

基于滑动相关峰检测的混沌码同步法

谢绍斌 周双* 王锋 万康
(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)

摘要: 混沌无线数字通信是未来高安全高保密无线通信的重要发展方向,而混沌码同步是其核心技术之一。该文根据混沌无线通信特点,提出一种基于滑动相关峰检测的混沌码同步方法。针对非周期混沌码同步,设计了在混沌码同步3个约束条件下的相位延迟控制模块,搭建了基于Logistic序列的同步系统动态模型,并进行了仿真。仿真结果表明,该方法可实现收发两端混沌码同步,同步速度快,抗噪能力强,有效地解决了混沌无线数字通信中的同步方法问题。

关键词: 混沌无线数字通信; 混沌码同步; 同步约束条件; 滑动相关

中图分类号: TN919

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)01-0141-05

DOI: 10.11999/JEIT150620

Method of Chaos Code Synchronization Based on Sliding Correlation

XIE Shaobin ZHOU Shuang WANG Feng WAN Kang

(School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: Chaos wireless digital communication is an important development direction of high security wireless communication in the future. Chaos code synchronization is one core technology. According to characteristics of chaos wireless communication, a method of chaos code synchronization based on sliding correlation is put forward. For non-periodic chaos code synchronization, phase delay controller is designed under the condition of three constrain conditions. Taking logistic sequence for example, a dynamic model of chaos code synchronization system is built and the simulation is carried out. The test results show that this method can effectively realize chaos code synchronization between sender and receiver. Its synchronous rate is fast and anti-noise performance is good. It solves the synchronization problem in chaos wireless digital communication.

Key words: Chaos wireless digital communication; Chaos code synchronization; Synchronization constraints; Sliding correlation

1 引言

早在1983年Yamada和Fujisaka在混沌同步方面做了早期探索^[1],分析了Lyapunov指数对混沌同步系统行为的影响。1990年美国海军实验室PECORA和CARROLL取得突破性进展^[2],从理论和实验上证明了两个混沌系统可以达到同步。近年来,国内外学者又陆续提出了其他同步方法,如模糊控制方法^[3]、观测器同步方法^[4]、快速同步方法^[5]等。上述混沌渐近同步方法在混沌无线数字通信中应用有很大局限性,混沌无线数字通信中要求的是

混沌严格同步,即混沌码同步。然而至今,针对混沌无线数字通信的研究主要围绕在产生性能优异的混沌序列^[6,7],或搭建基于已同步系统的信息传输模型^[8-10],关于混沌码同步技术的研究很少^[11-13]。

混沌码同步是混沌无线数字通信系统中一个关键环节,一般收发双方不在同地,必须要有同步系统来保证其协调工作,具有重要研究意义。但非周期混沌码同步有如下难点:一是与传统通信中周期序列不同,对于非周期混沌序列如何实现;二是通信链路建立与信息传输是实时的,如何快速建立同步;三是信号在实际传输过程会受到各种噪声干扰,如何设计鲁棒性较好的同步方法。针对以上问题,本文提出了一种非周期混沌码滑动相关同步法,并搭建了相应的同步系统动态仿真模型,有效地实现了收发两端混沌码同步,为混沌无线数字通信工程化应用提供了技术支持。

收稿日期: 2015-05-25; 改回日期: 2015-09-11; 网络出版: 2015-11-19

*通信作者: 周双 hljzhsh@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61202490), 航空科学基金(20BZC15008)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61202490), The Aeronautical Science Fund of China (20BZC15008)

2 混沌码同步及 3 个约束条件

设发送端、接收端混沌时间序列分别为

$$\left. \begin{aligned} s(n) &= f(\lambda, n) \\ r(n) &= f(\lambda, n, m) \end{aligned} \right\} \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

其中, n 为某一状态时刻; m 为传输时延; $s(n), r(n)$ 分别为收发混沌序列状态变量; f 为 $R^n \rightarrow R^n$ 非线性映射。

如果满足

$$\lim_{\Delta m \rightarrow 0} \|s(n) - r(n)\| = 0 \quad (2)$$

则称发送端和接收端达到混沌码同步。

由于信道传输时延、启动时差等因素, 收发两端混沌序列起始时失步。假定接收的混沌序列为 $s(n)$, 本地产生的混沌序列为 $r(n)$ 。 $\Delta m \rightarrow 0$ 是从相空间上保持混沌序列同步, $\|s(n) - r(n)\| = 0$ 是从收敛性上要求混沌序列相同。

模拟电路实现混沌保密系统时, 收发两端混沌电路参数误差不可避免。为在混沌无线数字通信中克服这个缺点, 根据实际工程应用可能, 提出了以下 3 个混沌码同步约束条件:

- (1) s, r 采用相同混沌模型 f , 其参数 λ 和 $x(0)$ 相同;
- (2) s, r 约定采用相同的时间基准 t_0 , 使系统频率精度 ν 一致;
- (3) s, r 约定采用相同码率 ν 和精度 p 的混沌码产生器。

基于上述同步约束条件, 可以保证通信双方产生具有相同特性的混沌码, 且只考虑由信道传输引起的码位相移延时。

3 混沌码滑动相关同步法

混沌码滑动相关同步法, 主要利用混沌序列尖锐的自相关特性。首先根据混沌码同步 3 个约束条件产生本地混沌码, 并进行二值化处理; 然后截取本地序列一定数量的混沌码, 与经过接收处理的发射基带混沌信号进行连续相关运算, 获得相关值序列并进行相关峰检测; 一旦检测到峰值, 即刻停止运算, 可获得本地码同步位置, 实现快速同步目的。

混沌码滑动相关同步原理如图 1 所示, 主要由乘法器、积分器、门限和相位延迟 4 部分组成。当两组混沌码相位一致时, 相关器的输出有尖峰值出现, 否则, 相关器的输出值很小。

接收的信号为信码 $d(t)$ 与混沌序列 $x(t - \tau)$ 之和, 则有用信号 $s(t)$ 为

$$s(t) = d(t)x(t - \tau) \quad (3)$$

式中 $t = nT_c$, T_c 为码片宽度; τ 为传输时延。

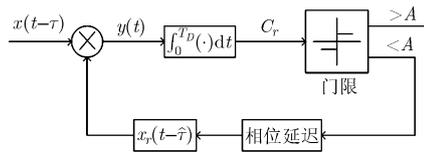


图 1 混沌码滑动相关峰检测原理框图

设在同步初始阶段不传输信码, 可令 $d(t) = 1$, 收信机主要检测本地混沌序列 $x_r(t - \hat{\tau})$ 与接收的混沌序列 $x(t - \tau)$ 经过相关搜索后是否取得同步, 在取得同步后, 收信机保持同步可传输信码。

那么乘法器输出 $y(t)$ 为

$$y(t) = d(t)x(t - \tau)x(t - \hat{\tau}) \quad (4)$$

经过积分器后 C_r 为

$$C_r = \int_0^{T_D} y(t) dt = \int_0^{T_D} x(t - \tau)x(t - \hat{\tau}) dt = R(\tau_e) \quad (5)$$

式中相对时延 $\tau_e = \tau - \hat{\tau}$ 。

根据混沌序列相关性理论可知, 归一化自相关函数为

$$R(m) = \frac{r(m)}{r(0)} = \frac{\sum_{n=1}^{N-m} x(n)x(n+m)}{\sum_{n=1}^N x(n)^2} \quad (6)$$

在相关处理过程中, 应用 Fourier 变换, 对 N 点混沌序列, 其 DFT 变换表达式为

$$\left. \begin{aligned} X(k) &= \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{nk}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \\ x(n) &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k)W_N^{-nk}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中 $W_N = e^{-j2\pi/N}$ 。

利用信号在时域上卷积对应于频域上乘积的变换关系, 通过计算接收信号与本地信号在频域上的乘积, 再将结果进行 Fourier 反变换, 即可得到相关值, 这样能够保证在一次相关操作后, 完成一次码搜索。这种方法大大减少了运算量, 缩短了运算时间, 可实现快速混沌码同步。

该原理的判决估计数学模型可抽象为

$$C_r = \int_0^{T_D} y(t) dt = \int_0^{T_D} x_{ij} dt = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (8)$$

混沌码滑动相关同步法具体实现步骤如下:

步骤 1 本地混沌序列 $x_r(t - \hat{\tau})$ 与接收的混沌序列 $x(t - \tau)$ 进行相乘处理, 记作 x_{ij} ;

步骤 2 对 x_{ij} 进行积分运算, 区间 $[0, T_D]$, 通常 $T_D = \lambda T_c$ (λ 为大于 1 的整数), 记作 C_r ;

步骤 3 将 C_r 与预先设定的门限值 A 进行比较;

步骤 4 相位延迟模块顺序地改变 $x_r(t - \hat{\tau})$ 的时钟相位，并在每个时钟相位上进行检测，直到 $C_r > A$ 即可；

步骤 5 当 $C_r = 1$ 时，混沌码相位一致，可进行信息的无失真传输。

假设两组混沌序列时延差为 τ_e ，代表时钟相位的总不确定性。以时钟相位步进方式进行同步搜索，选取 N 个码元做相关积分运算，那么建立混沌码同步所需时间为

$$t = \frac{\tau_e}{T_c} NT_c = N\tau_e \quad (9)$$

由式(9)可知，同步建立时间 t 由码元长度 N 和时延 τ_e 决定。起始时延差最小值为 T_c ，所以为了让接收端有充分时间进行相位搜索，起始同步阶段送入接收机的同步序列长度至少为 NT_c 。最大的同步建立时间为 $t_{\max} = NT_c$ ，最小的同步建立时间为 $t_{\min} = T_c$ ，因此混沌码同步的平均建立时间为 $\bar{t} = \frac{t_{\max} + t_{\min}}{2} = \frac{N+1}{2} T_c \approx \frac{N}{2} T_c$ 。

4 模型建立与仿真分析

4.1 同步仿真模型设计

Logistic 序列数学表达式为

$$x(n+1) = \mu \left(\frac{1}{4} - x(n)^2 \right) - \frac{1}{2},$$

$$\mu \in [3.57, 4] \quad x \in [-0.5, 0.5] \quad (10)$$

Logistic 序列的迭代波形如图 2(a)所示，轨迹极其不稳定，没有趋近于一个常数的迹象，呈现混沌状态。Logistic 序列自相关特性如图 2(b)所示，其自相关函数主峰尖细突出，没有明显副瓣，利于信号检测和估计。Logistic 序列是非周期时间序列，可以在时间轴上源源不断地产生混沌码，码元数目众多，且具有逼近于高斯白噪声的统计特性，从而起到了高安全高保密通信的作用。因此，本文以经典 Logistic 序列为例，对其进行滑动相关峰检测。

在 Simulink 可视化仿真平台上，根据混沌码滑动相关同步法，搭建同步系统动态仿真模型如图 3 所示。该模型主要包括以下 4 个功能模块：Logistic 模块、相关器模块、比较器模块、相位延迟模块。

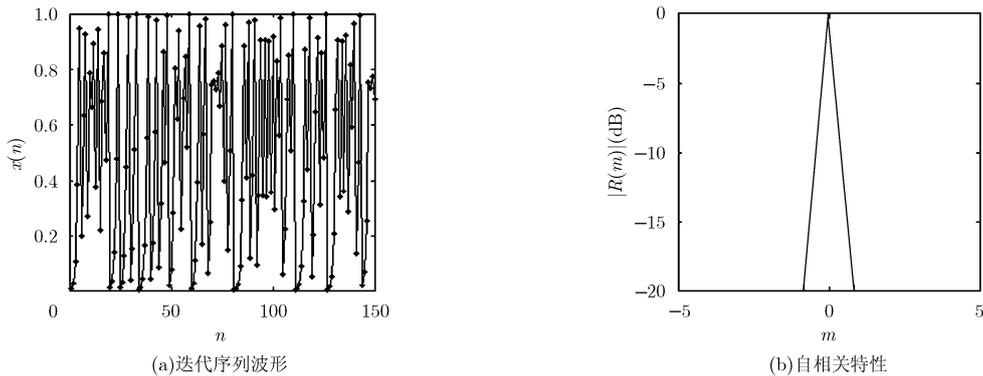


图 2 Logistic 序列

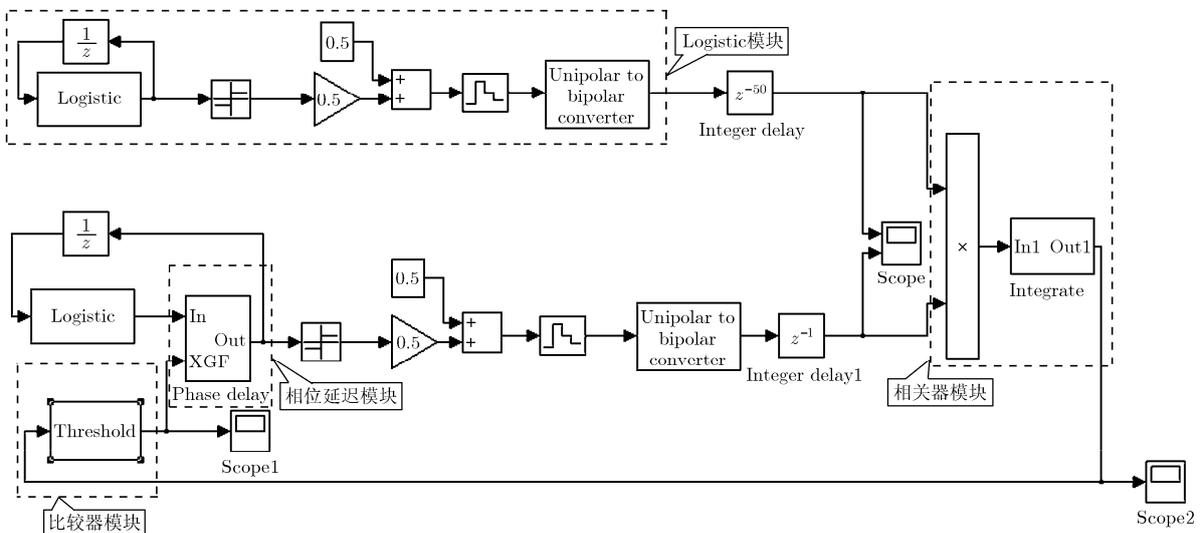


图 3 Logistic 混沌码同步系统仿真模型

4.2 仿真结果及分析

模块参数设置如下：设采样时间为 10^{-5} s，Logistic 模块输出为二进制码元；信道传输时延为 z^{-50} ；相关器模块中 $N = 1000$ ；比较器模块中 $A = 0.9$ 。仿真参数设置如下：为便于观察且不失一般性，设仿真时间为 1 s，求解器面板中类型、步长、误差容限等均采用默认值。

4.2.1 同步建立时间 同步仿真结果如图 4 所示。图 4(a)为收、发两端 Logistic 序列相关峰检测值，在 $t = 0.51$ s 时出现尖锐的相关峰，此时两混沌序列相关性达到最大，即两组混沌序列码相位一致。图 4(b)为收、发两端 Logistic 序列的波形图，图 4(b1)为接收的 Logistic 序列，图 4(b2)为本地产生的 Logistic 序列。由于混沌码元数目较多，无法同时全部显示，因此截取时间 $t = 0.5$ s 附近混沌码元波形图进行放大。通过对全部混沌码元波形图动态监视及图 4(b)的观察分析可知，时间 t 为 $0 \sim 0.5$ s 时本地混沌序列相比接收的混沌序列均超前，即未实现混沌码同步；在 $t = 0.5$ s 后本地混沌序列与接收的混沌序列波形完全一致，即实现了混沌码同步。

通过上述仿真分析可知，混沌码同步建立时间 $t = 0.5$ s 符合前面理论推导公式，仿真结果达到了

预期效果。基于上述混沌码 3 个约束条件，通过对本地非周期混沌时间序列的相位延迟控制，可实现对传递的混沌序列相位同步捕捉，证明了该混沌码同步理论的正确性和有效性。

4.2.2 抗噪声性能 在实际通信工程，噪声是始终存在的，但是传统混沌同步对噪声非常敏感，当噪声大小达到信号 10% 时，即信噪比 SNR 为 20 dB，同步性能恶化严重^[14]。下面对混沌码滑动相关算法进行仿真并分析。

Logistic 序列自相关值尖锐，功率谱像噪声一样平坦，与 AWGN 谱特性很接近。在图 3 中添加噪声模块 AWGN，设置 AWGN 的参数 SNR=0 dB。同步仿真结果如图 5 所示，图 5(a)为收、发两端 Logistic 序列相关峰检测值，可以看出在 0.51 s 时出现峰值，由于受到噪声干扰，相关峰有微小波动但仍保持在 1.0 附近；图 5(b)为收、发两端 Logistic 序列的波形图，图 5(b1)为发送端的 Logistic 序列，图 5(b2)为受到噪声干扰后信道中传输的信号，图 5(b3)为本地产生的 Logistic 序列。此时本地混沌序列在 $t = 0.5$ s 时仍可以实现与发送端的同步，效果不受噪声影响。仿真结果表明，该方法具有很强的抗噪声能力。

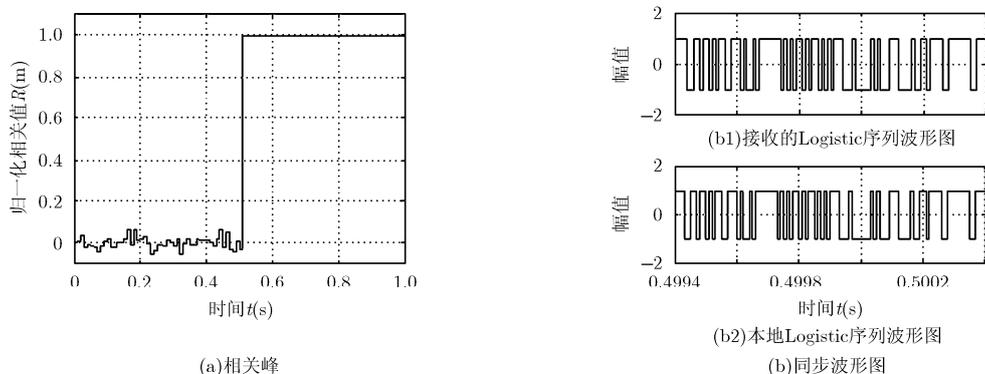


图4 Logistic 序列滑动相关同步法仿真结果

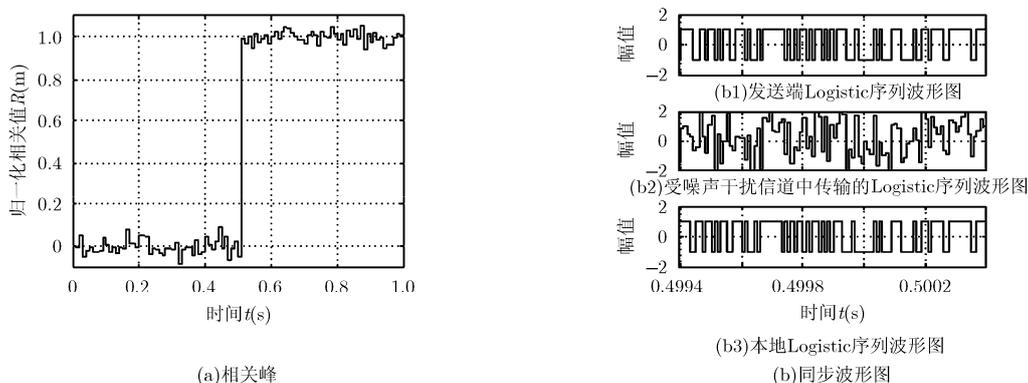


图5 当 SNR = 0 dB 时，Logistic 序列滑动相关同步法仿真结果

5 结束语

针对混沌无线数字通信中的同步问题，采用传统通信中的滑动相关思想，本文提出了一种非周期混沌码滑动相关同步法，将混沌同步理论研究融入了传统通信的研究框架。本文在 Simulink 可视化仿真平台上，搭建了混沌码同步系统仿真模型，实现了收发两端的混沌码同步。该方法原理清晰、同步速度快、抗噪声能力强、恢复信号精度高且实用性强，为混沌同步的研究开辟了新方向，解决了混沌无线数字通信中同步方法的问题，具有重要研究意义。

参考文献

- [1] YAMADA T and FUJISAKA H. Stability theory of synchronized motion in coupled-oscillator systems-I[J]. *Progress of Theoretical Physics*, 1983, 70(5): 1240-1248.
 - [2] PECORA L M and CARROLL T L. Synchronization in chaotic systems[J]. *Physical Review Letters*, 1990, 64(8): 821-824.
 - [3] VASEGH N and KHELLAT F. Takagi-Sugeno fuzzy modeling and chaos control of partial differential systems[J]. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 2013, 23(4): 042101.
 - [4] WANG X Y and MENG J. Observer-based adaptive fuzzy synchronization for hyperchaotic systems[J]. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 2008, 18(3): 033102.
 - [5] JOVIC B and UNSWORTH C P. Fast synchronization of chaotic maps for secure chaotic communications[J]. *Electronics Letters*, 2010, 46(1): 1-2.
 - [6] HU H P, LIU L F, and DING N D. Pseudorandom sequence generator based on the Chen chaotic system[J]. *Computer Physics Communications*, 2013, 184(3): 765-768.
 - [7] 胡进峰, 郭静波. 混沌直扩信号扩频序列盲估计[J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(8): 1824-1827.
HU Jinfeng and GUO Jingbo. Blind estimation of chaotic spread spectrum sequences[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(8): 1824-1827.
 - [8] 孙克辉, 周家令, 牟俊. 多用户混沌序列扩频通信系统设计与性能分析[J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(10): 2436-2440.
SUN Kehui, ZHOU Jialing, and MOU Jun. Design and performance analysis of multi-user chaotic sequence spread-spectrum communication system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(10): 2436-2440.
 - [9] LIU J, Yang W, YU J, et al. Simulation and analysis of chaotic direct sequence spread spectrum TT&C system tracking performance[J]. *Journal of the Academy of Equipment Command & Technology*, 2010, 4: 023.
 - [10] 雷苗, 彭宇, 彭喜元. 一种面向混沌时间序列预测的虚拟特征提取算法[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(10): 2400-2404. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01968.
LEI Miao, PENG Yu, and PENG Xiyuan. A virtual feature extraction method for chaotic time series prediction[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(10): 2400-2404. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01968.
 - [11] WANG Xingyuan. Chaotic Synchronization and Its Applications in the Secure Communication[M]. Beijing: Science Press, 2012: 485-500.
 - [12] 张友安, 余名哲, 耿宝亮. 基于投影法的不确定分解混沌系统自适应同步[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(2): 455-460. doi: 10.11999/JEIT140514.
ZHANG Youan, YU Mingzhe, and GENG Baoliang. Adaptive synchronization of uncertain fractional-order chaotic systems based on projective method[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(2): 455-460. doi: 10.11999/JEIT140514.
 - [13] 周双, 谢绍斌. Lorenz 系统单一耦合同步研究[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2015, 16(5): 80-84.
ZHOU Shuang and XIE Shaobin. Investigation of synchronization realization between Lorenz systems under single coupling method[J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2015, 16(5): 80-84.
 - [14] CARROLL T L. Chaotic system for self-synchronizing Doppler measurement[J]. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 2005, 15(1): 013109.
- 谢绍斌：男，1962年生，副教授，硕士生导师，研究方向为混沌信号理论及应用研究。
周双：女，1990年生，硕士，研究方向为混沌同步及其在无线通信中的应用。
王锋：男，1970年生，副教授，研究方向为通信理论与系统。
万康：男，1991年生，硕士，研究方向为混沌无线通信理论与技术。