

文章编号: 1001 - 893X(2011)10 - 0011 - 04

# 一种非对称不变分布的混沌干扰源设计与干扰效果分析\*

钱 锋, 王可人, 金 虎, 冯 辉

(解放军电子工程学院, 合肥 230037)

**摘 要:**提出了一种用于干扰数字通信系统的非对称不变分布的混沌干扰样式。基于混沌映射产生均匀分布的混沌序列, 经过相应非线性变换, 得到了服从非对称不变分布的混沌干扰信号。与现有干扰信号产生方法相比, 该方法易于模块化实现, 可控性和可再生性好。理论分析和仿真结果表明, 相比于高斯分布干扰, 满足 Rayleigh 分布的混沌干扰对 QPSK 和 16QAM 系统具有更好的干扰效果。

**关键词:**数字通信系统; 混沌映射; 通信对抗; 干扰; 非对称不变分布

**中图分类号:** TN914; O415.5    **文献标识码:** A    doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2011.10.003

## An Asymmetrical Invariant Distributed Chaotic Jamming Source Design and Jamming Effect Analysis

QIAN Feng, WANG Ke-ren, JIN Hu, FENG Hui

(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

**Abstract:** An asymmetrical invariant distributed chaotic jamming mode is proposed for digital communication systems in this paper. Chaotic jamming signals with asymmetrical invariant distribution can be generated by applying certain nonlinear transformation to uniformly distributed chaotic time series generated based on chaotic maps. Compared with the existing jamming signal generators, the proposed chaos - based jamming generator can be easily implemented and controlled by simple structures, and can well reproduce the jamming signals in demand. Theoretical analysis and simulation results show that, the proposed chaotic jamming with Rayleigh distribution can jam QPSK and 16QAM systems more effectively compared with the Gaussian distributed jamming.

**Key words:** digital communication system; chaotic map; communication countermeasure; jamming; asymmetrical invariant distribution

### 1 引 言

近些年来,混沌理论在电子对抗领域已引起人们的广泛关注,它既增加了对抗的难度,同时也提供了新的对抗手段<sup>[1-5]</sup>。寻找实现简单、易于控制的最佳干扰源一直是国内外电子对抗领域的研究重点<sup>[6]</sup>。文献<sup>[6]</sup>讨论了现有干扰信号源的一些缺点,提出了基于混沌的最佳压制干扰源设计方法,该压制干扰噪声能很好地逼近高斯白噪声的干扰性能,

可有效干扰线性调频脉冲压缩雷达信号。

目前,混沌干扰技术研究大多集中于雷达对抗领域,其在通信对抗方面的研究成果鲜有报道。数字通信系统在设计时通常假设信道噪声满足对称的高斯分布,因此本文提出一种非对称不变分布的混沌干扰样式,能够更有效地干扰数字通信系统。与现有的干扰产生方法相比,基于混沌映射设计干扰信号的方法结构简单,可控性和可再生性好,易于模块化实现。仿真实验表明,相对于高斯分布的干扰信号, Rayleigh 分布的干扰信号的干扰效果更优。

\* 收稿日期: 2011 - 06 - 08; 修回日期: 2011 - 09 - 08

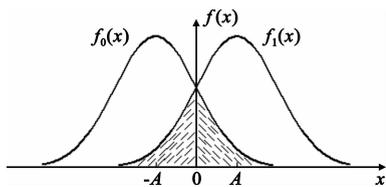
## 2 非对称不变分布的通信干扰原理

在通信系统中, 高斯过程起着非常重要的作用, 信道噪声通常被假设成平稳高斯白噪声。数字通信系统中, 加性高斯白噪声信道的最佳接收机由两部分组成, 一个是信号相关器或匹配滤波器, 另一个是检测器。

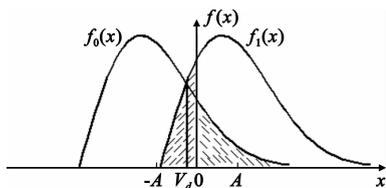
对于双极性基带信号, 在一个码元持续时间内, 检测器输入端得到的波形可表示为

$$x(t) = \begin{cases} A + n(t), & \text{发送“1”时} \\ -A + n(t), & \text{发送“0”时} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $n(t)$  是高斯噪声, 其均值为 0、方差为  $\sigma^2$ 。可知  $A + n(t)$  和  $-A + n(t)$  也服从高斯分布, 其概率密度  $f_1(x)$  和  $f_0(x)$  如图 1(a) 所示。



(a) 高斯分布



(b) Rayleigh 分布

图 1 二进制信号的分布曲线

Fig.1 Probability density function of binary signals

假设发送“0”码和“1”码的概率相等, 那么检测器的最佳判决门限为 0, 易知基带系统的比特差错概率为

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{A}{\sqrt{2}\sigma}\right) \quad (2)$$

当噪声功率增加时, 图 1(a) 中阴影部分的面积也随着变大, 导致比特差错概率上升。

当信道噪声不服从高斯分布时, 而是服从某种非对称分布时, 不妨假设非对称分布为 Rayleigh 分布, 那么检测器的最佳判决门限  $V_d$  会发生偏移, 如图 1(b) 所示。如果仍然按照高斯分布设置判决门限为 0, 那么相对于最佳判决门限而言, 此时基带系统的误码率必然有所上升。

Rayleigh 分布的概率密度函数为

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x}{\mu^2} e^{-\frac{x^2}{2\mu^2}}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\mu > 0$ , 均值为  $\sqrt{\frac{\pi}{2}}\mu$ , 方差  $\sigma^2 = \frac{4-\pi}{2}\mu^2$ 。

经过变换可以得到均值为 0、方差为  $\sigma^2$  的 Rayleigh 分布的概率密度函数为

$$f_R(x) = \begin{cases} \frac{x + \sqrt{\frac{\pi}{4-\pi}}\sigma}{\frac{2}{4-\pi}\sigma^2} e^{-\frac{(x + \sqrt{\frac{\pi}{4-\pi}}\sigma)^2}{\frac{4-\pi}{2}\sigma^2}}, & x \geq -\sqrt{\frac{\pi}{4-\pi}}\sigma \\ 0, & x < -\sqrt{\frac{\pi}{4-\pi}}\sigma \end{cases} \quad (4)$$

如果设置检测器的判决门限为 0, 那么 Rayleigh 分布噪声下基带系统的比特差错概率为

$$P_e = \begin{cases} \frac{1}{2} - \frac{1}{2} e^{-\left(\frac{\sqrt{\pi}}{2} - \frac{\sqrt{4-\pi}A}{2\sigma}\right)^2} + \frac{1}{2} e^{-\left(\frac{\sqrt{\pi}}{2} + \frac{\sqrt{4-\pi}A}{2\sigma}\right)^2}, & \frac{\sigma}{A} \geq \sqrt{\frac{4-\pi}{\pi}} \\ \frac{1}{2} e^{-\left(\frac{\sqrt{\pi}}{2} + \frac{\sqrt{4-\pi}A}{2\sigma}\right)^2}, & \frac{\sigma}{A} < \sqrt{\frac{4-\pi}{\pi}} \end{cases} \quad (5)$$

根据式(2)和式(5)作出双极性基带系统的比特差错概率曲线, 如图 2 所示, 可知, 信噪比相同时, 相比于高斯噪声, Rayleigh 分布噪声下双极性基带系统的比特差错概率较高。

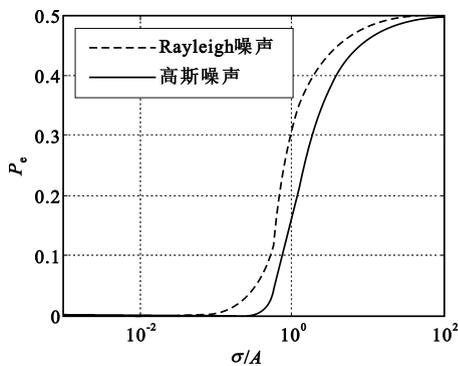


图 2 双极性信号的比特差错概率

Fig.2 Probability of bit error for binary antipodal signals

基于上述思想, 可以设计非对称不变分布的干扰样式, 使其干扰效果优于高斯分布的干扰。

## 3 基于混沌映射的干扰源

与现有干扰源相比, 基于混沌映射实现的干扰源结构简单, 易于控制, 且干扰信号输出质量稳定、可以再生。本文采用变换法设计混沌干扰源来产生

非对称分布的干扰信号,设计方案如图 3 所示。混沌序列产生器输出在 [0,1] 上均匀分布的混沌序列,然后通过相应的非线性函数变换,使其成为所需非对称分布的离散混沌干扰  $z(n)$ ,最后  $z(n)$  通过输出设备(D/A 转换器)得到连续的混沌干扰  $z(t)$ 。

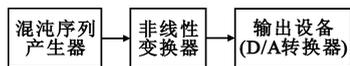


图 3 混沌干扰源的原理图

Fig.3 Design scheme of chaotic jamming source

上述混沌序列产生器可由双向耦合帐篷映射来实现,其时空混沌模型<sup>[7]</sup>为

$$x_{n+1}(i) = (1 - \epsilon)f(x_n(i)) +$$

$$\frac{\epsilon}{2} [f(x_n(i-1)) + f(x_n(i+1))] \quad (6)$$

式中,  $n$  为离散时间步数;  $i = 1, 2, \dots, L$  为离散格点坐标,  $L$  为系统尺寸;  $\epsilon$  为耦合系数,且满足  $0 < \epsilon < 1$ 。边界条件由  $x_n(L) = x_n(0)$  实现,初始条件为 [0,1] 内的随机数。非线性函数  $f$  为帐篷映射:

$$F_\alpha : x_i = \begin{cases} \frac{x_{i-1}}{\alpha}, & 0 \leq x_{i-1} < \alpha \\ \frac{1-x_{i-1}}{1-\alpha}, & \alpha \leq x_{i-1} \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中,参数  $\alpha = 0.5$ 。耦合帐篷映射具有良好的时空混沌性态,格点之间的耦合作用对格点变量的分布特性影响很大,耦合系数  $\epsilon$  越小,格点变量的分布特性越均匀,耦合系数  $\epsilon$  小于 0.01 时,格点变量趋于均匀分布状态。

把双向耦合帐篷映射产生的均匀分布的混沌序列经过如下非线性变换:

$$y = f(x) = \sqrt{-\frac{4}{4-\pi}\sigma^2 \ln(1-x)} - \sqrt{\frac{\pi}{4-\pi}}\sigma \quad (8)$$

即可得到服从 Rayleigh 分布的混沌干扰信号,其均值为 0,方差为  $\sigma^2$ 。

### 4 仿真与分析

为了验证非对称分布的混沌干扰对数字通信系统干扰的有效性,本文采用 Rayleigh 分布的混沌干扰对 QPSK 系统的干扰仿真模型<sup>[8]</sup>,如图 4 所示,其中,高斯噪声产生器用于模拟信道噪声, Rayleigh 分布混沌干扰产生器采用上述混沌干扰源方案来实现,用于模拟外界人为干扰。

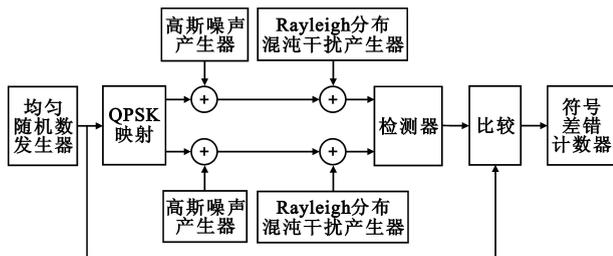


图 4 QPSK 系统的干扰仿真框图

Fig.4 Jamming simulation scheme for QPSK system

信干比(SJR)取 10 dB、20 dB 和 30 dB 时,得到符号差错概率  $P_s$  随信噪比(SNR)变化的曲线如图 5 所示。由图可见,信干比固定不变时,随着信噪比的增加,符号差错概率随之降低。图 5 中不带任何标记的虚线是 QPSK 系统不存在外界人为干扰时的符号差错概率理论曲线,当信噪比为 10 dB 时, QPSK 系统的符号差错概率约为  $7.744 \times 10^{-6}$ 。当信噪比为 10 dB、信干比为 10 dB 时,高斯干扰下 QPSK 系统的符号差错概率约为  $1.624 \times 10^{-3}$ ,而 Rayleigh 干扰下 QPSK 系统的符号差错概率约为  $9.388 \times 10^{-2}$ 。当信干比为 30 dB 时,干扰功率相对较小,高斯干扰几乎没有效果,而 Rayleigh 干扰效果却相对明显。

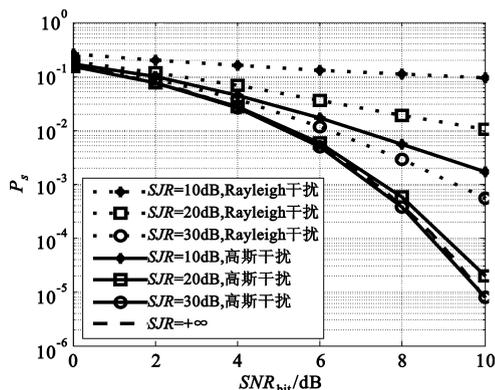


图 5 QPSK 系统的抗干扰性能

Fig.5 Anti-jamming performance for QPSK

另外,信噪比取 6 dB 和 10 dB 时,得到符号差错概率随干信比(JSR)变化的曲线如图 6 所示。由图可见,信噪比固定不变时,随着干信比的增加,符号差错概率变大。当信噪比为 10 dB,且干信比在 -50 dB 和 0 dB 之间变化时, Rayleigh 干扰和高斯干扰的干扰性能存在明显的差异。当信噪比为 10 dB 时,高斯干扰在干信比大于 -20 dB 时才有干扰效果,而 Rayleigh 干扰在干信比大于 -50 dB 时就有干扰作用,当信噪比为 10 dB、干信比为 -20 dB 时,高斯干扰下 QPSK 系统的符号差错概率约为  $2.169 \times$

$10^{-5}$ , 而 Rayleigh 干扰下 QPSK 系统的符号差错概率约为  $8.95 \times 10^{-3}$ 。显而易见, 与高斯干扰相比, Rayleigh 干扰对 QPSK 系统的干扰性能更优。

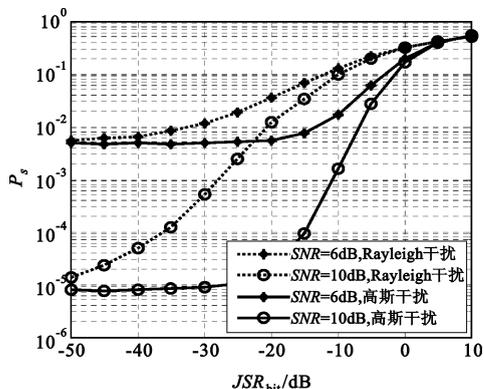


图6 Rayleigh分布混沌干扰对QPSK系统的干扰效果  
Fig.6 Jamming effect of chaotic jamming with Rayleigh distribution

同样地, 采用 Rayleigh 干扰和高斯干扰对 16QAM 系统进行仿真实验, 结果亦表明, 与高斯干扰相比, Rayleigh 干扰对 16QAM 系统的干扰效果更优。

## 5 结论

针对数字通信系统, 本文提出了一种非对称不变分布的混沌干扰样式及信号产生方法。相比于高斯分布的干扰, Rayleigh 分布的混沌干扰能够以更小的干扰功率, 对 QPSK 和 16QAM 系统形成有效干扰。此外, 基于混沌映射的干扰源结构简单, 易于模块化实现, 而且具有良好的可控性和可再生性。本文的干扰仿真实验主要是围绕检测器进行建模的, 下一步将在信道环节注入非对称分布的混沌干扰, 研究数字载波调制系统的抗干扰性能。

## 参考文献:

- [1] 张家树, 郭双冰, 肖先赐. 混沌跳频通信的非线性自适应预测对抗[J]. 信号处理, 2001, 17(3): 205-209.  
ZHANG Jia - shu, GUO Shuang - bing, XIAO xian - ci. Nonlinear adaptive predictive countermeasures of chaotic FH - SS communications[J]. Signal Processing, 2001, 17(3): 205-209. (in Chinese)
- [2] 刘雄英, 丘水生, 黄光周, 等. 混沌在数字通信中的应用[J]. 电讯技术, 2005, 45(2): 1-9.  
LIU Xiong - ying, QIU Shui - sheng, HUANG Guang - zhou, et al. An Overview of Chaos - based Digital Communication Systems [J]. Telecommunication Engineering, 2005, 45(2): 1-9. (in Chinese)
- [3] LING Cong, SUN Song - geng. Chaotic frequency hopping

sequences [J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46(11): 1433-1437.

- [4] 甘建超. 混沌信号处理在雷达和通信对抗中的应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2005.  
GAN Jian - chao. Chaotic signal processing with application to radar and communication countermeasures[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2005. (in Chinese)
- [5] 黄玉川. 混沌压制干扰信号设计与干扰效果分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.  
HUANG Yu - chuan. Chaos - based suppression jamming signal design and jamming effect analysis[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006. (in Chinese)
- [6] 张家树, 冯海涛. 基于混沌的最佳压制干扰噪声源设计[J]. 电波科学学报, 2006, 21(5): 701-707.  
ZHANG Jia - shu, FENG Hai - tao. Chaos - based optimal radar jamming noise sources design[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21(5): 701-707. (in Chinese)
- [7] 刘建东, 付秀丽. 基于耦合帐篷映射的时空混沌单向 Hash 函数构造[J]. 通信学报, 2007, 28(6): 30-38.  
LIU Jian - dong, FU Xiu - li. Spatiotemporal chaotic one - way Hash function construction based on coupled tent maps [J]. Journal on Communications, 2007, 28(6): 30-38. (in Chinese)
- [8] John G Proakis, Masoud Salehi, Gerhard Bauch. Contemporary Communication Systems: Using MATLAB and Simulink [M]. 2nd ed. Stanford: Thomson Learning, 2005.

## 作者简介:

钱 锋(1981—), 男, 江苏姜堰人, 2011 年获博士学位, 现为讲师, 主要研究方向为混沌理论及其应用;

QIAN Feng was born in Jiangyan, Jiangsu Province, in 1981. He received the Ph.D. degree in 2011. He is now a lecturer. His research concerns chaos theory and its applications.

Email: qian\_fn@126.com

王可人(1957—), 男, 江苏镇江人, 1986 年获硕士学位, 现为教授、博士生导师, 主要研究方向为现代通信理论与技术、非线性理论与应用;

WANG Ke - ren was born in Zhenjiang, Jiangsu Province, in 1957. He received the M.S. degree in 1986. He is now a professor and also the Ph.D. supervisor. His research interests include modern communication theory and techniques, nonlinear theory and applications.

金 虎(1974—), 男, 安徽潜山人, 2006 年获博士学位, 现为讲师, 主要研究方向为非线性信号处理;

JIN Hu was born in Qianshan, Anhui Province, in 1974. He received the Ph.D. degree in 2006. He is now a lecturer. His research direction is nonlinear signal processing.

冯 辉(1978—), 男, 山东荣成人, 2009 年获博士学位, 现为讲师, 主要研究方向为盲信号处理。

FENG Hui was born in Rongcheng, Shandong Province, in 1978. He received the Ph.D. degree in 2009. He is now a lecturer. His research direction is blind signal processing.