

文章编号:1001-9081(2010)10-2843-03

## 优化混沌扩频序列的抗干扰性能分析

何世彪, 罗冬梅, 谷 诚

(重庆大学 通信工程学院, 重庆 400044)

(luodm841027@126.com)

**摘 要:** 为了提高基于混沌序列的直序码分多址系统(DS/CDMA)抗干扰性能, 提出一种优化混沌序列性能的优选算法, 将得到的优化序列应用于DS/CDMA系统中, 研究分别在加入单频干扰、部分频段干扰、脉冲干扰情况下的抗干扰性能。结果表明优化后的改进型Logistic映射混沌序列可利用的码数众多, 抗干扰能力强, 且系统误码率较低, 与Gold序列相比, 在相同误码率情况( $10^{-1}$ )下, 信噪比至少可改善2 dB, 更适合用于DS/CDMA系统和通信抗干扰技术中。

**关键词:** 混沌序列; 直序码分多址; 抗干扰; 优选算法; 误码率

**中图分类号:** TN914.53 **文献标志码:** A

## Anti-jamming performance analysis of optimal chaotic spread spectrum sequences

HE Shi-biao, LUO Dong-mei, GU Cheng

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** In order to improve the anti-jamming performance of Direct Sequence/Code Division Multiple Access (DS/CDMA) system based on chaotic sequences, an optimization algorithm for choosing chaotic sequences was proposed. The optimal improved Logistic-map chaotic sequences were applied to DS/CDMA system, and the anti-jamming performances were studied under different kinds of jamming such as single-frequency interference, partial-band interference, and impulsive interference. The results show that the optimal improved Logistic-map chaotic sequences have larger capacity, excellent anti-jamming ability, and lower Bit Error Rate (BER). Compared with the Gold sequence, with the same BER, SNR can be improved at least 2 dB, so they are more suitable for DS/CDMA system and anti-jamming technology.

**Key words:** chaotic sequence; Direct Sequence/Code Division Multiple Access (DS/CDMA); anti-jamming; optimization algorithm; Bit Error Rate (BER)

### 0 引言

在直序码分多址系统(Direct Sequence/Code Division Multiple Access, DS/CDMA)中, 系统的抗干扰性能、抗截获能力、通信质量和系统容量等性能指标的优劣都与扩频序列直接相关。传统直扩系统中所采用的码字一般为 $m$ 序列、Gold序列或者复合码, 这些序列几乎都是以代数方法为基础, 用移位寄存器产生的, 普遍存在复杂度较低、保密性不高和码字数量有限的缺点。而混沌信号具有类噪声、伪随机、非周期和对初值极其敏感等特性, 根据混沌映射方程, 可以产生大量相关性很好的混沌序列<sup>[1]</sup>。因此, 它非常适合用在码分多址扩频通信系统中。

在电子通信对抗中存在着各式各样的干扰形式, 常见的有: AWGN干扰、单频干扰、部分频段干扰和脉冲干扰等<sup>[2-3]</sup>。这些干扰对系统性能均有不同程度的影响。因此, 研究基于混沌扩频序列的抗干扰性能, 具有重要理论意义和实际价值。本文提出了一种优化混沌扩频序列性能的优选算法, 并将得到的优化改进型Logistic映射混沌序列应用于存在加性高斯白噪声的DS/CDMA扩频通信系统, 仿真分析了分别在加入单频干扰、部分频段干扰、脉冲干扰情况下的抗干扰性能。

### 1 DS/CDMA 混沌系统误码率分析

多址干扰是影响码分多址系统容量的最主要因素。用户接收机在完全同步并采用理想正交扩频地址码的条件下, 各用户之间是不会产生多址干扰的, 但在多径衰落信道中, 理想的完全同步是难以实现的, 况且扩频码也难以保持完全的正交性; 理论上已证明, 同时具有理想自相关和理想互相关特性的二进制码是不存在的, 这就是著名的Welch界。在混沌扩频通信中, 混沌扩频序列的理想相关特性由于截取和量化等原因被影响, 因此各个用户信号之间存在一定的相关性, 这就是多址干扰存在的根源。

对于二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)系统来说, 即使每个接收端的扩频序列与发射端是同步的, 但是由于存在绝对的时延和相位差, 因此遇到的多址环境往往是异步的<sup>[4]</sup>。假设有 $K$ 个用户同时通信的异步DS/CDMA系统在高斯白噪声信道中, 系统的输出信噪比<sup>[5]</sup>为:

$$SNR_i = \left\{ \left( \frac{1}{6N^3} \right) \sum_{k=1, k \neq i}^K \sum_{l=1}^{N-1} \left[ 2C_{k,i}^2(l) + C_{k,i}(l)C_{k,i}(l+1) \right] + N_0/(2PT) \right\}^{-1/2} \quad (1)$$

其中:  $N_0/2$  为白噪声功率,  $N$  是扩频序列码长,  $C_k, C_i$  是扩频

收稿日期: 2010-04-20; 修回日期: 2010-06-12。 基金项目: 重庆市科委自然科学基金资助项目(2007ba2017)。

作者简介: 何世彪(1963-), 男, 安徽安庆人, 教授, 博士, 主要研究方向: 宽带无线通信、飞行器测控; 罗冬梅(1984-), 女, 四川宜宾人, 硕士研究生, 主要研究方向: 混沌扩频通信; 谷诚(1985-), 男, 江西庐山人, 硕士研究生, 主要研究方向: 混沌扩频通信。

序列的非周期自相关函数,  $C_{k,i}(l)$  是第  $k$  个用户与第  $j$  个用户之间的互相关,  $N_0/PT$  为加性高斯白噪声和信号能量的比值。根据中心极限定理, 可认为整个噪声服从高斯分布的随机变量, 因此可以直接写出系统第  $i$  个用户的误码率为  $BER = Q[(SNR_i)^{1/2}]$ 。

可见在信噪比一定的情况下, DS/CDMA 混沌系统的误码性能主要受到混沌序列离散非周期互相关函数  $C_{k,i}(l)$  的影响。

由于多址干扰在 DS/CDMA 系统中是不可避免的, 所以可以从式(1)入手, 对混沌序列的相关性能进行优化, 来降低多址干扰。

## 2 混沌扩频序列优选算法

选取一种混沌映射, 将产生的实值序列转化为二进制序列, 然后在数目众多的混沌序列中进行优选, 剔除部分性能不佳的混沌序列。在扩频通信中, 码元数的平衡性与载波抑制制度有关, 如果不平衡将会使系统的载波泄漏变大, 影响系统的性能, 因此在进行序列选取时可以用平衡性作为一个优选准则。文献[6]提出扩频码的平衡性要满足  $E < 0.01$ , 本文取  $E = 1/N$  作为优选准则。为了提高序列的性能, 本文把自相关峰值和均方值以及互相关峰值和均方值均作为序列优选的准则, 且四者分别对应设定的阈值  $Th_1, Th_2, Th_3, Th_4$ 。

互相关峰值的优选一直是优选中的一大难题, 一是运算量巨大; 二是根据两两相关值, 选取所有互相关特性满足要求的码字有一定困难。本文结合连通集思想和逻辑与运算, 提出了一种新的互相关优选算法来解决这一问题。

在应用互相关准则进行优选的过程中, 可以将经过一轮自相关准则优选后的每一个混沌扩频序列看做图中的一个节点, 满足互相关准则的两个序列可以认为是互相连通的节点, 因此互相关优选就相当于在图中寻找连通集的过程。目前一般采用递归算法求图中连通集, 但是这里的节点图是方阵图, 本文利用这个特点, 提出一种简便的寻找连通集的算法。此算法原理如下: 对经过自相关优选后的  $N$  个码字, 计算其互相关函数  $C_{ij}(m)$ , 每一个  $C_{ij}(m)$  求其绝对值的最大值  $C_{ij}^{\max}$ , 然后将所得到的值与阈值  $Th_3$  进行比较, 得到一个标志矩阵  $F$ , 如表1所示。方阵  $F$  的各元素取值如下: 当  $i \neq j$  时, 如果满足互相关峰值优选条件  $C_{ij}^{\max} \leq Th_3$  (互相关峰值阈值) 时,  $F_{ij} = 1$ , 否则  $F_{ij} = 0$ ; 当  $i = j$  时, 则设定  $F_{ij} = 1$ , 即对角线上的元素全部为1。此时, 再连续运用逻辑与运算找出所有两两互相关不为0元素的下标, 即可找到每一个序列的连通集。

表1 码字集合两两互相关峰值的标志矩阵

	$seq_1$	$seq_2$	$seq_3$	...	$seq_N$
$seq_1$	1	$F_{12}$	$F_{13}$	...	$F_{1N}$
$seq_2$	$F_{21}$	1	$F_{23}$	...	$F_{2N}$
$seq_3$	$F_{31}$	$F_{32}$	1	...	$F_{3N}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$
$seq_N$	$F_{N1}$	$F_{N2}$	$F_{N3}$	...	1

在 Matlab 中实现此算法步骤如下。

步骤1 任选一个码字  $seq_i$ , 借助  $A = F(i, :)$  函数将  $F$  矩阵中的第  $i$  行赋给向量  $A$ 。一般从第1 ( $i = 1$ ) 个码字开始, 即:  $A = \{F_{11}, F_{12}, \dots, F_{1N}\}$ 。

步骤2 借助  $X = find(A)$  函数求  $A$  不为0元素的下标。此时  $X = \{i, k_1, k_2, \dots, k_l\}$ , 表示所有的  $N$  个码字集合中, 有  $l$  个码字  $\{C_{k1}, C_{k2}, \dots, C_{kl}\}$  与  $C_i$  的互相关函数最大值小于给定的阈值  $Th_3$ 。

步骤3 令  $k = 2$ , 开始进行优选, 此时借助  $m = X(k)$  函数将矩阵  $F$  的第  $m$  行即第  $k_1$  行与向量  $A$  进行逻辑与运算, 得到新的向量  $A$  和  $X$ 。此时, 记  $X = \{i, k_1, l_1, l_2, \dots, l_L\}$ , 表示所有的  $N$  个码字集合中, 有  $L$  个码字  $\{C_{l1}, C_{l2}, \dots, C_{lL}\}$  同时与码字  $C_i$  和  $C_{k1}$  的互相关函数最大值小于给定的阈值  $Th_3$ 。

步骤4 令  $k = k + 1$ , 反复执行步骤3, 直到  $k > length(X)$ , 此时  $X$  为第  $i$  个序列的连通集。返回步骤1, 对下一个码字进行优选, 直到所有序列用完, 根据矩阵下标可以找出相应的混沌扩频序列, 完成优选过程。

通过优选过程可以看出, 本算法时间复杂度为  $O(N)$ , 而传统递归算法时间复杂度为  $O(N^2)$ , 本算法较大地节省了运算量, 且具有普遍适用性, 适用于传统的伪随机序列和所有的混沌映射序列。原因如下。

1) 本文优选算法的优选准则是从平衡度、自相关和互相关三个方面进行优选, 优选过程只是设定相应的阈值进行筛选和建立互相关峰值矩阵, 因此对于传统的伪随机序列和所有的混沌映射序列, 包括 Logistic 映射、Chebyshev 映射、Tent 映射、改进型 Logistic 映射以及由它们产生的级联混沌映射和内嵌式混沌映射所得到的混沌序列均适用。

2) 本文算法是收敛的, 具有有穷性和有效性。一方面: 算法中第  $i$  个序列的连通集只在第  $i + 1$  和第  $N$  个序列中寻找, 只要  $k > length(X)$  就立即停止搜索, 避免了不必要的搜索; 另一方面, 如果存在一个大小为  $R$  的连通集, 则本算法一定能够将其找出, 这是因为对于任一序列形成的向量  $A$ , 排在首位的序列, 算法必能找到第二个序列充当第二个节点进行逻辑与运算得到新的向量  $A$ 。同样, 此时  $A$  中的第三个序列作为第二个节点的子辈, 与前两个序列满足相关条件, 也具备了继续进行逻辑与运算的条件。如此往复, 总能找到向量中的末位序列充当第  $R$  级节点, 从而得到这个大小  $R$  的连通集。

用本文提出的优选准则对改进型 Logistic 映射 ( $x_{k+1} = 1 - 2x_k^2$ ,  $-1 < x_k < 1$ ) 混沌序列进行优选。令初始值  $x_0 = \sqrt{3} - 1$ , 其迭代步长为  $10^{-5}$ , 分别产生 4 000 个序列长度为 255, 1 023, 2 047, 4 095 的改进型 Logistic 二进制混沌扩频序列, 然后根据设定的阈值进行优选。表2给出了四种不同长度的改进型 Logistic 混沌序列每一步的优选结果, 可以看出, 随着序列长度增加, 绝对平衡序列数越来越少; 但用本文的优选方法, 仍可选出较多的序列, 若采用  $E \leq 0.02$  的相对平衡度, 则优选出的序列将更多。结合表3可以看出, 优选后序列的自相关和互相关性能较优选前有很大的改善; 同时, 在同等序列长度时, 与对角线优选算法[6]相比, 两种优选算法在优选后的序列的自相关和互相关性能相当, 但是本文优选出的个数却远大于对角移动法优选出的序列个数, 所以本文提出的算法更优, 且更能满足大用户容量的扩频通信系统的要求。

表2 每一步筛选后混沌序列剩余数目

序列长度	平衡准则	自相关准则	互相关准则
255	606	316	85
1 023	497	254	69
2 047	343	182	50
4 095	255	126	49

表 3  $N = 255$ , 优选前后的改进型 Logistic 序列性能比较

阶段	自相关旁瓣 峰值平均	自相关旁瓣 均方根值	互相关 峰值平均	互相关 均方根值
优化前	0.2170	0.0624	0.2231	0.0686
优化后	0.1510	0.0424	0.1700	0.0443

### 3 抗干扰性能仿真分析

为了验证用本文提出优选算法得到的混沌扩频序列具有良好的抗干扰性能,将它们应用于 DS/CDMA 系统,并在 Matlab 环境下,采用 Monte Carlo 方法进行仿真。每一次仿真都在改进型 Logistic 映射混沌优选序列中随机选取 12 个用户序列,码长为 1023,比较高斯白噪声信道的情况下,分别加入 3 种常见的干扰:单频干扰、部分频段和脉冲干扰,对 Gold 序列扩频和混沌序列扩频的 DS/CDMA 系统的误码率。仿真过程中假定序列理想同步。

1) 仅存在加性高斯白噪声 (Additive White Gaussian Noise, AWGN) 干扰。在只有 AWGN 的情况下,得到的误码率随信噪比变化曲线如图 1 所示,由图可知:当信噪比较小时,两条误码率曲线基本吻合,此时两种序列的性能差别不大,信道中的加性高斯噪声是影响系统的主要因素。随着信噪比的增大,两条误码率曲线逐渐分开,而且差别越来越明显,此时系统的影响主要来源于多址干扰,可见随着  $E_b/[N_0(P/N_0)]$  增大,系统多址干扰将成为影响系统性能的关键因素。优选混沌序列在相同  $E_b/N_0$  下误码率更小,性能更优。

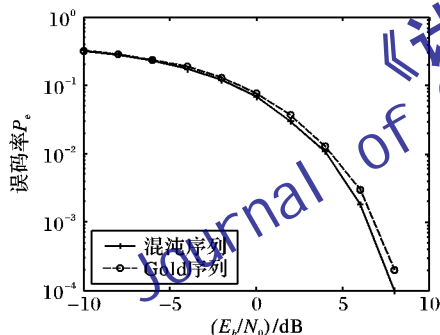


图 1 只有 AWGN 干扰下的仿真误码率

2) 加入单频干扰。这是一种容易产生的、且对直扩系统有效的干扰。为了获得最大的干扰,单频干扰的频率应当位于扩频信号带宽的中心。在 AWGN 信道中,加入单频干扰信号  $i(t) = 3\cos(0.5f_c t)$ ,其中  $f_c$  为码元速率,抽样频率  $f_s = 2 \times 0.5f_c$ ,抽样后的离散干扰信号为  $i(n) = 3\cos(0.25n)$ ,得到的仿真结果如图 2 所示,在误码率为  $10^{-1}$  时,Gold 序列的信噪比为 8 dB,而混沌序列的为 2 dB,信噪比改善了 6 dB。

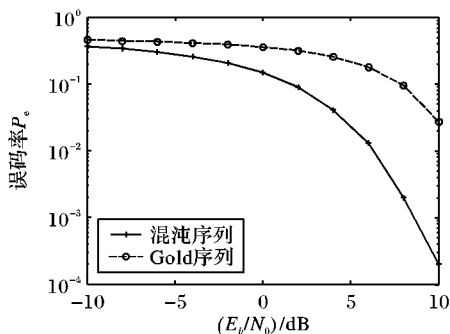


图 2 AWGN 和单频干扰下的仿真误码率

3) 加入部分频段干扰。在扩频带宽较宽的情况下,特别是对于跳频系统,把干扰功率集中在部分频带上可以获得更好的干扰效果。部分频段干扰易于产生,功率谱密度也可以做得较高。在 AWGN 信道中,加入部分频段干扰,干扰信号的带宽远小于扩频码字的带宽。取部分频段干扰的速率为  $f = (1/93)f_c$ ,幅度服从方差为  $\delta^2 = 100$  的高斯分布,得到的误码率曲线如图 3 所示,在误码率为  $10^{-1}$  时,Gold 序列的信噪比为 7 dB,而混沌序列的为 5 dB,信噪比改善了 2 dB。

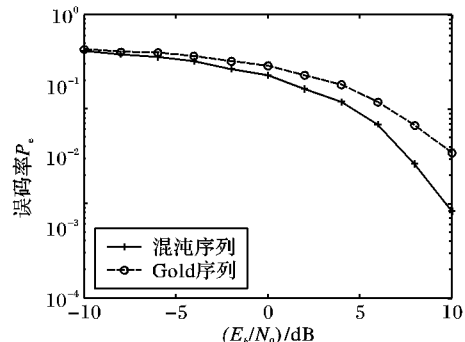


图 3 AWGN 和部分频段干扰下的仿真误码率

4) 加入脉冲干扰。脉冲干扰也叫部分时间人为干扰,对直接序列扩频通信 (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS) 系统性能有比较严重的影响。其干扰机以开/关状态交替工作,把干扰功率集中在脉冲之内,假如脉冲干扰机和宽带噪声干扰机有相同的平均功率,那么脉冲干扰机将有更大的峰值功率,因为它不是一直在发射的。脉冲干扰的频谱如噪声那样平坦,一般假定其功率谱密度能覆盖整个扩频系统的带宽  $W$ 。设脉冲占空比为  $\rho$ ,当干扰机处于发射状态时,接收机处干扰功率谱密度为  $J_0' = J/(PW)$ ,其中  $J$  是信号带宽  $W$  干扰源的平均功率。干扰机关机时,系统误码率是  $P_{b1}$ ;干扰机工作时,系统误码率是  $P_{b2}$ 。

在 AWGN 信道中,加入脉冲干扰,仿真中加入干扰的幅度为 1,持续时间为  $700T_c$ ,其中  $T_c = 1/f_c$ ,因此占空比  $\rho = 700/1023$ ,得到的仿真结果如图 4 所示,在误码率为  $10^{-1}$  时,Gold 序列的信噪比为 1.6 dB,而混沌序列的为 -0.4 dB,信噪比改善了 2 dB。

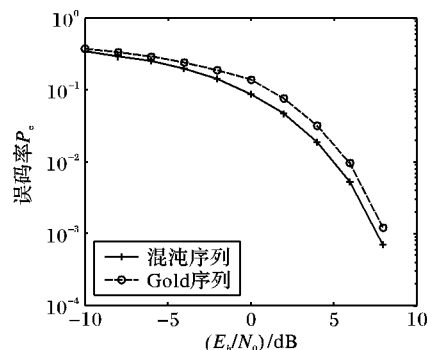
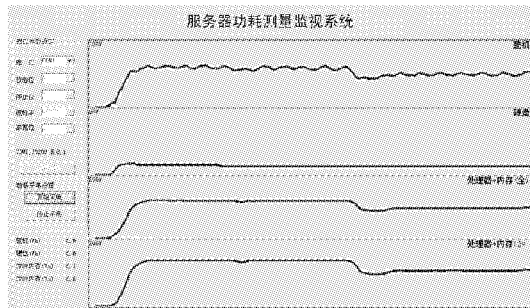


图 4 AWGN 和脉冲干扰下的仿真误码率

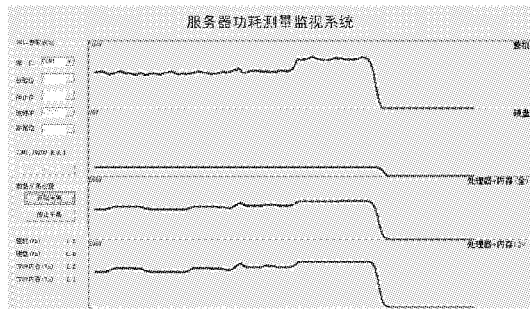
由图 2~4 可知:单频干扰、部分频段干扰和脉冲干扰的存在使得系统误码率性能较仅有 AWGN 干扰时明显下降,且部分频段干扰对系统性能影响最大,单频干扰次之,脉冲干扰的影响相对最小;但是从图中仍然可以看出,随着信噪比的增加,优选混沌序列抗干扰性能明显优于 Gold 序列,说明用本文优选算法产生的扩频序列具有良好的抗干扰能力。

(下转第 2849 页)





(a) 开机



(b) 关机

图 7 开关机过程监控

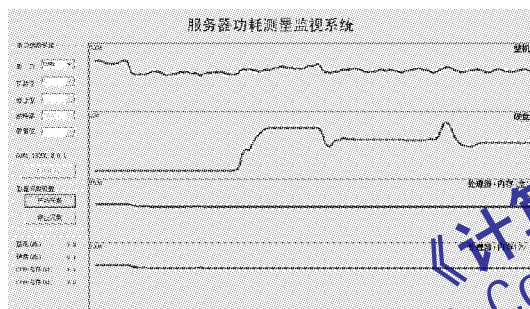


图 8 自检硬盘

用标准功率计测得正常运行时整机功耗为 199 W,拷贝时功率为 220 W,拷贝完毕后又回到 199 W。监控得到的数据与实际数据以及整体变化趋势保持一致,达到误差 1% 的测量要求。

#### 4 结语

为了方便检测计算机的功耗,基于 atmega16 单片机的服务器测量系统从硬件和软件两个方面对服务器关键能耗部件进行实时检测。实验表明:服务器功耗测量系统具有性能稳定、测量无损、实时准确、可远程监控的特点,能够应用于计算机管理时的能耗测量,各项测量指标达到了预先的要求。

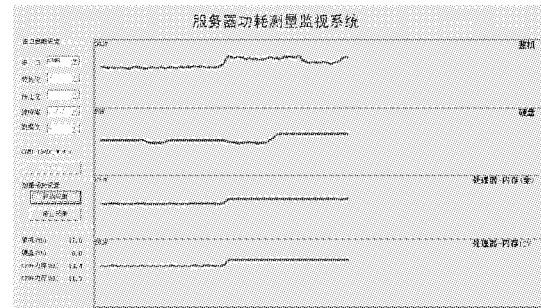
(上接第 2845 页)

#### 4 结语

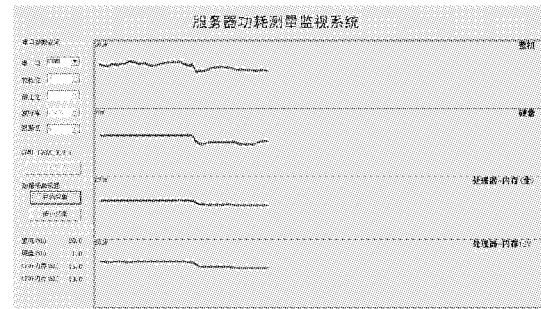
本文提出了一种简单的混沌扩频序列优选算法,在对产生的大量混沌序列进行优选时,能有效减少计算量;并将产生的优化混沌扩频序列应用于 DS/CDMA 系统中,分别在不同干扰下进行了仿真,结果表明本文方法产生的优化混沌扩频序列的性能得到很大提高,能提供的系统容量较大,且具有很强的抗干扰能力,在 DS/CDMA 和通信抗干扰技术中具有良好的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] HEN I, MERHAV N. On the threshold effect in the estimation of chaotic sequences [J]. IEEE Transactions on Information Theory,



(a) 拷贝开始



(b) 拷贝完成

图 9 拷贝过程监控

#### 参考文献:

- [1] 林守林,邵宗有,刘新春. 一种基于 CPU 利用率的功率控制策略的研究与实现[J]. 计算机工程与科学, 2009, 31(21): 282-285.
- [2] WANG KANFENG, HUANG JIWEN, FUKUNAGA M. Remote embedded power measurement system based on global network[C]// ICEMI '07: the 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments. Washington, DC: IEEE, 2007: 1-5.
- [3] 罗刚,郭兵,沈艳,等. 源程序级和算法级嵌入式软件功耗特性的分析与优化方法研究[J]. 计算机学报, 2009, 32(9): 1869-1875.
- [4] DIVAN D, LUCKJIFF G A, BRUMSICKLE W E, et al. A grid information resource for nationwide real-time power monitoring[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40(2): 699-705.
- [5] 杨书杰. 浅谈集成运放在电功率测量方面的应用[J]. 科技资讯, 2009(33): 89-90.
- [6] ZHANG JIAJIE, SHANG QIUFENG, DU CHONGGAO. A novel measurement system of electric power parameters based on DSP and ARM[C]// 2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2009: 353-356.

2004, 50(11): 2894-2904.

- [2] POISEL R A. 现代通信干扰原理于技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 168-169.
- [3] 陈洪,廖洁,张尔扬. 一种基于扩时的直接序列扩频系统抗脉冲干扰方法[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2006, 7(3): 220-224.
- [4] PURSLEY M. Performance evaluation for phase-coded spread-spectrum multiple-access communication (Part I): System analysis [J]. IEEE Transactions on Communication, 1997, 25(6): 795-803.
- [5] 付晓梅,曹宇,赵晶晶. 基于优化混沌扩频序列的 DS/CDMA 系统[J]. 天津大学学报, 2008, 41(1): 48-51.
- [6] 余振标,冯久超. 一种混沌扩频序列的产生方法及其优选算法[J]. 物理学报, 2008, 57(3): 1410-1413.