变电站无线通信模型研究及应用分析

随着智能电网的快速发展和全面部署，电力系统通信网络结构也发生了变化，除了传统的电力通信方式外，新的通信方式也在逐步推广。原有的光纤通信对带宽需求更加迫切，骨干网通信容量持续提升，输电线路在线监测系统、配电网自动化系统、电网应急指挥系统和输电线路监测等业务，对无线通信的需求非常迫切。对电力系统无线通信传输中的信道模型进行研究，通过现场数据收集和试验模拟，改进了适合电力系统智能变电站内适用的信道模型，为无线通信系统的数据传输和智能电网的无线通信部署提供技术支撑。

卞宝银　李秀彩　黄　鑫/国网电力科学研究院

卞宝银/工程师

关键词/Keywords
电力系统·
智能变电站·
信道模型·
无线通信·

无线通信系统的性能主要由无线通信环境决定。与传统的有线信道静态和可预测的典型特点相反，无线信道是动态且不可预测的，增加了对无线通信系统进行准确分析的难度。近几年，随着无线通信业务和新兴宽带移动互联网接入业务的快速增长，以及无线通信方式在电力系统的大量应用，对无线通信系统的优化变得至关重要。本文对无线通信在电力系统中的应用作了简要介绍，并对无线通信的信道模型进行了研究，分析了目前国际及国内无线通道模型的技术原理及研究现状，最后结合电力系统现场测试，并对现有模型进行修正测试。在电力系统具体的实际应用中，对无线信道进行深入理解，能够设计出更加高效的无线通信部署方式，提高无线通信应用的效率和质量。

国家电力自动化工程技术开发 （2009FU115Z17）。

电力系统无线通信应用

1. 无线公网通信

（1）GPRS

GPRS（General Packet Radio Service）是封包交换数据的标准技术，是一种基于GSM 系统的无线分组交换技术，与GSM（Global System for Mobile Communication）网络配合，传输速度可以达到115 Kbit/s，适用于频繁传送小数据量和非频繁传送大量数据的应用。目前，GPRS在我国配电网中的适用范围为无线抄表系统、无功补偿系统和负荷控制系统，如城乡结合部、郊区线路设备以及动作时间要求不高且不需瞬间动作配合的终端等。

（2）3G

3G（3rd Generation）是下一代移动通信系统的通称。3G技术的主要优点是能极大地增加系统容量、提高通信质量和数据传输速率，目前在电力系统应用中主要作为GPRS的替代技术。

2. 无线专网通信

（1）McWiLL（Multi-carrier Wireless information Local Loop）多载波无线信息本地环路

McWiLL是在现有大规模商用的窄带SCDMA（Synchronous Code Division Multiple Access）技术的基础上，国内自主研发的集智能天线、CS－OFDMA、信道跟踪和预测等核心技术的宽带无线通信系统。

图1为电力系统配电网McWiLL的典型应用图，该系统能够接入目前的IP网

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

络，包括电力系统内网。基站属于网络侧部分设备，它保持同终端的通信，终端同时保持与基站和下层设备的通信。主站系统主要是配置和监控系统的基站和终端。

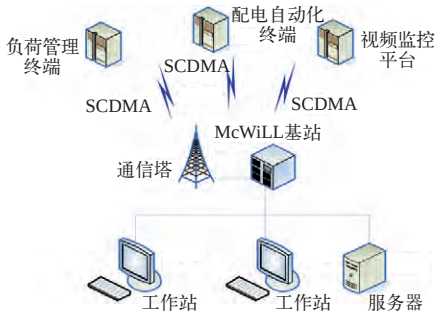

图1 McWiLL应用系统结构

（2）LTE（Long Term Evolution）长期演进计划

LTE是3GPP（3rd Generation Partnership Project）标准化组织制定的4G无线通信技术标准，下行传输速率可达到100 Mbit/s、上行传输速率为50 Mbit/s，并且提供从1.5～20 MHz的动态频谱分配技术，频谱效率提升到当前3G系统的2～4倍。近年来，国内外科研机构及相关企业已开始针对配电网接入层通信系统建设开展研究。国际标准化组织3GPP，3GPP2已成立工作组对LTE技术在智能电网中的应用开始标准化工作，同时，国家电网公司也已开始基于TD－LTE技术构建电力无线宽带通信系统应用示范网。LTE技术的引入可以有效解决电力通信“骨干网强，接入网弱”的态势，其扁平化的网络架构可以简化配电网结构、减小配电网管理成本以及降低网络运营复杂度；同时，LTE高的数据传输性能和网络容量可以有效提高支撑用户信息采集系统的接入层通信网络系统的性能，进一步提升电网的智能化能力。

（3）230 MHz数传电台

230 MHz数传电台使用国家无线电管理委员于1991年分配给电力专用的无线频点（包括15个双频频点和10个单频频点），相邻频点间隔为50～150 kHz，带宽为25 kHz。230 MHz电台采用点对点通信方式，响应速度快，通信时延短，技术成熟并具有建网成本低、组网灵活和单站覆盖范围广的优势，但也存在传输速率低等不足。

无线通信信道模型研究

由于地理环境的复杂性、无线设备的移动性、无线传输频率波长的差异性以及无线信号传播的不确定性，在无线通信系统的设计和建造时，就要考虑无线信号系统整个接收点的场强和数据传输速率，尽量减少和避开环境干扰，保证通信的最佳方式。但是，无线通信环境完整的特性描述是不可能实现的，所以就需要利用某种特定的信道模型，而这种信道模型可以表示某种给定环境下典型的或平均的信道情况。目前国内外对无线信道模型做了大量研究，国内这一部分研究还没有完成理论到实际的应用，目前比较成熟的模型主要有自由空间传播模型、Okumura/Hata模型、时间色散衰落与频率色散衰落模型、室内信道模型、IEEE 802.11信道模型和Saleh－Velenzuela模型[3]。

智能变电站无线通信应用模型研究

1. 智能变电站无线信道环境及干扰分析

目前，无线通信技术已经在变电站之间和变电站内部大量应用，很多方面替代了原有的有线技术。在复杂环境中、在无法铺设有线的情况下，无线通信方式将会大量部署。无线信道与有线信道最大的不同在于无线信道具有多径传播的特性，而有线信道则是沿着特定的媒质从单一路径传播。在无线信道中，由于终端设备的运动及周围环境中物体的运动，信号会产生多普勒频移，致使无线信道对信号产生的影响随时间发生变化。正是由于无线信道的这些特性，无线通信系统中必须加入对抗多径衰落的技术，增大了无线通信系统的复杂度。无线信道是整个变电站无线通信中重要的研究部分。其无线通信系统中的很多技术都是围绕着无线信道的特点来设计的。无线信道是整个无线通信中的研究热点。

在实际的工程应用中，变电站系统中无线通信所处的环境复杂，室内存在大量二次设备及机柜，室外存在变压器及杆塔等大型户外设备，对

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

无线的传输均产生影响，往往需要了解周围的信道环境，进而对系统的设计提供参考和帮助。这就需要对无线信道进行测量，对无线信道的多径时延和其他一些参数进行估计。信道测量方法主要包括直接射频脉冲测量、扩频滑动相关信道测量和基于扫频方式的频域信道测量。其中最为常用的是扩频滑动相关信道测量法，但是这种方法的准确度受到码片间隔的限制，只能测量相对时延间隔大于2个码片间隔的信道，如果相对时延小于2个码片间隔，则测量结果将出现错误。在这种情况下，如果想要提高测量的准确度，其方法就是在扩频相关测量的结果中加入多径时延估计算法，从而提高系统的时延分辨率。

对于多径时延估计算法，最简单的就是使用伪随机序列来进行时延估计。但是这种方法的分辨率受到码片间隔的限制。因而很多学者提出了一些高分辨率的时延估计算法。Ralph O. Schmidt提出了用于信号参数估计的MUSIC（The Multiple Signal Classification）算法[5]。南洋理工的Yuan Zhou等人提出了一种比较简单的MPOC（Modified Phase－Only Correlator）算法，直接利用频域数据估计信道的冲激响应，从而对接收信号进行多径时延估计。对于宽带无线通信时延衰落模型，IEEE 802.16工作组提出了SUI（Stanford University Interim）信道模型，完整地分析了信道特征，并给出了完整的模型参数。同时由英特尔、思科等企业联合IEEE 802.11 TGn（Task Group N）组织，也提出了一系列无线宽带信道模型，针对无线宽带应用提出了适用于WiFi（Wireless Fidelity）和MIMO（Multiple－Input Multiple－Output）等模型[7]。

2. 智能变电站无线信道模型改进及模拟测试

（1）变电站无线通道模型研究

本研究主要从适应变电站的模型展开研究并进行现场测试及试验模拟，由于电力系统中的无线通信主要以静态方式为主，也有少量处于运动状态的状态采集，但是系统搭建完成后，整个变电站的外部环境、建筑物、杆塔及线路等均无较大变化，无线通信模型可以从时间和空间两个方面来描述和测试。从空间角度看，沿移动台移动方向接收信号的幅度随着距离变动而衰减，其中，本地反射物所引起的多径效应呈现较快的幅度变化，其局部均值为随距离增加而起伏的下降的曲线，反映了地形起伏所引起的衰落以及空间扩散损耗。从使用上看，各个路径的长度不同，因而信号到达时间就不同，在接收端接收信号中不仅包含该脉冲，而且还包含它的各个时延信号，接收信号中脉冲宽度扩展，无线移动中主要考虑多径效应所引起的脉冲信号的时延，时延扩展将引起码间串扰，影响数据通信传输的质量。多径包括以下视距路径和非视距路径两种。视距路径（Line of Sight，LOS）为接收机和发射机之间的直接路径；非视距路径（Non Line of Sight，NLOS）为经过反射到达的路径。

以电力系统杆塔间信号传输为例，其无线通信由于信道的复杂性，存在大量的多径效应，影响信号传输的效率。在其多径传播过程中，假设共有n个相互独立的信道，其中有一条含有视距分量的信道，其他路径为散射信号。第i路径的路径长为x_i，发射系数为a_i，接收到的带通信号为

$$\begin{aligned} y'(t) &= \sum_i a_i s'\left(t-\frac{x_i}{c}\right) \\ &= \sum_i a_i \mathrm{Re}\left\{s\left(t-\frac{x_i}{c}\right)\exp\left[\mathrm{j}2\pi f\left(t-\frac{x_i}{c}\right)\right]\right\} \\ &= \mathrm{Re}\left\{\sum_i a_i s\left(t-\frac{x_i}{c}\right)\exp\left[\mathrm{j}2\pi f\left(t-\frac{x_i}{c}\right)\right]\right\} \end{aligned} \quad (1)$$

式中，c为光速，波长$\lambda=c/f_c$，提出公因子$\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi f_c t}$。

接收信号的复包络可表示为

$$y'(t)=\mathrm{Re}[y(t)\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi f_c t}] \quad (2)$$

接收信号的复包络是衰减、相移和时延都不同的路径成分的总和。式（2）中

$$y(t)=\sum_i a_i \mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi\frac{x_i}{c}} s\left(t-\frac{x_i}{c}\right)=\sum_i a_i \mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi\frac{x_i}{c}} s(t-\tau_i) \quad (3)$$

式中，$\tau_i=x_i/c$，即为需要的复包络模型。

在某些情况下，不仅有散射路径，还存在从基站到移动台的视距路径（LOS）。视距路径第一个到达接收端，因为其他路径需要经过更多的间

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

接路径才能到达接收端，视距路径通常是单个路径中最强的。

（2）变电站无线信道建模及测试参数分析

对于无线信道模拟，主要针对多径衰落信道。对于无线宽带信道的统计特征，SUI模型给出了无线宽带信道经过实测后得到的相关统计特征，定义了完整的衰落模型，多径信道结构模型所需的所有相关参数包括离散、多径的数目、时延、抽头增益风的均值、方差和多普勒功率谱等统计特征。变电站无线通信中存在大量的WiFi及WIMAX（Worldwide Interoperability for Microwave Access）等通信方式，应用偏向于静态或小尺度衰落模型，在SUI中小尺度模型共定义了6种模型（根据地形和植被程度分为A、B和C共3个等级），根据地形分类分为SUT－1～SUT－6，如表1所示。TGn组织提出了Model－A～Model－F（分为LOS和NLOS）共12个模型[7]。

表1　不同地形下的SUI信道模型

地形类型	SUI信道
A	SUI－5，SUI－6
B	SUI－3，SUI－4
C	SUI－1，SUI－2

根据变电站无线通信的应用特性，本次测试主要参考SUI模型中的SUI－3和TGn组织推荐的模型Model－B，上述两个模型与现场测试环境具有环境地形方面的共性，且都模拟了小尺度衰落特性，但是根据变电站无线通信在部署完成后，系统基本处于固定化状态，整个系统的信道偏静态化的应用特性，对于其中多普勒效应进行了改进和处理，即将多普勒频偏全部归零，其主要参考特性如表2、表3所示。

表2　SUI－3信道参数表

	抽头1	抽头2	抽头3
时延/μs	0	0.4	0.9
功率（全向天线）/dB	0	－5	－10
90%K因子（全向）	1	0	0
功率（30°天线）/dB	0	－10	－22
90%K因子（30°天线）	3	0	0
多普勒/Hz	0	0	0
天线相关	$\rho_{ENV}=0.4$		

（续）

	抽头1	抽头2	抽头3
增益减小因子	$G_{RF}=3$		
归一化因子	$F_{omni}=-1.511\ 3$ dB		
地形类型	B		
全向天线	$\sigma_\tau=0.264$ μs		
总体的K	$K=0.5(90\%)$		
30°天线	$\sigma_\tau=0.123$ μs		
总体的K	$K=2.2(90\%)$		

表3　Model－B信道模型参数表

路径	时延/μs	功率/dB	LOSAOA	K/dB
Path1	0	0	45	0
Path2	0.01	－5.4		0
Path3	0.02	－2.5		0
Path4	0.03	－5.9		0
Path5	0.04	－9.2		0
Path6	0.05	－12.5		0
Path7	0.06	－15.6		0
Path8	0.07	－18.7		0
Path9	0.08	－21.8		0

测试拓扑如图2所示，利用无线信道模拟器及网络性能测试仪，测试无线路由通过信道的特性参数变化，并比对变电站现场测试参数。信道及内部连接图如图3所示，阴影部分为SUI－3和Model－B模型加载部分。无线路由器通道制式802.11n，频道频率为5 GHz。

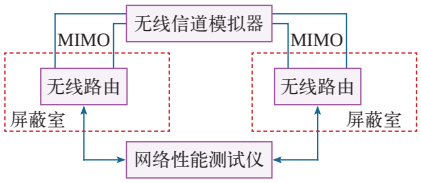

图2　系统测试拓扑图

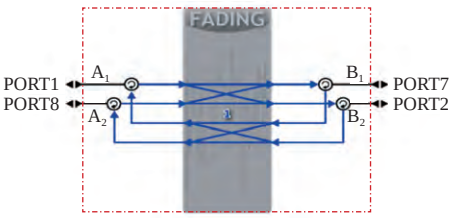

图3　信道连接及内部连接图

通过模型模拟测试和杆塔现场检验测试，系统的发送和接收端均处于屏蔽状态，且在进行测

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

试前，信号检测无泄漏。现场测试、SUI－3和Model－B通道测试吞吐量结果图如图4所示，网络负载满载状态下系统丢包率结果图如图5所示（测试结果为统计结果）。

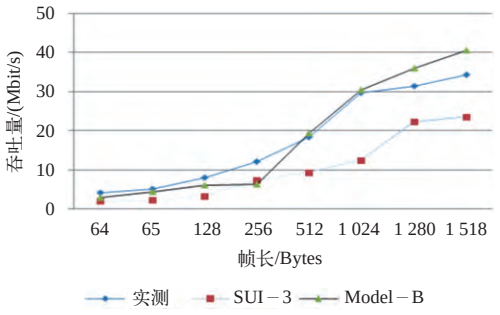

图4　实测结果及模型模拟测试吞吐量结果图

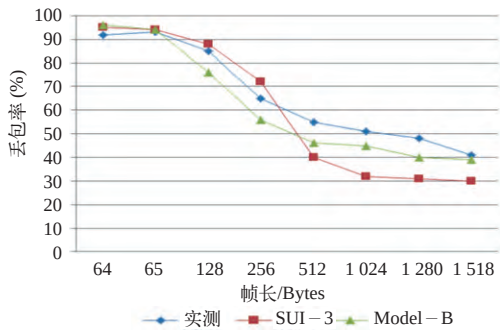

图5　实测结果及模型模拟测试丢包率结果图

图中，在短帧长时，实际测试值与Model－B模型的测试相近，随着数据帧长的增加，其传输时延的相对变长，增加了信道的变化性，总体与Model－B模型结果差异性较小，与SUT－3模型差异性稍大，SUI－3模型中，除了时延等特性外，结果影响因素较多，其中天线相角及天线增益等因素对测试结果的偏差产生了影响，因为在现场实际测试时，相角是可控因素，在无线通信部署时就保证了相角尽量保持在较优角度，而Model－B模型中参数的设置更接近于系统的实际运行环境，不考虑多普勒效应及运行角度等因素，实际测试结果也与实际结果较接近。可对Model－B模型进行改进分析，以满足现场模拟的参数需求。

结束语

无线通信是电力通信应用新的领域，也是未来电力通信发展的方向。本文对电力系统无线通信方式的应用作了简要介绍，分析了目前国际及国内无线通道模型的技术原理及研究现状，结合现场测试及SUT－3和Model－B模型修正后的模拟测试，测试结果达到了预期的结果，但具有一定的偏差，为后续模型的模拟改进提供了技术积累，为电网的无线通信提供技术支撑。下一步工作可以在上述信道模型的基础上，结合空时编码技术及MIMO等技术特性，提高无线通信方式带宽及稳定性。

参考文献

[1] 余贻鑫，栾文鹏．智能电网述评 [J]．中国电机工程学报，2009，29 (34)：1-8．

[2] 王阳光，尹项根，游大海，等，应用于变电站自动化系统的无线传感器网络技术 [J]．电网技术，2009，33 (2)：20-26．

[3] 张鑫，杨明华．基于城郊环境下Okumura-Hata预测模型的校正与实现 [J]．通信技术，2008，5 (41)：67-69．

[4] 杰鲁切姆．通信系统仿真——建模、方法和技术 [M]．2版．北京：国防工业出版社，2004．

[5] Hao Hung-Kuang，Liang Hang-Ming，Liu Yi-We．Particle methods for real-time sound source localization based on the multiple signal classification algorithm [C]．Intelligent Green Building and Smart Grid，2014：1-5．

[6] Yuan Zhou，Guan Yong Liang．Modified phase-only correlator with kurtosis-based amplified-noise suppression [J]．IEEE Transactions on Wireless Communications，2010，9 (5)：3341-3345．

[7] Yong Soo Cho，Jeakwon Kim，Won Young Yang．MIMO-OFDM无线通信技术及Matlab实现 [M]．北京：电子工业出版社，2013．

[8] Kong S H．TOA and AOD statistics for down link gaussian scatterer distribution model [J]．IEEE Transactions on Wireless Communications，2009，8 (5)：2609-2617．

（收稿日期：2014－10－07）EA

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net