

# 混沌相位调制雷达信号的模糊函数<sup>1</sup>

沈 颖 刘国岁

(南京理工大学电子工程系 南京 210094)

**摘 要** 本文研究了一类混沌编码信号, 利用混沌信号进行雷达信号的相位编码, 并且计算了这类编码信号的模糊函数。理论和仿真结果表明, 混沌编码信号的模糊函数十分逼近理想的“图钉型”, 信号具有很高的时延和多普勒分辨力, 揭示了混沌用于雷达信号处理的可能性和优越性。

**关键词** 混沌, 模糊函数, 相位编码

**中图分类号** TN911.7, TN951

## 1 引 言

混沌是确定性非线性动力学系统中的现象, 它具有非周期性、对初值敏感性、存在奇异吸引子等特殊性质, 因此近年来成为国内外学术界研究的热点, 并且涌现了大量的研究成果。目前, 对混沌应用的研究主要局限于通信领域, 用于保密通信或宽带通信系统, 而对混沌应用于雷达的研究还非常少。已有一些学者将混沌理论用于雷达目标检测, 自然噪声背景如海杂波等被认为是确定性的混沌噪声背景, H.Leung 用混沌模型对海杂波进行建模, 并基于此模型给出了目标检测方案<sup>[1]</sup>; S.Haykin 也给出了基于混沌动力学的相干和非相干检测器, 用于检测海杂波中的小目标<sup>[2]</sup>。前人的工作都是基于不同于传统的相关最佳匹配滤波器的混沌检测器来进行信号处理, 只考虑了背景噪声为混沌噪声, 而没有考虑雷达的信号体制。能否将混沌引入雷达体制以提高雷达的性能, 这是我们所关心的, 而目前这方面的研究还很少。

在通信系统中, 主要的问题是接收端受干扰或仅仅是衰减的混沌信号与发射端的同步, 而在雷达系统中, 没有必要对混沌系统进行同步, 因为发送和接收采用的是同一个系统。可以采用发射信号的延迟来进行接收混沌信号的处理。事实上, 混沌信号类随机性就意味着它可以应用于雷达系统, 它的非周期性使得连续波雷达不存在模糊。本文研究了两种混沌信号的模糊函数, 发现混沌编码信号的模糊函数非常逼近理想的图钉型, 使得混沌信号可以应用于连续波雷达系统中。

## 2 混沌相位编码信号分析

### 2.1 混沌雷达信号分析

有三种类型的混沌信号产生器可以用于雷达。它们的行为可以用下面的方程来描述:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), t), \quad x_0 = x(t_0); \quad (1)$$

$$\dot{x} = f(x(t - \tau), t), \quad x_{I_0} = x|_{I_0}; \quad (2)$$

$$x_{n+1} = f(x_n, n), \quad x_0 = x_{n_0}; \quad (3)$$

其中  $x$  为系统的状态,  $f: R^n \times R^n \rightarrow R^n$  为一非线性函数,  $I_0 = [t_0 - \tau, t_0]$ 。所有这些产生器都可用电路实现。

<sup>1</sup> 1998-04-14 收到, 1998-11-16 定稿

限于篇幅, 本文只讨论工作于混沌态的离散时间动力学系统, 即由 (3) 式所定义的系统。由 (1) 式和 (2) 式定义的混沌序列产生器将在其它的文章中讨论。由初值  $x_0$  开始迭代得到的序列  $\{x_n, n = 0, 1, 2, \dots\}$  称为该离散时间动力学系统的一条轨迹。如果非线性系统存在奇异吸引子, 那么系统的输出信号是有界的并且是非周期的, 因此一个混沌信号的自相关函数:

$$r_{xx}(\tau) = \langle x(t), x(t-\tau) \rangle \quad (4)$$

随  $\tau$  增加而减小,  $r_{xx}(\tau)$  所有的旁瓣都明显地小于  $\tau = 0$  时的主瓣。一个混沌系统的解对初始条件的敏感依赖性使得如果初始值  $x_0 \neq x'_0$ , 那么两个混沌信号  $x$  和  $x'$  不相关。我们正是利用混沌信号的上述特性进行雷达信号处理。

不失一般性, 本文研究两种离散时间动力学系统, 一种为基于非线性滤波器的混沌序列产生器, 另一种为分段线性映射系统。此外, 还有基于线性移位寄存器和离散迭代映射等的混沌序列产生器, 由于篇幅所限, 这里就不一一赘述。

首先考虑基于非线性滤波器的混沌序列产生器, 系统的结构如图 1 所示。

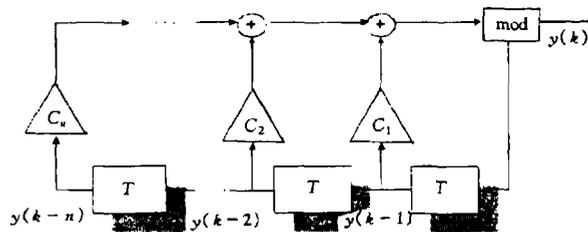


图 1 非线性滤波器系统结构框图

系统行为由下面的方程描述:

$$y_k = \text{mod} \left( \sum_{i=1}^n c_i y_{k-i} \right), \quad y_i \in I = [-1, 1]; \quad (5)$$

其中  $\text{mod}(\cdot)$  为模 2 溢出非线性函数。系统有  $n$  维的概率密度分布函数 (pdf)

$$f_Y(y) = \begin{cases} 2^{-n}, & y \in I^n; \\ 0, & y \notin I^n. \end{cases} \quad (6)$$

在参数  $c_i$  满足一定条件时 ( $c_n$  为整数值,  $c_i \neq 0$ , 对  $i \neq n$ , 并且对应的线性系统是不稳定的), 系统产生  $n$  阶均匀分布的混沌序列  $\{y_k, k = 0, 1, 2, \dots\}$ ,  $y_k \in [-1, 1]$ 。该混沌序列的原始信号和相关特性示于图 2(序列初值  $y_0 = 0.05$ ,  $n = 50$ ,  $c_{50} = c_{49} = -2$ ,  $c_i = 0.5$ ,  $i = 1, 2, \dots, 48$ )。

再来考虑一维离散时间动力学系统:

$$x_{n+1} = f(x_n, \lambda) = \begin{cases} \lambda x_n, & x_n \leq 1/\lambda; \\ [\lambda/(\lambda-1)](x_n - 1/\lambda), & x_n > 1/\lambda; \end{cases} \quad (7)$$

其中  $\lambda > 1$ 。这是一个伯努利型 (Bernoulli-like) 的映射, 若  $x_0$  是属于区间  $[0, 1]$  的, 那么  $f(\cdot)$  是一个从  $[0, 1]$  到自身的映射, 并且是一个分段线性映射, 只有一个不连续点。L.O.Chua 已经

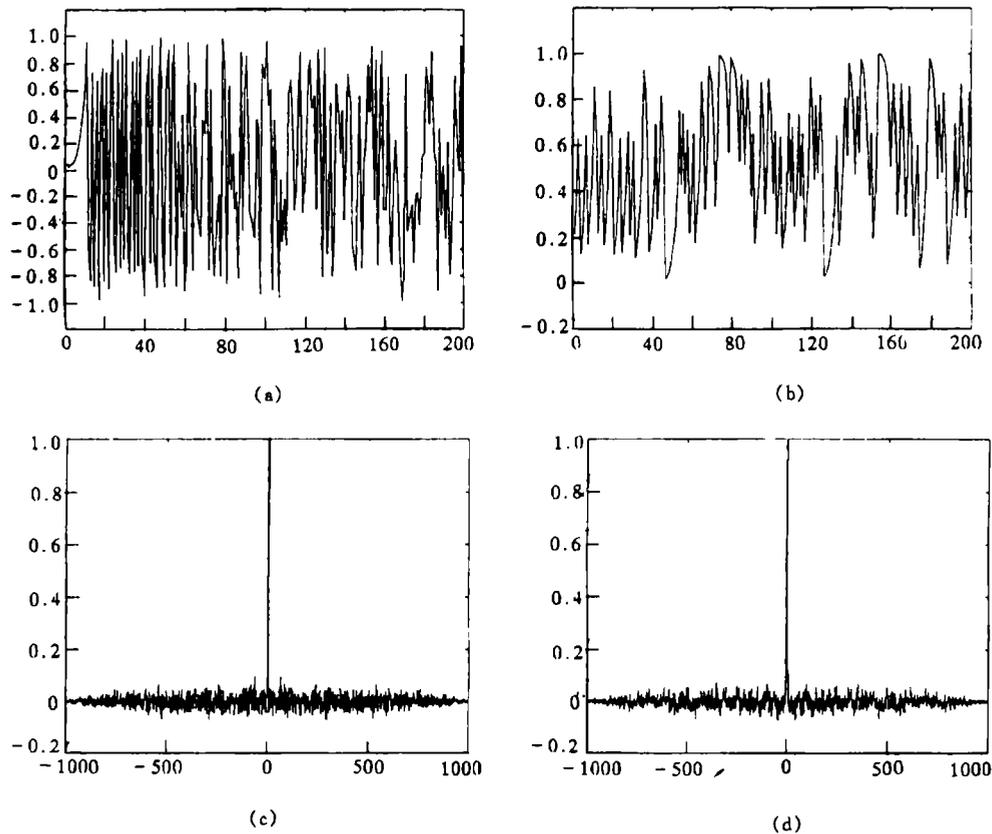


图 2 混沌编码原始信号及其相关特性

(a) 非线性滤波器混沌序列, 序列初值  $x_0 = 0.05$ ,  $n = 50$ (b) 分段线性映射混沌序列, 映射初值  $x_0 = 0.21$ ,  $\lambda = \sqrt{3}$ (c) 非线性滤波器混沌信号的归一化自相关函数, 相关间隔从  $-1000$  到  $1000$ (d) 分段线性映射混沌信号的归一化自相关函数, 相关间隔从  $-1000$  到  $1000$ 

证明由 (7) 式表达的系统是混沌的, 系统有一个正的李亚普诺夫指数, 并且系统的轨迹在  $[0, 1]$  上是均匀分布的, 即  $\rho(x) = 1$ ,  $x \in [0, 1]$ <sup>[3]</sup>. 同样, 我们也可以得到 (7) 式迭代产生的混沌序列具有良好的相关特性, 示于图 2 (映射初值  $x_0 = 0.21$ ,  $\lambda = \sqrt{3}$ ).

本文讨论的是离散编码脉冲压缩信号, 并且脉冲信号为连续的. 因此还必须对产生的混沌信号进行量化, 这里采用的是二值量化. 对于均值为  $a$  的模拟序列, 二值量化序列为  $\{y_n : n = 0, 1, 2, \dots\}$ , 量化规则为

$$y_n = \begin{cases} -1 & x_n < a; \\ 1, & x_n \geq a; \end{cases} \quad (8)$$

这样就得到了我们所需的离散编码信号.

## 2.2 混沌雷达信号模糊函数

调相连续波雷达信号的复数表达式可以写为

$$S(t) = a_1(t)e^{j\phi(t)}e^{j2\pi f_0 t}. \quad (9)$$

信号的复包络函数为

$$u_1(t) = a_1(t)e^{j\phi(t)}, \quad (10)$$

其中  $\phi(t)$  为相位调制函数. 对二元序列调相来说,  $\phi(t)$  只有 0 或  $\pi$  两个可能值, 即为二相编码调制. 若二相编码信号的包络为矩形, 规一化形式为

$$a(t) = \begin{cases} 1/\sqrt{PT}, & 0 < t < \Delta = PT; \\ 0, & \text{其它.} \end{cases} \quad (11)$$

它的复包络可写成

$$u(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{P}} \sum_{k=0}^{P-1} X(t)v(t-kT), & 0 < t < \Delta; \\ 0, & \text{其它;} \end{cases} \quad (12)$$

式中  $v$  为子脉冲函数, 如下式所示.  $T$  为子脉冲宽度,  $\Delta = PT$  为观测时间,  $X(t)$  为混沌调制信号.

$$v(t) = \begin{cases} 1/\sqrt{T}, & 0 < t < T; \\ 0, & \text{其它;} \end{cases} \quad (13)$$

则雷达信号的平均模糊函数为

$$A(\tau, \phi) = E \left\{ \left| \int_{-\infty}^{\infty} u(t)u^*(t-\tau)e^{-j2\pi\phi t} dt \right|^2 \right\}. \quad (14)$$

由于二相编码调制信号的模糊函数主要取决于二相码元序列的模糊函数<sup>[4]</sup>, 因此本文只对二相码元序列的模糊函数进行讨论. 为了获得理想图钉型的模糊函数, 自相关函数为脉冲矢量的序列是最优序列. 作为一种脉冲压缩信号, 系统要求所采用的序列具有点函数型的非周期自相关函数. 真正的二元随机序列能满足要求, 但是信号的产生和处理都很困难. 一般采用的都是伪随机序列, 但是具有良好特性的这类序列非常少, 并且具有周期性, 因此限制了它的应用. 而混沌序列则解决了上述问题, 使得它有着良好的应用前景.

我们分别计算了上述两种混沌二元序列的平均模糊函数, 结果如图 3 所示.

由图 3 我们可以看到, 对于以上两种混沌信号, 混沌编码信号的模糊函数都很逼近理想的图钉型, 在距离和速度上的模糊区域都很小, 具有很高的测距和测速精度. 时间模糊函数  $A(\tau, 0)$  为理想的点函数型; 而速度模糊函数  $A(0, \phi)$  也具有很高的主旁瓣比, 由于计算时采用的混沌信号的样本数有限 (仿真时采用的混沌码元数为 500), 故它为近似点函数型. 当然, 随着序列长度的增长, 序列的平衡性能等也逐渐改善, 仿真的效果会更理想. 以上混沌编码信号的“图钉型”模糊函数主要取决于混沌信号的非周期宽带和类噪声特性, 宽带特性使得距离模糊函数具有点函数形状, 而信号的复杂相位结构决定了点函数型的速度模糊函数.

### 3 结 论

本文研究了两种由离散非线性动力学系统产生的混沌信号, 给出了信号的相关特性, 并且绘出了混沌编码信号的模糊函数图. 分析表明, 混沌调相编码雷达信号的模糊函数逼近于理想

的图钉型, 具有良好的测距和测速精度, 能够用于连续波雷达系统。本文中给出的两种混沌信号具有一般性, 与随机调相和伪随机调相雷达信号相比, 混沌信号的数量众多, 可选择性强, 产生容易, 克服了随机码产生和存储不易以及伪随机码数量少并且存在周期性的困难。另外由于混沌信号的初值敏感性和类随机性, 混沌编码使得雷达系统有着很强的抗干扰性能, 使得混沌信号应用于雷达系统成为可能。

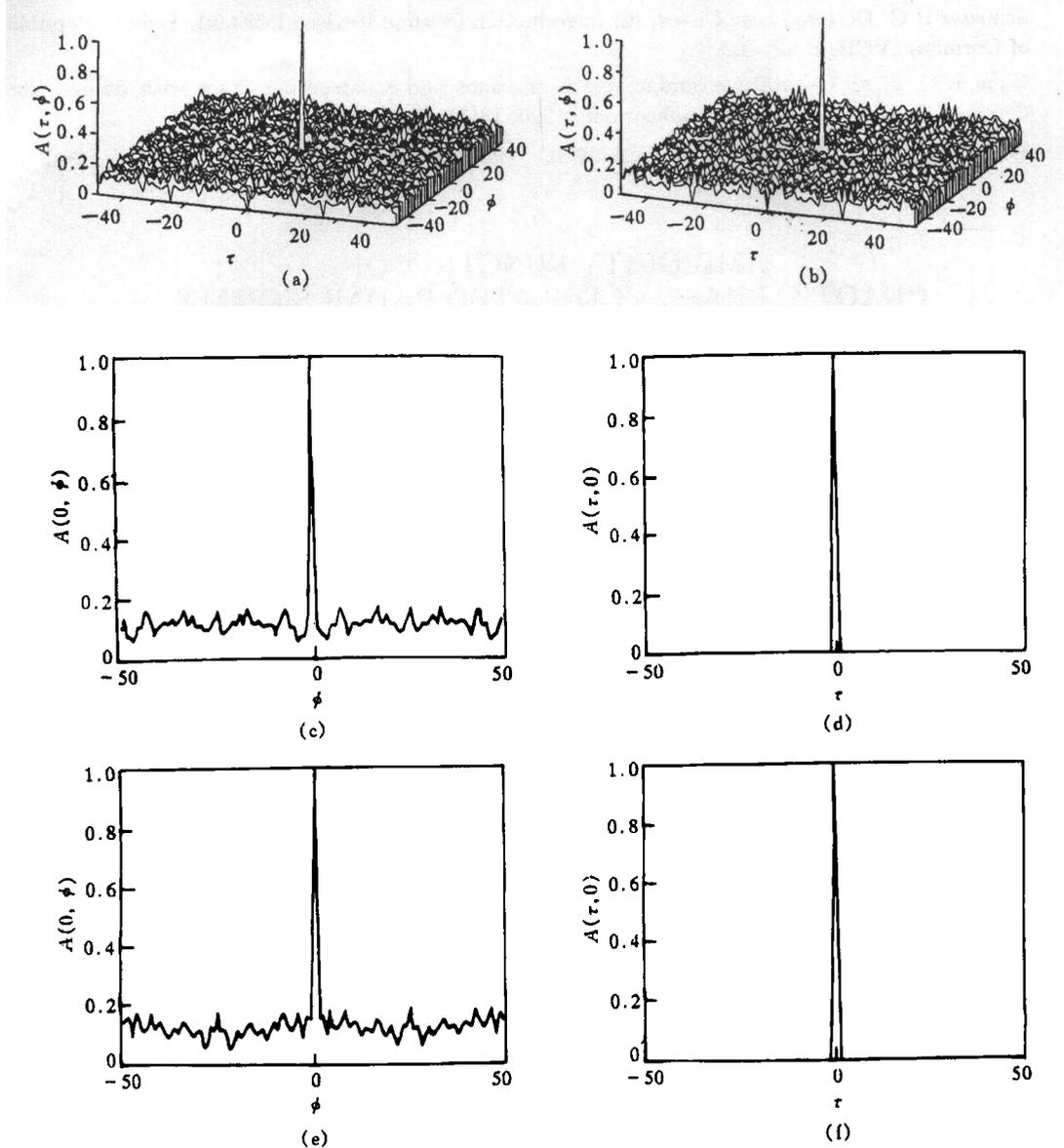


图3 混沌编码信号的模糊函数图

- (a) 基于非线性滤波器的混沌编码信号模糊函数  $A(\tau, \phi)$
- (b) 分段线性映射混沌编码信号模糊函数  $A(\tau, \phi)$
- (c) 基于非线性滤波器的混沌编码信号速度模糊函数  $A(0, \phi)$
- (d) 基于非线性滤波器的混沌编码信号时间模糊函数  $A(\tau, 0)$
- (e) 分段线性映射混沌编码信号速度模糊函数  $A(0, \phi)$
- (f) 分段线性映射混沌编码信号时间模糊函数  $A(\tau, 0)$

## 参 考 文 献

- [1] Leung H. Applying chaos to radar detection in an ocean environment: An experimental study. IEEE J. Oceanic Engineering, 1995, 20(1): 56-64.
- [2] Haykin S, *et al.* Detection of signals in chaos. Proc IEEE, 1995, 83(1): 94-122.
- [3] Schuster H G. Deterministic Chaos, An Introduction (Second Revised Edition). Federal Republic of Germany, VCH, 1988, ch2.
- [4] Chua L O, *et al.* Generating randomness from chaos and constructing chaos with desired randomness. Int. J. Circuit and Applications, 1990, 18(3): 215-240.
- [5] 林茂庸, 等. 雷达信号理论. 北京: 国防工业出版社, 1984, 第七章.

AMBIGUITY FUNCTION OF  
CHAOTIC PHASE MODULATED RADAR SIGNALS

Shen Ying    Liu Guosui

*(Dept. of Electron. Eng., Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)*

**Abstract** This paper analyzes a kind of chaotic modulation signals, the phase-modulated radar signals are generated by chaotic signals, at the same time the ambiguity function of the coded signals is given. Theory and simulation results show that the ambiguity function of chaotic modulated signals is approximately "thumbtack-shape" as the ideal results, thus the signal has high resolution both in time- delay domain and Doppler frequency domain. It implies the possibility and advantages for chaos to be used in radar signal processing.

**Key words** Chaos, Ambiguity function, Phase modulation

沈 颖: 女, 1975 年生, 博士生, 通信与电子系统专业, 研究方向为混沌在雷达及通信系统中的应用.

刘国岁: 男, 1933 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事神经网络、混沌及随机噪声雷达系统的研究.