·学术论文与技术报告·

自编码扩频和直接序列扩频的性能比较*

李仲令** 郭 燕 周 亮
(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】基于自编码扩频在传输数字信息时能实现扩频码动态可变的现象，讨论了自编码扩频的原理、传输特性，引入等效扩频增益描述其性能变化，并针对自干扰现象提出了改进方法。通过分析和仿真表明，虽然自编码扩频的增益与经典扩频实际上相同，但是通信的隐蔽性得到了改进。

关 键 词 扩频通信；伪随机序列；自编码扩频；直接序列扩频
中图分类号 TN91 文献标识码 A

Private Communication and Self-Encoded Spread Spectrum

Li Zhongling Guo Yan Zhou Liang
(National Key Laboratory of Communication, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract Self-encoded spread spectrum(SESS) system employs random spreading sequences extracted from the information date to assure dynamically random varying. Performance analysis of self-encoded spread spectrum in additive white Gaussian noise channels is presented. An equivalent spread spectrum gain is used to describe the characteristic of self-encoded direct sequence spread spectrum system. Improved approaches generating self-encoded spread spectrum sequences are introduced. Theoretical analysis and computer simulation show that the spread spectrum gain of self-encoded direct sequence spread spectum system is almost the same to conventional spread spectrum system, but private of self-encoded direct sequence spread spectum system increases with variability of spread spectrum codes.

Key words spread spectrum communication; pseudo-noise sequence; self-encoded spread spectrum; direct sequence spread spectrum

数字信息的无线传输技术是一个极活跃的研究领域。为提高无线信息传输的隐蔽性、抗干扰能力和安全性，需要在信号设计、空间滤波、环境自适应和参数优化等方面采取措施，提高系统的综合抗干扰能力。无线通信信号存在于一定的时间、频率和空间域。要有效地干扰通信信号，应该在时间、频率、距离三维空间，靠近干扰对象。为了有效地进行通信，必须造成干扰方困难，降低干扰效果。在多种抗干扰技术中，扩展频谱技术是目前的主流技术。扩展频谱通信广泛采用伪随机(Pseudo-Noise, PN)序列作为用户签字序列(地址码)。PN序列虽然有类似噪声的一些特性，但它实际上是确定的序列，可能被窃听者复制，使信息传输安全受到威胁。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序列的周期性和确定性与信息论对信号波形的要求相抵触。若采用真正的随机序列作扩频码，为了解扩，要求接收机具有扩频码的先验知识，所以一旦扩频码产生，仍然是固定序列，容易被复制[2]。

2003年9月2日收稿
* 国家自然科学基金资助项目，编号：60272008；国防科技重点实验室基金资助项目
** 男 63岁 教授 主要从事移动通信和扩频通信方面的研究

为提高通信的抗干扰性和安全性，降低通信信号被截获的概率，扩频序列应是随机的、不断变化的。直接序列扩频通信中采用变码直扩，跳频通信中采用变速率、变驻留时间等技术，能在增强抗干扰能力上取得一定的效果，但没有从根本上满足扩频序列随机、动态可变这一要求。

数字通信中传输的数字信息往往先经过扰码后再调制载波，其目的是为了便于收端的同步。因此，信道上传输的数字信息呈现某种随机性。如设法增强数字信息的随机变化特性，并从不断变化的随机数据流中获得扩频序列，就可以避免完全依赖PN序列、混沌序列进行频谱扩展的情况，较好地保证扩频序列的随机性、动态变化性和信号的低截获率，扩展频谱的通信方式称为自编码扩频(Self-Encoded Spread Spectrum, SESS)[3]，是一种抗干扰能力更好的安全通信方式。

1 自编码扩展频谱通信原理

利用随机变化的信息数据序列获得扩频序列，实现扩展频谱通信，适用于直接序列扩频(Direct Sequence Spread Spectrum，DSSS)、跳频(frequency hopping)等多种扩展频谱通信方式，本文主要讨论自编码直扩通信(Self-Encoded Direct Sequence，SEDS)中的问题。为和自编码扩频相区别，本文中将传统的扩频称为经典扩频。

自编码扩频的原理可以用图1说明。随机的信息数据流速率为$1/T$，它同时输入到相乘器和N级移位寄存器SR_1。SR_1的内容不断被信源数据更新，并以N/T的速率依次切换输出，作为扩频序列。N为扩频因子。扩频序列和信息序列相乘，得到基带扩频信号，再经载波调制(图中未画出)即可由天线发射。下面针对基带扩频信号进行讨论。

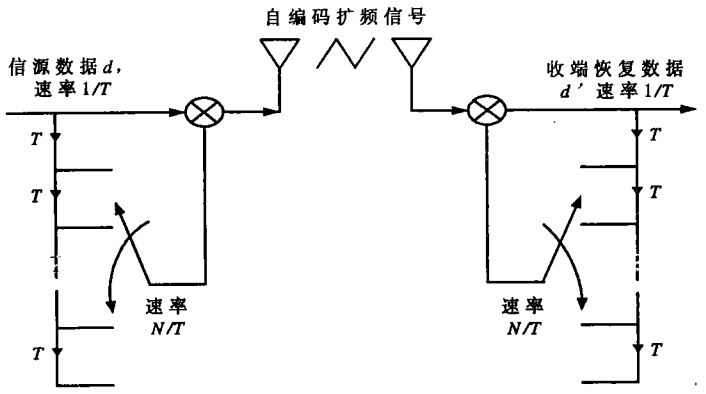

图1 自编码直扩原理图

接收端再生自编码扩频序列的过程和发端相似。若收、发已经同步，恢复的数据反馈到移位寄存器SR_2，用于估计发端的扩频序列，解扩接收信号。

上述扩频方法的本质是依次利用前N个信码的值构成第$N+1$个信码$d(i)$的扩频序列$\{d_{i-1},d_{i-2},\cdots,d_{i-N}\}$。信源的随机独立性决定着扩频序列的动态随机变化性。

利用图1所示方法产生的扩频序列实现自编码扩频时，会遇到一些实际问题。这种方法对信源随机化的要求苛刻。如果信源随机化不够好，从信源数据中得到的扩频序列可能不满足扩频序列应具备的特性，影响整个系统的可实现性。对某些相关信源可以通过线性或非线性回归方法，以较大概率由前N个码元预测出第$N+1$个码元，影响系统的抗截获率。

采用上述方法，接收端本地扩频序列预测依赖于解扩后恢复出的信码。在低信噪比情况下，误码率相对较高，预测出的扩频序列必然和发端使用的扩频序列不同，可能导致下一个信码的解扩错误，造成误码。该误码在移出移位寄存器SR_2前，又会进一步影响到以后产生的扩频序列，引起严重的错误传播现象。这是SEDS中特有的现象。在经典直扩通信中，扩频码是确定序列，收端只需完成和发端扩频码的同步，而信息数据误码与收端恢复扩频码不相关。SEDS在实现扩频码动态可变的同时，也带来了误码传播产生的自干扰。

2 自编码扩频序列产生方法的改进

对自编码扩频序列的产生方法应加以改进[4]。将移位寄存器SR_1存储单元数由N增加到$N+K$，使之具有K个冗余抽头；同时改进抽头选取的控制单元，从前面$N+K$个信码中伪随机地抽取N个作为扩频码，这样，扩频码不再直接来自前N个信码码元，而是从前$(N+K)$个信码码元中抽取N个的伪随机组合。这种方案可降低系统对信源随机化的严格要求，增加了由前面N个信码码元推知后面信码的难度，降低信息被截获的概率。另外一种方法与此类似，是在移位寄存器的$K(K<N)$个存储单元中存入事先选好的伪随机码，固定K个

存储单元内容。SR_1和SR_2中对应的固定存储单元的的值始终保持一致。即使在低信噪比、误码率较高的情况下，接收端再生的扩频码也能保持较高的可信度，在一定程度上减轻了错误传播的影响。

3 自编码扩频通信性能分析

3.1 自编码扩频在AWGN信道中的性能

假设自编码扩频通信采用二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)直接序列扩频调制。加性白高斯噪声(AWGN)信道中，BPSK调制、相干解调的比特差错率(BER)为

$$P_{e,BPSK} = Q\left(\sqrt{2E_b/N_o}\right) \tag{1}$$

式中　E_b 是单位比特的平均信号能量，N_o 为噪声的单边功率谱密度。式(1)实际上也是经典DSSS的误码率公式。

在SEDS通信中，接收端的误码将会引起再生的扩频码不同于发端的扩频码，由此引入自干扰。设收端 SR_2 中有n个错误码片，它引起接收机输出信号幅度衰减$2n/N$，信号的功率衰减为

$$A = 20\lg\left[1-(2n/N)\right] \tag{2}$$

对于整个通信过程，SR_2中的相对错误电码片数n/N应该用概率平均值$\bar{n}/N$ 代替。在式(2)中用$\bar{n}/N$ 代替n/N，得

$$A = 20\lg\left[1-(2\bar{n}/N)\right] \tag{3}$$

因此，SEDS在AWGN中的误码率 P_e 为

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

数字信息经扩频后频谱增大的倍数是扩频因子，它反映扩频信号经过解扩信噪比增大的倍数，称为扩频通信系统的扩频增益 G_S 。SEDS通信系统中，接收端误码产生的自干扰使信号功率衰减 $(1-2n/N)^2$ 倍，相应地，它的扩频增益修正为

$$G_{S,E} = \left[1-(2\bar{n}/N)\right]^2 G_S \tag{5}$$

式中　$G_{S,E}$ 称为有误码时SEDS系统的等效扩频增益。自编码扩频的 $G_{S,E} < G_S$ ，误码率也比经典扩频通信系统高。若信噪比较高，误码较少，则 $G_{S,E} \approx G_S$ ，SEDS的误码性能与经典DSSS通信系统近似相同。

3.2 改进的自编码扩频通信的性能

为了改进低信噪比时自编码扩频通信系统的性能，可以采用式(3)中的改进方法，将PN序列和自编码序列相结合，随机固定收发两端移位寄存器N个存储单元中的K个。此时，由于误码传播得到一定抑制，SEDS系统误比特率为

$$P_e = Q\left(\left[1-\left(2K\bar{n}/N^2\right)\right]\sqrt{2E_b/N_o}\right) \tag{6}$$

同样，可定义改进的SEDS通信系统的等效扩频增益 $G_{S,I}$

$$G_{S,I} = \left[1-(K/N)(2\bar{n}/N)\right]^2 G_S \tag{7}$$

显然，$G_{S,E} < G_{S,I} < G_S$ 。由于误码传播受到抑制，低信噪比时 $G_{S,I}$ 将比 $G_{S,E}$ 改进，误码率降低。

4 仿　真

利用Matlab仿真工具对SEDS在AWGN下的误码性能进行了仿真。假设收、发两端已同步，发端发送的信号是经压缩编码的文件[4]。

4.1 扩频因子N对系统性能的影响

经典扩频通信系统的抗干扰和抗截获性能与扩频因子的大小有密切关系。一般说，扩频因子越大，发送信号所占的带宽越宽，系统的抗干扰和抗截获能力越强。这一关系同样适用于自编码扩频通信。但是，在自编码扩频通信中，信噪比的大小，会影响误码率和收端扩频码的恢复。这时，扩频因子的大小对收端扩频码预测的准确性有一定影响，并使SEDS的误比特率随扩频因子N而变化，这是经典DSSS系统中设有

的现象。

由自编码扩频通信原理可推知，要使接收端可靠地预测扩频码，应使$N<1/P_e$。另一方面，N又必须足够大，使得接收端寄存器中个别码片错误引起的信号衰减较小。低信噪比的情况下，N又太小，会使SEDS通信系统的自干扰较大，系统不能正常工作。

图2中的仿真曲线说明了扩频因子N对自编码扩频通信系统性能的影响。图中，信道为白高斯噪声信道，N分别取10，50，100。从图2可以看出，在E_b/N_o取相同值时，自编码扩频通信系统的BER会随N的大小而变化，N太小(如N=10)，系统性能恶化E_b/N_o(dB)。现在的仿真结果和上面对扩频因子的分析是吻合的。

4.2 AWGN时自编码扩频与经典扩频的性能比较

自编码扩频通信在AWGN信道中的性能如图3所示。扩频因子N=128。图3中还同时给出了SEDS和经典扩频DSSS性能的理论曲线。由图中可看出：

1) $E_b/N_o>2$ dB时，自编码扩频通信BER理论值与仿真结果吻合紧密，而$E_b/N_o<2$ dB时，仿真得到的误码率大于理论计算结果。原因是低信噪比时，接收端解调后错误比特多，使接收端预测的扩频码中错误码片多，引起错误增值。当误码率达到一定阀值时，P_e会不断增加，最后达到极限值0.5。理论计算没有考虑错误增值引起不稳定的复杂情况，使得理论值和仿真结果在低信噪比时有较大差别。

2) 将SEDS和经典扩频DSSS通信系统比较，可以看出：$E_b/N_o<4$ dB时，SEDS通信系统由于自干扰的影响，BER性能不如经典DSSS通信系统。$E_b/N_o>4$ dB，SEDS通信系统自干扰的影响越来越小，其BER性能和经典DSSS通信系统基本相同。在一般的运行条件下，扩频通信系统要求$P_e<10^{-3}$，这时SEDS和经典DSSS系统一样稳定。

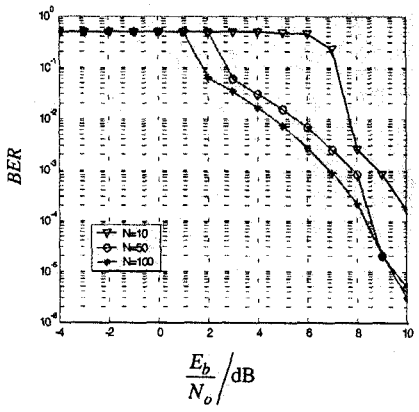

图2 扩频因子N对系统性能的影响

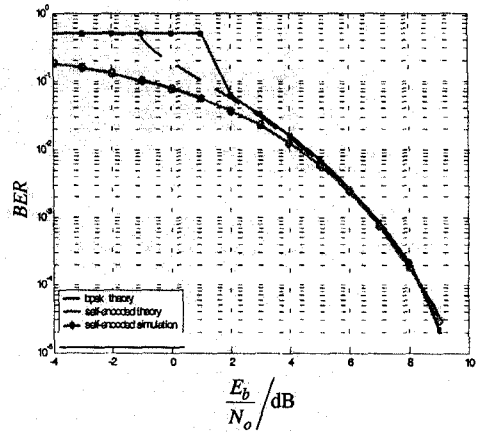

图3 AWGN信道下自编码扩频系统的误码率

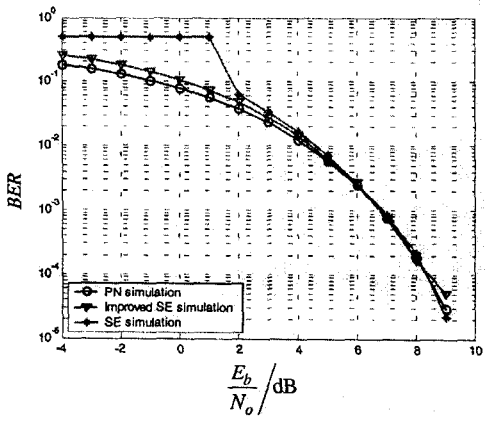

图4 AWGN信道下改进自编码扩频通信的误码率

4.3 改进的自编码扩频通信系统的性能仿真

为了改进SEDS通信系统在低信噪比时的性能，3.2节中提出了改进方法，图4是这种改进方案的仿真结果。扩频因子N=128，固定内容单元数K=50。图4中还同时给出了经典DSSS、未采用改进方案的SEDS的误码率曲线。由图4看出：将移位寄存器中一部分存储单元的内容固定，可改善SEDS通信在低信噪比时的性能。因为固定一部分存储单元的值，降低了接收端再生扩频码对接收信号的依赖程度，限制了误码增值，使低信噪比时系统性能改善。实际上，这是经典PN码扩频和自编码扩频的折衷，可以根据系统工作环境灵活选择。

(下转第529页)

$$P^3=\begin{bmatrix}0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125\\ 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125\\ 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125\\ 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125\\ 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125\\ 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125\\ 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125\\ 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125\end{bmatrix}$$

$P^n = P^3 = P^L$，其中n为大于3的整数，3步转移矩阵中的各项达到等概的极限分步，与理论推导完全吻合。

5 结 论

本文推导并归纳出构造差分跳频转移函数的原则和优化目标，提出一种有效的构造方法，并从理论角度证明该方法达到了优化目标。该类方法在提高系统误码率性能和频率随机性方面具有良好的性质，方法构造方便，便于跳频密钥的管理和控制，能够产生的算法个数多，对于一个具体的差分跳频系统的实现具有指导意义。

参 考 文 献

[1] Herrick D L , Lee P K. CHESS: a new reliable high speed HF radio[C]. IEEE MILCOM'96,1996. 684-690

[2] Herrick D L, Lee P K. Correlated frequency hopping: an improved approach to HF spread spectrum communications[C]. IEEE Proc. of the Tactical Communications Conference, 1996. 319-324

[3] 潘　武, 周世东, 姚　彦. 差分跳频通信系统性能分析[J]. 电子学报, 1999, 27(11): 102-104

[4] 杨裕亮, 何遵文, 匡镜明. 差分跳频系统的转移函数研究[J]. 通信学报, 2002, 23(4): 103-108

[5] 朱庆棠, 陈良均. 随机过程及应用[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1996

编　辑　孙晓丹

(上接第476页)

5 结 论

本文分析了自编码扩频在白高斯噪声信道中的误码特性，引入自编码扩频通信系统的等效扩频增益来描述其性能变化。针对低信噪比时自编码扩频通信系统中自干扰问题，提出了改进的方法。计算机仿真说明，论文中所作的分析和仿真结果是吻合的。自编码扩频的优势表现在扩频序列的动态可变，增加了信号的隐蔽性。改善低信噪比时性能的方法，是自编码扩频和经典PN码扩频的折衷，牺牲了扩频码的动态可变特性，虽在高信噪比、系统正常运行时完全不必要，但为低信噪比时系统的正常工作提供了一种备选方案。

参 考 文 献

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

[2] Lok T M, Lehnnet J S. Error probability for generalized guadriphase signature seguences[J]. IEEE Trans. Commun., 1996, 44(4): 876-885

[3] Nguyen L. Self-encoded spread spectrum communications[C]. Proc. of the 1999military communication conference, Atlantic City, NT, 1999

[4] 郭　燕. 自编码扩频通信技术的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2003

编　辑　孙晓丹