

一类非线性扩频序列的构造及其性能分析

吕虹¹, 戚鹏¹, 段颖妮², 陈万里¹, 解建侠¹, 孙全玲¹

(1. 安徽建筑大学 电子与信息学院, 安徽 合肥 230022; 2. 西安文理学院, 陕西 西安 710065)

摘要: 基于本原三项式线性函数, 构造了一类非线性序列. 首先根据非线性序列生成规律, 借助逻辑代数理论, 推导并提取了非线性序列特征函数, 利用特征函数筛分作用, 合成了非线性反馈函数, 据此实现了非线性序列生成. 最后, 对该类非线性序列特性进行了分析和计算, 并将其应用于直接序列码分多址通信系统(DS-CDMA)仿真实验中, 结果表明该类非线性序列不仅具有理想的伪随机特性、良好的线性复杂度, 还具有优于 m 序列、gold 序列的误码率.

关键词: 扩频序列; 非线性; 本原三项式; 反馈函数; 镜像; 误码率

中图分类号: TN801; TN914

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2013)10-1939-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.10.010

Constuction and Analyysis of a Class Non-linear Spread Spectrum Sequence

LV Hong¹, QI Peng¹, DUAN Ying-ni², CHEN Wan-li¹, XIE Jian-xia¹, SUN Quan-ling¹

(1. Department of Electronic and Information Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230022, China;

2. Xi'an College of Arts and Science, Xi'an 710065, China)

Abstract: In this thesis, we proposed a method to construct the feedback functions of the nonlinear shift registers based on three items' primary polynomial. First of all, we proved the characteristic state sets of the linear feedback shift registers with the feedback functions of three items' primary polynomial, we extracted its eigenfunction and synthesized the feedback function for the nonlinear shift register. Secondly, we implemented the non-linear feedback shift register on FPGA. Finally, we conducted analyses and calculations for new sequences generated by the nonlinear shift registers and simulated the sequences in direct sequence spread spectrum code division multiple access communication system(DS-CDMA). The results show unanimously that the new sequences dose not only possess ideal pseudorandom property and better linear complexity, but also get lower bit error rate(BER) than m sequence or gold sequence in the same communication system.

Key words: spread spectrum sequence; nonlinear; three items' primary polynomial; feedback function; enantiomorphous; bit error rate(BER)

1 引言

扩频通信地址码是序列设计中备受关注的课题之一. 作为扩频通信地址, 序列应该具有理想自相关和互相关特性. Welch 等理论界已证明同时具有理想自相关和互相关特性的序列集是不存在的^[1,2]. 近数十年, 为了提高通信系统抗干扰性能, 满足越来越多用户数, 人们一直在寻找相关特性更为理想、数量更大的序列集.

移位寄存器作为序列生成器能够生成伪码序列, m 序列、gold 序列都是线性反馈移位寄存器(LFSR)生成或衍生的重要伪码序列, 在各种通信系统都得到应用^[3,4]. 但是, m 序列、gold 序列都存在不足, m 序列数目

有限、线性复杂度低, 不能满足用户数的要求, 也难以抵御敌方攻击; gold 序列中不平衡序列, 易产生信息泄露. 本文基于线性反馈函数, 研究构造了一类非线性序列, 该序列是平衡序列且具有良好的线性复杂度, 若将其用于扩频通信系统, 是不可多得的扩频序列.

2 本原三项式移位寄存器

对于 n 阶移位寄存器, 反馈函数不同, 输出的序列也不同, 其中最大长度线性移位寄存器因输出 m 序列, 故又称为 m 序列移位寄存器. 在实际应用中, 最有使用价值的是本原三项式对应的 m 序列移位寄存器, 其反馈函数只有两项, 形式如下:

$$f_m(X) = x_i \oplus x_0 \quad (1)$$

其中, \oplus 模 2 加;

$x_i \in GF(2)$, 为寄存器第 i 位状态, $i = 1 \cdots n - 1$.

(1) 式是 m 序列移位寄存器反馈函数最简单的二项形式, 因其抽头少最为常用. 本文基于该种形式反馈函数构造非线性反馈函数, 故把 (1) 式称为母函数. 若所构造的非线性反馈函数生成的新序列周期长度仍然为 $2^n - 1$, 则称新序列为非线性 m 子序列, 简称 m 子序列.

m 序列移位寄存器状态转换规律可以用状态图描述. 图 1(a) 实线是 n 阶本原三项式 m 序列移位寄存器状态图, 其循环长度为 $2^n - 1$. m 序列移位寄存器遍历了除 0 以外的所有状态, 在它的 $2^n - 1$ 个状态中, 仅低位互反的状态对共有 $2^{n-1} - 1$ 对, 并称其为低位逻辑互反状态对; 同理, 仅高位互反的状态对也有 $2^{n-1} - 1$ 对, 称为高位逻辑互反状态对. 在移位寄存器状态转换中, 一对低位逻辑互反状态的后继是一对高位逻辑互反状态, 若改变 m 序列移位寄存器一对低位逻辑互反状态反馈函数值, 就实现了彼此互换后继, 形成如图 1(a) 虚线所示转换, 这里 s_i, s_j 是一对低位逻辑互反状态^[5].

3 基于本原三项式的非线性反馈函数

3.1 非线性移位寄存器状态图构造

由上述分析可知, 改变一对低位逻辑互反状态反馈函数值, 就形成如图 1(a) 虚线所示的状态转换, 显然其循环周期小于 $2^n - 1$. 如果存在另一对低位互反状态 s_m, s_n , 且其在状态转换中位置与 s_i, s_j 交错, 那么, 分别对其反馈函数值求反, 就可以得到如图 1(b) 实线所示的状态转换, 且其循环周期仍然为 $2^n - 1$. 把形成图 1(b) 实线所示状态转换的移位寄存器称为基于本原三项式的非线性移位寄存器, 又称为 m 子序列移位寄存器.

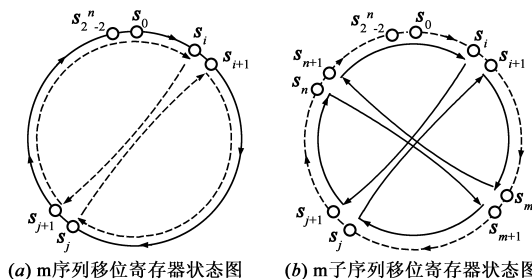


图1 移位寄存器状态图

3.2 m 子序列移位寄存器特征函数提取

在图 1(b) 中, 因改变了 m 序列移位寄存器状态转换中位置相互交错且仅低位互反的 $2i (0 < i \leq 2^{n-2} - 1)$ 对状态反馈函数值, 就形成了 m 子序列移位寄存器状

态图. 称这样的 $2i (0 < i \leq 2^{n-2} - 1)$ 对状态为 m 序列移位寄存器特征状态对, 形成新的转换大循环所需要的特征状态对构成了 m 序列移位寄存器一个特征状态集. 特征状态集中所有状态小项之和构成 $y(x)$:

$$y(X) = m_i + m_j + \cdots = \sum m_k \quad (2)$$

这里, 称 $y(x)$ 为 m 序列移位寄存器的特征函数, 简称 m 序列特征函数.

3.3 m 子序列反馈函数构造

由上述分析可知, 只要能够形成一个新的大循环, 就一定存在一个特征状态集. 每一个特征状态集都对应着一个确定的子序列. 根据图 1(b) 实线状态转换图知, 移位寄存器处于非特征状态时, 子序列移位寄存器保持 m 序列移位寄存器状态转换不变; 处于特征状态时, m 子序列移位寄存器改变 m 序列移位寄存器状态转换. 结合式 (2), 概括如下:

$$\text{处于特征状态时, } \begin{cases} y(X) = 1 \\ f'_m(X) = \overline{f_m(X)} \end{cases}$$

$$\text{处于非特征状态时, } \begin{cases} y(X) = 0 \\ f'_m(X) = f_m(X) \end{cases}$$

其中, $f'_m(X)$ 是 m 子序列移位寄存器反馈函数, 简称 m 子序列反馈函数.

上述分析说明, 函数 $f'_m(X)$ 因 $y(X)$ 取值不同而取 $f_m(X)$ 或其反函数, 故 $y(X)$ 对函数 $f'_m(X)$ 实现了筛分作用. 根据这种筛分作用, 合成 $f_m(X), y(X)$ 得到 $f'_m(X)$:

$$f'_m(X) = f_m(X) \oplus y(X) \quad (3)$$

根据式 (3), m 子序列反馈函数由母函数、非线性函数组成. 母函数 $f_m(X)$, 非线性函数由特征函数 $y(X)$ 确定. 显然, 子序列反馈函数可以由不同母函数 $f_m(X)$ 与不同特征函数 $y(X)$ 合成, 也可以由同一母函数 $f_m(X)$ 与不同特征函数 $y(X)$ 合成, 还可以由不同母函数 $f_m(X)$ 与相同特征函数合成. 可见, m 子序列极为丰富.

4 一类新序列

4.1 新序列特征状态集

(1) 式是两项式 m 序列移位寄存器反馈函数, 其中, $x_i (0 < i \leq n - 1)$ 为寄存器第 i 位状态. 若 $0 < i \leq (n/2)$, 移位寄存器有如下状态转换:

$$\underbrace{0 \cdots 0}_{n-(i+1)} \underbrace{1 \cdots 1}_{i+1} \rightarrow \underbrace{0 \cdots 0}_{n-i} \underbrace{01 \cdots 1}_i \rightarrow \underbrace{10 \cdots 01 \cdots 1}_{n-i+1} \rightarrow \cdots \rightarrow \underbrace{1 \cdots 1}_i \underbrace{0 \cdots 0}_{n-i} \rightarrow \cdots \quad (4)$$

$$\underbrace{0 \cdots 0}_{n-(i+1)} \underbrace{1 \cdots 10}_{i+1} \rightarrow \underbrace{10 \cdots 01 \cdots 1}_{n-i} \rightarrow \cdots \rightarrow \underbrace{1 \cdots 1}_i \underbrace{0 \cdots 01}_{n-i} \rightarrow \cdots \quad (5)$$

在 (4) 式转换中, 第一个状态 $\underbrace{0 \cdots 0}_{n-(i+1)} \underbrace{1 \cdots 1}_{i+1}$ 中 x_i 是 '1', x_0 是 '1', 由式 (1) 知, 母函数 $f_m(x)$ 在状态 $\underbrace{0 \cdots 0}_{n-(i+1)} \underbrace{1 \cdots 1}_{i+1}$ 时

取值为“0”,这个“0”将反馈给移位寄存器,作为下一个状态的最高位.所以,移位寄存器由状态 $\underbrace{0\cdots 0}_{n-(i+1)}\underbrace{1\cdots 1}_{i+1}$ 反馈、移位转换到 $\underbrace{0\cdots 0}_{n-i}\underbrace{1\cdots 1}_i$ 状态.

对于 $\underbrace{0\cdots 0}_{n-i}\underbrace{1\cdots 1}_i$ 状态,由于它的 x_i 是‘0’, x_0 是‘1’.根据式(1),母函数 $f_m(x)$ 在 $\underbrace{0\cdots 0}_{n-i}\underbrace{1\cdots 1}_i$ 状态时值为“1”,这个“1”将反馈给移位寄存器,作为下一个状态的最高位.所以,移位寄存器由状态 $\underbrace{0\cdots 0}_{n-i}\underbrace{1\cdots 1}_i$ 反馈、移位转换到 $\underbrace{10\cdots 0}_{n-i+1}\underbrace{1\cdots 1}_{i-1}$ 状态.依次类推,再经过 $(i-1)$ 次转换到达 $\underbrace{1\cdots 1}_i \underbrace{0\cdots 0}_{n-i}$ 状态.

在式(5)转换中,第一个状态 $\underbrace{0\cdots 0}_{n-(i+1)}\underbrace{1\cdots 1}_{i+1}$ 中 x_i 是‘1’, x_0 是‘0’,由式(1)知,母函数 $f_m(x)$ 在该状态时取值为“1”,这个“1”将反馈给移位寄存器,作为下一个状态的最高位.所以,移位寄存器由状态 $\underbrace{0\cdots 0}_{n-(i+1)}\underbrace{1\cdots 1}_{i+1}$ 反馈、移位转换到 $\underbrace{10\cdots 0}_{n-i}\underbrace{1\cdots 1}_i$ 状态.

对于 $\underbrace{10\cdots 0}_{n-i}\underbrace{1\cdots 1}_i$ 状态,由于 x_i 是‘0’, x_0 是‘1’.根据式(1),母函数 $f_m(x)$ 在该状态时值为“1”,这个“1”将反馈给移位寄存器,作为下一个状态的最高位.所以,移位寄存器由 $\underbrace{10\cdots 0}_{n-i}\underbrace{1\cdots 1}_i$ 状态反馈、移位转换到 $\underbrace{110\cdots 0}_{n-i+1}\underbrace{1\cdots 1}_{i-1}$ 状态.依次类推,再经过 $(i-2)$ 次转换到达 $\underbrace{1\cdots 1}_i \underbrace{0\cdots 0}_{n-i}$ 状态.

由此可见,状态 $\underbrace{0\cdots 0}_{n-(i+1)}\underbrace{1\cdots 1}_{i+1}$ 、 $\underbrace{0\cdots 0}_{n-(i+1)}\underbrace{1\cdots 1}_{i+1}$ 和 $\underbrace{1\cdots 1}_i$ $\underbrace{0\cdots 0}_{n-i}$ 、 $\underbrace{1\cdots 1}_i \underbrace{0\cdots 0}_{n-i}$ 在基于本原三项式的 m 序列移位寄存器状态转换中位置相互交错,故构成两个特征状态对,形成了一个特征状态集 $\{ \underbrace{0\cdots 0}_{n-(i+1)}\underbrace{1\cdots 1}_{i+1}$ 、 $\underbrace{0\cdots 0}_{n-(i+1)}\underbrace{1\cdots 1}_{i+1}$ 、 $\underbrace{1\cdots 1}_i \underbrace{0\cdots 0}_{n-i}$ 、 $\underbrace{1\cdots 1}_i \underbrace{0\cdots 0}_{n-i}$ $\}$.

以上证明了 $0 < i \leq (n/2)$ 时, $\{ \underbrace{0\cdots 0}_{n-(i+1)}\underbrace{1\cdots 1}_{i+1}$ 、 $\underbrace{0\cdots 0}_{n-(i+1)}\underbrace{1\cdots 1}_{i+1}$ 、 $\underbrace{1\cdots 1}_{i+1}\underbrace{0\cdots 0}_{n-i}$ 、 $\underbrace{1\cdots 1}_i \underbrace{0\cdots 0}_{n-i}$ $\}$ 是两项式 m 序列移位寄存器特征状态集.

同理,当 $(n/2) < i \leq n-1$ 时, $\{ \underbrace{0\cdots 0}_{i-1}\underbrace{1\cdots 1}_{n-(i-1)}$ 、 $\underbrace{0\cdots 0}_{i-1}\underbrace{1\cdots 1}_{n-(i-1)}$ 、 $\underbrace{1\cdots 1}_{n-(i-1)}\underbrace{0\cdots 0}_i$ 、 $\underbrace{1\cdots 1}_{n-i}\underbrace{0\cdots 0}_i$ $\}$ 是两项式 m 序列移位寄存器特征状态集.

4.2 新序列特征函数

根据特征状态集,提取特征函数式如下:

$0 < i \leq (n/2)$ 时,

$$y(X) = \overline{x_{n-1}} \cdots \overline{x_{i+1}} x_i \cdots x_1 x_0 + \overline{x_{n-1}} \cdots \overline{x_{i+1}} x_i \cdots x_1 \overline{x_0} + x_{n-1} \cdots x_n \overline{x_{n-(i+1)}} \cdots \overline{x_1} x_0 + x_{n-1} \cdots x_n \overline{x_{n-(i+1)}} \cdots \overline{x_1} \overline{x_0} + x_{n-1} \cdots x_n \overline{x_{n-(i+1)}} \cdots \overline{x_1} x_0 = \overline{x_{n-1}} \cdots \overline{x_{i+1}} x_i \cdots x_1 + x_{n-1} \cdots x_n \overline{x_{n-(i+1)}} \cdots \overline{x_1} = (\overline{x_{n-1}} + \cdots + \overline{x_{i+1}}) \cdot (\overline{x_i} \cdots \overline{x_1}) (x_{n-1} \cdots x_n \overline{x_{n-i}}) \cdot (\overline{x_{n-i-1}} + \cdots + \overline{x_1}) \quad (6)$$

$(n/2) < i \leq n-1$,

$$y(X) = \overline{x_{n-1}} \cdots \overline{x_{n-i+1}} x_{n-i} \cdots x_1 x_0 + \overline{x_{n-1}} \cdots \overline{x_{n-i+1}} x_{n-i} \cdots x_1 \overline{x_0} + x_{n-1} \cdots x_n \overline{x_{i-1}} \cdots \overline{x_1} x_0 + x_{n-1} \cdots x_n \overline{x_{i-1}} \cdots \overline{x_1} \overline{x_0} = \overline{x_{n-1}} \cdots \overline{x_{n-i+1}} x_{n-i} \cdots x_1 + x_{n-1} \cdots x_n \overline{x_{i-1}} \cdots \overline{x_1} = (\overline{x_{n-1}} + \cdots + \overline{x_{n-i+1}}) \cdot (\overline{x_{n-i}} \cdots \overline{x_1}) + (x_{n-1} \cdots x_n \overline{x_i}) \cdot (\overline{x_{i-1}} + \cdots + \overline{x_1}) \quad (7)$$

比较(6)、(7)两式可以看出:当 n 一定时,两式结构完全相同,均由两项之或组成.根据代数理论知,若 $x^n + x^i + 1$ 是本原多项式, $x^n + x^{n-i} + 1$ 也一定是本原多项式^[6],由此可以得到:若 $x_i \oplus x_0$ 是 m 序列移位寄存器反馈函数,则 $x_{n-i} \oplus x_0$ 也一定是 m 序列移位寄存器反馈函数,称 $x_i \oplus x_0$ 、 $x_{n-i} \oplus x_0$ 是一对镜像 m 序列反馈函数.所以, n 一定时,(6)、(7)两式就是对应 m 序列移位寄存器特征函数,(6)、(7)两式归纳如下:

$$y(X) = (\overline{x_{n-1}} + \cdots + \overline{x_{k+1}}) \cdot (\overline{x_k} \cdots \overline{x_1}) + (x_{n-1} \cdots x_{n-k}) \cdot (\overline{x_{n-k-1}} + \cdots + \overline{x_1}) \quad (8)$$

当 $0 < i \leq (n/2)$ 时, $k = i$; $(n/2) < i \leq n-1$ 时, $k = n-i$.

m 序列移位寄存器反馈函数总是镜像成对出现,且在一对镜像反馈函数中, $0 < i < (n/2)$ 中的 i 与 $(n/2) < i < n-1$ 中的 $n-i$ 是相等的.故一对镜像 m 序列移位寄存器具有相同的特征函数.

4.3 新序列反馈函数

根据子序列反馈函数合成方法,将特征函数式(8)与母函数 f_m 合成得到新序列反馈函数:

$$f'_m(X) = f_m(X) \oplus (\overline{x_{n-1}} + \cdots + \overline{x_k} \overline{x_{k-1}} \cdots \overline{x_1} + x_{n-1} \cdots x_{n-k+1} \overline{x_{n-k}} + \cdots + \overline{x_1})$$

若 n 取九,根据表 1 中给出的九阶 m 序列反馈函

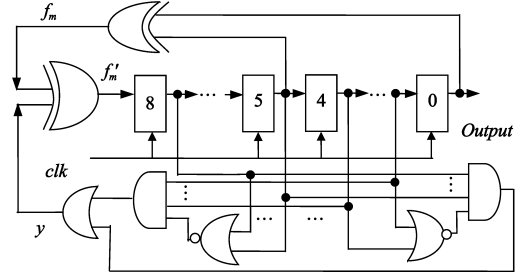


图2 九阶新序列生成器电路图

数,得到九阶新序列反馈函数:

$$f'_m(X) = x_5 \oplus x_0 \oplus (x_8 + x_7 + x_6 + x_5 \cdot (x_4 x_3 x_2 x_1) + (x_8 x_7 x_6 x_5) \cdot \overline{x_4 + x_3 + x_2 + x_1})$$

按照上式,可以通过软件编程生成新序列,也可以硬件实现.图2是在FPGA Cyclone II EP2C35F器件上实现的九阶新序列发生器.

5 新序列特性及应用分析

5.1 伪随机特性分析

新序列周期仍然为 $2^n - 1$,与 m 序列相同,且其游程特性、平衡特性也与 m 序列完全相同.对于新序列的自相关特性,根据自相关函数的定义:

$$R_b(t) = \frac{1}{2^n - 1} \sum_{k=0}^{2^n - 2} b_k b_{k+t}, t = 0 \cdots 2^n - 2 \quad (9)$$

其中,序列 $b_k (k = 0 \cdots 2^n - 2)$,是新序列 a_k 从 0、1 二元变换为 1、-1 二元的序列.按照式(9),我们对各阶序列都进行了大量计算,结果显示新序列具有良好的自相关特性.图3是5阶到15阶新序列自相关曲线,由图知随着周期增大,新序列自相关特性趋于 m 序列自相关特性,均显示出 δ 函数特性^[7-9].为便于比较,图中 τ

均按 $\tau = \frac{t}{p-1} \left(-\frac{p-1}{2} \leq t \leq \frac{p-1}{2} \right)$ 进行了归一化处理, p 为序列周期.

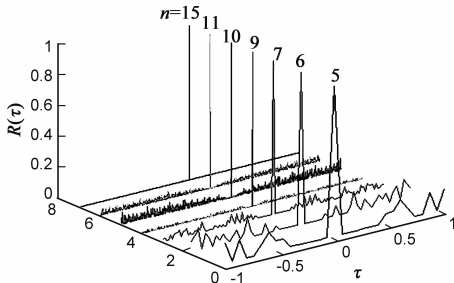


图3 新序列自相关特性图

5.2 线性复杂度分析

序列的线性复杂度定义为产生该序列的最短线性反馈移位寄存器的长度^[10,11].新序列是非线性序列,采用B-M算法,对15阶以内具有二项式该类序列线性复杂度都进行了计算,结果显示新序列线性复杂度较 m 序列都有很大改善.表1列出部分结果,由表1知:新序列线性复杂度均趋于序列长度的二分之一左右,是比较理想的.

5.3 对通信系统误码率影响

m 序列、gold 码在通信系统得到广泛应用^[12,13],图3是采用Matlab仿真的3用户直接序列扩频多址通信系统的误码率与系统信噪比 E_s/E_n 关系曲线.仿真参数采用比特速率 512kbps,码元速率 256kbps, QPSK 调制方

式.图中三条曲线是分别采用 m 序列、 m 子序列、gold 序列仿真得到的.由图3知:当系统信噪比 E_s/E_n 取值在 -10 dB 时,多用户 m 子序列扩频通信系统的误码率均小于 m 序列、gold 序列,这说明新序列扩频信号的抗多址干扰、噪声干扰能力优于 m 序列、gold 序列.进而说明新序列也具有有良好的互相关特性.

表2 m 序列和新序列特性表

阶数 n	5	6	7	9	10	11	15
母函数	$x_3 \oplus x_0$	$x_5 \oplus x_0$	$x_3 \oplus x_0$	$x_5 \oplus x_0$	$x_7 \oplus x_0$	$x_9 \oplus x_0$	$x_8 \oplus x_0$
m 序列线性复杂度	5	6	7	9	10	11	15
新序列线性复杂度	17	13	45	152	579	1580	19656

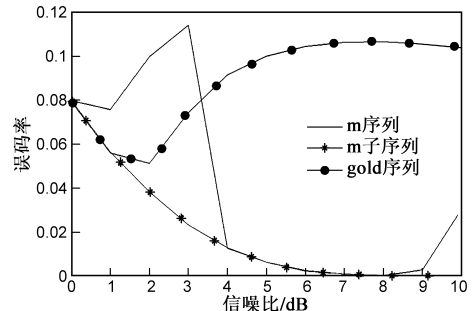


图3 m 序列、 m 子序列、gold 序列误码率与信噪比关系曲线

6 结论

本文构造了一类非线性新序列,该序列作为直接序列扩频通信系统地址码,具有良好的抗噪声干扰、抗多址干扰性能.同时,该序列还具有良好的平衡性和线性复杂度,有利于通信系统抗信息截获、抗信息泄漏,为通信系统安全、可靠运行提供了保障.

参考文献

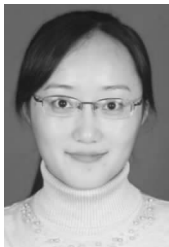
- [1] L R Welch. Lower bounds on the maximum cross correlation of signals[J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 1974, 20(3): 397 - 399.
- [2] D V Sarwate. Bounds on crosscorrelation and autocorrelation of sequences[J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 1979, 25(6): 720 - 724.
- [3] Sarala B, Venkateshwarulu D S. Performance analysis of multi-carrier code division multiple access transmission techniques [A]. Processing of 5th International Conference on Information, ICIP 2011[C], Belgium, 2011: 311 - 319.
- [4] Kang Minsu. FPGA implementation of Gaussian-distributed pseudo-random number generator[A]. Proceeding of the 6th International Conference on Digital Content, Multimedia Technology and Its Applications, IDC 2010 [C], Seoul, Korea, 2010: 11 - 13.
- [5] Lv Hong. Design and Implementation of A Maximal Length

- Nonlinear Pseudorandom Sequence [A]. Proceedings of the 2009 International Conference on Computer and Communications Security [C], Hong Kong, China, 2009:64 – 67.
- [6] 肖国镇, 梁传甲, 王育民. 伪随机序列及其应用 [M]. 北京, 国防工业出版社 [M], 1985.
- [7] N Y Yu, G Gong. A new binary sequence family with low correlation and large size [J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2006, 52 (4): 1624 – 1636.
- [8] 孙霓刚, 胡磊. 一类具有极低相关性的 CDMA 序列 [J]. 电子学报, 2010, 38(7): 1525 – 1530.
SUN Ni-gang, HU Lei. A New CDMA Sequence Family with Low Correlation [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38 (7): 1525 – 1530. (in Chinese)
- [9] X W Ma, Q Y We, T Zhang, et al. New Constructions of Binary Sequences with Good Autocorrelation Based on Interleaving Technique [J]. IEICE Transaction on Fundamentals of Electronic, Communication and Computer Sciences, 2011, E94 – A (12): 1701 – 1705.
- [10] 吕虹, 张爱雪, 方俊初等. 基于母函数的特征式及其一类非线性子序列研究 [J]. 电子学报, 2012, 40(10): 2127 – 2131.
LV Hong, ZHANG Ai-xue, FANG Jun-chu, et al. Study of the Non-Linear Feedback Functions and a Class Subsequence Based on the Root-Functions [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(10): 2127 – 2131. (in Chinese)
- [11] 高军涛, 胡予濮, 李雪莲. 自相关和线性复杂度的关系 [J]. 电子学报, 2006, 34(8): 1401 – 14045.
GAO Jun-tao, HU Yu-pu, LI Xue-lian. A Relationship Between Autocorrelation and Linear Complexity [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(8): 1401 – 1404. (in Chinese)
- [12] S M Tseng, et al. Asynchronous multicarrier DS-CDMA using mutually orthogonal complementary sets of sequences [J]. IEEE Tran. On Communications, 2000, 46(6): 53 – 59.
- [13] P sol, D Zino view. Low correlation, high nonlinearity sequences for multiple code CDMA [J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2006, 52(11): 5158 – 5163.

作者简介

吕虹 硕士, 安徽建筑工业学院教授, 1959 年生. 从事序列构造、信号处理及计算机应用研究. 曾主持、完成国家级、省部级科研项目. 发表论文四十余篇, 其中十余篇 EI 检索.

E-mail: zjj176@yahoo.com.cn



戚鹏 1981 年生, 硕士, 安徽建筑工业学院讲师. 研究方向为算法分析与设计.



段颖妮 1976 年生, 硕士, 西安文理学院讲师. 研究方向为检测技术及其自动化装置、序列与编码

陈万里 1971 年生, 博士, 安徽建筑工业学院副教授. 研究方向为智能计算.