

多用户混沌序列扩频通信系统设计与性能分析

孙克辉 周家令 牟俊

(中南大学物理科学与技术学院 长沙 410083)

摘要: 该文介绍了多用户混沌扩频通信系统原理, 分析了 Chebyshev, Logistic, Tent 3种混沌扩频序列的平衡性、相关性, 建立了多用户混沌扩频通信系统动态可视化仿真模型, 利用模型研究了这3种不同混沌扩频序列扩频码的初始值、信噪比、用户数以及截取的序列长度对系统误码率的影响。仿真结果表明, Chebyshev 映射的扩频性能最好, Logistic 映射次之, Tent 映射最差, 且这3种混沌扩频码的扩频性能均优于传统的扩频码。

关键词: 混沌序列; 直接序列扩频; 平衡性; 相关性

中图分类号: TN914.42

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)10-2436-05

Design and Performance Analyses of Multi-user Chaotic Sequence Spread-Spectrum Communication System

Sun Ke-hui Zhou Jia-ling Mou Jun

(School of Physics Science and Technology, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The principle of multi-user chaotic sequence spread-spectrum communication system is introduced. Performances of balance and correlation properties of three different chaotic spread series (Chebyshev, Logistic and Tent) are analyzed. The dynamic visual simulation modeling of multi-user chaotic sequence spread-spectrum communication system is established. Based on this modeling, the error-bit rate performances of these systems with different initial values, signal to noise ratio, number of users and the length of sequence are investigated. Simulation results show that the spread-spectrum performance of Chebyshev is the best, then Logistic and Tent, and the spread-spectrum performances of the three chaotic spread series are better than that of the conventional spread sequence.

Key words: Chaotic sequence; Direct sequence spread-spectrum; Performance of balance; Correlation property

1 引言

直接序列扩频通信(DS/SS)的核心是如何产生高质量的扩频序列。现有的扩频序列, 如m序列或Gold序列, 存在复杂度低, 保密性差等缺点, 而且随着信息科学和数字信号处理理论和技术的发展, 对现有直扩通信信号也出现相应的侦破手段^[1]。因此, 必须寻找新的扩频码, 以提高通信系统的抗干扰、抗破译能力。因混沌扩频序列具有随机性好, 保密性高, 相关特性优异, 数量极大等特点, 而有望成为扩频通信中理想的地址码^[2-4]。因此, 研究混沌扩频序列特性, 及其多用户情况下对扩频通信系统性能的影响, 具有重要理论意义和实际价值。

2 多用户混沌扩频通信原理

混沌序列替代传统直接序列扩频通信系统中的PN码作为地址码^[4], 构成混沌直接序列扩频通信系统如图1所示。系统包括扩频、调制、解扩、相关运算和判决等环节。

假设系统各用户同步, 且系统各用户信号功率相同, 当

系统的用户数为 M , 每个用户要传递的信息数据为 $a_i(k)$ ($i = 1, 2, \dots, M$), 则第 i 用户的原始数据信号为 $a_i(k) =$

$\sum_{n=KN}^{KN+(N-1)} d_i(n)$, 其中 $d_i(n)$ 为第 i 用户的信息比特值, $d_i(n) \in \{-1, 1\}$ 。 $x_i(n)$ 是发送端第 i 用户的混沌扩频序列, 其表达式为 $x_i(k) = \sum_{n=KN}^{KN+(N-1)} g_i(n)$, 其中 $g_i(n)$ 是第 i 用户的扩频序列比特值。所以, 接收端的输入信号 $r(n)$ 为

$$r(n) = \sum_{i=1}^M A_i(n)d_i(n)g_i(n) + N(n) \quad (1)$$

其中 $A_i(n)$ 为第 i 用户的载波信号幅度, $N(n)$ 是零均值的高斯白噪声。设 T_b 为每个原始信息比特的码元宽度, 则接收端第 i 用户相关器(滤除高次谐波)的输出为

$$y_i(k) = \frac{1}{T_b} \int_{T_b} r(t)g_i'(t)dt \quad (2)$$

设 $x_i'(n)$ 是接收端第 i 用户的混沌扩频序列, 当系统收发两端同步时, 即 $x_i(n) = x_i'(n)$, 则

$$y_i(k) = \frac{1}{T_b} \int_{T_b} r(t)g_i(t)dt = A_i d_i + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^M \rho_{i,k} A_i d_i + \frac{1}{T_b} \int_{T_b} N(t)g_i(t)dt = A_i d_i + MAI_i + z_i \quad (3)$$

式(3)中, 第 1 项为有用信息分量; 第 2 项为第 i 用户本身的扩频信号与接收信号相关得到的恢复数据, 即与其它用户相关造成的多址干扰, 显然, 多址干扰与用户数 i 、其他用户信号的幅度 $A_i(i \neq k)$ 、互相关系数 $\rho_{i,k}$ 有关, 其中, $\rho_{i,k} = \frac{1}{T_b} \cdot \int_{T_b} g_i(t)g_k(t)dt$; 第 3 项为噪声干扰。

接收端第 i 用户在积分(相关运算)后, 再对信号进行判决, 设判决门限为 0, 则第 i 用户的接收端解调出的数据为

$$b_i(k) = \begin{cases} -1, & y_i(k) < 0 \\ 1, & y_i(k) > 0 \end{cases} \quad (4)$$

综上所述, 用户信息能否正确被接收, 扩频码的特性是关键。

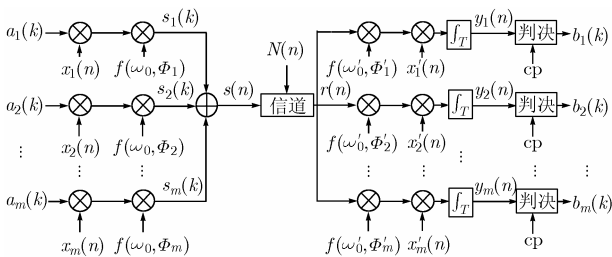


图 1 多用户混沌序列扩频通信系统原理框图

3 混沌扩频码的产生及性能分析

3.1 3 种混沌映射及其二值化序列

以 Chebyshev, Logistic, Tent 3 种混沌映射^[5]来产生二相混沌扩频序列。在多用户混沌序列扩频通信系统中, 扩频序列是取值为 ± 1 的二进制序列, 故应对混沌映射的实值序列进行二值量化。一般地, 从模拟序列向二进制序列转移采用如下两种方法: 一种是设定一个判决门限 ξ , 通过判决函数 $T(x) = [1 + \text{sgn}(x - \xi)]/2$ 进行变换; 另一种是将模拟序列各点值表示成二进制, 取其中某一位作为输出序列的一个比特, 这里采用第一种方法。

Chebyshev 混沌映射。 ω 阶 Chebyshev 混沌映射定义为

$$x_{k+1} = \cos(\omega \cos^{-1} x_k), \quad -1 \leq x_k \leq 1 \quad (5)$$

当 ω 为 2 的整数次幂时, 系统处于混沌状态, 此时, 序列的均值为 0, 序列二值化的判决门限 $\xi = 0$ 。

Logistic 混沌映射。Logistic 映射的表达式为

$$x_{k+1} = rx_k(1 - x_k), \quad 0 < x_k < 1 \quad (6)$$

其中 $1 \leq r \leq 4$, r 为分形参数。当 $3.5699 \dots < r \leq 4$ 时, 系统处于混沌状态, 此时, 序列的均值为 0.5, 序列二值化的判决门限 $\xi = 0.5$ 。

Tent 混沌映射。Tent 映射定义为

$$x_{k+1} = \begin{cases} x_k/a, & 0 < x_k < a \\ (1-x_k)/(1-a), & a \leq x_k \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

当 $0 < a < 1$, $0 \leq x_0 \leq 1$ 时, 系统处于混沌状态, 序列的均值为 0.5, 序列二值化的判决门限 $\xi = 0.5$ 。

混沌序列是非周期的, 但是在扩频通信中每个信息比特所含的扩频序列的位数是一定的(例如 N), 因此, 混沌扩频序列就有一个长度和如何截取的问题。本文从混沌序列中依次截取固定 N 位数的码段分配给信息比特的方法, 即信息比特 $a(k) \in \{-1, 1\}$ 由 N 个序列元素 $x(n)(n = KN, \dots, KN + (N - 1))$ 表示, 在仿真过程中主要是通过基于帧的处理方式来实现, 即通过设定每帧的抽样数来把混沌序列截取成 N 位的码段。

3.2 3 种序列的平衡性分析

序列的平衡性与直接序列扩频系统对载波抑制制度有密切关系, 若扩频序列不平衡会使系统载波出现泄露, 易产生误码或码元丢失。因此研究序列平衡性对直接扩频系统具有重要意义。对混沌映射的实值序列进行二值量化产生扩频序列后, 序列取值为 ± 1 。序列的平衡性由序列中“1”和“-1”的统计分布所决定, 设 P 和 Q 分别表示混沌序列中“1”和“-1”的个数, 则序列的平衡度 E 为^[6]

$$E = (P - Q) / N \quad (8)$$

其中 N 为序列的码元总数。

根据式(8), 对 3 种混沌映射的初始值对平衡性的影响进行分析。由于 Chebyshev 映射以及该映射初始值对序列平衡度的影响都是关于 $x = 0$ 对称的, 因此为了便于比较, 把该映射的初值范围选在 $[0, 1]$, 当 $\omega = 20$, 初始值 x_0 取值精度不小于 10^{-4} 时, Chebyshev 映射的平衡度 E 和 x_0 之间的关系如图 2(a)所示, 可见, 初始值 x_0 对平衡度影响比较小, 不存在峰值点; 当 $r = 4$, 初始值 x_0 取值精度不小于 10^{-4} 时, Logistic 映射的平衡度 E 和初始值 x_0 之间的关系如图 2(b)所示, 显然, 初始值 x_0 对平衡度影响比较小, 但存在 3 个峰值点, 其对应的初始值分别是 $x_0 = 0.25, 0.5$ 和 0.75 ; 当 $a = 0.49$, 初始值 x_0 取值精度不大于 10^{-4} 时, Tent 映射的平衡度 E 和初始值 x_0 之间的关系如图 2(c)所示, 初始值 x_0 对平衡度的影响也比较小, 但存在 3 个峰值点, 对应的初始值 x_0 分别是 $0.2401, 0.49$ 和 0.7501 。值得一提的是, 文献[6]认为 Tent 映射中初始值对映射的平衡度的影响不存在峰值点是错误的, 因为 Tent 映射的平衡度峰值出现与否跟初始值精度选取有关, 如果选取的初始值精度不够, 就会把系统的峰值点漏掉。

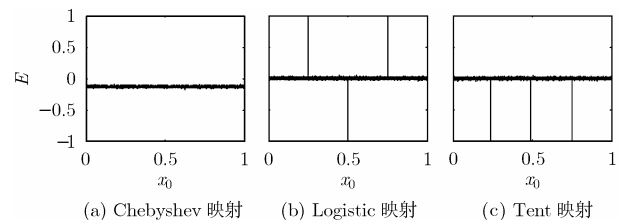


图 2 3 种映射的初值 x_0 对混沌序列平衡度 E 的影响关系

3.3 3 种序列的相关性分析

序列的互相关均方根值是由序列的长度和相关间隔决定的, 在相同间隔下, 序列越长, 相关特性的偏差就越小^[7]。

但在实际的多用户混沌扩频系统仿真过程中,无法将二者分

开进行讨论,因为在该仿真过程中必须保证每一帧的仿真步长是相同的,即要求帧长度和每帧的采样周期的乘积是个常数。由式(3)可知,在信噪比和用户数相同,且不考虑多径干扰的情况下,多址干扰是影响系统传输性能的主要因素,而扩频序列的多址干扰的大小可由序列的互相关均方根来表征,所以下面通过互相关均方根来研究序列的互相关特性。若保持混沌序列的长度 N 不变,利用序列帧长度改变相关间隔 M , 则互相关均方根 $\sigma_{R_{12}}$ 为

$$\sigma_{R_{12}} = \sqrt{\frac{1}{2M+1} \sum_{m=-M}^M [R_{12}(m)]^2} \quad (9)$$

由式(9)计算 3 种混沌二值序列互相关均方根值如表 1 所示。

表 1 3 种混沌序列互相关均方根值

序列长度	Chebyshev	Logistic	Tent
100	0.2810	0.2783	0.2630
500	0.2510	0.2520	0.2551
1000	0.2529	0.2410	0.2633
1500	0.2477	0.2533	0.2530
2000	0.2351	0.2437	0.2587
2500	0.2299	0.2389	0.2531
3000	0.2211	0.2333	0.2521
基于采样 处理方式	0.2843	0.2841	0.2752

由表 1 可见,混沌序列经过帧处理之后每个序列的互相关均方根值变化不一,而且不同的帧长度对应不同的均方根值,这样就破坏了原来的相关特性;此外,与基于采样的序列相比,一定长度的混沌序列经过帧处理后跟具有更好的互相关性;显然 3 种混沌序列的互相关均方根值整体上都呈现减小趋势,只是不同序列减小幅度有大有小,其中 Chebyshev

映射变化幅度最大, Logistic 映射次之, Tent 映射最差。考虑到序列越长,系统的同步越困难,对器件的要求越高,所以不能一味的增加序列长度。作者认为混沌扩频序列的长度取 2000~2500 比较合适。

4 多用户混沌扩频系统设计及性能分析

4.1 多用户混沌扩频系统设计

若要设计多用户混沌序列扩频通信系统,还必须解决每个用户的混沌扩频码初始值选择问题。因为混沌映射经过二值量化和截取后,原来的相关特性可能被破坏。因此本文所有混沌扩频码都采用一个初始值,然后把这个混沌扩频码进行移相处理,作为其它用户的混沌扩频码,这样既避免了各个用户的混沌扩频码初始值优选的问题,同时也满足了系统的设计要求。

仿真条件: Chebyshev, Logistic, Tent 混沌映射初始值都取 0.63, 其中 r , ω 和 a 分别取 4, 20 和 0.49, 随机整数发生器的输出范围取 2, 抽样时间为 1/192s, 每帧的抽样数为 1, 混沌扩频码的抽样时间为 1/192000s, 每帧的抽样数为 1000, 加性高斯白噪声信道的符号周期取 1/192s, 接收端延迟取为 1, 用户数设为 5, 仿真时间取 10s。根据图 1 构建用户数为 5 的混沌扩频通信仿真系统如图 3 所示。图中发送端用户 2~用户 5 是用户信息与扩频码相乘的封装子系统,接收端 2~接收端 5 分别对应用户接收模块,其中虚线内的用户 1 和接收端 1 由未封装的模块构成。

本系统的设计难点在于(1)如何选择 5 个用户的混沌扩频码,使其具有良好的相关特性;(2)在什么位置进行单双极性变换;(3)如何进行相关接收。对应的解决方案是(1)所有的混沌扩频码都采用一个混沌映射,区别是其它的混沌扩频码都是由该映射移相产生;(2)单双极性变换位置如图 3 所示;(3)判决接收采用的是积分器,它由如图 4 所示模块封装而成。

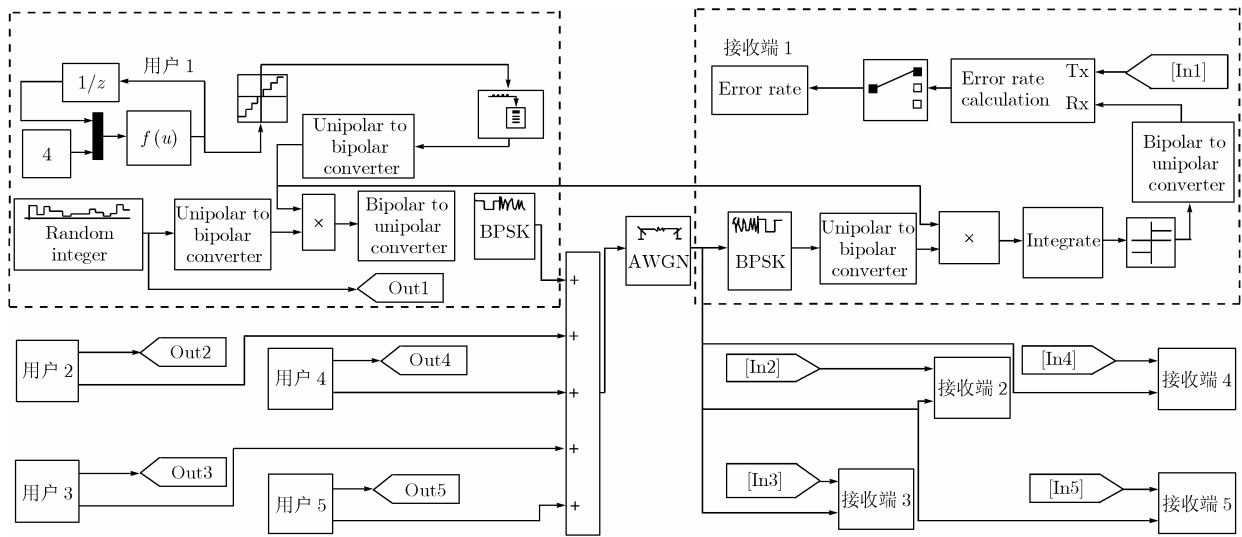


图 3 多用户混沌序列扩频通信系统仿真图

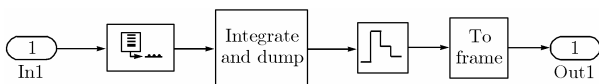


图 4 相关接收器的构成框图

4.2 AWGN 信道下的系统性能分析

(1)混沌映射初始值 x_0 对系统误码率 BER 的影响 不失一般性, 信噪比 E_s / E_0 变化范围取 1dB, 当初始值 x_0 取值精度不小于 10^{-4} 时, 随着信噪比的增加, 系统误码率逐渐下降。由图 5(a)可见, Chebyshev 混沌映射受初始值的影响较小, 误码率随着序列的初始值变化不大, 不存在峰值点问题。Logistic 混沌映射的平衡度峰值(对应初始值分别为 0.25, 0.5 和 0.75)导致了系统的误码率峰值, 如图 5(b)所示, 当取其它初值时, 误码率变化比较平缓, 因此在序列取初值的时候应尽量避免 0.25, 0.5 和 0.75 初始值点。由图 5(c)可见, Tent 混沌映射有 3 个平衡度峰值, 对应的初始值分别为 0.2401, 0.49 和 0.7501, 当 $x_0 = 0.49$ 时, 因为分形参数也取的是 0.49, 这样把数值代入式(7)中就会发现实值序列中除了第 1 个元素为 1 之外, 其它元素均为 0, 此时由式(8)得 $E = -0.998$, 即在初始值为 0.49 处有一个峰值点, 其对平衡性的影响很大, 如图 2(c)所示。但是不能简单的说构造序列时某一序列元素要避开这一点, 因为从式(7)中可以看出序列元素的取值范围是 (0,1], 即 Tent 混沌映射的序列元素不能为 0, 所以说当 $x_0 = 0.49$ 时得到的二值序列也就没什么意义了, 因此不讨论 $x_0 = 0.49$ 时的情况。但是当序列初始值 $x_0 = 0.2401$ 和 0.7501 时候, 就存在峰值了, 这说明 Tent 映射确实存在平衡度峰值点, 这就进一步验证了图 2(c)的结论, 因此在序列取初值的时候尽量避免 0.2401 和 0.7501 初始值。

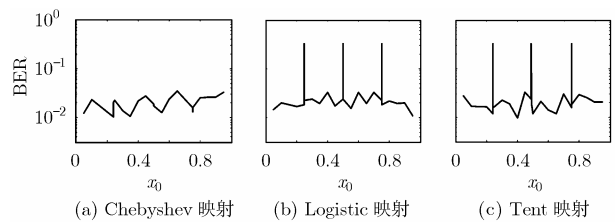


图 5 不同混沌映射初值 x_0 对多用户扩频系统 BER 的关系曲线

(2)信噪比对系统误码率的影响 当信噪比 E_s / E_0 取值在 0~8dB 变化时, 由图 6 可以看出, 其中多用户的 Chebyshev, Logistic, Tent 混沌扩频通信系统的误码率性能相近, 但优于 m 序列和 Gold 序列, 这说明混沌扩频信号的抗多址干扰的能力强于 m 序列和 Gold 序列, 能够适应多个用户的通信要求。在该系统中, 当信噪比较小的时候, 系统表现出的主要是噪声干扰, 这时, Chebyshev 映射的误码性能最好, 具有良好的抗噪声干扰性能; 当信噪比较大的时候, 系统表现出的主要是多址干扰, 这时, Logistic 映射具有良好的抗多址干扰能力。

(3)用户数 i 对系统误码率的影响 设用户数 $i = 1 \sim 10$, 信噪比 E_s / E_0 取 1dB, 从图 7 中可以看出, 随着用户数的增加, 3 种混沌扩频码的扩频系统误码率变化不大, 其中 Chebyshev 映射的扩频系统误码率最小, Logistic 映射的次之, Tent 映射的最大, 但优于 m 序列和 Gold 序列, 这说明基于 3 种混沌序列的扩频通信系统具有良好的抗噪声和抗多址干扰能力。

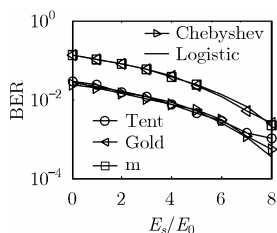


图 6 信噪比对系统 BER 的影响

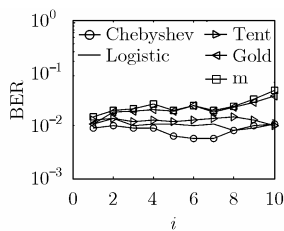


图 7 用户数对系统 BER 的影响

(4) 截取的序列长度 N 对系统误码率的影响 设信噪比 E_s/E_0 取 8 dB, 截取的序列长度 N 在 100~3500 之间变化, 其它条件不变。序列长度 N 与系统误码率的关系如图 8 所示, 由于 m 序列和 Gold 序列是周期性序列, 因此在每一帧的仿真步长相同情况下, 截取的序列长度 N 对系统误码率的影响相同, 而 3 种混沌序列是非周期性序列, 随着序列长度的增加, 截取的序列长度 N 对系统误码率影响逐渐减小, 且优于 m 序列和 Gold 序列; 当序列长度相同时, 在 0~1050 之间, 3 种混沌映射系统的误码率相当, 而在 1050~3500 之间, Tent 系统的误码率最大, Logistic 系统次之, Chebyshev 系统最小; 从图 8 还不难看出, Chebyshev 映射在 $N=1000$, Logistic 映射在 $N=1100$ 时, 系统误码率发生突变, 这主要是因为序列截取后, 混沌映射的相关特性被破坏的缘故。从图中还可以发现, 每个序列的系统误码率大小与该序列的互相关均方根值大小相对应, 这也说明扩频序列的多址干扰的大小确实是由序列的互相关均方根来表征的。

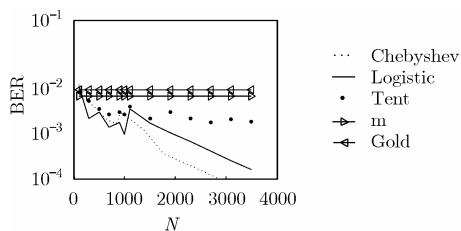


图 8 序列长度对系统 BER 的影响

5 结束语

随着第三代个人通信的发展, 信息的保密传输变得越来越重要。混沌直接序列扩频系统具有比传统的扩频系统更好地安全性。本文利用 MATLAB 的 SIMULINK 仿真平台, 对多用户混沌序列扩频通信系统进行建模与仿真, 并对利用 3 种不同的有限长度混沌扩频序列(Chebyshev, Logistic 和 Tent)扩频系统性能进行仿真与分析。研究了扩频码的平衡性、相关性对系统的影响, 并与传统扩频序列(m 序列和 Gold 序列)进行了传输性能比较。仿真结果表明混沌扩频序列要优于传统扩频序列。

参考文献

- [1] Ling Cong, Wu Xiaofu, and Sun Songgeng. A general efficient method for chaotic signal estimation [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1999, 47 (5): 1424-1428
- [2] Kohda T and Tsuneda A. Pseudonoise sequences by chaotic nonlinear maps and their correlation properties[J]. *IEICE Trans. on Communications*.1993, E76-B(8): 855-862
- [3] Mcgillem C D. A novel multiple-address digital communication system using chaotic signals[C]. Proceedings of International Conference on Communications, Chicago, 1992, 41(6): 1232-1236
- [4] Heidari B G and McGillem C D. A chaotic direct-sequence spread-spectrum communication system[J]. *IEEE Trans on Commun.*, 1994, 42(2/3/4): 1524-1527
- [5] 胡健栋, 郑朝辉, 龙必起, 等. 码分多址与个人通信[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996: 151-160
- [6] 于银辉, 刘卫东. 两种混沌扩频序列平衡性分析[J]. 重庆邮电学院学报, 2004, 16(3): 61-64
- [7] 王亥, 胡健栋. 改进型 Logistic-Map 混沌扩频序列[J]. 通信学报, 1997, 18(8): 71-77

孙克辉: 男, 1968 年生, 博士, 副教授, 研究领域为混沌理论及其应用。

周家令: 男, 1979 年生, 硕士, 研究领域为混沌扩频与保密通信。

牟俊: 男, 1981 年生, 硕士, 研究领域为混沌同步与保密通信。