

# 变电站 4G 传输安全电磁干扰研究

马鸿娟<sup>1</sup>, 涂新奇<sup>2</sup>, 贾寅森<sup>2</sup>, 颜伟<sup>2</sup>

(1.江苏科能电力工程咨询有限公司,江苏 南京 211102)

(2.南京师范大学南瑞电气与自动化学院,江苏 南京 210023)

[摘要] 针对变电站无线 4G 通讯链路易受强电磁脉冲干扰问题,分析了两种常用的变电站通信常用的传播模型,研究了无线传输的调制解调技术,建立了几种典型强电磁脉冲如高压正弦电磁脉冲、EFT 电磁脉冲群、浪涌脉冲的解析函数模型.搭建了无线通讯链路仿真平台,以 BPSK 调制解调方式为例,分析了各典型强电磁脉冲在 5% 误码率情况下对通讯链路的影响,仿真结果表明,浪涌脉冲对无线传输的影响程度最大,从而为强电磁脉冲抑制方法设计提供了理论依据.

[关键词] 变电站 4G 传输,电磁干扰,调制解调

[中图分类号] TM7, TN92 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2019)04-0038-06

## Research on Safety Electromagnetic Interference of 4G Transmission in Substation

Ma Hongjuan<sup>1</sup>, Tu Xinqi<sup>2</sup>, Jia Yinsen<sup>2</sup>, Yan Wei<sup>2</sup>

(1.Jiangsu Keneng Power Engineering Consulting Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

(2.School of NARI Electrical and Automation, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Focusing on the problem that the substation 4G wireless communication link is easily interfered by strong electromagnetic pulse, this paper introduces the two common transmission models commonly used in substation communication link, and analyzes the modulation and demodulation technology of wireless transmission. Meanwhile, the models of several typical strong electromagnetic pulse, such as high voltage sine electromagnetic pulse, EFT electromagnetic pulse group, and the surge pulse, have been established in this paper. In this paper, a simulation platform of wireless communication link is also established, and the influence of typical strong electromagnetic pulse on communication link under the case of 5%-bit error rate is analyzed by taking BPSK modulation and demodulation mode as an example. The simulation shows that the influence degree of surge pulse is the severest, which provides a theoretical basis for future strong electromagnetic pulse suppression methods.

**Key words:** substation 4G transmission, electromagnetic interference, modulation and demodulation

目前,正大力开展建设智能电网,电力专用通信网研究逐渐成为一个重要的课题.智能电网的根本目的就是能够在大规模集成网络上实现高速双向通信.智能电网主要采用的方式包括传感技术、控制测量技术、决策支持系统,目标是能够在网络发生瘫痪时能快速恢复、对恶意网络攻击有较好的防护能力、高品质地满足用户对配用电的需求、对不同发电形式有良好的容纳性,以保证电力市场稳定高效地运行,保障用户电力需求,优化资源配置.电力业务对可靠性、安全性、全覆盖的要求也越来越高,电力通信网作为智能电网的基础支撑平台,对保障电网安全运行具有十分重要的作用.

文献[1]对电力 4G 网络应用模式分析了电力 4G 网络的安全风险.文献[2]分析设计了 4G 电能质量检测系统的网络结构.文献[3]分析了目前配电网终端常用的几种通信技术的优缺点,如电力线载波通信、光纤通信、GPRS、3G.文献[4-6]分析了基于长期演进(long term evolution, LTE)技术体制建设的电力无线宽带专网,同时进行了安全风险分析,并进一步给出了防护方法分析.

传播模型通过各项研究总结分析得到路径损耗计算公式,通过计算路径损耗,并代入其他因子进一步

推算链路损耗,能够预估基站的覆盖范围,从而达到覆盖规划的目的.下面简要介绍适用于 230 MHz 的 Okumura-Hata 传播模型.

Okumura 模型是预测城区信号时使用最广泛的模型,在日本已经成为系统规划的标准.该模型是由奥村等人在日本东京使用不同的频率和不同的天线高度,选择不同的距离进行一系列测试,最后绘成经验曲线.

Okumura-Hata 模型也是根据实测数据建立的模型,该模型提供的数据较全,应用较广泛,适用于 VHF 和 UHF 频段.该模型的特点是:以准平坦地形大城市地区的场强中值路径损耗作为基准,对不同的传播环境和地形条件等因素用校正因子加以修正.该模型是根据经验分析测得的,其适用于:

- (1) 载波频率从 150 MHz 到 2 000 MHz;
- (2) 离基站不能太近,有效距离为 1~100 km,天线的高度要在 30 m 以上;
- (3) 小区半径大于 1 km 的宏蜂窝系统;
- (4) 基站有效天线高度为 30~200 m;
- (5) 移动台天线有效高度为 1~10 m.

Okumura-Hata 模型的路径损耗计算公式为:

$$L(\text{dB}) = 69.55 + 26.16 \lg f_c - 13.82 \lg h_{te} - a(h_{re}) + (44.9 - 6.55 \lg h_{te}) \lg d + C_{\text{cell}} + C_{\text{terrain}}. \quad (1)$$

式中,  $f_c$  为工作频率;  $h_{te}$  和  $h_{re}$  分别为发射端与接收端的天线有效高度,即天线高出地表高度(对发射端而言为传播方向实际距离内的平均地表高度)的数值,单位为 m;  $d$  为发射端与接收端天线之间的水平距离,单位为 km;  $a(h_{re})$  为有效天线修正因子,根据覆盖场景不同采用不同公式计算.

变电站内因电网传输具有工频交流信号干扰,还有开关带来的波动干扰,给信号传输带来了不便.文献[7]分析了开关动作瞬间形成的较高频率电磁波.文献[8-9]对断路器辅助触点断开时产生电快速瞬变脉冲群进行了建模和仿真并分析了电快速瞬变脉冲群对电力系统的影响.文献[10-11]分析了在变电站通信配线施工背景下的站内环境的测量及抗电磁干扰方法.文献[12]分析了雷电对变电站二次电缆的电磁干扰问题.文献[13]分析了复杂电磁环境下无人机机载电子设备的内外部干扰特性.文献[14]分析了通讯链路中的遥测遥控信号干扰,无线电导航干扰.文献[15-16]提出了不同电磁环境下机载电子设备的抗干扰阈值与电磁兼容设计要求.文献[17]分析了部分典型 EMI 的影响及解决方案.

## 1 无线传输的调制解调技术

数字调制与模拟调制相比,具备更好的抗噪性、保密性和易融合性等特点,数字调制已被广泛应用于各种通信体系中.根据基带波形所控制的不同载波参数,可以将调制方式分为幅度键控(ASK)、相移键控(PSK)、频移键控(FSK)和正交振幅调制(QAM)等.根据 4G 网络架构,4G 无线传输的调制解调方式主要包括 BPSK、QPSK、16QAM 和 64QAM.其中 BPSK、QPSK 设备简单、抗噪较好,8PSK、16PSK 有较高的频谱利用率,易于传输<sup>[18]</sup>.

### 1.1 BPSK 调制解调技术

二进制相移键控(binary phase shift keying, BPSK)信号是利用载波的相位变化来传递信息,而振幅和频率保持不变.在 BPSK 中,通常用初始相位 0 和  $\pi$  分别表示二进制“1”和“0”.其时域表达式可表示为

$$e_{\text{BPSK}}(t) = A \cos(\omega_c t + \varphi_n). \quad (2)$$

其中,  $A$  表示载波的振幅,  $\omega_c$  表示载波频率,  $\varphi_n$  表示第  $n$  个符号相位,  $\varphi_n$  且只能取 0 或者  $\pi$ .

由上式可得

$$e_{\text{BPSK}}(t) = \begin{cases} A \cos(\omega_c t), & \text{概率为 } P, \\ -A \cos(\omega_c t), & \text{概率为 } 1-P. \end{cases} \quad (3)$$

设  $g(t)$  为脉宽为  $T_s$  的单个矩形脉冲,  $a_n$  取值为 +1 或者 -1, 则 BPSK 信号可以表述为一个双极性全占空矩形脉冲序列与一个正弦波相乘. 设  $m$  为信号采样数, 则

$$e_{\text{BPSK}}(t) = s(t) \cos(\omega_c t) = \sum_{n=1}^m a_n g(t - nT_s) \cos(\omega_c t). \quad (4)$$

BPSK 信号的解调通常采用相干解调法. 图 1 为 BPSK 信号解调机理图, 其中相乘器的结果为

$$e_{\text{BPSK}}(t) \cos(\omega_c t) = A \cos(\omega_c t + \varphi_n) \cos(\omega_c t) = \frac{A}{2} \cos(2\omega_c t + \varphi_n) + \frac{A}{2} \cos \varphi_n. \quad (5)$$

进一步, 设低通滤波器截止频率为  $\omega_c$ , 则低通滤波器的输出为  $A \cos(\varphi_n/2)$ , 由于 BPSK 信号中  $\varphi_n$  可取 0 或者  $\pi$ , 所以抽样判决器的输入为  $A/2$  或者  $-A/2$ . 设抽样判决器的判定门限为 0, 则当  $A/2 > 0$  时, 抽样判决器输出为 1. 当  $-A/2 < 0$  时, 抽样判决器输出为  $-1$ , 进而实现了对 BPSK 信号的解调.

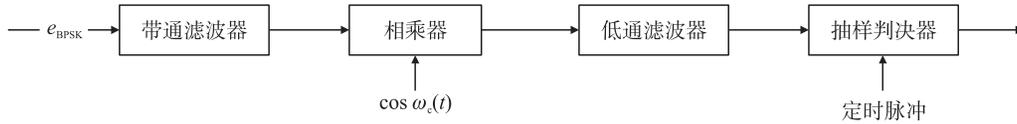


图 1 BPSK 信号解调机理  
Fig. 1 BPSK modulation process

### 1.2 QPSK 调制解调技术

正交相移键控 (quadrature phase shift keying, QPSK) 信号也是利用载波的相位变化来传递信息, 而振幅和频率保持不变. QPSK 调制框图如图 2 所示, 设输入为幅值  $A$  的串行数据  $u_i$ , 首先按照奇数列为  $I$  路、偶数列为  $Q$  路, 得到两路时间对应、速率减半的并行数据, 接下来两路数据分别对  $\cos \omega_0 t$  和  $-\sin \omega_0 t$  完成相位调制. 通过加法电路可得

$$e_{\text{QPSK}}(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_n). \quad (6)$$

式中, 当输入 00 时,  $I = +1, Q = +1, \varphi_n = \pi/4$ . 当输入 01 时,  $I = -1, Q = +1, \varphi_n = 3\pi/4$ . 当输入 11 时,  $I = -1, Q = -1, \varphi_n = 5\pi/4$ . 当输入 10 时,  $I = +1, Q = -1, \varphi_n = 7\pi/4$ .

QPSK 调制得到的信号进行解调, 可将 QPSK 信号分别与  $\cos(\omega_0 t)$  和  $\sin(\omega_0 t)$  相乘得到:

$$Z_I(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_n) \cos(\omega_0 t) = \frac{A}{2} \cos(2\omega_0 t + \varphi_n) + \frac{A}{2} \cos \varphi_n, \quad (7)$$

$$Z_Q(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_n) \cos\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right) = \frac{-A}{2} \sin(2\omega_0 t + \varphi_n) + \frac{A}{2} \sin \varphi_n. \quad (8)$$

对  $Z_I(t)$  和  $Z_Q(t)$  进行低通滤波可得,

$$x_I(t) = \frac{A}{2} \cos \varphi_n, \quad (9)$$

$$x_Q(t) = \frac{A}{2} \sin \varphi_n. \quad (10)$$

再将滤波后的信号进行抽样判决, 原理与 1.1 节相同.

## 2 复杂电磁环境对通讯链路的干扰

本节主要分析复杂电磁环境对无线通讯链路的影响, 将图像作为原始信号, 经过调制、加噪、解调后输出图像, 通过图像的变化, 分析达到 5% 误码率时不同电磁脉冲的幅值及其对图像传输质量的影响.

如图 3 所示, 设采集数据后作为原始信号  $S(t)$ , 经过 BPSK 调制过程后得到调制信号  $S_2(t)$ , 再由天线产生传输信号电场  $E_R, E_R(x, y, z)$  为空间  $(x, y, z)$  处的传输信号电场强度, 对应的噪声信号电场为  $E_P, E_P(x, y, z)$  为空间  $(x, y, z)$  处的噪声信号电场强度, 两者在传输过程中叠加得到叠加电场  $E$ . 叠加电场  $E$  后经天线及 BPSK 解调过程得到解调信号  $S_4(t)$  并输出.

$$E(x, y, z) = E_P(x, y, z) + E_R(x, y, z). \quad (11)$$

为了考虑最为恶劣的情况, 将电磁干扰与调制信号同相位叠加, 即电场绝对值叠加公式

$$|E| = |E_P| + |E_R|. \quad (12)$$

不失一般性, 仿真中采用波特率为 4 000, 载波频率  $f_c$  为 4 kHz 依照常用传输抗噪标准接收端采样频

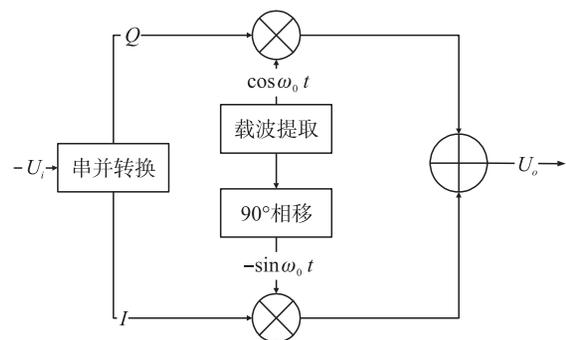


图 2 QPSK 信号调制机理  
Fig. 2 QPSK signal modulation mechanism

率  $f_w$  为 64 kHz,低通滤波器的截止频率  $f_k$  为 4 kHz,误码率  $e$  为 5%,在空间  $(x,y,z)$  处通讯链路产生的电场强度  $E_R$  大小为 5 V/m.

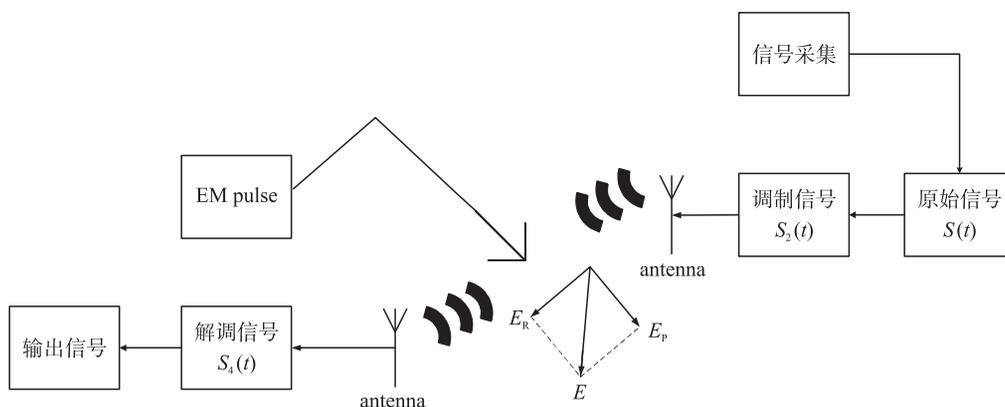


图 3 无线信号传输过程受到的电磁环境影响

Fig. 3 Block diagram of the downlink transmission process

### 2.1 高压输电线对通讯链路的影响

在实际生活中,尤其在边远地区,高压输电线周边产生的强电干扰对无人机通信影响巨大,其电场大小  $E_{p1}$  为

$$E_{p1}(t) = C_V \sin(2\pi f_d t + \varphi). \quad (13)$$

式中,  $C_V$  为场强幅值,  $f_d$  为脉冲频率,  $\varphi$  为初始相角. 将脉冲信号场  $E_p(t)$  与调制信号场  $E_R(t)$  叠加得干扰信号场  $E_N(t)$

$$E_N(t) = E_R(t) + E_p(t). \quad (14)$$

以  $C_V$  为 136.70 V/m,  $f_d$  为 50 Hz,  $\varphi$  为 0 的正弦脉冲作为高压输电线产生的电磁脉冲,其波形如图 4 所示,原始图像如图 5 所示. 与原始图像相比,图 6 中的图像可以看出人物明显模糊,其五官不清楚,图片的圆润度明显减弱,并出现大量条纹. 此时脉冲场强幅值为 136.70 V/m,误码率为 5.048 507 46%.

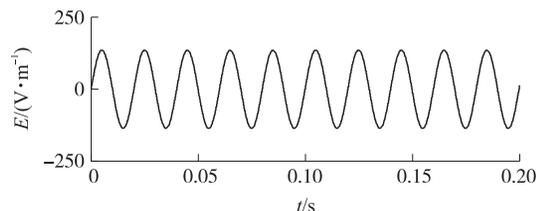


图 4 压输电线脉冲波形

Fig. 4 Sinusoidal pulse waveform



图 5 原始图像

Fig. 5 Original image



图 6 高压脉冲干扰后图像

Fig. 6 Sinusoidal pulse interference image

### 2.2 EFT 电磁脉冲对通讯链路的影响

电快速变脉冲群 (electrical fast transient, EFT) 是指数量有限且清晰可辨的脉冲序列或持续时间有限的振荡,脉冲群中的单个脉冲有特定的重复周期、电压幅值、上升时间、脉宽,其是在电力系统环境中经常存在的一种瞬间高能量的干扰,对无线通讯有较大的影响,又称为瞬态脉冲扰源. 在电力设备的开关和雷电放电期间等都会产生此类干扰,电快速瞬变骚扰群就是其中一种,其解析函数  $E_{p4}$  为

$$E_{P4}(t) = \begin{cases} t \times 10^9, & 0 \leq t \leq 4.4 \times 10^{-9}, \\ 4.4e^{-0.11 \times 10^9 \times (t - 4.4 \times 10^{-9})}, & 4.4 \times 10^{-9} \leq t \leq 1\ 000 \times 10^{-9}. \end{cases} \quad (15)$$

EFT 的单个脉冲波形如图 7 所示,将 EFT 单个脉冲信号连续产生便得到脉冲群,将 EFT 脉冲群叠加于无线通讯链路中,经过解调过程得到干扰图像如图 8 所示.

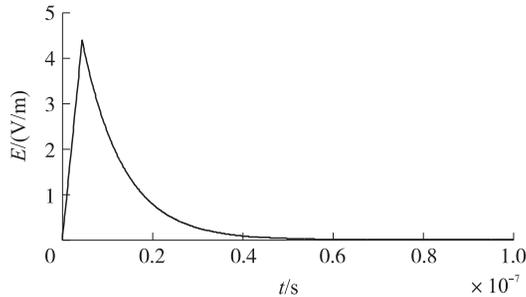


图 7 单个 EFT 脉冲波形图  
Fig. 7 EFT pulse waveform



图 8 EFT 脉冲干扰后图像  
Fig. 8 EFT noise interference image

### 2.3 浪涌脉冲对通讯链路的影响

浪涌脉冲是一种远超出正常工作电压的瞬间性的强力脉冲,其瞬间含有的巨大能量足以使无人机通讯直接失败. 在现实生活中雷击、电力设备的启停、供电网络运行的故障都会导致此现象的发生. 浪涌脉冲可能会造成传输数据丢失或损坏甚至设备的损毁,对于电力设备的寿命大大缩短,即使非雷击这种超高功率的浪涌脉冲,多个小电涌累积效应也会造成半导体器件性能的衰退、设备故障和寿命的缩短,其解析函数  $E_{PS}$  为:

$$E_{PS}(t) = \begin{cases} e^{0.481 \times 10^{12} \times t^2} - 1, & 0 \leq t \leq 1.2 \times 10^{-6}, \\ -(t - 1.2 \times 10^{-6}) \times 10^4 + 1, & 1.2 \times 10^{-6} \leq t \leq 130 \times 10^{-6}, \\ (t - 1.2 \times 10^{-6}) \times 10^4 - 0.424, & 130 \times 10^{-6} \leq t \leq 158 \times 10^{-6}. \end{cases} \quad (16)$$

雷电脉冲的单个波形如图 9 所示,将雷电脉冲信号连续施加于无线通讯链路中,经过解调过程得到干扰图像如图 10 所示.

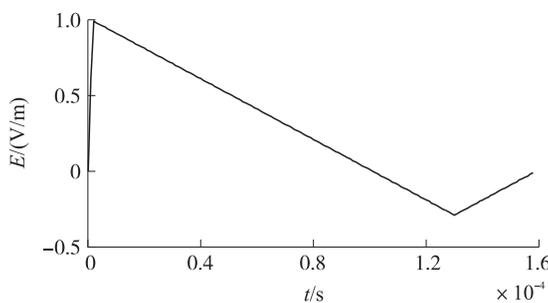


图 9 单个雷电脉冲波形  
Fig. 9 Surge pulse waveform



图 10 雷电脉冲干扰后的图像  
Fig. 10 Surge noise interference image

与原始图像相比,图 10 中的图像中出现明显、数量众多的裂纹,图片几乎全部失真,无法辨认. 此时脉冲幅值为 10.90 V/m,对应图像的误码率 4.990 125 47%.

## 3 结语

对于充电站 4G 通信安全问题,本文主要讨论了电磁干扰的特性和影响,为消除地磁干扰,增强传输安全性做了准备,目前消除噪声的方法还有待解决,仿真结果如表 1,表明浪涌脉冲、EFT 脉冲对误码率

表 1 脉冲信号幅值及误码率

Table 1 Pulse signal amplitude and bit error rate		
噪声类型	$c/(V/m)$	$e/\%$
正弦脉冲	136.70	5.014 392 32
EFT 脉冲	29.19	5.022 654 58
浪涌脉冲	10.90	4.990 125 47

的影响较大,它们在幅值较低时,误码率已经很高,所以在实际运用中需要较高的防护等级.而正弦脉冲、浪涌脉冲对图片的影响较大,所以在实际运用中当需要较准确的图片信息时需要较高级的防护.

### [参考文献] (References)

- [1] 李坚,刘昫,安春燕,等. 电力 4G 无线通信网络安全技术[J]. 电信科学,2015,39(增刊1):69-73.  
LI J, LIU W, AN C Y, et al. Power 4G wireless communication network security technology[J]. Telecommunications science, 2015, 39(Suppl. 1):69-73. (in Chinese)
- [2] 朱伟华,索大翔,谭微. 4G 技术应用于电能质量监测的分析研究[J]. 电测与仪表,2015(6):44-48.  
ZHU W H, SUO D X, TAN W. Analysis and application of 4G technology in power quality monitoring[J]. Electrical measurement and instrumentation, 2015(6):44-48. (in Chinese)
- [3] 孙建平,林长锥. 基于 TD-LTE 的智能配电网终端通信技术研究[J]. 电力系统通信,2012,33(7):80-83.  
SUN J P, LIN C Z. Research on terminal communication technology of intelligent distribution network based on TD-LTE[J]. Power system communications, 2012, 33(7):80-83. (in Chinese)
- [4] 韦磊,刘锐,高雪. 电力 LTE 无线专网安全防护方案研究[J]. 江苏电机工程,2016,35(3):29-33.  
WEI L, LIU R, GAO X. Research on security protection scheme of electric LTE wireless private network[J]. Jiangsu electrical engineering, 2016, 35(3):29-33. (in Chinese)
- [5] 李文伟,陈宝仁,吴谦,等. TD-LTE 电力无线宽带专网技术应用研究[J]. 电力系统通信,2012,33(11):82-87.  
LI W W, CHEN B R, WU Q, et al. TD-LTE power wireless broadband private network technology application research[J]. Power system communication, 2012, 33(11):82-87. (in Chinese)
- [6] 胡珂珏. 电力无线通信专网关键技术及主要问题[J]. 通讯世界,2018,24(10):213-214.  
HU K Y. Key technologies and main problems of power wireless communication network[J]. Communication world, 2018, 24(10):213-214. (in Chinese)
- [7] 王玉峰. 变电站瞬态电磁环境及微机保护系统 EMC 研究[D]. 大连:大连理工大学,2007.  
WANG Y F. Study on transient electromagnetic environment and microcomputer protection system EMC[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [8] 秦晓辉,黄少锋. 保护与控制二次回路内电快速瞬变脉冲群的干扰模型及 MATLAB 仿真[J]. 继电器,2006,34(4):17-21.  
QIN X H, HUANG S F. Interference model and MATLAB simulation of protection and control of electrical fast transient bursts in secondary circuits[J]. Relay, 2006, 34(4):17-21. (in Chinese)
- [9] 王辉,窦杰,金瑶,等. 500 kV 变电站通信配线施工的抗电磁干扰研究[J]. 科技通报,2018,34(10):154-157,268.  
WANG H, DOU J, JIN Y, et al. Research on anti-electromagnetic interference of communication wiring construction in 500 kV substation[J]. Bulletin of science and technology, 2018, 34(10):154-157,268. (in Chinese)
- [10] 郭法明. 智能变电站中无线通信系统的电磁环境建模与仿真[D]. 北京:北京邮电大学,2017.  
GUO F M. Electromagnetic environment modeling and simulation of wireless communication system in intelligent substation[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017. (in Chinese)
- [11] 王璐. 雷电对变电站二次电缆的电磁干扰研究[D]. 北京:华北电力大学,2017.  
WANG L. Research on electromagnetic interference of lightning on secondary cable of substation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017. (in Chinese)
- [12] 戴兴龙,王自立. 复杂电磁环境下无人机载电子设备电磁兼容研究[J]. 通信对抗,2014,33(1):51-53.  
DAI X L, WANG Z L. Research on electromagnetic compatibility of unmanned aerial vehicles in complex electromagnetic environment[J]. Communication combat, 2014, 33(1):51-53. (in Chinese)
- [13] 马文良. 无人机通信链路抗干扰问题研究[J]. 中国新通信,2017,19(1):35.  
MA W L. Research on anti-jamming problem of UAV communication link[J]. China new telecommunications, 2017, 19(1):35. (in Chinese)
- [14] 王品. 具有量测噪声和数据丢包的分布式多无人机编队协同控制[C]//第四届中国指挥控制大会. 北京,2016.  
WANG P. Distributed multi-UAV formation cooperative control with measurement noise and data loss[C]//Proceedings of the 4th China Command and Control Conference. Beijing, 2016. (in Chinese)

(下转第 48 页)

- drive units[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2001, 48(3):482-490.
- [4] MIHALI F, KOS D. Reduced conducted EMI in switched-mode DC-DC power converters without EMI filters: PWM versus randomized PWM[J]. IEEE transactions on power electronics, 2006, 21(6):1783-1794.
- [5] OGASAWARA S, AYANO H, AKAGI H. Measurement and reduction of EMI radiated by a PWM inverter-fed AC motor drive system[J]. IEEE transactions on industry applications, 1997, 33(4):1019-1026.
- [6] 魏兆博. PWM 逆变器共模电磁干扰分析及抑制技术研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2015.  
WEI Z B. Analysis and suppression of common-mode electromagnetic interference in PWM inverter[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [7] 姜保军. PWM 电机驱动系统传导共模 EMI 抑制技术的研究现状[J]. 电气传动, 2008, 389(8):3-9.  
JIANG B J. Research status of conducted common mode EMI restraint method in PWM motor drive system[J]. Electric drive, 2008, 389(8):3-9. (in Chinese)
- [8] 朱军伟. 舵机用无刷直流电机控制系统[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2008.  
ZHU J W. Dissertation for the master degree in engineering brushless DC control system for actuator[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)
- [9] 陈恒林, 凌光, 黄华高, 等. Boost 变流器门极驱动电路的 EMI 发射及抑制[J]. 电工技术学报, 2010, 25(5):98-102.  
CHEN H L, LING G, HUANG H G, et al. Emission and Suppression of EMI from gate drive circuit of boost converter[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2010, 25(5):98-102. (in Chinese)
- [10] 王壮. CRM Boost PFC 电路传导 EMI 分析及抑制方法研究[D]. 南京:南京师范大学, 2018.  
WANG Z. Research on conducted EMI analysis and suppression methods of CRM boost PFC circuit[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2018. (in Chinese)
- [11] 颜伟. 复杂电子系统电磁干扰噪声机理建模与抑制方法研究[D]. 南京:南京师范大学, 2014.  
YAN W. Research on modeling and suppression methods of electromagnetic interference noise mechanism in complex electronic systems[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2014. (in Chinese)

[责任编辑:陈 庆]

(上接第 43 页)

- [15] 孙荣平, 成本茂, 郭龙. 复杂电磁环境下机载电子设备的电磁兼容仿真研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(2):57-60.  
SUN R P, CHENG B M, GUO L. Electromagnetic compatibility simulation of airborne electronic equipment in complex electromagnetic environment[J]. Equipment environmental engineering, 2012, 9(2):57-60. (in Chinese)
- [16] DEVENDER K, NAGESWARA R K, SURYANARAYANA S S, et al. Electromagnetic interference (EMI) suppression techniques—a case study[C]//Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility. Bangalore, India, 2002:221-225.
- [17] HADI S Q, EHKAN P, ANUAR M S, et al. Performance comparison of STBC-FT based OFDM wireless communication system using M-QAM and M-PSK modulation techniques[C]//2016 3rd International Conference on Electronic Design (ICED). Phuket, Thailand, 2016:174-179.
- [18] 董照琦. 基于 FPGA 的 BPSK 调制解调算法的研究与实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2016.  
DONG Z Q. Research and implementation of BPSK modulation and demodulation algorithm based on FPGA[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016. (in Chinese)

[责任编辑:陈 庆]