

## AR自编码扩频通信系统的性能分析

魏梅, 李仲令, 殷飞

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 成都 610054)

**【摘要】**介绍了自编码扩频通信的原理,提出了利用自回归滤波的方法从信源序列中提取扩频码的AR自编码扩频系统,并对该系统的误码性能和多址通信能力进行了理论分析和仿真。分析与仿真结果表明,AR自编码扩频系统改善了普通自编码扩频系统的误码性能,提高了系统的多址能力,为自编码扩频通信的实际应用提供了可选的方案。

**关键词** 自编码扩频通信; 谱估计; AR模型; 误码性能; 多址性能  
中图分类号 TN91 文献标识码 A

## Analysis and Simulation of AR-SESS System Performance

WEI Mei, LI Zhong-ling, YIN Fei

(National Key Laboratory of Communication, UEST of China Chengdu 610054)

**Abstract** The principle of self-encoded spread spectrum communication is introduced. AR-SESS system which employs AR filter technique to obtain the spreading codes from the source sequences is proposed. And the paper analyzes and simulates the performance of Bit-Error-Rate (BER) and the multiple access capability of this system. The analysis and simulation show that AR-SESS improves the BER performance of the conventional SESS system and enhance the performance of the multiple accesses. It provides a good choice for the practical application of the SESS system.

**Key words** self-encoded spread spectrum; estimation of the spectrum; AR model; BER; performance of multiple accesses

传统的扩频通信广泛采用伪噪声(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。而信息论指出,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<sup>[1]</sup>。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<sup>[2]</sup>。文献[3]提出的自编码扩频通信(Self-Encoded Spread Spectrum, SESS),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,有效地提高了信息传输的安全性和抗干扰能力。

扩频通信中理想的扩频序列应该具有白噪声的特性。自编码扩频通信的扩频序列是从待传输的信源数据流中获得的,信源序列的随机化处理决定了扩频码的特性,影响着整个系统的性能。因此信源随机化技术是自编码扩频通信的基础,它在很大程度上决定了自编码扩频通信是否能获得实际应用。本文引入现代谱估计中的自回归(Auto-Regressive, AR)滤波模型,利用自适应滤波器提取随机化的序列,动态地把信源序列转化成高斯白噪声分布的数据流,作为自编码扩频系统中的扩频码。文中将讨论序列的产生方法、该序

收稿日期: 2005-06-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60272008)

作者简介: 魏梅(1980-),女,硕士生,主要从事移动通信与扩频通信方面的研究。

列的特性，以及在AWGN信道下相应的自编码扩频系统的性能，并给出了计算机仿真结果。

### 1 扩频序列的产生

根据谱估计的理论，由高度相关的观测值组成的时间序列  $u(n)$ ，可通过一系列统计独立的冲击激励一个系统函数为  $H(w)$  的线性滤波器产生，该冲击是零均值的高斯白噪声序列，记为  $v(n)$ 。该线性滤波器可以用三种模型实现，即自回归模型(AR)、滑动平均模型(MA)和自回归滑动平均模型(ARMA)<sup>[4]</sup>。三种模型的原理相似，本文以AR滤波模型为例进行讨论。

定义  $p$  为AR滤波器的阶数， $A(i)(i=1,2,\dots,p)$  为滤波器的各阶参数， $r(i) = E[u(n)u^*(n+i)]$  是  $u(n)$  的相关函数，则AR滤波器参数与自相关函数之间的关系可用尤利 - 沃克方程表示如下<sup>[4]</sup>：

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

式中  $R$  表示  $u(n)$  的相关矩阵， $A$  表示滤波器参数矩阵，假设自相关矩阵  $R$  可逆，可得方程式(1)的解为：

$$A = -R^{-1} \times r \tag{2}$$

由式(2)得知，求出信源  $u(n)$  的相关矩阵就可求出滤波器的各阶参数  $A(i)$ ，得到系统函数  $H(w)$ 。根据线性系统的可逆性，若使信源  $u(n)$  通过系统函数为  $1/H(w)$  反向 AR 滤波器，就可以将  $u(n)$  变换为服从  $N(0, \sigma_v^2)$  分布的高斯白噪声序列  $v(n)$ 。由于  $v(n)$  取值连续，不适用于数字扩频通信，需要对其进行二值量化，

得到最终的自编码扩频序列  $\{y(n): n=0,1,2,\dots\}$ ，即  $y(n) = \begin{cases} -1 & v(n) < 0 \\ 1 & v(n) > 0 \end{cases}$ 。

利用 AR 滤波得到自编码扩频序列，克服了文献[3]中信源序列随机化的缺点，且  $y(n)$  随信源序列而动态可变，具有良好的相关性、平衡性和高的线性复杂度<sup>[5]</sup>，满足扩频通信的要求，是一种方便实用的方法。利用 AR 滤波获取扩频序列的自编码扩频通信系统简称为 AR-SESS 系统，系统模型如图 1 所示。

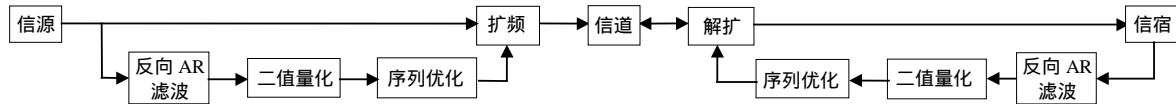


图 1 AR-SESS 系统模型

### 2 AR-SESS通信的性能分析

#### 2.1 单用户系统误码率

误码率是数据通信最重要的性能指标。在自编码扩频通信系统中，假设接收端再生扩频序列中平均有  $\bar{n}$  个错误码片，它引起信号幅度衰减  $2\bar{n}/N$  ( $N$  为扩频序列的长度)，则信号功率的衰减为：

$$A_{\bar{n}} = 20 \lg(1 - (2\bar{n}/N)) \tag{3}$$

根据相干BPSK调制方式下扩频通信系统的比特差错率，由式(3)可得自编码扩频通信系统在加性白高斯噪声信道中的误码率  $P_e$ <sup>[6-7]</sup>：

$$P_e = Q\left([1 - (2\bar{n}/N)]\sqrt{2E_b/N_0}\right) \tag{4}$$

式中  $Q(\cdot)$  是  $Q$  函数， $E_b$  是单位比特的平均信号能量， $N_0$  为噪声的单边功率谱密度。注意到当  $\bar{n}/N$  为 0.5 时，式(4)恒等于 1/2，且与信噪比无关。由于系统误码传播及自干扰，当传输误码  $\bar{n}$  达到阈值  $N/2$  时，不论此时信噪比多大，接收端都不可能正确解扩。

选择合适的AR阶数，AR-SESS系统对于传输平均误码  $\bar{n}$  引起的信号功率衰减系数为<sup>[8]</sup>：

$$\eta_{ar} = \begin{cases} 0 & \bar{n} \leq \bar{m} \\ 2(\bar{n} - \bar{m})/N & \bar{n} > \bar{m} \end{cases} \tag{5}$$

式中  $\bar{m}$  为AR滤波器中引起扩频码恢复错误时的最小误码数。根据自编码系统的误码性能及式(5)的分析，

可得AR-SESS系统在高斯信道下的传输误码率  $P_{e-ar}$  为:

$$P_{e-ar} = Q\left((1-\eta_{ar})\sqrt{2E_b/N_0}\right) \quad (6)$$

比较式(4)和式(6)发现,通过调整合适的AR滤波阶数,AR-SESS系统改善了基本SESS系统的误码性能。同时传输误码  $\bar{n}$  的门限由  $N/2$  变为  $(N/2 + \bar{m})$ ,减小了自干扰对系统性能的影响。

利用Matlab仿真平台对AR滤波自编码扩频通信系统、PN码扩频通信系统及自编码扩频通信系统的误码率进行仿真,结果如图2所示。仿真中假设收发两端已经精确同步。由仿真结果可见,  $E_b/N_0$  小于2 dB时,AR-SESS系统性能略逊于传统PN序列扩频的性能,但比普通的SESS系统有较大改善,有助于改善低信噪比条件下的误码性能。因为误码增殖现象依然存在<sup>[8]</sup>,AR-SESS的误码率比传统的PN码扩频的误码率高。当  $E_b/N_0$  大于4 dB时,各种方式效果几乎相同。扩频通信系统在正常的运行情况下要求  $P_e$  小于  $10^{-3}$ ,此时利用谱估计算法的AR-SESS通信系统和传统PN码扩频通信系统一样稳定可靠,完全符合通信要求。由于AR-SESS的扩频码是动态可变的,降低了信号的截获概率,这对某些应用场合是非常有意义的。

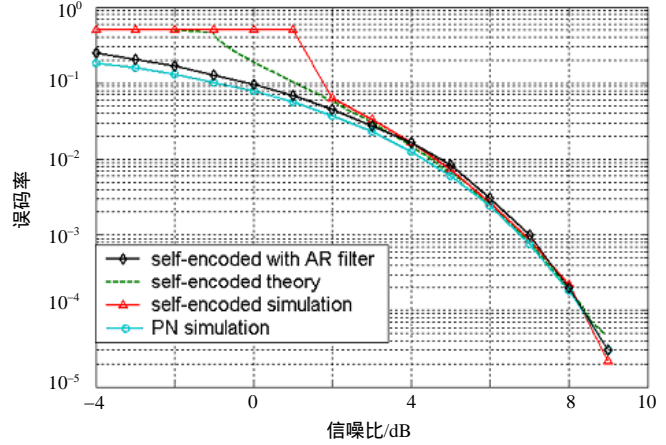


图2 加性白高斯信道下三种系统的误码性能比较

### 3.2 多址性能

AR自编码多址通信(AR-SEMA)系统中,各用户所发送的信息是随机的、互不相关的,其扩频码是随机的,互不相关的。一个  $K$  用户、扩频因子为  $N$  的自编码直扩多址通信系统,第  $i$  个用户接收机的多址干扰  $\mu_i$  为<sup>[8]</sup>:

$$\mu_i = \sum_{n=1}^N \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^K c_k S_k(n) S_i(n) = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^K c_k \sum_{n=1}^N S_k(n) S_i(n) \quad (7)$$

式中  $c_k \in \{+1, -1\}$  是第  $k$  个用户的数字信息,  $S_k(n)$  是第  $k$  个用户的地址码。

由式(7)可以看出,多址干扰是  $K-1$  个 AR-SESS 系统扩频序列相关函数之和。AR自编码扩频序列是服从均值为0,方差为  $1/N$  二项分布的随机变量<sup>[7]</sup>,因此  $K-1$  个相关函数是互不相关的。系统的归一化多址干扰  $\mu_i$  是在  $[-K+1, K-1]$  区间内均值为0,方差为  $(K-1)/N$  的二项随机变量。根据中心极限定理,当用户数  $K$  足够大时,可近似视为高斯随机变量。定义  $P_{1/0}$  为“0”码错判为“1”的概率,  $P_{0/1}$  为“1”码错判为“0”的概率。由式(6)得  $P_{1/0}$  和  $P_{0/1}$  分别为:

$$P_{1/0} = Q(\sqrt{2E_b/N_0}(1-\eta_{ar} + \mu_i)) = Q\left(\frac{A}{\sigma}(1-\eta_{ar} + \mu_i)\right) \quad (8)$$

$$P_{0/1} = Q(\sqrt{2E_b/N_0}(1-\eta_{ar} - \mu_i)) = Q\left(\frac{A}{\sigma}(1-\eta_{ar} - \mu_i)\right) \quad (9)$$

式中  $A$  为信号幅度,  $\sigma^2$  为噪声功率即方差。则由多址干扰引起的AR-SEMA系统误码率为:

$$P_{e/\mu_i} = P_0 P_{1/0} + P_1 P_{0/1} = 0.5Q\left(\frac{A}{\sigma}(1-\eta_{ar} - \mu_i)\right) + 0.5Q\left(\frac{A}{\sigma}(1-\eta_{ar} + \mu_i)\right) \quad (10)$$

对  $P_{e/\mu_i}$  求统计平均,即可得AR-SEMA系统的误比特率:  $P_e = E\{P_{e/\mu_i}\}$ <sup>[8]</sup>。由于多址干扰  $\mu_i$  可等效为高斯分布的随机过程,它与加性白高斯噪声相互独立,AR-SEMA系统的误比特率可简化为<sup>[6]</sup>:

$$P_e = Q\left(\frac{(1-\eta_{ar})A}{\sqrt{\sigma^2 + \frac{K-1}{N}A^2}}\right) \quad (11)$$

由式(11)可知,系统的多址干扰与用户数  $K$  成正比,与扩频因子  $N$  成反比。不同用户数、不同扩频因子时的误码率仿真结果分别如图3、图4所示。当采用不同的扩频因子  $N$  时,可获得不同的误码性能,实现不同

等级的服务质量。自编码多址扩频系统中各用户间具有随机独立的特性,易于实现变速率、异步组网,各用户以各自的速率和码片长度 $N$ 进行异步通信。

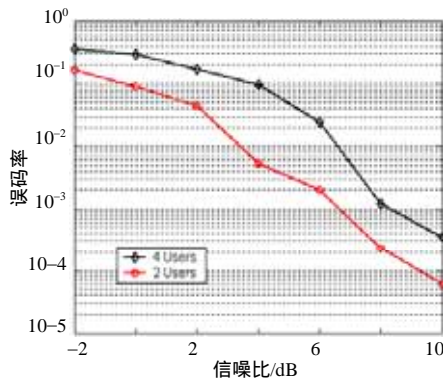


图3 不同用户数AR-SESS性能比较

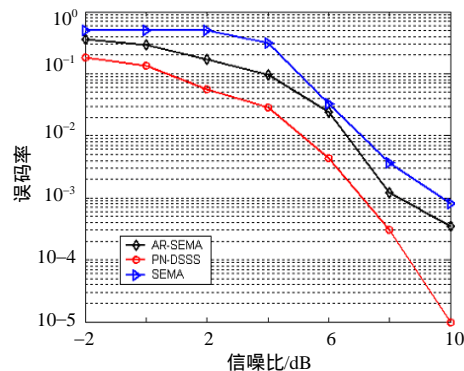


图4 不同扩频因子的AR-SESS性能比较

扩频因子为128,用户数为4时,对传统PN码扩频通信多址系统、基本自编码扩频多址系统及AR滤波自

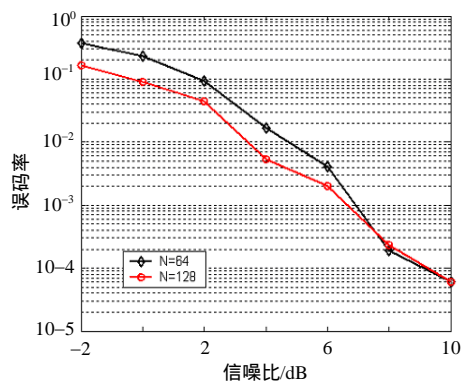


图5 3种多址系统误码性能比较

编码扩频多址系统的误码性能进行仿真比较,结果如图5所示。

从图5中可看出,AR-SEMA系统提取的扩频码,无论从理论分析还是在实验仿真中都比较接近理想的贝努里分布。相对于采用信源压缩编码获取扩频序列的SESS系统,扩频码的相关特性上有很大改进。因此对相同的碰撞概率和扩频因子长度,AR-SEMA的性能优于SEMA。相对于传统PN扩频通信系统,AR-SEMA系统在低信噪比时的误码性能稍差。AR扩频序列作为二项贝努里序列,虽然在统计意义上具有良好的相关特性,但不能保证每一瞬时各序列都有很小的互相关值,有时甚至可能出现完全重叠的序列碰撞现象。另外在扩频因子 $N$ 较小时,自编码扩频特有的自干扰现象,会影响系统的性能,但适当增大扩频因子可减小这些

影响。

### 3 结束语

本文研究了采用反向AR滤波器的自编码扩频系统,并在高斯信道下对自编码扩频通信系统的误码率及多址性能进行了理论分析和仿真。结果表明:在高信噪比环境下,AR滤波获得的自编码扩频序列能够满足扩频通信的要求,且增加了扩频码的自适应变化,降低了传输信号的截获率,提高了通信的隐蔽性和安全性。在低信噪比环境下,AR-SESS改善了普通SESS系统的误码性能,提高了自编码扩频系统的多址能力。AR-SESS为自编码扩频通信的实际应用提供了一种可选的方案。

### 参 考 文 献

- [1] Lok T M, Lehnnet J S. Error probabilities for generalized quadriphase DS/SSMA communication systems with random signature sequences[J]. IEEE Trans. Commun., 1996, 44(4): 876-885
- [2] Viterbi A J. Wireless digital communication: A view based on three lessons learned[J]. IEEE Communication Magazine., 1991, 29(10): 33-36
- [3] Nguyen L. Self-encoded spread spectrum communication[C]. Proc. of the 1999 Military Communication Conference, Atlantic City, 1999. 182-186
- [4] Haykin S. Adaptive filter theory[M]. Prentice-Hall, 2002: 33-41
- [5] Wei Mei, Li Zhongling, Yin Fei. Analysis and simulation of AR-SESS system performance[C]. 2005 International Conference on Communication, Circuits and Systems, HongKong, 2005. 160-164
- [6] Nguyen L. Self-encoded spread spectrum and multiple access communications[C]. IEEE 6th Int. Symp. Spread Spectrum Tech. &Appli., New Jersey, 2000. 394-398
- [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
- [8] 殷飞. 自编码扩频序列的产生及特性研究: [学位论文][D]. 成都: 电子科技大学, 2005

编辑 刘文珍