

频率混沌信号产生分析与实验研究

包伯成¹ 蒋飞² 朱雷³ 卜沛霞³ 胡文⁴

(1. 常州大学信息科学与工程学院, 江苏常州 213164; 2. 中国电子科技集团公司第二十八研究所, 江苏南京 210007;
3. 江苏技术师范学院电气信息工程学院, 苏常州 213001; 4. 南京航空航天大学信息科学与技术学院, 江苏南京 210016)

摘要: 信号的峰均功率比(PAPR)是信息与通信系统中的一项关键指标, 而一般混沌信号因其动态范围变化较大有着较高的PAPR值。为了有效降低混沌信号的PAPR值, 提出了一种幅度恒定不变而频率混沌调制的频率混沌信号, 给出了利用混沌电路产生的幅度混沌信号驱动压控振荡器产生频率混沌信号的实现原理, 并分析了频率混沌信号的基本动力学特性和主要应用性能。利用蔡氏混沌电路作为幅度混沌信号源设计了该频率混沌信号的具体产生电路, 并由实验电路给出了幅度混沌信号的相轨图和频率混沌信号的时域波形。理论分析和实验结果表明, 所提出的频率混沌信号有着与幅度混沌信号相同的最大Lyapunov指数、与正弦振荡信号相等的PAPR值和近似图钉型的模糊函数。

关键词: 频率混沌信号; 峰均功率比; 模糊函数; 电路实现

中图分类号: TN75; TN76; TN702 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2011)02-0287-06

Generation and Experiment of Frequency Chaotic Signal

BAO Bo-cheng¹ JIANG Fei² ZHU Lei³ BO Pei-xia³ HU Wen⁴

(1. School of Information Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou, Jiangsu 213164, China;
2. The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing, Jiangsu 210007, China;
3. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu Teachers University of Technology, Changzhou, Jiangsu 213001, China; 4. College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract: The peak to average power ratio (PAPR) of a signal is one of the key indexes in information and communication systems. General chaotic signal has higher PAPR value due to large dynamic variation range. To reduce the PAPR value of the chaotic signal effectively, we present a frequency chaotic signal with constant amplitude and chaotic modulated frequency. The realization of frequency chaotic signal by using chaotic circuit to generate an amplitude chaotic signal to drive voltage-controlled oscillator (VCO) is proposed. Basic dynamical characteristics and main application performances of the frequency chaotic signal is analyzed. A circuit to generate the frequency chaotic signal is designed by using Chua's chaotic circuit as the amplitude chaotic signal source, from which phase portrait of the amplitude chaotic signal and time-domain waveforms of the frequency chaotic signal are obtained. Theoretical analyses and experimental results indicate that the frequency chaotic signal has the same maximum Lyapunov exponent as the amplitude chaotic signal, the same PAPR value as that of sinusoidal oscillation signal, and thumbtack like ambiguity function. Therefore, the application of frequency chaotic signal as radar signal will have good transmission and detection performance.

Key words: frequency chaotic signal; peak to average power ratio (PAPR); ambiguity function; circuit realization

1 引言

由确定性系统产生的貌似随机或类噪声的混沌信号已在各种信息工程领域中得到了诸多实际应用, 例如混沌信号雷达^[1-3]等。混沌信号易于由简单的非线性

性电路产生, 并具有理想的图钉型模糊函数^[3-4]。因此混沌电路产生的混沌信号可以应用于雷达, 并可能在处理和性能上具有潜在的优势, 还可减小电磁干扰^[5]并能容易实现系统同步^[6]。

信号的峰均功率比(PAPR)是信息与通信系统中

的一项关键指标^[7-9]。雷达系统和通信系统的发射机为了充分利用发射机的效率,通常限制发射信号的峰值功率,并使发射信号的平均功率最大化。在数学意义上衡量这一技术指标的是发射信号的峰均功率比(Peak to Average Power Ratio, 简称为 PAPR)。一般混沌信号自身的 PAPR 值很高^[10,11],当它直接作为探测信号时,由于探测信号的瞬时幅值有较大波动,对系统的一些部件,如功率放大器、数模转换器等需要具有较大的线性动态范围,这就使得系统硬件的性能受到很大的影响,所以发射信号通常选择低 PAPR 值的常幅调制信号。众所周知,正弦信号和一些恒包络调制信号具有约为 2 的较低 PAPR 值,那么如何实现一个有着正弦振荡信号波形形式且具有最优 PAPR 值的常幅混沌信号呢?该常幅混沌信号将具有怎样的性能呢?

本文将提出一个频率混沌信号,该信号形式上类似于正弦振荡信号,具有恒等的幅值且有着混沌动力学特性的振荡频率。频率混沌信号可以利用混沌电路产生的幅度混沌信号驱动压控振荡器容易获得。该信号是连续模拟信号,不同于基于离散混沌序列实现的数字混沌调频信号^[1, 12]。由于离散序列值的跳变而无法避免频率跳变,使得离散混沌序列调频信号的频率变换不连续且功率谱不平滑^[13],给具体的电路系统实现带来困难。本文将对频率混沌信号的实现原理、数学建模、性能分析和电路实验等进行产生分析和实验研究。

2 频率混沌信号实现

2.1 基本原理

一个简单的频率混沌信号实现框图如图 1 所示,图中幅度混沌信号 $x(t)$ 为一般混沌振荡电路的一个状态变量, $\mathbf{X}(t)$ 为混沌振荡电路余下的状态变量集合。用一个压控振荡器(VCO)作为频率调制器,经幅度混沌信号 $x(t)$ 驱动后直接输出频率混沌信号。

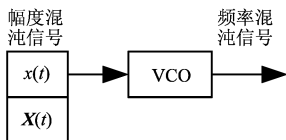


图1 频率混沌信号实现

设定 VCO 输入电压为中心电压值时的自由振荡频率为 f_0 ,控制灵敏度为 K_0 。频率混沌信号产生系统

所具有的动力学状态方程为^[8]

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \mathbf{F}(x, \mathbf{X}), \\ \dot{\mathbf{X}} &= \mathbf{F}(\mathbf{X}), \\ \dot{\theta} &= 2(f_0 + K_0 x) \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $\theta(t)$ 为频率混沌信号的相位,有

$$\theta(t) = 2(f_0 t + K_0 \int_0^t x(\tau) d\tau) \quad (2)$$

其导数即为频率混沌信号的瞬时频率,该瞬时频率是幅度混沌信号 $x(t)$ 的线性函数。

频率混沌信号 $s_f(t)$ 可以表示为

$$s_f(t) = A \exp[j\theta(t)] \quad (3)$$

这里,为了便于分析,我们设定频率混沌信号的初相 $\theta(0) = 0$,并设定 $A = 1$ 。

定理 频率混沌信号 $s_f(t)$ 与幅度混沌信号 $x(t)$ 具有相同的最大 Lyapunov 指数。

证明 根据最大 Lyapunov 指数的定义,可以证明频率混沌信号 $s_f(t)$ 的最大 Lyapunov 指数的表达式与幅度混沌信号 $x(t)$ 的一致,具体推导过程详见文献[8]。这里证明从略。

定理说明了只要幅度混沌信号 $x(t)$ 具有正的最大 Lyapunov 指数,那么频率混沌信号 $s_f(t)$ 也具有正的最大 Lyapunov 指数,且 VCO 不改变信号的动力学特性。

2.2 频率混沌信号产生

本文以一个简单的蔡氏混沌电路^[10]作为幅度混沌信号产生器,如图 2 所示。蔡氏混沌电路结构简单却不失其灵活性,是一种实现简单却蕴含着丰富的动力学现象的幅度混沌信号产生电路。

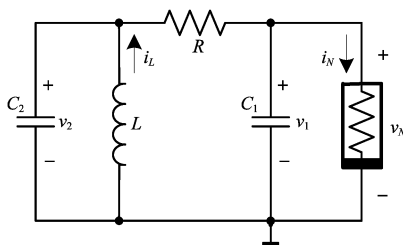


图2 典型的蔡氏混沌电路

蔡氏混沌电路有三个动态元件,分别是电容 C_1 、 C_2 和电感 L 。对应的三个状态变量是电容两端的电压 v_1 和 v_2 ,流过电感的电流 i_L ,由此构成的微分方程组为:

$$\begin{aligned} \frac{dv_1}{dt} &= -\frac{v_1}{RC_1} + \frac{v_2}{RC_1} - \frac{f(v_1)}{C_1}, \\ \frac{dv_2}{dt} &= \frac{v_1}{RC_2} - \frac{v_2}{RC_2} + \frac{i_L}{C_2}, \\ \frac{di_L}{dt} &= -\frac{v_2}{L} - \frac{ri_L}{L} \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $f(v_1)$ 是描述蔡氏二极管伏安特性函数, R 是电阻值, r 是电感的寄生电阻值(图中没有画出)。蔡氏二极管是一个具有分段线性函数形式的非线性负阻, 其伏安关系表达式为^[10]:

$$i_N = f(v_N) = G_b v_N + 0.5(G_a - G_b) |v_N + B_p| - |v_N - B_p| \quad (5)$$

选择电路参数 $R = 1.57\text{k}\Omega$, $C_1 = 10\text{nF}$, $C_2 = 100\text{nF}$, $L = 17.2\text{mH}$, $r = 1\Omega$, $G_a = -757.58\mu\text{S}$, $G_b = -409.09\mu\text{S}$ 和 $B_p = 1.075\text{V}$, 图 2 所示的蔡氏电路的典型混沌吸引子以及所对应的时域波形图如图 3 所示。

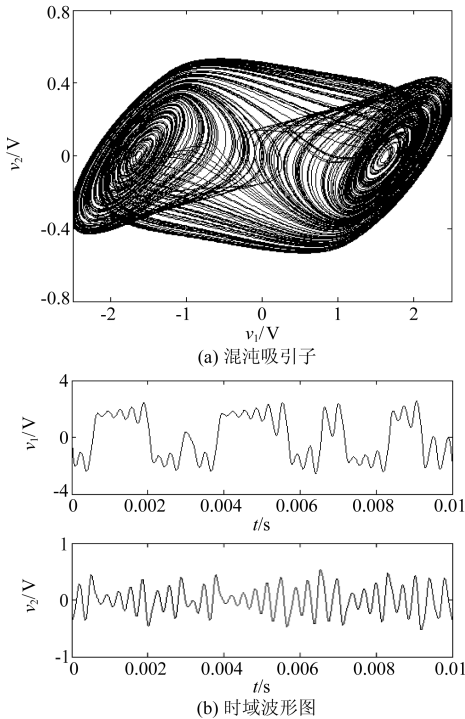


图 3 蔡氏电路产生的幅度混沌信号

由蔡氏混沌电路产生的电压信号 $v_1(t)$ 驱动图 1 中的 VCO, 则输出的频率混沌信号 $s_f(t)$ 的瞬时频率可以表示为

$$f = f_0 + K_0 v_1 \quad (6)$$

因此, VCO 输出的电压信号的瞬时频率是 $v_1(t)$ 的线

性函数。选择 $f_0 = 100\text{kHz}$ 和 $K_0 = 35\text{kHz/V}$, 则电压信号 $v_1(t)$ 与 VCO 输出信号 $s_f(t)$ 的时域波形图如图 4 所示, 从图中可知, $s_f(t)$ 的瞬时频率受到了 $v_1(t)$ 调制。

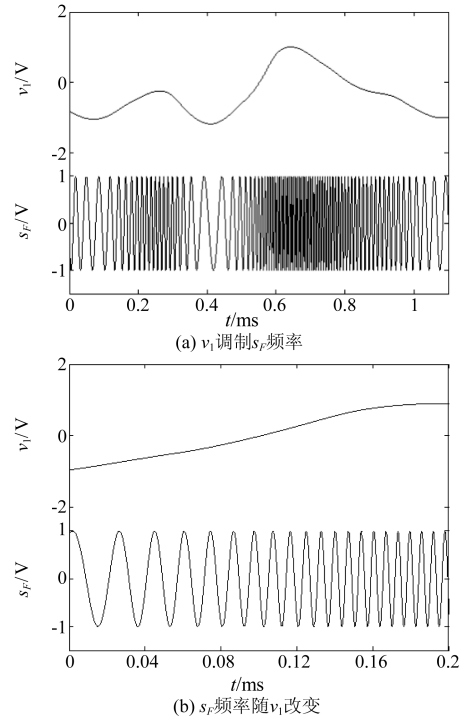


图 4 幅度混沌信号和频率混沌信号

2.3 频率混沌信号分析

频率混沌信号分析可以从该信号的峰均功率比、自相关函数、功率谱、模糊函数和抗干扰性能等几个方面进行分析。这里, 我们对频率混沌信号的峰均功率比和模糊函数进行数值仿真分析。

2.3.1 峰均功率比

信号 $x(t)$ 的峰均功率比 (PAPR) 定义为信号的最大峰值功率和平均功率的比值^[9], 如下式表示:

$$\text{PAPR} = \frac{\max[x(t)x^*(t)]}{E[x(t)x^*(t)]} \quad (7)$$

其中, $E[x]$ 为 $x(t)$ 的期望值, 式中的符号 * 表示共轭运算。

根据 (7) 式的定义, 可计算出蔡氏混沌电路的三个幅度混沌信号 $v_1(t)$ 、 $v_2(t)$ 和 $i_L(t)$ 的 PAPR 值分别为 2.87、5.58 和 3.97, 而频率混沌信号 $s_f(t)$ 的 PAPR 值为 2.00, 即与正弦振荡信号具有相等的 PAPR 值。显然, 幅度混沌信号的 PAPR 较高, 使得信号的瞬时幅值有较大波动, 对应用系统的一些部件, 如功率放

大器、数模转换器等要具有较大的线性动态范围。因此, PAPR 较低的频率混沌信号可以降低对应用系统的硬件要求, 这样提高了信号的传输效率和系统性能。

2.3.2 模糊函数

信号的模糊函数是研究、分析雷达信号以及进行波形设计的有效数学工具, 通常是由发射波形和滤波器特性决定的函数, 因此它能说明雷达系统的分辨率、模糊度、测量精度以及杂波抑制能力。信号的延迟和速度分辨率性能可直接通过研究 $s_f(t)$ 的模糊函数 $|\chi(\cdot, \nu)|$ 获得, 根据 Woodward 和 Dawood 的定义^[14], 类噪声频率混沌信号 $s_f(t)$ 的模糊函数可表示为:

$$|\chi(\cdot, \nu)| = E \left| \int s_f(t) s_f^*(t - \cdot) \exp(j2\pi \nu t) dt \right| \quad (8)$$

其中 \cdot, ν 分别表示距离项和速度项, 式中的符号 * 表示共轭运算。

由于积分时间 T 有限, 因此实际得到的模糊函数是由(8)式经矩形时间窗函数 $h(t)$ 滤波(即卷积运算)后的输出, 矩形时间窗函数 $h(t)$ 通常定义为

$$h(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < T; \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

由于 $h(t)$ 为矩形函数, 因此速度轴上的峰值旁瓣比 PSR_ν 一般与 sinc 函数相同, 约为 13.4 dB。为了降低速度向峰值旁瓣比 PSR_ν , 可以对频率混沌信号进行时间加窗^[9]。通常信号的时间窗函数 $w(t)$ 定义为积分区间的平滑, 区间外置零, 这里取 $w(t) = \sin(\pi t/T)$ 。

图 5(a) 和 (b) 分别给出了积分时间 $T = 1.6384\text{s}$ 的频率混沌信号模糊图和加时间窗模糊图, 模糊图接近理想的图钉型, 模糊区域较小, 加窗后速度轴旁瓣进一步降低, 但代价是主瓣变宽, 分辨率下降。由于频率混沌信号具有和幅度混沌信号类似的非周期宽带和类噪声特性, 时间轴和速度轴都有较高的峰值旁瓣比, 因此频率混沌信号的测距和测速精度高。

综上所述, 频率混沌信号有着与正弦振荡信号相等的 PAPR 值和近似图钉型的模糊函数等应用性能。因此, 频率混沌信号作为混沌雷达信号应用时将具有良好的发射和探测性能。

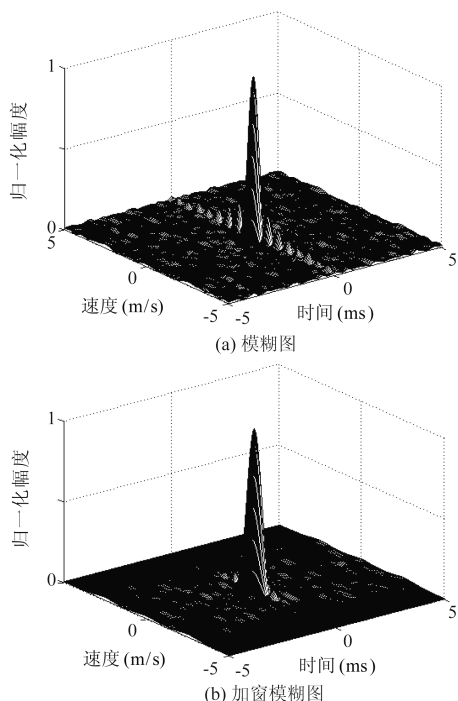


图5 频率混沌信号模糊图和加窗模糊图

3 频率混沌信号实验

3.1 幅度混沌信号输出

蔡氏混沌电路中的蔡氏二极管可采用多种方式实现。一种较为简单的实现电路如图 6 所示^[10], 利用运算放大器的输出饱和电压特性, 可实现由(5)式描述的伏安关系。图 6 中, $R_1 = R_2, R_4 = R_5, B_p = [R_6/(R_5 + R_6)] E_{\text{sat}}, G_a = -1/R_6 - 1/R_3, G_b = 1/R_4 - 1/R_3$, 这里 E_{sat} 是运算放大器的饱和电压。

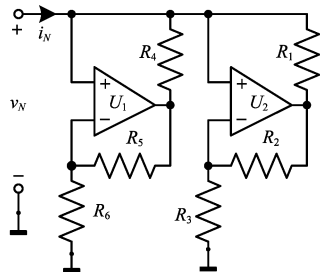


图6 蔡氏二极管实现形式

选择 $R_1 = R_2 = 220\ \Omega, R_4 = R_5 = 22\ \text{k}\Omega, R_3 = 2.2\ \text{k}\Omega, R_6 = 3.3\ \text{k}\Omega$, 则有 $G_a = -757.58\ \mu\text{S}, G_b = -409.09\ \mu\text{S}$ 。图 6 中两个运算放大器选取 TL082CP 型号, 其工作电源设定为 $\pm 9\text{V}$, 实验测得 $E_{\text{sat}} \approx 7.5\text{V}$, 可计算得: $B_p \approx 1.075\text{V}$ 。

固定蔡氏混沌电路中的 $C_1 = 10\text{nF}, C_2 = 100\text{nF}, L = 17.2\text{mH}$, 当 $R = 1.58\ \text{k}\Omega$ 时, 采用 Tek 数字示波器, 可观察到 2 电路中电容两端的电压 v_1 和 v_2 的相轨图及

相应的时域波形分别如图 7(a) 和 7(b) 所示。图 7(a) 是一个典型的双涡卷混沌吸引子。与图 3 结果做比较,理论分析时的电阻值与实验观察时的有稍微的差异,且两个电压信号的动态幅度也有着微小的差异,这是由于实际电路元器件的离散性导致的,但不影响本文研究的结果。

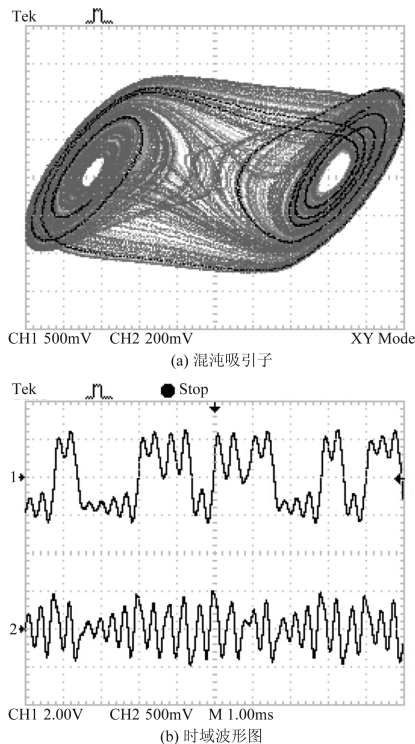


图 7 蔡氏电路产生的幅度混沌信号

3.2 频率混沌信号输出

按照图 1 所示的频率混沌信号实现框图,可以设计出一个具体的频率混沌信号产生器。

实验电路中,选择 TTL 系列中的 74LS628 器件作为 VCO 集成电路。74LS628 内含一个 VCO,具有使能端、频段转换和温度补偿等功能,当 74LS628 引脚 3 和 4 上外接一个 10pF 电容时,实验测得输入电压在 $0\text{V} \sim 5\text{V}$ 范围内所对应的工作频率范围为 $50\text{Hz} \sim 184\text{kHz}$ 。为了满足 VCO 的输入电压范围,需要把工作在正负值区间的幅度混沌信号电压通过一个加法器提升到正值区间,其实现电路如图 8 所示。

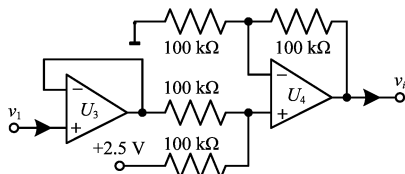


图 8 隔离和电平提升电路

图 8 电路由两级运算放大器电路组成, U_3 电路部分构成了一个电压跟随器,对前后级电路起隔离作用; U_4 电路部分把输入的幅度混沌信号的电平提升了 2.5V ,使得作为 VCO 输入的 v_i 信号的电压保证在正值范围,即 VCO 输入信号电压范围在 $+5\text{V}$ 以内。

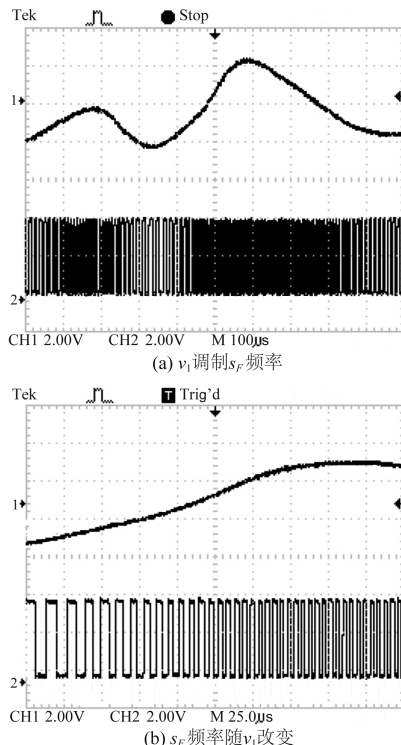


图 9 幅度混沌信号和频率混沌信号的实验输出

蔡氏混沌电路电容 C_1 两端的幅度混沌信号 $v_1(t)$ 和压控振荡器 74LS628 芯片输出引脚上的频率混沌信号 $s_f(t)$ 在数字示波器上捕获的实验输出波形如图 9 所示。由实验结果可以看到,VCO 输出信号的频率在幅度混沌信号的驱动下是呈现线性变化,该结果与图 4 的数值仿真结果是基本一致的,这就实现了一个单位幅度的频率混沌可调的类正弦混沌振荡信号。需要说明的是,为了便于实验观察,在实验电路中选择了较低的 VCO 工作频率范围。在具体应用中,可以根据实际需要,通过更换 VCO 器件外接电容值,调整 VCO 输出信号的振荡频率范围,74LS628 芯片的最大工作频率可接近 20MHz 。

由此可见,频率混沌信号产生电路可以直接输出模拟信号,产生应用于混沌雷达的探测信号,无需数模转换和模拟开关单元,无需时钟序列滤波器额外滤波;同时通过调节混沌电路参数和控制灵敏度,容易调整频率混沌信号的性能指标。此外,与传统的噪声雷达探测信号产生方法相比,本文提出的产生方法简单

控、代价低,探测信号有着相似的性能,但较低的 PAPR 值,更能有效利用发射机的效率。

4 结束语

本文提出并设计了频率混沌信号源的实现原理和具体电路,利用蔡氏混沌电路产生的幅度混沌信号驱动数字式压控振荡器获得了一种幅度恒定不变而频率混沌调制的频率混沌信号的实验输出,并给出了幅度混沌信号的相轨图和频率混沌信号的时域波形图。该频率混沌信号具有确定性,有着与幅度混沌信号相同的最大 Lyapunov 指数。对频率混沌信号进行了峰均功率比和模糊函数等性能分析,此结果表明频率混沌信号有着与正弦振荡信号相等的 PAPR 值和近似图钉型的模糊函数等一些独特的应用性能,对各种基于混沌的信息工程领域有着实际的应用价值。

参考文献

- [1] Callegari S, Rovatti R, Setti G. Spectral properties of chaos-based FM signals: Theory and simulation results [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems -I, 2003, 50(1): 3-15.
- [2] Lin F Y, Liu J M. Chaotic radar using nonlinear laser dynamics [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2004, 40(6): 815-820.
- [3] Hu W, Liu Z, Li C B. A synchronization-based scheme for calculating ambiguity functions of wideband chaotic signals [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(1): 367-372.
- [4] Lin F Y, Liu J M. Ambiguity functions of laser-based chaotic radar [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2004, 40(12): 1732-1738.
- [5] Callegari S, Rovatti R, Setti G. Chaotic modulations can outperform random ones in electromagnetic interference reduction tasks [J]. Electronics Letters, 2002, 38(12): 543-544.
- [6] Boccaletti S, Kurths J, Osipov G, Valladares D L, Zhou C S. The synchronization of chaotic systems [J]. Physics Reports, 2002, 366: 1-101.
- [7] Lee Y L, You Y H, Jeon W G, Paik J H, Song H K. Peak-to-average power ratio in MIMO-OFDM systems using selective mapping [J]. IEEE Communications Letters, 2003, 7(12): 575-577.
- [8] 蒋飞, 刘中, 胡文, 包伯成. 连续混沌调频信号的动力学产生与分析 [J]. 物理学报, 2010, 59(1): 116-

122.

- Jiang F, Liu Z, Hu W, Bao B C. Dynamical design and analysis of continuous chaos frequency modulation signal [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(1): 116-122.
- [9] 蒋飞, 刘中, 胡文, 包伯成. 连续混沌调频雷达信号分析 [J]. 电子与信息学报, 2010, 32(3): 559-563.
- Jiang F, Liu Z, Hu W, Bao B C. Analyses of continuous-chaos frequency-modulating signal of radar [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(3): 559-563.
- [10] Bilotta E, Pantano P, Stranges F. A gallery of Chua attractors: Part I [J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2007, 17(1): 1-60.
- [11] Bao B C, Liu Z, Yu J B. Modified generalized Lorenz system and fold chaotic attractors [J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2009, 19(8): 2573-2587.
- [12] Setti G, Rovatti R, Callegari S. Chaos-based FM signals: Application and implementation issues [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems -I, 2003, 50(8): 1141-1147.
- [13] Volkovskii A R, Tsimring L S. Synchronization and communication using chaotic frequency modulation [J]. International Journal of Circuit Theory Applications, 1999, 27(6): 569-576.
- [14] Woodward P M. Probability and information theory with application to radar [M]. McGraw Hill Book Company, 1955.

作者简介



包伯成 (1965-), 男, 江苏常州人, 常州大学信息科学与工程学院研究员。1989年1月获电子科技大学应用电子技术专业硕士学位, 2010年7月获南京理工大学信息与通信工程专业博士学位。主要研究方向为非线性电路与系统、混沌信息动力学。E-mail: mervinbao@126.com

蒋飞 (1979-), 男, 江苏盐城人, 中国电子科技集团公司第二十八研究所博士。研究方向为混沌雷达信号处理、混沌同步和控制。E-mail: jiangfei_nj@163.com

朱雷 (1979-), 男, 江苏金坛人, 江苏技术师范学院电气信息工程学院讲师。研究方向为非线性电路与系统。E-mail: dxzl@jstu.edu.cn

胡文 (1979-), 男, 江西南昌人, 南京航空航天大学信息科学与技术学院讲师。研究方向为混沌雷达信号处理、混沌同步和控制。E-mail: huwen@nuaa.edu.cn