulation method [J]. Modern Computer, 2008 (279): 26-27.

[作者简介]



李强(1985-),男,北京邮电大学电子工程学院博士生,主要研究方向为无线通信与信号处理、电磁兼容与微波技术。



陆阳(1984-),男,博士,全球能源互联网研究院工程师,主要从事电力通信新技术研究工作。



张洪欣(1969-),男,北京邮电大学电子工程学院教授、博士生导师,宽带通信与微波技术中心主任,主要研究方向为无线通信与电磁兼容、通信信号处理、电磁辐射信息安全、生物电子等。



李建岐(1969-),男,全球能源互联网研究院教授级高级工程师,主要从事电力通信新技术研究及应用研发工作。



罗佳祺(1990-),男,北京邮电大学硕士生,主要研究方向为无线通信。



吕英华(1944-),男,北京邮电大学教授、博士生导师,主要研究方向为计算电磁学、电磁兼容、生物医电工程、天线和电磁散射、计算机信息技术等。