

## 超混沌调相信号抗干扰技术研究

胡英辉<sup>①②</sup> 郑远<sup>①②</sup> 邓云凯<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要:** 该文根据超混沌映射初值敏感性、内随机性和高维超混沌等特点, 提出了一种新的脉内混沌调相-脉间随机编码的 SAR 信号。文中详细比较了 4 种超混沌映射调相信号的特点, 并在此基础上选择了超混沌 Logistic 映射调相信号作为 SAR 发射信号, 仿真实验表明, 这种信号的确具有高保密性和较强的抗干扰性能。

**关键词:** 合成孔径雷达; 电子抗干扰; 超混沌; 混沌; 调相

中图分类号: TN974

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)07-1756-04

## A Study on ECCM Using Hyperchaotic Phase Modulated Signal

Hu Ying-hui<sup>①②</sup> Zheng Yuan<sup>①②</sup> Deng Yun-kai<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

<sup>②</sup>(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** In this paper, a new Synthetic Aperture Radar(SAR) signal of chaotic phase modulated intra-pulse and random coded inter-pulse is proposed depending on the characteristic of extreme initial value sensitivity and pseudo-randomness and multidimensional hyperchaos. Four hyperchaotic phase modulated signals are compared detailedly and hyperchaotic logistic map phase modulated signal is proved to be best for SAR transmit signal. This signal is proved with an excellent exhibition on encryption and high Electronic Counter CounterMeasures(ECCM) performances.

**Key words:** SAR; ECCM; Hyperchaotic; Chaotic; Phase modulated

### 1 引言

随着电子战技术的发展, SAR 对抗(ECM)和反对抗(ECCM)已经成为合成孔径雷达电子战(EW)研究领域的重要内容。对 SAR 实施干扰时, 可以采用数字射频存储器(DRFM)接收雷达发射信号, 然后进行调制转发, 从而达到欺骗干扰的目的。目前, 针对这种欺骗干扰技术, 一种有效的方法是改变传统的线性调频发射信号, 而采用不同的发射脉冲间相互正交的编码信号<sup>[1]</sup>, 从而达到抗欺骗干扰的目的。

混沌是确定性非线性动力学系统中的现象, 它具有初值敏感性、内随机性、非周期性和长期不可预测性等特点。研究表明, 当混沌序列用作雷达信号时, 若序列无限长, 其自相关函数为  $\delta$  函数, 互相关函数为 0; 序列长度有限时, 其自相关函数也近似为  $\delta$  函数, 而互相关函数近似为 0。除此之外, 混沌二相码调制信号以及混沌频率调制信号用作雷达信号时, 也使得雷达系统具有很强的抗干扰性能<sup>[2, 3]</sup>。

上述研究, 均是针对一维混沌序列进行的, 但是用低维混沌加密信息, 仍然存在密文破译的可能。解决这一问题的最有效办法之一就是利用至少两个正性 Lyapunov 指数的高维超混沌系统加密有用信号<sup>[4]</sup>。

本文提出了一种将超混沌序列进行相位调制用作合成孔径雷达发射信号的方法, 下面几个部分将分别介绍信号模型、相关性能、成像模型, 通过抗欺骗干扰成像仿真, 表明了该信号具有较强的电子抗干扰性能。

### 2 超混沌调相信号模型

本文列举了目前各文献中应用广泛的 4 种映射, 它们已经被证明是超混沌映射<sup>[5-8]</sup>, 为便于说明, 分别简记为映射 A、B、C、D。映射 A 为超混沌广义 Henon 映射, 它是一个三维映射, 由 3 个序列组成, 分别是  $\{x_n\}, \{y_n\}, \{z_n\}$ , 下面均简记为序列 X,Y,Z; 映射 B 是超混沌 Logistic 映射; 映射 C 是一个组合映射; 映射 D 形式简单、总的项数少、非线性项数少, 是二维超混沌映射的典型代表。

下面以二维超混沌映射为例, 介绍混沌调相信号的产生方法。假设混沌二维映射方程如下:

$$\begin{cases} x(n+1) = f(x(n), y(n)) \\ y(n+1) = f(x(n), y(n)) \end{cases} \quad (1)$$

则混沌调相信号可以表示为

$$s(n) = \text{rect}\left(\frac{n}{N_r}\right) \exp[j2\pi K\Phi(n)] \quad (2)$$

其中  $N_r$  为发射信号的脉冲时宽,  $\Phi(n) = X$  或  $\Phi(n) = Y$ , 称式(2)为脉内混沌调相信号。

### 3 超混沌调相信号分析

超混沌信号的核心特点是其初值敏感性, 对超混沌信号的分析, 一般来讲有解析方法和数值模拟方法两种思路。本文采用数值模拟方法, 在式(2)中, 取  $K=40$ , 序列的初值均由(0,1)随机数产生。

#### 3.1 超混沌调相信号的自相关函数

由于混沌和超混沌系统的奇怪吸引子在相空间中是遍历的, 并且它们都是确定论系统中的一种内在随机性行为, 因此可以把混沌和超混沌系统产生的信号看作一个随机过程。根据随机过程的有关理论可知, 遍历过程必然是平稳过程<sup>[9]</sup>, 于是混沌和超混沌信号的概率分布满足平稳性, 其样本函数的集合平均等于某一个样本函数的时间平均。故其自关联函数为

$$R_{xx}(n) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i x_{i+n}^*, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3)$$

图 1 中选取了 50 个序列长度为 1024 的超混沌调相信号作为独立样本, 分别求出了每个样本信号的自相关函数并取平均, 从数值计算的角度模拟了广义自相关函数。从图 2 中可知, 这些信号的自相关函数非常接近于理想的  $\delta$  函数, 具有较高的测距精度。

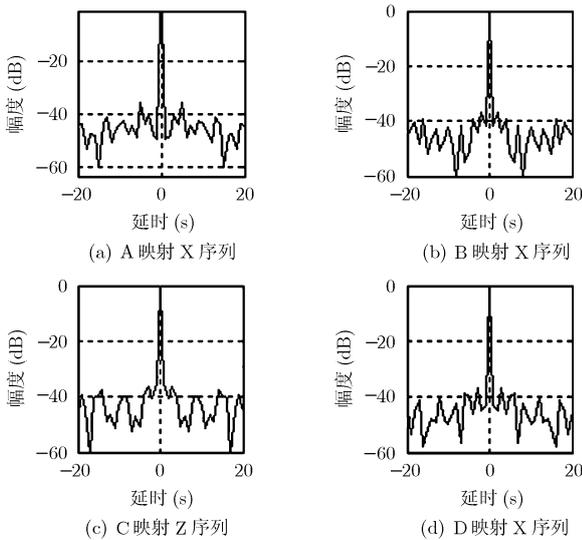


图 1 超混沌调相信号自相关函数

#### 3.2 超混沌调相信号的互相关函数

前面已经提到, 为了有效地对抗欺骗干扰, 可以采用脉冲分集技术, 即在一个合成孔径所在的若干个脉冲重复周期里, 发射相同的载频和带宽, 但是各脉冲之间相互正交的雷达信号。两个不同信号波形  $x(n)$  与  $y(n)$  之间的相似性用互相关函数来表示

$$C_{xy}(n) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i y_{i+n}^*, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (4)$$

超混沌系统是高维系统, 因此, 对于超混沌调相信号而言, 它的互相关函数表现在两个方面:

(1) 发射的各个脉冲信号都是由同一映射的同一个序列产生的调相信号, 只是初值不同而已。

(2) 发射的各个脉冲信号是由同一映射的不同序列产生的, 初值也不同。究竟是发射映射的哪个序列的调相信号, 可以用 {0,1} 二值编码实现, 在本文中称其为脉冲编码。

图 2 中选取了 50 个长度为 1024 的样本求解了同一序列在不同初值时的互相关函数。经仿真发现, 其相关程度很低, 大都在 -35dB 以下, 具有良好的抗干扰性能; 图 3 给出了不同序列之间的互相关函数。经仿真发现, 映射 A 的各序列间互相关性能十分差, 不宜采用它的不同序列调相信号作为雷达发射脉冲。而 B 映射和 D 映射的相关值较小, 大都在 -35dB 以下, 具有良好的抗干扰性能。

#### 3.3 超混沌调相信号的频谱

理想的高斯白噪声充满整个频谱空间, 这样的信号功率谱

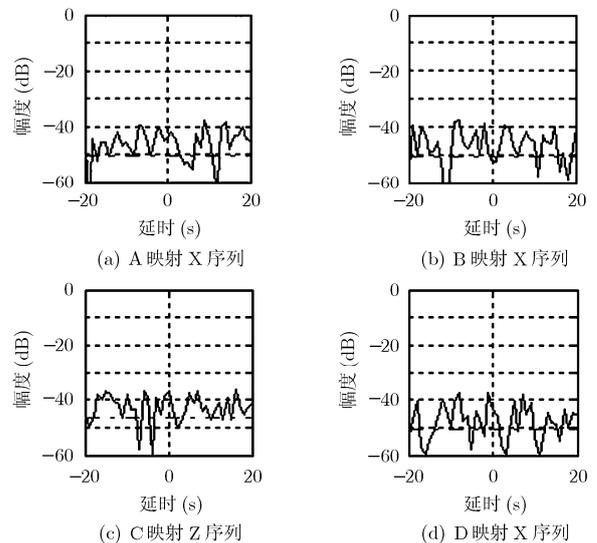


图 2 超混沌调相信号同一序列不同初值时的互相关函数

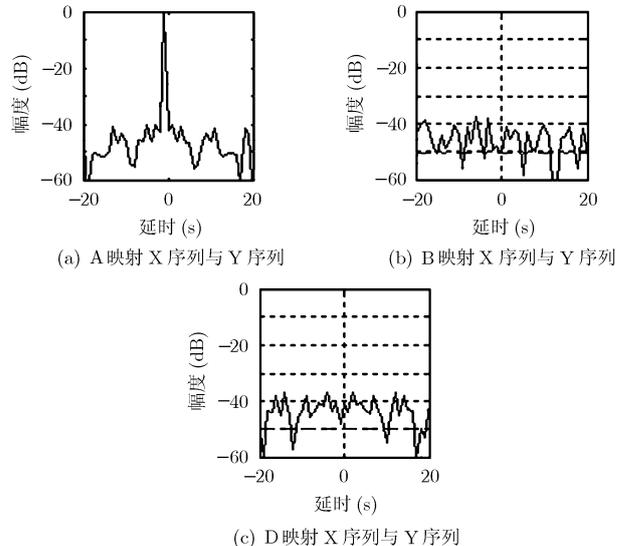


图 3 超混沌调相信号不同序列间的互相关函数

密度低, 被截获的概率非常小, 抗干扰能力也很强。图4中选取了50个长度为1024的样本求解了各序列的频谱。经仿真发现, 各序列均具有较为平坦的频谱图, 频谱波动幅度均不超过5dB, 具有较高的频谱利用率。

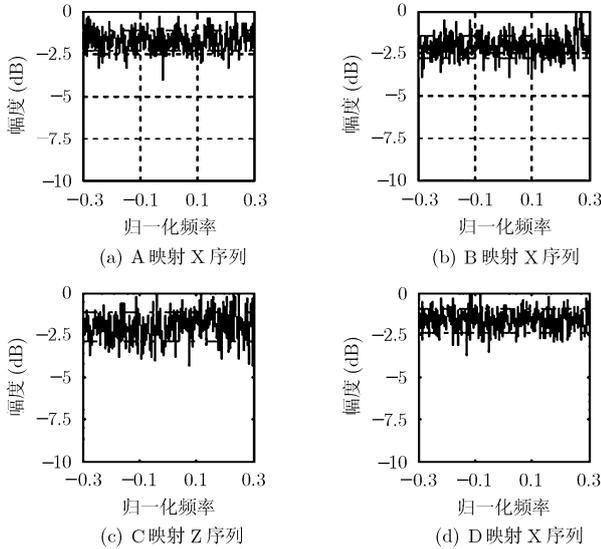


图4 超混沌调相信号频谱图

### 3.4 超混沌调相信号特性分析与总结

衡量信号自相关函数的两个重要指标是峰值旁瓣比(Peak Sidelobe Level, PSL)和积分旁瓣比(Integrated Sidelobe Level, ISL), 其定义为<sup>[10]</sup>

$$PSL = 10 \lg \left\{ \frac{\max_{n \neq 0} [R_{xx}^2(n)]}{R_{xx}^2(0)} \right\} \quad (5)$$

$$ISL = 10 \lg \left[ 2 \sum_{n=1}^{N-1} \frac{R_{xx}^2(n)}{R_{xx}^2(0)} \right] \quad (6)$$

综合表1和前面章节的分析, 可以得出以下结论: B映射各项指标表现均较好, 具有较高的成像分辨率和很强的抗

干扰性能, 可用于脉间编码, 只是在频谱方面与A映射相比有一定的不足, 是一种比较理想的雷达信号。

### 4 超混沌调相信号 SAR 模型<sup>[11]</sup>

假设雷达工作于正侧视情形下, 点目标位于测绘带中心, 参照文献[11]可知, 从点目标  $P$  散射, 经过接收机并同步检波后得到的信号为

$$s_r(x, t) = \text{Re} \left\{ \mu \left( t - \frac{2}{C} \sqrt{R^2 + (v_a t)^2} \right) e^{-j4\pi \sqrt{R^2 + (v_a t)^2} / \lambda} \right\} \quad (7)$$

假设信号回波方位向采样点个数为  $N_a$ , 距离向采样点个数为  $N_r$ , 脉冲重复周期为 PRI。由式(1)可知, 此时, 回波采样矩阵为

$$S_r(n_a, n_r) = \text{Re} \left\{ G_N(n - \Delta_n) e^{j2\pi K \Phi(n_a, n_r)} e^{-j4\pi \sqrt{R^2 + (v_a * n_a * \text{PRI})^2} / \lambda} \right\} \quad (8)$$

$G_N(n) = \begin{cases} 1, & 0 \leq n \leq N-1 \\ 0, & n < 0, n \geq N \end{cases}$  为矩形脉冲序列,  $N$  为由信号脉

冲宽度  $T_r$  决定的采样点数;  $\Delta_n$  是由延时  $\tau$  决定的离散偏移量;  $n_a = 1, 2, \dots, N_a$   $n_r = 1, 2, \dots, N_r$ ,  $\Phi(n_a, n_r)$  表示超混沌 Logistic映射的第  $n_a$  个发射序列对应的第  $n_r$  个采样值。

### 5 点目标成像仿真

成像仿真算法如下:

- (1)产生长度为  $N_a$  的(0,1)随机数序列  $\{I(n_a)\}_{n_a=1,2,\dots,N_a}$ ;
- (2)设  $I_0 = 0.5$ , 如果  $I(n_a) > I_0$ , 则  $I(n_a) = 1$ , 反之,  $I(n_a) = 0$ ;
- (3)如果  $I(n_a) = 1$ , 则发射 X 序列; 反之, 则发射 Y 序列;
- (4)产生长度为  $N_a$  的(0,1)随机数序列  $\{R(n_a)\}_{n_a=1,2,\dots,N_a}$ , 此序列的值分别作为每个发射序列的初值;
- (5)由(3)、(4)两步加密, 便可以构造出发射的超混沌 Logistic 调相信号  $S(n)$ , 本文称其为脉内调相-脉间编码的超混沌信号;

表 1 超混沌调相信号的对比分析

性能参数		映射 A	映射 B	映射 C	映射 D	性能优劣顺序
自相关函数	峰值旁瓣比(dB)	-38.6	-38	-36.3	-37	B>A>D>C
	积分旁瓣比(dB)	-50.8	-50.9	-48.9	-50.7	
同序列不同初值的互相关函数	归一化最大相关值(dB)	-37.5	-37.7	-32.4	-37.4	B>A>D>C
	归一化平均相关值(dB)	-50.7	-50.9	-47.5	-50.8	
不同序列之间的互相关函数	归一化最大相关值(dB)	0	-37.2		-37	B>D>A
	归一化平均相关值(dB)	-50.6	-50.8		-50.3	
频谱	方差	0.608	0.648	0.857	0.671	A>B>D>C

(6)利用发射信号和设定参数,产生目标回波,并利用RD算法进行点目标成像仿真。

本文以正侧视成像为例,进行了点目标的成像仿真,雷达工作参数如下:波长:0.0319m,信号带宽15MHz,距离向采样频率40.95MHz,脉冲重复频率468Hz,载机速度180m/s,信号脉宽10 $\mu$ s,点目标离航线的垂直距离8.61km,成像分辨率为10m $\times$ 0.7m(方位向)。在仿真过程中按照欺骗干扰的原理产生了两个假目标,它们分别位于偏离真实目标方位向30m和距离向30m处。我们分别利用了超混沌 Logistic 映射调相信号和线性调频信号进行了成像仿真,仿真结果如图5所示。

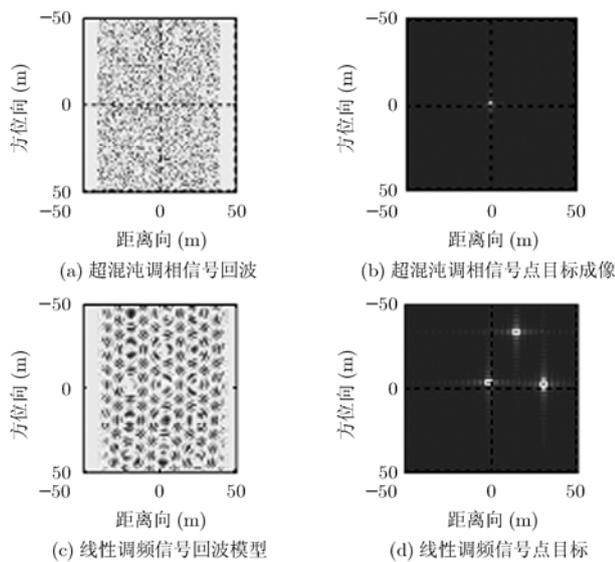


图5 SAR点目标成像仿真

从图5可知,线性调频信号的回波具有明显的规律性,而且不能抗干扰;超混沌调相信号的回波类似噪声杂乱无章,距离向上旁瓣较线性调频信号低,而且只是对真实目标成像,达到了抗欺骗干扰的目的。

## 6 结束语

本文从数值模拟的角度给出了4种超混沌调相信号的时间序列、相关性能(自相关函数和互相关函数)、频谱特性等,并

进行了综合比较,分析表明:超混沌 Logistic 映射调相信号是4种映射中最佳的。最后还利用超混沌 Logistic 映射构造了一个脉内混沌调相-脉间随机编码的超混沌信号,通过与线性调频信号的成像对比,结果表明它的确具有较好的抗干扰性能。

## 参考文献

- [1] Mehrdad Soumekh. SAR-ECCM using phase-perturbed LFM chirp signals and DRFM repeat jammer penalization. *IEEE Trans. on AES*, 2006, 42(1): 191-205.
- [2] Graham W V and Airs Alexopoulos. Examples of a class of chaotic radar signals. <http://www.dst.defence.gov.au/publications/4067/>, 2005, 9.
- [3] Emmanuel Arturo Solis Nepote. Chaotic and chaotic based frequency modulated signals for radar imaging. [Master of Science], Winnipeg, Manitoba, Canada: University of Manitoba, 2003.
- [4] 张鑫. 超混沌同步及其在保密通信中的应用. [硕士论文], 浙江: 浙江工业大学, 2005.
- [5] Henon. A two-dimensional mapping with a strange attractor[J]. *Math Phys*, 1976, 50(1): 69-77.
- [6] 王兴元, 石其江. 基于图像特征和超混沌迭代的图像认证算法. *计算机研究与发展*, 2005, 42(11): 1896-1902.
- [7] 权安静, 蒋国平, 左涛等. 基于超混沌序列的分组密码算法及其应用. *南京邮电学院学报*, 2005, 25(4): 80-84.
- [8] 彭飞, 丘水生, 龙敏. 基于二维超混沌映射的单向 Hash 函数构造. *物理学报*, 2005, 54(10): 4562-4568.
- [9] 黄载祿. 统计信号处理基础. 武汉: 华中工学院出版社, 1986: 47.
- [10] Fred N E. Radar Design Principles: Signal Processing and the Environment. New York: McGraw-Hill, 1991, chapter 12.
- [11] 张澄波. 综合孔径雷达——原理、系统分析与应用. 北京: 科学出版社, 1989: 38-42.

胡英辉: 男, 1981年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达电子抗干扰技术。

郑远: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为雷达对抗与仿真。

邓云凯: 男, 1962年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为合成孔径雷达雷达系统设计。