

基于多进制扩频的低压电力线抄表技术的研究

高强, 王艳阳, 杨红叶, 刘娜

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071000)

摘要: 低压电力线通信广泛应用于电力抄表系统中。由于低压电力线信道特性复杂, 严重影响载波通信质量, 结合相关数据资料对低压电力线信道噪声环境进行了分析。为了提高电力线信道条件下的传输可靠性, 提出多进制扩频技术, 构造了多进制伪随机序列。设计了多进制扩频的低压电力线抄表方案, 并建立了基于该信道特性的电力线扩频通信系统模型。通过对其性能仿真验证, 仿真结果表明: 该多进制扩频方式有效改善了抄表系统误码率性能, 更适合于电力线的抄表作业。

关键词: 电力线; 多进制; 抄表; 扩频; 伪随机序列

Low-voltage power line meter reading technology research based on multi-band spread spectrum

GAO Qiang, WANG Yan-yang, YANG Hong-ye, LIU Na

(Institute of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071000, China)

Abstract: Low voltage power line communication is an important technology of the electric power meter reading system. The low-voltage power line channel is complex and seriously affects the quality of carrier communication. Combining with relevant data, the paper analyzes the low-voltage power line channel noise environments. The multi-band spread spectrum technology is put forward and is applied to the power meter reading system in order to improve the performance of noise resistance. Characteristic polynomial of multi-band pseudo random sequence is proposed. The way of data shift register is used to produce multi-band spread spectrum code. The research of autocorrelation function characteristics and cross-correlation function characteristics of multi-band spread spectrum sequence is simulated. And the characteristics of error rate is presented. The results show that the performance of multi-band spread spectrum code is better than that of binary spread spectrum code. And it can improve the performance of characteristics of error rate. At the same time, low voltage power line meter reading scheme of multi-band spread spectrum is designed.

Key words: power line; multi-band; meter reading; spread spectrum; pseudo-random sequence

中图分类号: TM913; TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)05-0136-06

0 引言

随着智能电网的建设与发展, 对用电数据自动采集的要求更加迫切, 而已入网运行的自动抄表系统中 84% 采用了低压电力线 (220 V, AC) 通信技术^[1]。电力线通信技术采用电力线作为通信介质, 具有充分利用现有资源、易于施工、综合成本较低和不受环境条件限制等多方面的优点。传统电力线通信采用 FSK 或 PSK 调制技术^[2], 部分采用扩频通信 (SSC) 技术或正交频分复用 (OFDM)^[3] 技术。由于电力抄表的数据量不大, 实时性要求不高, 传统电力线通信技术能够满足大部分场合的要求。在某些场合也尝试了采用短码扩频通信应用于电力抄表系统, 但扩频增益不高, 抗干扰能力不强。但是,

电力线通信信道同时存在间歇性噪声大、阻抗随负载变化大、信号衰减大等明显的特点, 严重影响了抄表数据传输的可靠性, 抄通率不超过 96%^[4-6]。因此, 研究新的电力线通信技术, 提高电力抄表的可靠性是十分必要的。

目前, 伪随机码是以二进制 m 序列为主, 二进制扩频码的缺点是可用扩频码数量少、短码实际的扩频增益与理论值相差较大, 常规二元直扩序列在灵活、有效利用频谱方面显出了不足^[7]。本文研究了多进制扩频码及其特性, 并针对电力线抄表系统研究了多进制扩频码的抗干扰性能。

1 低压电力线信道环境分析

低压电力线抄表系统一般由电表、采集器、集

中器和管理中心计算机(PC机)组成,其基本结构框图如图1所示。低压电力线自动抄表系统通过低压电力线实现计量仪表数据的集中采集、传输、存储和处理。电力线信道具有负载变化大,低频段噪声干扰强,信道衰减大和延时不稳定等特点,因此,要研究多进制扩频技术抗噪声能力,首先要分析电力线噪声特性。

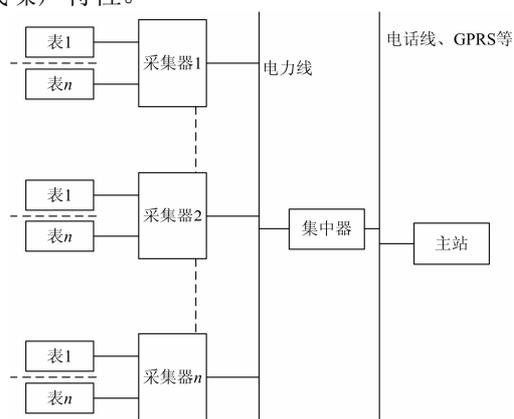


图1 低压电力线载波集中抄表系统网络结构图

Fig. 1 Low-voltage power line carrier meter reading system network structure

电力线噪声分布与时间、地点及负载等密切相关,各噪声间相互独立^[8]。根据国内外的相关文献,通常认为在低压电力线载波通信环境中存在五类噪声,即有色背景噪声、窄带噪声、同电网频率不同步的周期性脉冲噪声、同电网频率同步的周期性脉冲噪声、非同步脉冲噪声^[9-10]。

1.1 有色背景噪声

有色背景噪声主要由电力线上各种低功率的噪声源产生,是一种随时间缓慢变化的随机干扰,其功率谱密度相对低,随频率增加而减小。背景噪声可由白噪声通过滤波器得到,其传递函数 $H(Z)$ 表示为

$$H(Z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{1 + \sum_{i=1}^m b_i z^{-i}}{1 + \sum_{i=1}^n a_i z^{-i}} \quad (1)$$

对上面的模型进行分析,得到有色背景噪声波形如图2所示^[11]。

1.2 窄带噪声

窄带噪声一般由电力线驻波或谐振和中短波广播引起。夜间干扰相对严重,白天干扰却相对小。可以通过下面 N 个独立的正弦函数叠加来表示。

$$n(t) = \sum_{i=1}^N A_i(t) \sin(2\pi f_i t + \theta) \quad (2)$$

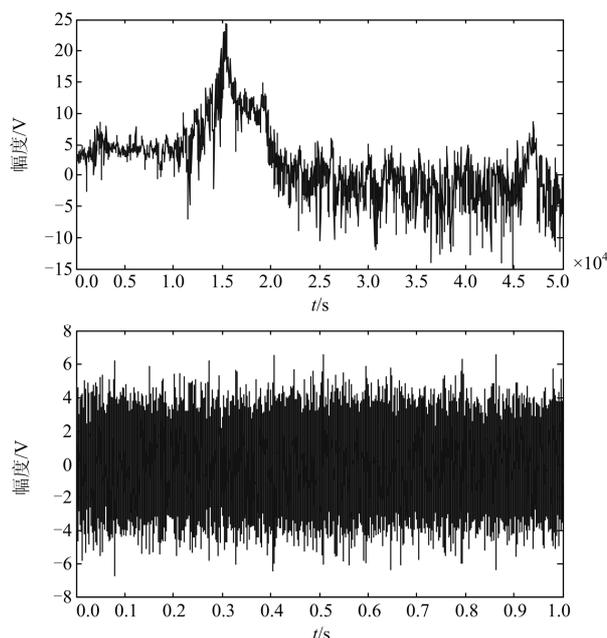


图2 有色噪声频域时域图

Fig. 2 Time domain and frequency domain of colored noise

仿真时采用多个不同频率的正弦波来代替窄带噪声。

1.3 脉冲噪声

脉冲噪声分为突发性脉冲噪声和周期性脉冲噪声,对低压电力线通信有着严重的影响,其幅度、脉宽和间隔时间决定着对数据传输的影响程度。同步于工频的周期性噪声主要是电力设备按 50 Hz 频率工作产生的脉冲,重复率为 50 Hz 或 100 Hz 脉冲强度一般比背景噪声高出 10~40 dB 的水平。异步于工频的周期性噪声其功率谱为离散的谱线。重复率在 50~200 kHz 范围内。资料显示,多数脉冲包络呈三角形,可以采用指数衰减的正弦波或衰减正弦波的叠加来表示。单脉冲噪声和同步于工频的周期性脉冲仿真如图3所示^[12]。

1.4 噪声干扰分析

背景噪声和窄带噪声,覆盖整个频域,不同时间电力线上噪声是变化的,但从噪声仿真结果来看其中还是有一定规律的。脉冲噪声是随时间变化而变化,在数据传输中出现错误主要就是由脉冲噪声引起的,尤其是突发性脉冲噪声。通过仿真实验表明,采用多进制扩频则有效抑制了各噪声对通信的干扰,与扩频性质相符。

2 多进制扩频的研究

2.1 生成多进制扩频序列特征多项式

如何产生多进制扩频序列，目前还没有现成的

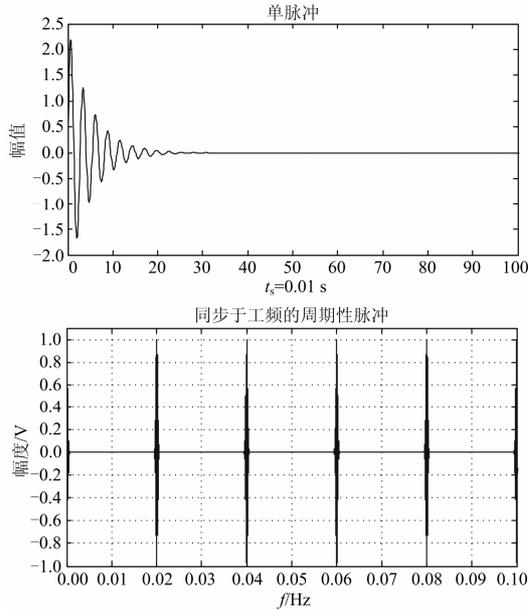


图3 噪声仿真图

Fig. 3 Noise simulation diagram

方法，本文从特征多项式出发，提出一种多进制扩频序列的产生方法。当特征多项式 $f(x)$ 为本原多项式时，能产生最长周期的多进制扩频序列。多进制 (q 进制) 的本原多项式可以应用“域”的理论构造出来，即

$$f(x) = c_0 + c_1x + c_2x^2 + \dots + c_nx^n = \sum_{i=0}^n c_i x^i \quad (3)$$

$$c_i \in \{0, 1, 2, \dots, q-1\}$$

其中： q 表示进制数； c_i 表示反馈移位寄存器的系数状态。多进制扩频序列的周期为 q^n-1 ， q 进制的 q 值必须是素数。多进制扩频序列的周期为 q^n-1 ，其与二进制相比可用状态即地址数大大增多^[13]。

要构造多进制扩频序列，首先要构造移位寄存器的特征多项式。利用线性反馈移位寄存器（多位）可以产生多进制扩频序列，移位寄存器的状态与多进制数值相关，如 q 进制各级移位寄存器的状态可以为 $0 \sim q-1$ 中的任意一个值，每一次移位后要进行模 q 求和运算，输出序列即为多进制扩频序列。

2.2 多进制扩频序列的自相关互相关特性

由序列自相关函数的定义可得

$$R_a(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i a_{i+\tau} \quad (4)$$

对于二元域 $\{0,1\}$ 的码序列 $\{a_i\}$ ，可以通过映射： $b_i=1-2a_i$ ，将集合 $\{0,1\}$ 映射为集合 $\{-1,1\}$ 。同样我们可以通过其他的映射将多元域 $\{0,1,2,\dots,q-1\}$ 映射为关于零点对称的集合。如 $q=5$ 时，可以通过 $b_i=2-a_i$ 的映射，将五元域 $\{0,1,2,3,4\}$ 变为 $\{-2,-1,0,1,2\}$ 的集合。

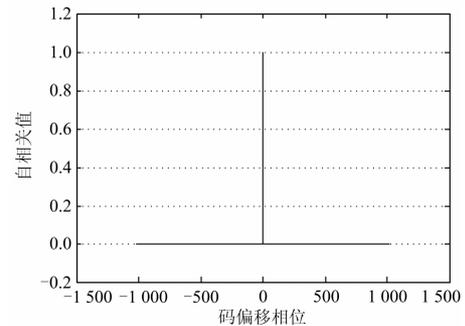
根据序列的互相关函数，设 $\{a_i\}$ 与 $\{b_i\}$ 都是周期为 N 的两个码序列，则有

$$R_{ab}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i b_{i+\tau} \quad (5)$$

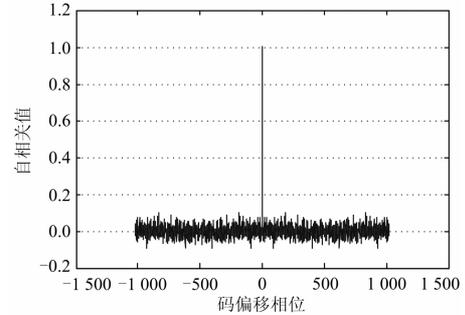
若 $R_{ab}(\tau)=0$ ，则说明两个序列正交。在考察序列的相关性时，自相关旁瓣峰值 R_x 和互相关峰值 R_y 是两个重要的衡量指标。

$$R_x = \max_{r \neq 0} |R_a(r)| \quad R_y = \max_{a \neq b} |R_{ab}(r)| \quad (6)$$

R_x 和 R_y 的值越小，序列的相关性性能越好^[14]。以 $L=1023$ 位长的多进制扩频序列为例，分析多进制的参数特性。序列功率归一化的结果如图 4、图 5 所示。



(a) 1 023位二进制序列自相关



(b) 1 023位五进制序列自相关

图4 相关函数图

Fig. 4 Correlation function diagram

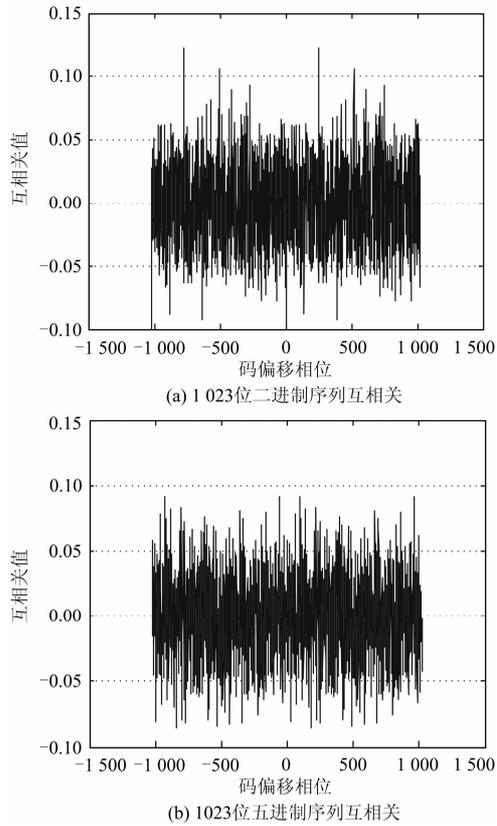


图 5 互相关函数图

Fig. 5 Cross-correlation function diagram

由图 4、图 5 可见, 显然多进制自相关旁瓣峰值大, 互相关峰值小。所以多进制的自相关性略差, 互相关性要好。互相关函数的峰值越小, 其抗干扰性能越好, 图 5 证明了多进制序列抗噪声性能优于二进制序列。

3 系统仿真及误码率

多进制扩频的低压电力线载波抄表仿真系统模型如图 6 所示。

图 6 中随机整数发生器 (Random Integer Generator) 产生 0、1 码作为数据信息, 经过单/双极变换与多进制序列相乘实现扩频, 再进行调制后进入电力线信道。而接收端经过解调、解扩和判决等处理单元实现多进制扩频通信任务。

通信系统最基本、最主要的质量指标是通信系统的有效性和可靠性。扩频通信系统的主要特点就是通过扩频, 以牺牲有效性来换取可靠性。数字通信系统的可靠性则以差错率来描述。

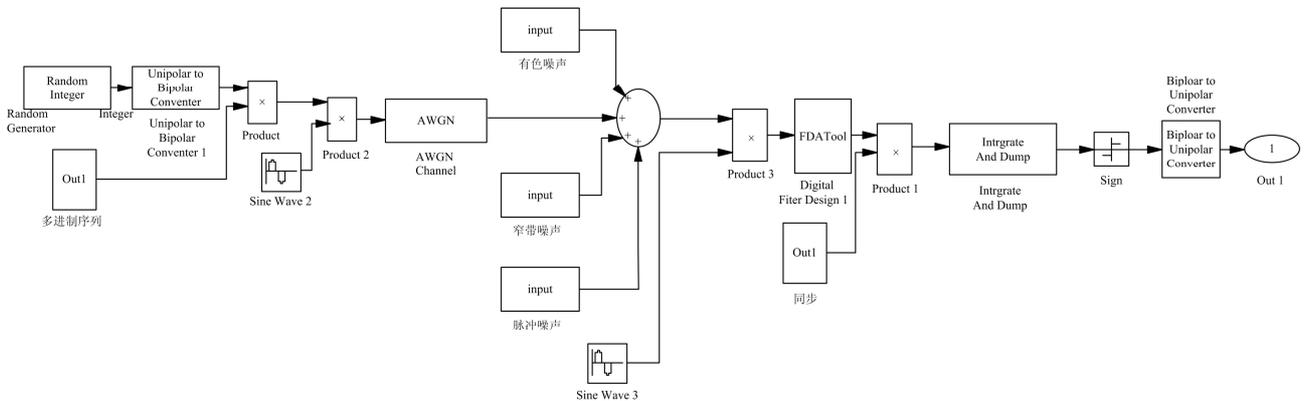


图 6 系统仿真模型

Fig. 6 System simulation model

在建模与仿真研究时, 通过改变信道中的噪声功率来改变信噪比, 即在不同信噪比条件下, 通过蒙特卡洛随机试验统计传输差错率, 从而得出信噪比与差错率之间的统计关系曲线。采用相同位数的二进制序列与多进制序列进行扩频来进行比较, 如图 7 所示。

从图 7 (a) 中可以看出, 在相同的电力线噪声条件下, 以误码率 10^{-3} 为目标, 多进制扩频序列的信噪比要优于二进制 2 个 dB。同样在图 7 (b) 中可以看出, 多进制的信噪比要优于二进制 5 个 dB。可见, 在抗噪声性能方面, 多进制要比二进制有明显的优势。

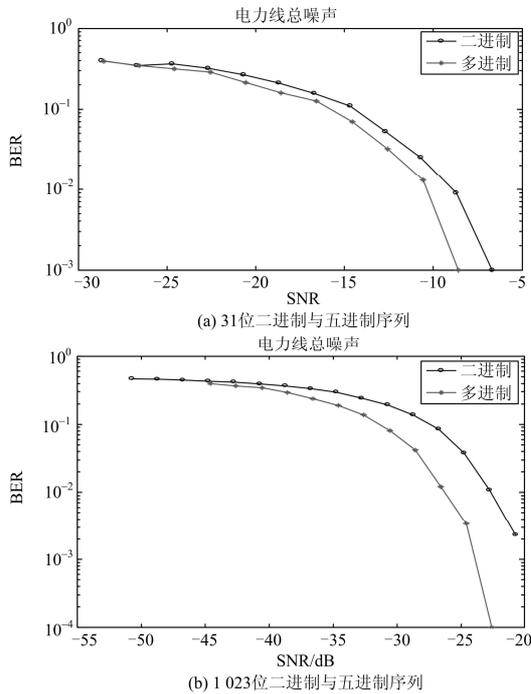


图 7 误码率示意图

Fig. 7 BER schematic

4 结语

电力线通信是抄表系统具有较大优势的通信技术。本文针对电力线信道中各噪声特性，研究了多进制扩频的电力线抄表系统。通过对多进制扩频系统在电力线信道的仿真分析，可以得出，多进制扩频系统比传统的二进制直接序列扩频具有更强的抗干扰能力，并且位数越多越能显著降低通信系统的误码率。

参考文献

[1] 王睿, 杨仁刚. 差分码移键控在低压电力线抄表中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 26-30.
WANG Rui, YANG Ren-gang. Differential code shift keying for meter reading system based on low-voltage power line[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 26-30.

[2] 王根平, 易灵芝. 电力线通信系统中的信道训练和信道估计方案[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 35-37.
WANG Gen-ping, YI Ling-zhi. Channel training and estimating scheme for power line communication[J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 35-37.

[3] 杨扬. 快速发展的低压电力线载波技术及其应用展望[J]. 浙江电力, 2002(4): 43-45, 48.

YANG Yang. The rapid development of low-voltage power line carrier technology and its application prospects[J]. Zhejiang Electric Power, 2002(4): 43-45, 48.

[4] 刘晓胜, 张良, 周岩, 等. 低压电力线载波通信新型组网模型性能分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 271-277.

LIU Xiao-sheng, ZHANG Liang, ZHOU Yan, et al. Performance analysis of novel low-voltage power line communication model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 271-277.

[5] 张有兵, 翁国庆, 曹一家. 网络化电能质量监测系统 中的配电网载波通信[J]. 电工技术学报, 2010, 25(6): 116-122, 149.

ZHANG You-bing, WENG Guo-qing, CAO Yi-jia. Distribution line carrier communication in networked power quality monitoring system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(6): 116-122, 149.

[6] 周陶涛, 马正新, 王剑, 等. 低压电力线通信性能测试 分析与路径选择[J]. 电工技术学报, 2008, 23(8): 126-130.

ZHOU Tao-tao, MA Zheng-xin, WANG Jian, et al. Testing and analysis performance of LV-PLC and transmission path selection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(8): 126-130.

[7] 李仲令, 郭燕, 周亮. 自编码扩频和直接序列扩频的 性能比较[J]. 电子科技大学学报, 2003, 32(5): 473-476.

LI Zhong-ling, GUO Yan, ZHOU Liang. Private communication and self-encoded spread spectrum[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2003, 32(5): 473-476.

[8] 姜霞, NGUIMBIS J, 程时杰. 低压配电网载波通信噪 声特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(11): 30-35.

JIANG Xia, NGUIMBIS J, CHENG Shi-jie. Noise characteristics investigation in low voltage power line

- communication[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(11): 30-35.
- [9] 吴军基, 郭昊坤, 孟绍良, 等. 电力线通信信道背景噪声建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 6-10.
WU Jun-ji, GUO Hao-kun, MENG Shao-liang, et al. Modeling of background noise in power line communication channel[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 6-10.
- [10] 肖勇, 房莹, 张捷, 等. 低压电力线载波通信信道特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(20): 20-25.
XIAO Yong, FANG Ying, ZHANG Jie, et al. Research on characteristics of low voltage power line communication channel[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(20): 20-25.
- [11] 林虹, 林东. PLC 道噪声建模及噪声发生器的设计[J]. 电力系统通信, 2011, 32(7): 61-65.
LIN Hong, LIN Dong. Modeling of PLC noise and design of noise generator[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2011, 32(7): 61-65.
- [12] 郭昊坤, 吴军基, 应展烽, 等. 一种改进的马尔科夫链及其在电力线通信信道脉冲噪声建模中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 129-132.
GUO Hao-kun, WU Jun-ji, YING Zhan-feng, et al. Application of improved Markov chain in impulse noise modeling of power line communication channel[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 129-132.
- [13] 高强, 闫华, 方舟. 基于移位寄存器的多进制扩频序列研究[J]. 信息通信, 2012, 26(6): 3-5.
GAO Qiang, YAN Hua, FANG Zhou. Research of M-ary spread spectrum sequences based on shift register[J]. Information & Communications, 2012, 26(6): 3-5.
- [14] 何迪, 何晨, 蒋铃鸽, 等. 二相与四相无限折叠混沌扩频序列的相关特性分析[J]. 通信学报, 2001, 22(3): 13-19.
HE Di, HE Chen, JIANG Ling-ge, et al. Correlation characteristics of binary phase and quadri phase ICMIC spreading sequences[J]. Journal of China Institute of Communications, 2001, 22(3): 13-19.

收稿日期: 2013-06-06; 修回日期: 2013-06-22

作者简介:

高 强 (1960-), 男, 教授, 主要研究方向为信号与信息处理、高电压与绝缘技术; E-mail: gaoqiang0001@sohu.com

王艳阳 (1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统通信及信息处理;

杨红叶 (1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统通信及信息处理。