AR 自编码扩频系统中扩频序列的特性研究

魏　梅[①②]　　李仲令[①]
[①](电子科技大学通信抗干扰技术国家重点实验室　成都　610054)
[②](大连交通大学电气信息学院　大连　116028)

摘　要: 在扩展频谱通信中，扩频序列的性能与系统的抗多址干扰、抗多径衰落的能力，和信号的低截获率概率有密切关系，也关系到捕获与同步系统的实现。扩频序列的特性对扩频系统的性能有重要影响。在自编码扩频通信系统中，自编码扩频序列的特性对于自编码扩频系统的性能同样非常重要。该文详细分析了采用AR滤波方式产生的扩频序列的扩频特性。计算机仿真说明，用AR滤波提取自编码扩频序列完全满足自编码扩频通信的要求。

关键词: 自编码扩频通信; AR 滤波; 相关性; 线性复杂度; 游程特性
中图分类号: TN914.42　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1009-5896(2007)02-0291-05

The Performance of the Spreading Sequences Generated by AR-SESS

Wei Mei[①②]　　Li Zhong-ling[①]
[①](*National Key Laboratory of Communication*, *UESTC*, *Chengdu* 610054, *China*)
[②](*School of Electronics and Information Engineering*, *DJTU*, *Dalian* 116028, *China*)

Abstract: In the spread spectrum communication, the characteristics of spreading sequences are important to the anti-jamming,anti multi-path fading,the low probability of intercept and the acquisition of the system. The characteristics of the spreading codes have tremendous impact on the performance of the spread spectrum system. Specifically, the characteristics of the spreading codes also play an important part in the Self-Encoded Spread Spectrum (SESS) communication system. In this paper, the characteristics of the spreading codes generated by AR filter in SESS are analyzed in detail. The results of the computer simulation show that the characteristics of self-encoded spread spectrum sequences obtained with AR filter meet the requirements of SESS system.

Key words: Self-Encoded Spread Spectrum(SESS); AR filter; Correlation; Linear complexity; Run length property

1　前言

传统的扩频通信广泛采用伪随机(Pseudo-Noise，PN)序列作为扩频序列，PN序列具有类噪声特性，但它实际上是确定的周期序列。信息论指出，为了增强通信的抗干扰性，信号波形应和噪声类似，有尽可能大的带宽[1]。PN序列具有的确定性和周期性使通信的安全性和抗干扰性受到威胁[2]。Nguyen在 1999 年提出的自编码扩频通信(SESS)[3]，从不断变化的随机数据源中提取扩频序列，避免使用确定的PN序列作扩频码。这种动态变化的扩频序列较好地保证了扩频序列的随机性、通信的隐蔽性和低截获率，有效地提高了扩频通信中信息传输的安全性和抗干扰能力。

目前国内外已有不少文献讨论了自编码扩频通信各方面的问题，如文献[4]讨论了在白高斯噪声(AWGN)信道中自编码扩频多址通信系统的容量问题；文献[5]分析了自编码扩频多址通信中系统性能与处理增益的关系；文献[6]讨论了用差分编码减小自编码扩频中误码传播的影响，文献[7]讨论了减小自编码扩频自干扰现象的方法；文献[8]和文献[9]讨论了纠错码用于自编码扩频时性能改善的情况。这些文献对自编码扩频的分析都是基于文献[3]的假设，即待传输的信源序列是无冗余的随机序列：二元信源数据符号是独立等同分布的贝努里随机变量，符号 1 和–1 出现的概率各为 1/2。但实际上，待传输的信源一般都不满足这种假设。

文献 [10] 首先将前向预测误差中的自回归(Auto-Regressive, AR)滤波模型引入自编码扩频通信。利用AR滤波器将输入的信源数据转化成随机的数据流，产生自编码扩频的扩频序列。采用AR滤波器的自编码扩频通信系统减小了自干扰现象对系统性能的影响，提高了常规自编码扩频通信系统的误码性能[7]，为自编码扩频通信的实际应用提供了一种可选的方案。

在直接序列扩频通信系统中，抗干扰、抗截获、抗衰落和多址通信能力等都与扩频码的设计密切相关。同样扩频序列的各种特性对自编码扩频通信的性能影响极大。自编码扩频序列除了具有动态可变性外，还必须具有良好的相关性、游程特性、复杂度特性。自编码扩频序列的产生是自编码扩频通信的关键。本文将在文献[10]的基础上首先讨论利用AR滤波产生自编码扩频序列的机理，然后详细分析这种扩频序

2005-06-20 收到，2006-05-18 改回
国家自然科学基金(60272008)资助课题

列的特性。分析和仿真都证明了利用AR滤波器由信源序列获得自编码扩频序列的可行性。

用 AR 滤波器产生扩频序列的自编码扩频系统简称为 AR-SESS，模型如图 1 所示。

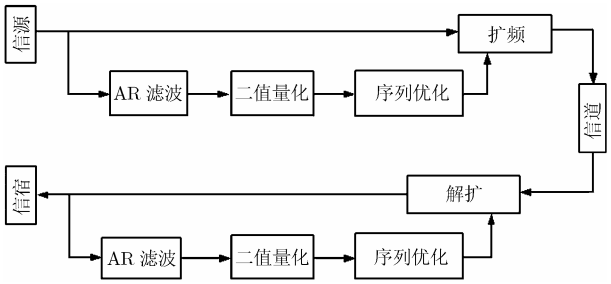


图 1 AR 滤波方式提取扩频码的系统模型

2 扩频序列的产生

在自适应滤波器中，AR过程分析器能够实现这样的功能：高度相关的时间序列 $u(n)$ 通过AR滤波器 $H(z)$ 可产生一个白噪声序列 $v(n)$ [11]。该线性滤波模型可用图 2 表示：

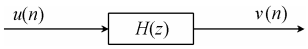


图 2 线性滤波模型

根据此原理，可以使用 AR 过程分析器来完成自编码扩频通信的信源随机化。产生自编码扩频序列的模型如图 3 所示。其中 $u(n)$ 为自编码扩频系统中的待传输信源数据，$y(n)$ 是最终产生扩频的序列, p 是 AR 滤波器阶数， $A(i)(i=1,2,\cdots,p)$ 是滤波器各阶参数。

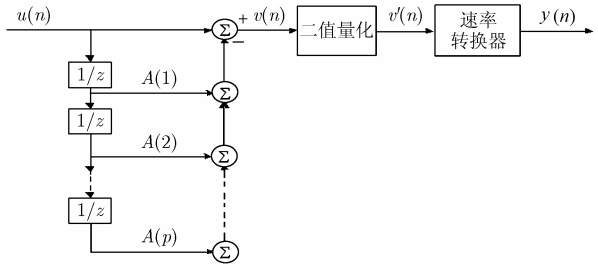


图 3 产生 AR 自编码扩频序列的系统模型

描述 AR 滤波器的差分方程如下式所示：

$$u(n)+A(1)u(n-1)+\cdots+A(p)u(n-p)=v(n) \tag{1}$$

定义 $U(z)$ 为 $u(n)$ 的 z 变换， $V(z)$ 为 $v(n)$ 的 z 变换，对式(1)两边取 z 变换，整理可得 AR 滤波器的转移函数

$$H(z)=V(z)/U(z)=\sum_{i=0}^{p}A(i)z^{-i} \tag{2}$$

设 $r(i)=E\left[u(n)u^*(n+i)\right]$ 是 $u(n)$ 的相关函数。则对式(1)两端同乘以 $u(n-m)^*$ ($m=0,1,\cdots,p$ ，*为求共轭)，求均值，可以得到AR滤波器参数与自相关函数之间的关系为[11]

$$\begin{bmatrix} r(0) & r(-1) & \cdots & r(-p+1) \\ r(1) & r(0) & \cdots & r(-p+2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r(p-1) & r(p-2) & \cdots & r(0) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} A(1) \\ A(2) \\ \vdots \\ A(p) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -r(1) \\ -r(2) \\ \vdots \\ -r(p) \end{bmatrix} \tag{3}$$

用 $\boldsymbol{R}$ 表示 $u(n)$ 的相关矩阵， $\boldsymbol{A}$ 表示滤波器参数矩阵。假设自相关矩阵 $\boldsymbol{R}$ 可逆，上式可变换为

$$\boldsymbol{A}=-\boldsymbol{R}^{-1}\times\boldsymbol{r} \tag{4}$$

由式(2)和式(4)，求出信源 $u(n)$ 的相关矩阵就得到 AR 滤波器的系统函数 $H(z)$ 。

将信源 $u(n)$ 通过系统函数为 $H(z)$ 的 AR 滤波器之后输出高斯白噪声序列 $v(n)$ 。因为 $v(n)$ 的取值连续，不适用于数字扩频通信。对高斯白噪声序列进行二值量化 $v'(n)=\begin{cases}-1 \ , & v(n)\le 0 \\ 1 \ , & v(n)>0\end{cases}$，得到二进制随机序列 $v'(n)$ 。扩频序列一个非常重要的特点就是，扩频序列的码元速率要远远大于信源的码元速率。因此，根据基本自编码扩频通信原理，将 $v'(n)$ 通过速率转换器使码元速率提升N倍[3]，形成需要的自编码扩频序列 $y(n)$ 。

这里需要说明的是，根据 AR 模型的原理， $u(n)$ 必须是高度相关的时间离散序列，才能最好地实现白化功能。当信源序列是完全随机的序列， $u(n)$ 的相关矩阵为 $\boldsymbol{R}=\boldsymbol{I}$ (单位矩阵)， $\boldsymbol{r}=\boldsymbol{0}$，系数矩阵 $\boldsymbol{A}=-\boldsymbol{R}^{-1}\times\boldsymbol{r}=\boldsymbol{0}$ ，即 AR 滤波不起作用， $u(n)$ 经过 AR 滤波后保持不变。但此时序列本身就有很好的相关特性，可以从中直接提取扩频序列，并不影响系统的整体性能。如果信源序列具有一定的相关性，根据线性滤波的概念，信源通过 AR 滤波器之后，可以消除码元间的相关性，得到符合要求的随机扩频码。

3 扩频序列的扩频特性

在扩展频谱通信中，理想的扩频序列应该具有下列特性[12]：(1)良好的相关特性。信号必须具有尖锐的自相关函数，互相关函数应接近于零。(2)有尽可能大的线性复杂度。(3)游程特性。随机序列中连续出现 0 或 1 的子序列称为游程。连续的 0 或 1 的个数称为游程长度。长度为n的游程占总游程的 $1/2^k$ 。0 游程和 1 游程数量平衡。(4)平衡特性。每个周期内 0 和 1 出现的次数近似相等。

由前面的自编码扩频序列 $y(n)$ 的产生方法可知，它是随信源序列变化动态可变的。本节将分析自编码扩频序列的相关性、线性复杂度、游程特性和平衡性，并进行实验仿真。这里需要说明的是由 $v'(n)$ 到 $y(n)$ 只是码元速率的提升，并不改变其随机特性。因此在分析过程中，不再具体注明由 $v'(n)$ 到 $y(n)$ 的转换。

3.1 序列的相关特性

信源经过 AR 滤波器后输出高斯白噪声序列 $v(n)$ ，对其以零为门限作二值量化并提速，得到的序列 $y(n)$ 满足等概性[13]，因此 $E[y(n)]=0$ ， $D[y(n)]=1$ 。

高斯白噪声信号 $v(n)$ 的相邻点之间不相关，因此量化提速后序列 $y(n)$ 的前后两点也是无关的[10]。即

$$\begin{aligned} R_a(m)&=E[y(n)y(n+m)]=E[y(n)]E[y(n+m)] \\ &=\left(E[y(n)]\right)^2=0, \quad m=1,2\cdots \end{aligned} \tag{5}$$

$$R_a(0)=D[y(n)]=1 \tag{6}$$

由式(5)和式(6)可见，序列 $y(n)$ 具有良好的自相关特性。

若任意两用户的信号分别经过 AR 滤波器后产生高斯白噪声序列 1 和 2，序列 1 经二值量化得到序列 X，序列 2 经量化后得到序列 Y。高斯白噪声序列 1，2 互不相关，因此序列 X 和 Y 也线性无关，则

$$R_c(X,Y)=E[X(n)]E[Y(n)]=0 \tag{7}$$

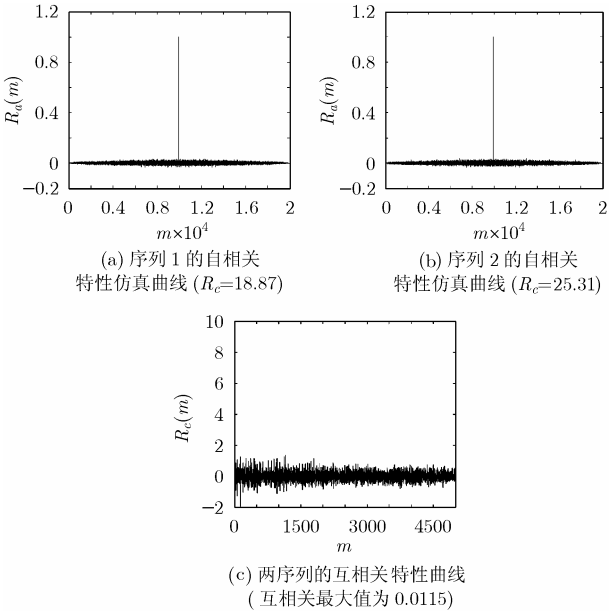
因此，$y(n)$ 序列也具有良好的互相关性。

利用 Matlab 仿真工具对式(5)和式(7)中表示的自编码扩频序列的相关特性进行仿真。仿真中随机取两个序列长度为 10000 的二进制数据流作为信源序列，分别经过 AR 滤波及二值量化产生两个扩频序列，AR 滤波阶数取 40。它们的自相关和互相关特性的仿真结果如图 4 所示。图中横坐标为序列长度，纵坐标为归一化相关函数值。图 4 (a)，4(b)分别为两个序列归一化自相关函数的仿真曲线，R_r 表示 $R_a(0)$ 与最大自相关旁瓣之比，图 4(c)为两序列归一化的互相关函数仿真曲线。

理论分析和仿真结果可知，经二值量化后的自编码扩频序列具有良好的自相关和互相关特性，可以在扩频通信中实现多径识别和多址用户的区分。

3.2 序列的线性复杂度

线性复杂度是衡量一个序列不可预测性的重要指标，它代表了用线性反馈移位寄存器去恢复一个序列的困难程度。一个安全的序列其线性复杂度应接近序列长度的一半，线性复杂度曲线应接近 $L=N/2$ 这条曲线(N 为序列长度)，跃点数目不能太少且分布均匀[14]。



(a) 序列 1 的自相关特性仿真曲线 (R_c=18.87)

(b) 序列 2 的自相关特性仿真曲线 (R_c=25.31)

(c) 两序列的互相关特性曲线 (互相关最大值为 0.0115)

图 4　二值量化后 AR 序列的自相关及互相关特性

利用AR反向滤波器和二值量化后获得的扩频序列 $y(n)$ 可以看作一个独立的二进制随机数据序列。对于一个长度为 N的序列 $y(n)$，它给定了一个包含 2^N 个样本序列的有限概率空间 $\Omega=\Omega_N$，每一个样本序列都以相同的概率 $1/2^N$ 出现。用 $b^N=(b_0,b_1,\cdots,b_{N-1})$ 记 Ω 中的某个具体的样本序列，那么 $y(n)$ 线性复杂度的期望为[15]

$$E\left[L(y)\right]=2^{-N}\sum_{b^N\in\Omega}L\left(b^N\right)\triangleq 2^{-N}L_N^* \tag{8}$$

其中

$$L_N^*=\sum_{l=1}^{N}\sum_{b^N:L\left(b^N\right)=l}l\triangleq\sum_{l=1}^{N}l\cdot\sigma_N(l) \tag{9}$$

$\sigma_N(l)$ 表示 Ω 中线性复杂度为 l 的序列个数。

根据 Berlekamp-Massey 算法，经数学运算，得 $y(n)$ 线性复杂度的均值为

$$E[L(y)]=\frac{N}{2}+\frac{4+(N\bmod 2)}{18}-2^{-N}\left(\frac{N}{3}+\frac{2}{9}\right)\approx\frac{N}{2} \tag{10}$$

同理可推得方差为

$$\begin{aligned}&\mathrm{Var}\left[L(y)\right]\\&=E\left[L^2(y)\right]-\left(E\left[L(y)\right]\right)^2\\&=\frac{81}{86}-2^{-N}\left(\frac{14-(N\bmod 2)}{27}N+\frac{82-2(N\bmod 2)}{81}\right)\\&\approx 1\end{aligned} \tag{11}$$

式(10)和式(11)的结果表明，N 长二元序列 b^N 的线性复杂度 $L(b^N)$ 最佳值是 $N/2$，浮动幅度大约为 ±1 。

利用 Matlab 仿真工具对 AR 滤波阶数为 40 时 100 个扩频序列的平均线性复杂度进行了仿真，仿真曲线如图 5 所示。由图中可知，序列的线性复杂度接近 $L=N/2$ 这条曲线，跃点数目较多且分布均匀。应该指出，由 $u(n)$ 到 $y(n)$ 的映射是一对一的映射，在 2^N 个样本序列的空间 Ω 中，不是所有的 $y(n)$ 都具有好的线性复杂度和其它特性。但是后面对序列其它特性的讨论将进一步证明，从统计意义上观察，当序列 $y(n)$ 足够长时，它能满足扩频序列要求的各种特性。

理论分析和实验仿真都可看出，通过反向 AR 滤波器的方法获得的扩频序列，其线性复杂度接近于保密通信理论中随机序列的最佳线性复杂度，符合扩频序列安全通信的要求。因此利用 AR 滤波器方式产生的自编码扩频序列具有比较理想的复杂度特性。

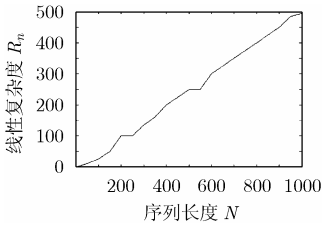


图 5　AR 滤波提取的扩频码的线性复杂度仿真曲线

3.3 序列的游程特性

游程是序列随机性能的一个重要指标。经过AR滤波和二值量化后的扩频序列是一个非周期二元等概贝努利序列。对于非周期 q 元贝努利序列的游程特性有如下的性质[16]：

(1) s 长游程数占总游程数比例的数学期望为 $(q-1)/q^s$ 。(2) 总的游程数占序列长度的比例的数学期望为 $(q-1)/q$ 。根据上述性质及贝努利分布的特性，可以给出AR扩频序列游程特性的理论值，对比传统伪随机序列的游程特性[12]可知，理论上AR扩频序列具有和PN序列相当的游程特性。表 1 和表 2 分别给出了序列长度为 100，1000 时的游程特性及仿真数据(表中百分比数据表示+1(–1)各游程数目占+1(–1)游程总数的百分比)。

由仿真数据可知道，AR 扩频序列的游程特性符合理论分析的规律：

(1) “+1”和“–1”游程的数目几乎相等；

(2) “+1”和“–1”游程数目之和很接近序列长度的一半；

(3) 游程分布基本符合性质 1 描述的规律。

从表 1 和表 2 还可看出，良好的游程特性必须以一定的序列长度为基础，随着序列长度的增加，游程特性逐渐逼近理论值。总的来说，AR 扩频序列能满足扩频通信对序列游程特性的要求，具有良好的随机性能。

3.4 序列的平衡性

平衡性也是考察扩频序列性能的重要指标，良好的码平衡特性有利于防止高频载波的泄露，保障通信的安全。定义扩频序列 $y(n)=(y_0,y_1,\cdots,y_{N-1})$ 的码重 W 为

表 1 长度为 100 的 AR 扩频序列游程特性仿真数据(%)

码元极性	游程长度							游程总数
	1	2	3	4	5	6	大于 6	
+1	53.8	26.9	3.8	3.8	3.8	3.8	4.1	26
–1	53.6	21.4	14.3	10.7				28

表 2 长度为 1000 的 AR 扩频序列游程特性仿真数据(%)

码元极性	游程长度							游程总数
	1	2	3	4	5	6	大于 6	
+1	54.5	21.6	10.6	5.1	4.7	1.2	2.3	255
–1	54.5	23.9	11.4	5.1	3.1	0.4	1.6	255

$$W=\sum_{n=0}^{N-1} y_n \tag{12}$$

用码重 W 来表征扩频序列的码元平衡性质。当二电平序列+1 和–1 数目完全平衡时，W 为零。通过 AR 滤波和二值量化后序列 $y(n)$ 的均值 $E[y(n)]=0$ ，即 W 为零，因此序列 $y(n)$ 具有很好的码平衡性。

实际仿真中，对于不同的信源序列和不同的 AR 滤波器阶数，码重有波动。但是利用 AR 方法提取的 N 长扩频序列，其数目可以为 2^N 个，因此可以优化选择，从中选出性能较好的序列进行扩频。

4 结束语

本文研究了自编码扩频系统中利用反向AR滤波器产生的扩频序列的特性。理论分析和仿真实验的结果均表明，这种方式产生的自编码扩频序列随着信源数据的变化而动态可变，具有良好的自相关和互相关特性、平衡性、高的线性复杂度和良好的游程特性,同时也能很好地保证通信系统接收端的同步问题[17]。

自编码扩频通信系统中存在固有的误码传播现象，影响整个扩频系统的性能。在AR-SESS中，AR滤波器参数随信源动态可变的特性可以有效的抑制误码传播的问题，提高自编码扩频通信系统的性能[7]。

综上所述，采用 AR 方式提取的扩频码完全能满足扩频通信技术对扩频码的特性要求。

参 考 文 献

[1] Lok T M and Lehnnet J S. Error probabilities for generalized quadriphase DS/SSMA communication systems with random signature sequences. *IEEE Trans. on Commun.*, 1996, 44(4): 876–885.

[2] Viterbi A J. Wireless digital communication: A view based on three lessons learned. *IEEE Communication Magazine*, 1991, 29(10): 33–-36.

[3] Nguyen L. Self-encoded spread spectrum communications. IEEE Military Communications Conference Atlantic City, New Jersey 1999: 182–186.

[4] Jang W M and Nguyen L. Capacity analysis of m-user self-encoded multiple access system in AWGN channels. IEEE 6th Int. Symp. Spread-Spectrum Tech. & Appli., New Jersey, 2000: 216–220.

[5] Kong Y, Nguyen L, and Jang W M. Self-encoded Spread Spectrum and Multiple Access Communications. IEEE 6th Int. Symp. Spread-Spectrum Tech. & Appli., New Jersey, 2000: 394–398.

[6] Kong Y, Nguyen L, and Jang W M. Self-encoded spread spectrum modulation with differential encoding. IEEE 7th Int. Symp. On Spread-Spectrum Tech. & Appl., Prague, Czech Republic, New Jersey, 2002: 471–474.

[7] 魏梅, 李仲令, 殷飞. AR 自编码扩频通信系统的性能分析. 电子科技大学学报, 2005, 34(5): 585–588.

[8] Hempel M, Jang W M, and Nguyen L. Self-encoding multiple access with Turbo coding. http://www.pixelish.com/ Media/ Documents/, 2003.6

[9] 陈仲林, 周亮, 李仲令. 自编码直接扩谱通信原理与机制. 系统仿真学报, 2004, 16(2): 2842–2846.

[10] Yin Fei and Li Zhongling. A new method to produce SESS codes with the algorithm of estimation of PSD, 2004 International Conference on Communication, Circuits and Systems, Chendu, 2004: 117–120.

[11] Haykin S. Adaptive Filter Theory. New Jersey, Prentice-Hall, 2002: 33–41.

[12] Viterbi A J. CDMA: Principles of spread spectrum communication. New Jersey, Arts & Licensing International Inc, 1995: 11–20.

[13] 李一兵, 岳欣. 伪噪声码产生新方法.信息技术, 2002, 26(12): 29–30.

[14] 马新友. 伪随机序列特性分析及其通用分析软件包实现: [硕士论文], 成都: 电子科技大学, 2001.

[15] 王育民, 何大可. 保密学基础与应用. 西安电子科技大学出版社, 1990, 第 3 章.

[16] 张申如, 梅文华. 非周期 q 元均匀随机序列的游程特性, 通信学报, 2000, 21(1): 45–48.

[17] 林丹, 李仲令, 甄维学. 自适应滤波自编码扩频系统的同步捕获研究. 信息与电子工程, 2005, 3(2): 110–113.

魏　梅：　女, 1980 年生, 助教, 从事移动通信和扩频通信方面的研究.

李仲令：　男, 1940 年生，教授, 主要从事数字移动通信、扩频通信和抗干扰技术等方面的研究.