m 序列伪随机动态测试信号建模与压缩检测方法

王学伟[1],董晓璇[1],王　琳[1],袁瑞铭[2],田海亭[2],姜振宇[2],王国兴[2]
(1. 北京化工大学 信息科学与技术学院,北京 100029;
2. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院,北京 100045)

摘要:针对智能电网中动态负荷对电能计量的影响问题,建立了 m 序列伪随机动态测试信号的参数模型,并分析了该测试信号的统计特性;证明了该动态测试信号的频域稀疏性,采用压缩感知理论建立了伪随机动态测试信号的压缩感知检测系统模型,采用稳态优化方法构建了压缩感知测量矩阵;在此基础上,针对 m 序列伪随机动态测试信号,提出了电能量值的压缩感知测量方法;仿真分析了长度为 255 位、511 位、1023 位单周期和多周期 m 序列动态测试信号的相对误差,误差均小于 10^{-12},可忽略不计,表明所提压缩感知测量方法能够准确测量伪随机动态测试信号的电能量值。

关键词:智能电网;动态负荷;m 序列;伪随机测试信号;测试信号模型;压缩检测模型;压缩感知测量方法;电能测量方法

中图分类号:TP 391　　**文献标识码**:A　　DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2017.02.022

0　引言

随着智能电网的加速建设,风能、太阳能、潮汐能等新能源的大量接入,电网中动态负荷以及具有非稳态特征的新型电源的输出普遍存在[1-4]。因此,建立能够反映随机动态特征的测试信号模型,以及研究一种随机型动态测试信号电能量的测量方法,建立检测系统模型,已经成为电能计量领域亟待解决的重要科学问题。

在测试信号的建模方面,近年来学者们均采用确定周期信号建模的方法建立了确定型动态测试信号模型:文献[5]建立了正弦和梯形包络调幅的动态测试信号时域模型;文献[6]建立了调相与调频的动态测试信号时域模型;文献[7-8]建立了通断键控(OOK)调幅动态测试信号的时域和频域模型。电力系统动态负荷的重要特征是其具有随机性,确定型动态测试信号模型不能测试动态负荷的随机特性对电能表动态误差的影响。因此建立伪随机动态测试信号模型,进而研究得到相应的动态误差测试方法十分重要。然而,通过对国内外的文献检索表明,目前尚未见随机型动态测试信号建模的文献报道。

在动态测试信号电能量检测方法方面,国内外学者针对稳态测试信号提出了时域电能量值测量算法[9]、频域基于快速傅里叶变换(FFT)的电能测量算法[10]以及在时频域中基于小波变换的电能量值测量算法[11-12]。但如何建立伪随机动态测试信号的电能量检测模型,是有待解决的科学问题。

在随机信号检测方法方面,压缩感知(CS)理论[13]与压缩检测(CM)方法[14-15]的提出,为检测随机信号提供了新的解决思路。目前 CM 信号检测方法的研究均是从理论层面解决二元通信信号"有"和"无"的检测问题[16],提出了针对通信信号的 CM 算法[17-18]。但 CM 算法的性能与测量矩阵的优越性相关,不能解决随机信号的电能量值的准确测量问题。

本文研究建立了 m 序列伪随机动态测试信号模型,采用 CS 这一现代信号处理工具,建立伪随机动态测试信号的电能量 CM 系统模型,并针对该电力动态测试信号,提出 CS 电能测量新方法。

1　m 序列调制的伪随机动态测试信号模型

1.1　m 序列调制的伪随机动态测试信号参数模型

本文采用将稳态信号转换为动态信号的方法,建立 m 序列调制的伪随机动态测试信号参数模型(以下简称为 m 序列动态测试信号模型),如图 1 所示。该方法利用 m 序列二元波形函数 $m(t)$ 对稳态工频电流信号 $i_s(t)$ 进行调制,建立具有伪随机动态

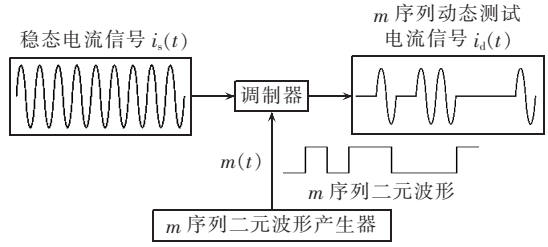

图 1　m 序列动态测试信号建模方法
Fig.1 Modeling of m-sequence dynamic test signal

收稿日期:2016-03-17;**修回日期**:2016-12-25
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577006);国网冀北电力有限公司电力科学研究项目(8KE000M15006)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51577006) and Research Program of State Grid Jibei Electric Power Co.,Ltd.(8KE000M15006)

特性的测试电流信号 $i_d(t)$ 模型，测试电压信号模型由稳态正弦电压信号 $u_s(t)$ 给出，动态测试功率信号模型由 $u_s(t)$ 与 $i_d(t)$ 相乘得到。建模过程如下。

设稳态电压信号和稳态电流信号分别为：

$$\begin{aligned} u_s(t)&=U\sin(\Omega_1 t+\varphi)\\ i_s(t)&=I\sin(\Omega_1 t)\end{aligned} \tag{1}$$

其中，U、I 分别为电压、电流幅值；φ 为电压初相位；$\Omega_1=2\pi f_1$ 为角频率，f_1 为工频频率。

二元波形函数 $m(t)$ 采用数值 m 序列 $m(k)$ 与矩形窗函数的乘积表示：

$$m(t)=\sum_{k=1}^{N} m(k)g(t-kT) \tag{2}$$

$$g(t-kT)=\begin{cases}1 & t\in[kT,(k+1)T]\\ 0 & \text{其他}\end{cases}$$

其中，$N=2^n-1$，n 为 m 序列的级数；$g(t-kT)$ 为窗函数，$T=1/f_1$ 为二元波形函数 $m(t)$ 的码元宽度，也为稳态工频电流信号 $i_s(t)$ 的周期。

由 $m(t)$ 对 $i_s(t)$ 进行幅度调制得到 $i_d(t)$ 为：

$$i_d(t)=m(t)i_s(t)=I\sum_{k=1}^{N}[m(k)g(t-kT)]\sin(\Omega_1 t) \tag{3}$$

其中，$I\sum_{k=1}^{N}[m(k)g(t-kT)]$ 为动态电流的幅度变化；$|m(t)|\leqslant 1$。

对于式(3)所示 m 序列动态测试电流信号，本文采用如图2所示的方案来实现。

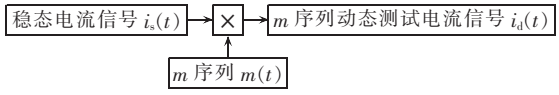

图2 m 序列动态测试信号实现方案

Fig.2 Implementation scheme of m-sequence dynamic test signal

根据 m 序列的生成原理，$m(k)$ 可以由其递推方程式表示如下：

$$\begin{aligned} m(k)&=C_1m(k-1)\oplus C_2m(k-2)\oplus\cdots\oplus C_nm(k-n)=\\ &\sum_{i=1}^{n}C_im(k-i)(\mathrm{mod}\ 2)\end{aligned} \tag{4}$$

其中，$C_i=0$ 或 $1(i=1,2,\cdots,n)$ 为 m 序列系数。将式(4)代入式(3)可得 m 序列动态测试电流信号的参数模型，见式(5)，其模型参数由 C_i、I、Ω_1 共同决定。

$$i_d(t)=I\sum_{k=1}^{N}\left\{\left[\sum_{i=1}^{n}C_im(k-i)(\mathrm{mod}\ 2)\right]g(t-kT)\right\}\sin(\Omega_1 t) \tag{5}$$

m 序列动态测试功率信号参数模型可由稳态电压信号 $u_s(t)$ 与式(5)相乘并化简得出：

$$\begin{aligned} p_d(t)=p_0\sum_{k=1}^{N}&\left\{\left[\sum_{i=1}^{n}C_im(k-i)(\mathrm{mod}\ 2)\right]g(t-kT)\right\}\times\\ &[\cos\varphi-\cos(2\Omega_1 t+\varphi)]\end{aligned} \tag{6}$$

$$p_0=UI/2$$

综上所述，m 序列动态测试信号的参数模型可由稳态电压信号 $u_s(t)$、式(5)和式(6)给出，其模型参数由 $C_i(i=1,2,\cdots,n)$、I、U、Ω_1、φ 决定。

图3展示了 m 序列动态测试信号参数模型给出的 m 序列动态测试信号的波形图。

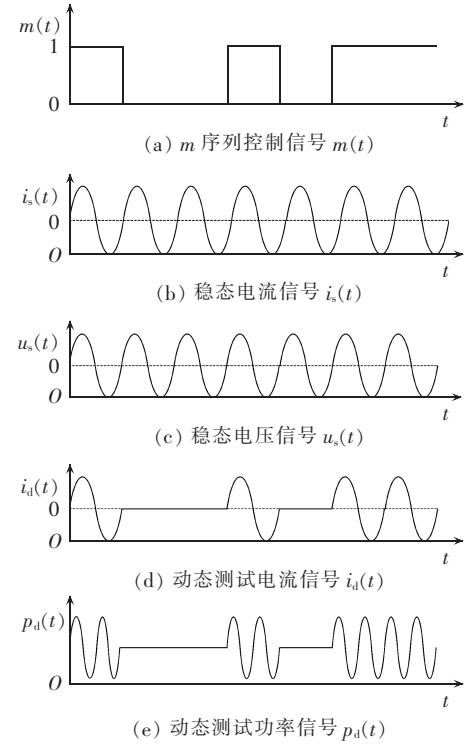

图3 m 序列动态测试信号波形

Fig.3 m-sequence dynamic test signal waveforms

1.2 m 序列动态测试信号模型的统计特性

本文建立的 m 序列伪随机信号模型，给出了一种长周期信号(比如：17级 m 序列，其长度为 $N=131071$ 位)，若观察测试时间大于一个周期，则是确定性周期信号，并显示出它的非随机特性；若观察测试时间小于一个周期，则是真实的随机二进制信号[20]。

以下将针对本文 m 序列动态测试电流信号模型，在测试信号的一个周期 T_m 内分析其统计特性。

m 序列 $m(k)$ 和与其对应的二元波形 $m(t)$ 是同一事物的2种不同描述方法[20]，故 $m(k)$ 与 $m(t)$ 具有相同的统计特性。以下由 $i_d(t)=m(t)i_s(t)$ 的函数关系，推导 m 序列动态测试电流信号 $i_d(t)$ 的数学期望 $E[i_d(t)]$、方差 $V_{ar}[i_d(t)]$、自相关函数 $R_d(\tau)$：

$$\begin{aligned} E[i_d(t)]&=i_s(t)E[m(t)]=i_s(t)E[m(k)]=\\ &I\sin(\Omega_1 t)E[m(k)]\end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} V_{ar}[i_d(t)]&=V_{ar}[m(t)i_s(t)]=i_s^2(t)V_{ar}[m(k)]=\\ &I^2\sin^2(\Omega_1 t)V_{ar}[m(k)]\end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} R_d(\tau)&=E[i_d(t)i_d(t+\tau)]=\\ &E[m(t)i_s(t)m(t+\tau)i_s(t+\tau)]=\\ &i_s(t)i_s(t+\tau)E[m(t)m(t+\tau)]=\\ &i_s(t)i_s(t+\tau)R_m(\tau)\end{aligned} \tag{9}$$

由式(7)—(9)可知：推导得出 m 序列 $m(k)$ 的期望 $E[m(k)]$、方差 $V_{ar}[m(k)]$、自相关函数 $R_m(\tau)$，就能确定 m 序列动态测试电流信号 $i_d(t)$ 的统计特性。

根据 m 序列的 0-1 分布特性，“0”比“1”少一个：$P(m=1)=\frac{2^{n-1}}{2^n-1}$，$P(m=0)=\frac{2^{n-1}-1}{2^n-1}$。则由二值分布的数学期望和方差定义与性质，可推导得出 m 序列的数学期望及方差为：

$$E[m(k)]=1\times P(m=1)+0\times P(m=0)=\frac{1}{2}+\frac{1}{2(2^n-1)} \tag{10}$$

$$V_{ar}[m(k)]=E[m^2(k)]-E^2[m(k)]=\frac{1}{4}-\frac{1}{4(2^n-1)^2} \tag{11}$$

在 m 序列的一个周期 T_m 内，$m(k)$ 为平稳的随机过程[20]，因此可计算 m 序列 $m(k)$ 的自相关函数为：

$$R_m(\tau)=\frac{1}{T_m}\int_0^{T_m} m(k)m(k+\tau)\mathrm{d}k=\begin{cases}\frac{1}{2}\left[\left(1+\frac{1}{N}\right)-\frac{|\tau|(N+1)}{2NT}\right] & |\tau|\leqslant T\\ \frac{1}{4}\left(1+\frac{1}{N}\right) & T<|\tau|\leqslant(N-1)T\end{cases} \tag{12}$$

当 m 序列为 17 级时，取 $n=17$，$N=2^n-1$，则有：

$$E[m(k)]=\frac{1}{2}+\frac{1}{2(2^n-1)}=\frac{1}{2}+\delta_1 \tag{13}$$

$$V_{ar}[m(k)]=\frac{1}{4}-\frac{1}{4(2^n-1)^2}=\frac{1}{4}+\delta_2 \tag{14}$$

$$R_m(\tau)=\begin{cases}\left(\frac{1}{2}-\frac{|\tau|}{4T}\right)(1+\delta_3) & |\tau|\leqslant T\\ \frac{1}{4}(1+\delta_3) & T<|\tau|\leqslant(N-1)T\end{cases} \tag{15}$$

其中，$|\delta_1|\leqslant 3.8\times10^{-6}$，$|\delta_2|\leqslant 1.5\times10^{-11}$，$|\delta_3|\leqslant 7.6\times10^{-6}$，即误差项 δ_1、δ_2、δ_3 可以忽略不计。

将式(13)代入式(7)得到 $E[i_d(t)]$ 为：

$$E[i_d(t)]=\frac{I}{2}\sin(\Omega_1 t) \tag{16}$$

将式(14)代入式(8)得到 $V_{ar}[i_d(t)]$ 为：

$$V_{ar}[i_d(t)]=\frac{I^2}{4}\sin^2(\Omega_1 t) \tag{17}$$

将式(15)代入式(9)得到 $R_d(\tau)$ 为：

$$R_d(\tau)=\begin{cases}\frac{I^2}{4}[\cos(\Omega_1\tau)-\cos(2\Omega_1 t+\Omega_1\tau)]\left(1-\frac{|\tau|}{2T}\right) & |\tau|\leqslant T\\ \frac{I^2}{8}[\cos(\Omega_1\tau)-\cos(2\Omega_1 t+\Omega_1\tau)] & T<|\tau|\leqslant(N-1)T\end{cases} \tag{18}$$

在动态条件下，由于 m 序列动态测试电流信号幅度的波动周期大于稳态电流信号的工频周期，因此，本文取稳态电流工频周期的整数倍为时间变量，研究 m 序列动态测试电流信号的统计特性。即取 $t=k_1T+t_0$，$\tau=k_2T(k_1,k_2=0,1,\cdots,N-1)$，$t_0<T$ 为常数，代入式(16)—(18)，得：

$$E[i_d(k_1T+t_0)]=\frac{I}{2}\sin(\Omega_1 t_0) \tag{19}$$

$$V_{ar}[i_d(k_1T+t_0)]=\frac{I^2}{4}\sin^2[\Omega_1(k_1T+t_0)]=\frac{I^2}{4}\sin^2(\Omega_1 t_0) \tag{20}$$

$$R_d(k_2T)=\frac{I^2}{8}[1-\cos(2\Omega_1 t_0)] \tag{21}$$

对于动态测试电流信号 $i_d(t)$，计算其在 $t=k_1T+t_0$ 时刻的时间均值 $\langle i_d(k_1T+t_0)\rangle$，并考虑 $N=2^{n-1}$，得：

$$\langle i_d(k_1T+t_0)\rangle=\lim_{N\to\infty}\frac{1}{N}\sum_{k_1=1}^{N}m(k_1T+t_0)i_s(k_1T+t_0)=\lim_{N\to\infty}\frac{2^{n-1}}{2^n-1}I\sin[\Omega_1(k_1T+t_0)]=\frac{I}{2}\sin(\Omega_1 t_0) \tag{22}$$

同理可计算 $i_d(t)$ 在 $t=k_1T+t_0$、$\tau=k_2T$ 的时间自相关函数 $\langle\overline{i_d(k_1T+k_2T+t_0)}\,i_d(k_1T+t_0)\rangle$，由伪随机序列的移位相加性[19]($m(k_1T)m(k_1T+k_2T)=-m(k_1T+lT)$ $(l=0,1,\cdots,N-1)$)，简化时间自相关函数，可得：

$$\langle\overline{i_d(k_1T+k_2T+t_0)}\,i_d(k_1T+t_0)\rangle=\lim_{N\to\infty}\frac{I^2}{2N}\sum_{k_1=1}^{N}m(k_1T+t_0)m(k_1T+t_0+k_2T)\times[1-\cos(2\Omega_1k_1T+2\Omega_1t_0+\Omega_1k_2T)]=\frac{I^2}{8}[1-\cos(2\Omega_1t_0)] \tag{23}$$

式(19)—(23)表明：在 $t=k_1T+t_0(k_1=0,1,\cdots,N-1;t_0<T)$ 为常数情况下，$i_d(t)$ 在测试信号周期 T_m 内是平稳的随机信号，且具有各态历经性。

由帕斯瓦尔定理可知，m 序列动态测试电流信号的自相关函数式(21)与其功率谱是一对傅里叶变换，则 m 序列动态测试电流信号的功率谱密度为：

$$S_d=F[R_d(k_2T)]=\frac{I^2\pi}{4}\left[1-\cos\left(\frac{4\pi}{T}t_0\right)\right]\delta(\Omega) \tag{24}$$

其中，$\delta(\Omega)$ 为 $R_d(k_2T)$ 经傅里叶变换后产生的直流分量，Ω 为模拟频率。

由式(24)可知 m 序列动态测试电流信号只在 $\Omega=0$ 点有离散频率分量，表明 m 序列动态测试电流信号在频域上具有稀疏性，为 CS 测量方法提供基础。

2　m 序列动态测试信号电能量值的 CS 测量方法

2.1　m 序列动态测试信号电能量的 CS 检测系统模型

由于式(24)所示 m 序列动态测试电流信号在频域具有稀疏性，CS 理论表明，在任何域具有稀疏

性的信号均可以通过 CS 的方法进行处理。本文采用 CS 非重构检测信号处理方法，建立 m 序列动态测试功率信号的检测系统模型，解决伪随机动态测试功率信号电能量的准确测量问题。

离散化式(6)所示 m 序列动态测试功率信号 $p_d(t)$，采样频率为 $f_s=N_s/T$，得到离散 m 序列动态测试功率信号 $p_d(n')$，其中 N_s 为工频信号采样点数。对于长度为 $N_m=N\times N_s$ 的离散测试信号 $p_d(n')$，用向量形式表示为：$\boldsymbol{p}_d=[p_d(1),p_d(2),\cdots,p_d(N_m)]^T$。

构建信号 $\boldsymbol{p}_d$ 的CS 检测系统模型见图 4。m 序列动态测试功率信号 $\boldsymbol{p}_d$ 作为 CS 的原始信号，经过 CS 测量矩阵 $\boldsymbol{\Phi}$ 投影降维后，实现对 $\boldsymbol{p}_d$ 信号电能量的测量，测量值为 E。根据图 4 建立 m 序列动态测试功率信号的电能量 CS 检测系统数学模型为：

$$E=\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{p}_d \tag{25}$$

其中，E 为信号电能量的CS 测量值；$\boldsymbol{\Phi}$ 为 $1\times N_m$ 阶 CS 测量矩阵。

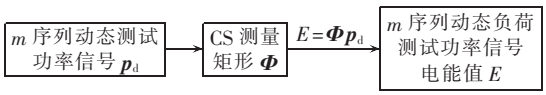

图 4 m 序列动态测试信号 CS 检测系统模型

Fig.4 CS measurement system model for m-sequence dynamic test signal

式(25)还给出 CS 检测系统的输入、输出之间的关系，$\boldsymbol{p}_d$ 作为 CS 检测系统的输入，是系统的检测变量，E 作为系统的输出，$\boldsymbol{\Phi}$ 又为系统状态矩阵。下文将构建最优测量矩阵 $\boldsymbol{\Phi}$，使 m 序列动态测试信号的电能量 E 与理论电能量 E_0 相对误差 δ 最小，即：

$$\left|\frac{\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{p}_d-E_0}{E_0}\right|=\delta_{\min} \tag{26}$$

2.2 CS 测量矩阵的构建

本文针对式(25)所示 CS 检测系统，采用稳态优化方法构建 CS 测量矩阵 $\boldsymbol{\Phi}$。

根据上述对信号 $p_d(t)$ 的采样方法，对式(6)进行离散化，可得动态测试功率信号的离散表达式如下：

$$p_d(n')=p_0\left\{\sum_{k=1}^{N}\left[\sum_{i=1}^{n}C_i m(k-i)(\mathrm{mod}\ 2)\right]g(n'-kT)\right\}\times[\cos\varphi-\cos(2\omega_1 n'+\varphi)]$$

其中，$\omega_1=\Omega_1/f_s=2\pi/N_s$ 为数字频率。为了保证通过优化的方法构造测量矩阵 $\boldsymbol{\Phi}$，将信号 $p_d(n')$ 中 $m(k)$ 置 1，此时 $p_d(n')$ 可作为系统优化的稳态输入信号，在输入信号稳态的情况下对系统进行优化，获得系统稳定状态量 $\boldsymbol{h}_{1\times N_s}$。设系统状态量为 $\boldsymbol{h}_{1\times N_s}=[h(n')]$，$\boldsymbol{p}_{d(N_s\times 1)}=[p_d(n')]^T$，根据式(25)可建立系统的输入、输出与 CS 的对应关系：

$$E=\max(\boldsymbol{p}_{d(N_s\times 1)}\times\boldsymbol{h}_{1\times N_s})=\boldsymbol{\Phi}_{1\times N_s}\boldsymbol{p}_{d(N_s\times 1)} \tag{27}$$

式(25)—(27)表明，若能够寻找得到最优系统状态量 $\boldsymbol{h}_{1\times N_s}$，使得系统输出 $E=E_0=N_s p_0\cos\varphi$，就可由式(27)优化得出确定型 CS 测量矩阵 $\boldsymbol{\Phi}_{1\times N_s}=[\phi(n')]=[h(N_s-n'+1)]$。

根据稳态最优理论，本文采用傅里叶变换在频域实现系统状态变量 $\boldsymbol{h}_{1\times N_s}=[h(n')]$ 的线性化：

$$P_d(\omega)=\mathrm{DTFT}[p_d(n')]=\sum_{n'=1}^{N_s}p_d(n')\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega n'}=\frac{IU}{2}\times\left[2\pi\cos\varphi\sum_{i=-\infty}^{+\infty}\delta(\omega-2\pi i)-\pi\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\varphi}\sum_{i=-\infty}^{+\infty}\delta(\omega+2\omega_1-2\pi i)-\pi\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi}\sum_{i=-\infty}^{+\infty}\delta(\omega-2\omega_1-2\pi i)\right] \tag{28}$$

$$H(\omega)=\mathrm{DTFT}[h(n')]=\sum_{n'=1}^{N_s}h(n')\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega n'} \tag{29}$$

其中，$\omega=\Omega/f_s$。

由式(27)—(29)建立检测系统频域输入与输出的关系：

$$E(\omega)=P_d(\omega)H(\omega) \tag{30}$$

并给出频域性能指标及约束条件：

$$\begin{aligned}&\min J=\min\left\{C_1\sum_{n'=1}^{N_s}[E(\omega)-E_0(\omega)]+C_2\sum_{n'=1}^{N_s}H^2(\omega)\right\}\\&\text{s.t. }\mathrm{DTFT}[E]=E_0\sum_{n'=1}^{N_s}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega n'}=N_s p_0\cos\varphi\sum_{n'=1}^{N_s}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega n'}\end{aligned} \tag{31}$$

其中，C_1、C_2 为常数。根据稳态优化方法求得：

$$\begin{aligned}H(\omega)=CP_d(\omega)=&C\left[2\pi\sum_{i=-\infty}^{+\infty}\delta(\omega-2\pi i)-\pi\sum_{i=-\infty}^{+\infty}\delta(\omega+2\omega_1-2\pi i)-\pi\sum_{i=-\infty}^{+\infty}\delta(\omega-2\omega_1-2\pi i)\right]=\\&C\sum_{n'=1}^{N_s}[1-\cos(2\omega_1 n')]\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega n'}\end{aligned} \tag{32}$$

其中，$C=C_1IU/(4C_2)$ 为常数。对式(32)中 $H(\omega)$ 的结果进行傅里叶反变换得：

$$h(n')=\mathrm{IDTFT}[H(\omega)]=C[1-\cos(2\omega_1 n')] \tag{33}$$

根据上述 $h(n)$ 与 $\phi(n)$ 的关系得：

$$\phi(n')=h(N_s-n'+1)=C\{1-\cos[2\omega_1(n'-1)]\} \tag{34}$$

将式(34)代入 $\boldsymbol{\Phi}_{1\times N_s}=[\phi(n')]$，构造得到 CS 检测系统中 CS 测量矩阵。

3 实验验证与结果分析

针对 m 序列动态测试信号，为了验证 CS 检测系统模型的正确性，本文采用 255 位、511 位和 1023 位 m 序列调制 50 Hz 的工频稳态信号，得到 m 序列动态测试电流信号及功率信号波形如图 5 所示。对该测试信号进行离散采样，采样频率 $f_s=2500$ Hz，获得离散动态测试电流信号。

实验分别采用不同的本原多项式系数产生 255 位、511 位和 1023 位单周期 m 序列动态测试信号，

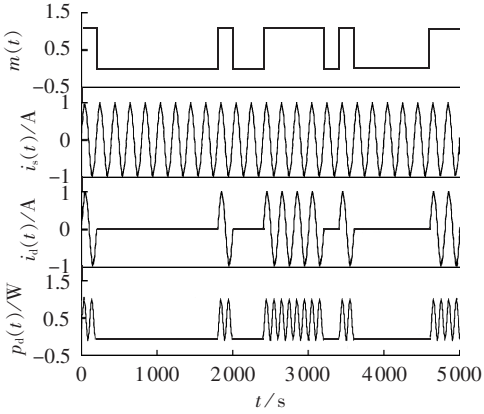

图 5　m 序列动态测试信号仿真波形

Fig.5 Simulative m-sequence dynamic test signal waveforms

按照上述 CS 测量方法,计算得到 m 序列动态测试信号电能量 E 的相对误差 δ,结果如表 1 所示。

表 1　单周期 m 序列动态测试信号的相对误差

Table 1 Relative error for different single-period m-sequence dynamic test signals

序号	本原多项式系数	序列长度/位	功率因数	误差 δ
1	101110001	511	1	7.03×10^{-14}
2	110101001	511	1	6.48×10^{-14}
3	101101001	511	1	7.12×10^{-14}
4	101100101	511	1	6.94×10^{-14}
5	11000001	255	1	1.74×10^{-14}
6	10010001	255	1	5.92×10^{-15}
7	1000100001	1023	1	1.22×10^{-14}
8	1101100001	1023	1	6.28×10^{-14}

实验采用表 1 中序号为 1 的本原多项式系数产生多周期 m 序列动态测试信号,按照相同的 CS 测量方法,计算该多周期 m 序列动态测试信号电能量 E 的相对误差 δ,结果如表 2 所示。

表 2　多周期 m 序列动态测试信号的相对误差

Table 2 Relative error for different multi-period m-sequence dynamic test signals

序号	m 序列周期	功率因数	误差 δ
1	1	1.0	7.03×10^{-14}
2	2	1.0	3.55×10^{-14}
3	4	1.0	7.62×10^{-14}
4	2	0.5	3.29×10^{-13}
5	4	0.5	1.21×10^{-13}

由表 1、表 2 可以看出,对于长度为 255 位、511 位、1023 位的单周期 m 序列动态测试信号以及多周期 m 序列动态测试信号,CS 电能测量方法的理论相对误差可忽略不计。因此,CS 测量方法能够准确测量出 m 序列动态测试信号的电能量。

4　结论

首先提出了 m 序列动态测试信号参数模型,该动态测试信号在一个 m 序列周期内具有随机动态变化特性,在多个 m 序列周期内具有周期性与循环遍历性,能反映实际动态负荷信号的多种状态;然后根据 CM 理论建立了 CS 检测系统模型,采用稳态优化方法,构建了 CS 测量矩阵,提出了电力伪随机动态测试信号的 CS 电能测量新方法,解决了电力伪随机动态测试信号的电能量值准确测量的理论问题;针对不同长度的 m 序列仿真分析得出了新方法的理论相对误差,结果表明本文 CS 测量新方法的理论相对误差,在动态电能测量时可忽略,优于已有的确定型动态测试信号电能量的测量误差。未来将进一步研究实际采样通道、模数转换、频谱泄漏对误差的影响等关键技术问题,并在实际测量中应用。

参考文献:

[1] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考[J]. 电力系统自动化,2009,33(9):1-4.
XIAO Shijie. Consideration of technology for constructing Chinese smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(9):1-4.

[2] 王守相,张卫涛,葛磊蛟,等. 智能配电网统一模型云与应用服务技术系统[J]. 电力自动化设备,2015,35(2):49-54.
WANG Shouxiang,ZHANG Weitao,GE Leijiao,et al. Unified model cloud and application service system for smart distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(2):49-54.

[3] 王芳,顾伟,袁晓冬,等. 面向智能电网的新一代电能质量管理平台[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):134-139.
WANG Fang,GU Wei,YUAN Xiaodong,et al. Power quality management platform for smart grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(7):134-139.

[4] 刘壮志,许柏婷,牛东晓. 智能电网需求响应与均衡分析发展趋势[J]. 电网技术,2013,37(6):1555-1561.
LIU Zhuangzhi,XU Baiting,NIU Dongxiao. Development tendency of equilibrium analysis and demand response for smart grid[J]. Power System Technology,2013,37(6):1555-1561.

[5] 陆祖良,王磊,李敏. 对电能表动态测量功能评价的讨论[J]. 电测与仪表,2010,47(4):1-4.
LU Zuliang,WANG Lei,LI Min. Discussion for evaluation of dynamic measurement function of electrical energy meter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2010,47(4):1-4.

[6] 李世松,赵伟. 基于 DDS 信号发生器的智能电表动态测量功能评估方法初探[J]. 电测与仪表,2010,47(10):1-5.
LI Shisong,ZHAO Wei. A method for dynamic measurement capabilities evaluation of smart meter based on DDS signal generator[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2010,47(10):1-5.

[7] 王学伟,温丽丽,贾晓璐,等. 智能电能表动态误差的 OOK 激励测试方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(9):143-147.
WANG Xuewei,WEN Lili,JIA Xiaolu,et al. OOK-driven dynamic error measurement of smart energy meter[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(9):143-147.

[8] 王学伟,贾晓璐,王琳,等. 电能表动态误差特性实验研究[J]. 电测与仪表,2013,50(12):1-4.
WANG Xuewei,JIA Xiaolu,WANG Lin,et al. Experimental

research for dynamic error characteristic of electrical energy meter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2013,50(12):143-147.

[9] STENBAKKEN G N. A wideband sampling wattmeter[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems,1984,103(10):2919-2926.

[10] ZHUANG Fusheng,GENG Zhongxing,YUAN Wei. The algorithm of interpolating windowed FFT for harmonic analysis of electric power system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2001,16(2):160-164.

[11] YOON W K,DEVANEY M J. Reactive power measurement using the wavelet transform [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement,1999,2(2):246-252.

[12] 王学伟,胡令彬. 采用第二代小波变换的功率测量方法[J]. 计量学报,2008,29(1):73-76.
WANG Xuewei,HU Lingbin. Second generation wavelet transform for power measurement[J]. Acta Metrologica Sinica,2008,29(1):73-76.

[13] DONOHO D D L. Compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory,2006,52(4):1289-1306.

[14] DUARTE M,DAVENPORT M A,WAKIN M B,et al. Sparse signal detection from incoherent projections[C]//2006 IEEE International Conference on Acoustics,Speech and Signal Processing. Toulouse,France:IEEE,2006:305-308.

[15] DAVENPORT M A,BOUFOUNOS P T,WAKIN M B,et al. Signal processing with compressive measurements[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing,2010,4(2):445-460.

[16] HAUPT J,NOWAK R. Compressive sampling for signal detection[C]//IEEE International Conference on Acoustics,Speech and Signal Processing,2007. Honolulu,HI,USA:IEEE,2007:Ⅲ-1509-Ⅲ-1512.

[17] 刘冰,付平,孟升卫. 基于正交匹配追踪的压缩感知信号检测算法[J]. 仪器仪表学报,2010,31(9):1959-1964.
LIU Bing,FU Ping,MENG Shengwei. Compressive sensing detection algorithm based on orthogonal matching pursuit[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2010,31(9):1957-1964.

[18] 刘冰,付平,孟升卫. 基于采样值数字特征的压缩感知信号检测方法[J]. 仪器仪表学报,2011,32(3):577-582.
LIU Bing,FU Ping,MENG Shengwei. Compressive sensing signal detection method base on numerical characteristics of sampling value[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2011,32(3):577-582.

[19] 李白男. 伪随机信号及相关辨识[M]. 北京:科学出版社,1987:18-29.

[20] 林可祥,汪一飞. 伪随机码的原理与应用[M]. 北京:人民邮电出版社,1978:142.

作者简介:

王学伟

王学伟(1958—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士研究生导师,研究方向为小波变换信号处理、压缩感知信号处理、电参量与功率电能测量理论、电能质量分析理论(**E-mail**:wangxw@mail.buct.edu.cn);

董晓璇(1990—),女,新疆乌鲁木齐人,硕士研究生,研究方向为压缩感知信号处理、电参量与功率电能测量理论(**E-mail**:ssarahddddd@163.com)。

Modeling of *m*-sequence pseudo-random dynamic test signal and compressive measurement method

WANG Xuewei[1],DONG Xiaoxuan[1],WANG Lin[1],YUAN Ruiming[2],TIAN Haiting[2],JIANG Zhenyu[2],WANG Guoxing[2]

(1. College of Information Science and Technology,Beijing University of Chemical Technology,Beijing 100029,China;
2. Electric Power Research Institute,State Grid Jibei Electric Power Company Limited,Beijing 100045,China)

Abstract: Aiming at the influence of dynamic loads on the electric energy measurements in smart grid,a parameter model of *m*-sequence pseudo-random dynamic test signal is established,its statistic characteristics are analyzed,and its frequency-domain sparsity is then verified. A compressive sensing measurement system model of pseudo-random dynamic test signal is established based on the compressive sensing theory and the steady-state optimization method is applied to obtain the compressive sensing measurement matrix,based on which,a compressive sensing measurement method for measuring the electric energy of *m*-sequence pseudo-random dynamic test signal is proposed. The relative error of *m*-sequence dynamic test signal is simulated and analyzed for different types,single and multiple periods,as well as different lengths,255 bits,511 bits, and 1023 bits. Being neglectable,all the calculated relative errors are less than 10^{-12},which shows that, the proposed compressive sensing measurement method can accurately measure the electric energy of pseudo-random dynamic test signal.

Key words: smart grid; dynamic loads; *m*-sequence; pseudo-random test signals; test signal models; compressive measurement model; compressive sensing measurement method; electric energy measurement method