

## 混沌调频雷达成像仿真

丁凯<sup>①②③</sup> 杨汝良<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

<sup>②</sup>(微波成像技术国家级重点实验室 北京 100080)

<sup>③</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要** 混沌调频信号类似随机信号,具有较强的抗干扰性能(ECCM)。为了提高成像雷达的抗干扰性能,该文把混沌调频信号用于成像雷达系统,使用  $n$ -Way Bernoulli 映射产生混沌序列,用该混沌序列进行频率调制得到的信号具有良好的自相关特性,不但可以获得高分辨率雷达图像,还使雷达波形难于辨识。该文分析了信号模型,对点目标进行了仿真,分析了脉冲压缩波形的旁瓣特性。结果表明,混沌调频信号用于成像雷达系统可获得比较理想的点目标图像,在成像雷达系统中有良好的应用前景。

**关键词** 混沌,混沌调频信号,成像雷达,合成孔径雷达

中图分类号: TN951

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)02-0354-04

## Chaotic FM Radar Imaging Simulation

Ding Kai<sup>①②③</sup> Yang Ruliang<sup>①②</sup>

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

<sup>②</sup>(The National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Beijing 100080, China)

<sup>③</sup>(Graduate School of Chinese Academy of Sciences Beijing, 100039, China)

**Abstract** Chaotic FM signal is similar to random signal. It has good Electronic Counter-Counter Measure (ECCM) capabilities. In this paper, chaotic FM signal is used to improve the ECCM capabilities of imaging radar. A kind of chaotic series was generated using  $n$ -Way Bernoulli map. The signals modulated by this kind of series have ideal auto-correlation property. High resolution image can be achieved using these signals. However, the waveform is very hard to estimate. In this paper, the chaotic FM signal model is discussed, and point target imaging is simulated. The simulation result shows that ideal point target image can be achieved using chaotic FM signal, which has good prospects to be applied in imaging radar system.

**Key words** Chaos, Chaotic FM signals, Imaging radar, SAR

### 1 引言

近年来随着人们对混沌现象研究的不断深入,混沌理论的应用已经延伸到雷达领域,目前的研究工作主要集中在目标检测与波形设计两方面。在目标检测方面<sup>[1]</sup>,已经初步建立了一套基于混沌动力学的雷达目标检测理论,在波形设计上方面,研究工作开展不多。由于混沌相位编码信号<sup>[2-5]</sup>和混沌调频信号<sup>[6]</sup>都具有良好的自相关特性,其模糊函数呈现图钉型,具有较高的距离、速度分辨率,再加上混沌信号的初值敏感性与类随机性,用于雷达系统可使雷达具有很强的抗干扰能力,同时混沌信号的产生和处理比噪声信号容易,因

而在雷达系统中具有良好的应用前景。

考虑到传统的合成孔径雷达(SAR)在距离向的高分辨率是通过线性调频信号(LFM)进行脉冲压缩获取的,但 LFM 信号参数容易估计。最近出现的混沌信号具有较好的相关性,能进行脉冲压缩获取高分辨率,可用于成像雷达系统,同时又具有类随机性,克服了 LFM 参数容易估计的缺点,本文将混沌调频信号用于高分辨率雷达成像,并通过讨论信号模型,点目标仿真,得出了混沌调频信号可用于合成孔径雷达的结论。文章的第 2 节给出了混沌调频信号模型,第 3 节给出回波信号模型,第 4 节给出点目标仿真结果,第 5 节是

全文总结。

## 2 混沌调频信号<sup>[6]</sup>的产生

在采用混沌序列进行调频时, 只有用Bernoulli映射产生的序列才能得到较理想的自相关特性<sup>[6]</sup>, 这里采用 $n$ -Way Bernoulli映射产生混沌序列, 其定义为

$$x_{n+1} = f(x_n) = rx_n \pmod{1} \quad (1)$$

其中  $x_n \in [0,1]$ ,  $r$  是大于等于 2 的整数。选定以概率密度函数  $\rho(x_0)$  分布在区间 $[0,1]$ 上的初值  $x_0$ , 通过式(1)迭代产生混沌序列  $x_0, x_1, x_2, \dots$ 。则混沌调频信号为

$$s(n\Delta t) = A \cdot e^{j2\pi K \sum_{i=0}^n (x_i - 0.5) \cdot \Delta t} \quad (2)$$

其中  $A$  为信号幅值,  $K$  为调频系数。如果  $\Delta t$  足够小, 信号的瞬时频率可近似为  $f(n\Delta t) = K \cdot (x_n - 0.5)$ 。由于  $x_i \in [0,1]$ , 则信号的频率范围为

$$-K/2 \leq f \leq K/2 \quad (3)$$

根据奈奎斯特采样定理, 必须  $1/\Delta t \geq 2K/2 = K$ , 在这里取下限  $1/\Delta t = K$ , 代入式(2), 得混沌调频信号的采样值序列为

$$s(n) = A \cdot e^{j2\pi K \sum_{i=0}^n (x_i - 0.5) \cdot \frac{1}{K}} = A \cdot e^{j2\pi \sum_{i=0}^n (x_i - 0.5)} \quad (4)$$

在下面的仿真中采用式(4)表示距离向调频信号。

## 3 成像几何关系与信号模型

### 3.1 成像几何关系

本文以点目标为例进行讨论, 采用正侧视条带SAR成像方式<sup>[7]</sup>, 成像的几何关系如图1所示。在包含航线及点目标 $P$ 的斜平面内, 以雷达航向为 $x$ 轴, 与之垂直的斜距方向为 $r$ 轴建立坐标系, 为了讨论方便, 点目标 $P$ 放在 $r$ 轴上, 坐标为  $(0, R_p)$ , 如图1所示。设载机航速为  $v_a$ , 合成孔径长度为  $L_s$ , 脉冲重复频率为  $f_r$ , 则雷达发射脉冲的空间位置间隔为  $\Delta x = v_a / f_r$ 。假设载波波长为  $\lambda$ , 天线长度为  $D_a$ , 则合成孔径长度为  $L_s = R_p \cdot \lambda / D_a$ , 所以天线波束扫过点目标 $P$ 时雷达

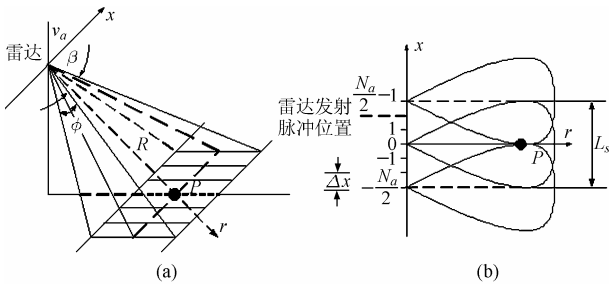


图1 SAR 的成像几何关系

(a) 立体关系 (b) 平面关系

发射  $N_a = L_s / \Delta x$  个脉冲。不失一般性, 下面的讨论假设  $N_a$  为偶数,  $N_a$  为奇数时讨论类似, 且结论一致。

### 3.2 回波信号模型

雷达在位置  $(n_a \Delta x, 0)$  接收到的回波信号为

$$s_r(n_a \Delta x, t) = \sigma_0 \cos \left( 2\pi f_c (t - \Delta T) + 2\pi K \int_0^{(t-\Delta T)\lfloor (t-\Delta T)/T_c \rfloor} \sum_{i=0}^{N_a/2} (x_{(n_a+N_a/2)i} \cdot p_c(u - iT_c) - 0.5) du + \phi_0 \right)$$

其中  $\sigma_0$  是回波后向散射系数,  $T_c$  为码元宽度,  $p_c(t)$  为矩形脉冲, 定义为

$$p_c(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T_c \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

$0 \leq t \leq \tau$ ,  $\tau$  为脉冲宽度,  $\tau = N_r T_c$ ,  $\Delta T$  是发射脉冲到接收脉冲之间的时间差,  $n_a$  是脉冲序号,  $-\frac{N_a}{2} \leq n_a \leq \frac{N_a}{2} - 1$ ,  $\phi_0$  为初始相位,  $f_c$  为载波频率,  $x_{(n_a+N_a/2)}$  是混沌序列, 其下标表示在位置  $(n_a \Delta x, 0)$  接收到的混沌信号。经过正交双通道解调得到回波基带信号, 表示成复数形式为

$$s_o(n_a \Delta x, t) = I + Qi = \frac{\sigma_0}{2} \exp \left\{ j \left[ 2\pi K \int_0^{(t-\Delta T)\lfloor (t-\Delta T)/T_c \rfloor} \sum_{i=0}^{N_a/2} (x_{(n_a+N_a/2)i} \cdot p_c(u - iT_c) - 0.5) du + \phi_0 - 2\pi f_c \Delta T \right] \right\} \quad (5)$$

由式(3)可知基带信号的最高频率为  $1/(2\Delta t)$ , 用采样率为  $f_s = 1/\Delta t$  的 ADC 进行采样, 得到离散检波信号为

$$s_o(n_a \Delta x, n_r) = \sigma_0 A \exp \left[ j2\pi \sum_{i=0}^{n_r} (x_{(n_a+N_a/2)i} - 0.5) \right] \cdot \exp \left[ -j2\pi f_c \frac{(n_a \Delta x)^2}{R_p c} \right] \quad (6)$$

其中  $\exp \left[ -j2\pi f_c \frac{(n_a \Delta x)^2}{R_p c} \right]$  是方位向回波多普勒信号<sup>[7]</sup>,  $A = \frac{1}{2} \exp \left[ j \left( -4\pi f_c \frac{R_p}{c} + \phi_0 \right) \right]$  是固定相位项<sup>[7]</sup>, 在整个成像过程中都不发生变化, 不影响信号的成像处理。由于

$\exp \left[ j2\pi \sum_{i=0}^{n_r} (x_{(n_a+N_a/2)i} - 0.5) \right]$  的存在, 使得整个回波信号都

呈现出非周期性, 极大地增加了对回波信号参数识别难度, 这就是采用混沌信号的优势所在。如图2所示, 线性调频信号的回波信号呈现双曲线型, 而混沌信号的回波则呈现不规则的噪声型。

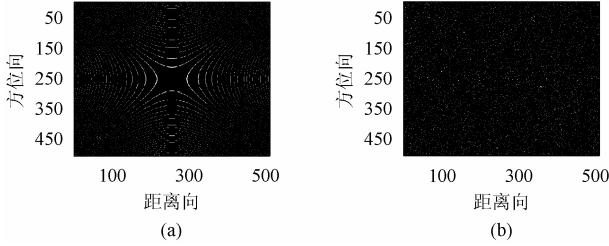


图2 LFM信号回波数据阵列与混沌信号回波数据阵列对比  
(a) LFM信号回波数据阵列 (b) 混沌信号回波数据阵列

### 3.3 脉冲压缩

由于混沌序列的特殊性,必须先进行距离向脉冲压缩。与使用LFM的SAR不同,使用混沌序列的SAR压缩各个脉冲信号的匹配滤波器都不相同,对于在位置 $(n_a \Delta x, 0)$ 接收到的混沌信号,匹配滤波器的传递函数为 $h_r(n_a + N_a/2, n_r) = \exp\left[j2\pi \sum_{i=0}^{n_r} (x_{(n_a + N_a/2)_i} - 0.5)\right]$ 。在方位向的处理与传统SAR系统相同。经过距离向和方位向的脉冲压缩后,点目标的重构函数 $f_p(m_a, m_r)$ 如图3(a)所示,当 $m_r = 0$ 时

$$|f_p(m_a, 0)| = N_r \left| \frac{\sin\left(\frac{2\pi f_c \Delta x^2}{R_p c} (N_a - |m_a|) m_a\right)}{\sin\left(\frac{2\pi f_c \Delta x^2}{R_p c} m_a\right)} \right| \quad (7)$$

当 $m_r \neq 0$ 时,重构函数类似随机噪声,统计参数如下:

$$E[f_p(m_a, m_r)] = 0 \quad (8)$$

$$\text{Var}[f_p(m_a, m_r)] = (N_a - |m_a|) \cdot (N_r - |m_r|) \quad (9)$$

与混沌相位编码信号一样,由式(7)式(9)知,在 $m_r = 0$ 的位置上,也就是距离向脉压波形的主瓣位置,重构函数的形状与传统SAR一样,都是sinc函数,在不采用旁瓣抑制措施的情况下,峰值旁瓣为-13.6dB,而在 $m_r \neq 0$ 的位置上,即距离向脉压波形的旁瓣位置,重构函数的波形都是均值为0,方差为 $(N_a - |m_a|) \cdot (N_r - |m_r|)$ 的类随机波形。也就是说,混沌调频信号的随机特性只在距离向脉压波形的旁瓣位置表现出来,正是因为这样,才使得方位向的脉冲压缩得以进行。

在 $m_r \neq 0$ 时,重构函数的平均主副瓣比APSR(Averaged Peak to Sidelobe Ratio)<sup>[8]</sup>为

$$\text{APSR} = \frac{N_a^2 N_r^2}{(N_a - |m_a|) \cdot (N_r - |m_r|)} \quad (10)$$

方位向取的脉冲数越多,APSR越大,原因是重构函数在距离向脉冲压缩波形的旁瓣位置呈现随机性,各个脉冲的混沌序列不相关,在方位向脉压时,距离向主瓣相干叠加,副瓣非相关叠加,所以脉压后APSR与方位向脉冲数成正比。同样用概率论<sup>[5]</sup>的方法可求出重构函数的峰值和 $m_r \neq 0$ 时峰值旁瓣比PSR(Peak to Sidelobe Ratio)为

$$\text{PSR} = \frac{N_a N_r}{\ln \frac{(N_a (N_r - 1))^2}{2\pi N_a N_r}} \quad (11)$$

随着 $N_r$ 、 $N_a$ 的增加,PSR增大,当 $N_r=512$ , $N_a=4096$ 时,APSR达到63dB,PSR达到52dB。

## 4 点目标仿真

下面对点目标的成像进行仿真。系统参数如下:信号带宽100MHz,脉冲长度2.56 $\mu$ s,点目标P到载机航线的垂直距离为 $R_p = 40 \times 10^3$ m,载机航速 $v_a = 150$ m/s,天线长度 $D = 1.6$ m,载波频率 $f_c = 9.4 \times 10^9$ Hz,脉冲重复频率 $f_r = 800$ Hz。图3(a)给出了点目标重构函数的立体图,图3(b)给出点目标的仿真成像结果,图中使用了归一化值,由图中可见,我们得到了较好的点目标像。图4(a)给出了 $m_r = 0$ 时方位向压缩的波形,图4(b)给出了 $m_a = 0$ 时距离向压缩的波形。仿真中距离向没有加入旁瓣抑制算法,方位向采用了系数为0.54的泰勒加权,得到方位向的-3dB主瓣宽度为2m,距离向主瓣底宽为3m,在距离向混沌序列取256个点,方位向有2048个脉冲的情况下,距离向的峰值旁瓣已经在-50dB以下,可以得到较好的雷达图像。

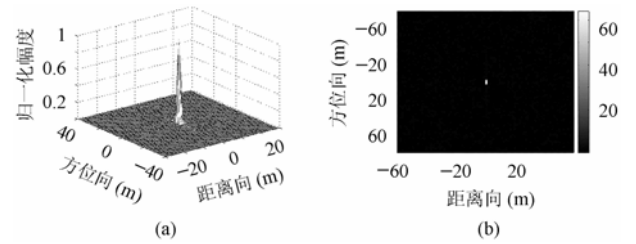


图3 点目标重构函数图

(a) 点目标重构函数的立体图 (b) 点目标像

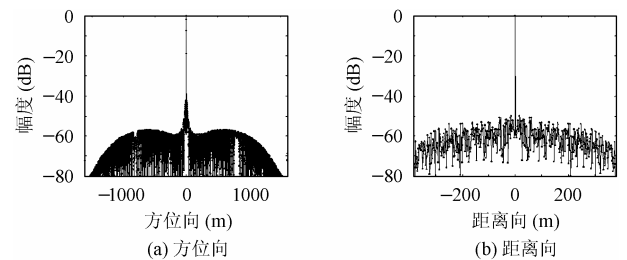


图4 点目标重构函数的旁瓣特性

(a) 方位向 (b) 距离向

## 5 结束语

通过上面的分析和仿真我们可以发现,将混沌调频信号用于雷达成像是可行的,在不采用任何旁瓣抑制措施的情况下,如果方位向取2048个脉冲,距离向序列取256个点,点目标重构函数在距离向的峰值旁瓣可以降到-50dB以下,而

且方位向所用的脉冲越多, 距离向旁瓣下降的越大。在使用了混沌信号之后, 由于混沌序列的非周期性, 敌方很难识别信号参数, 从而能提高成像雷达的抗干扰性能。

### 参 考 文 献

- [1] 沈颖, 刘国岁. 混沌在雷达信息处理中的应用前景. 南京理工大学学报, 1999, 23(4): 378 – 381.
- [2] 沈颖, 刘国岁. 混沌相位调制雷达信号的模糊函数. 电子科学学刊, 2000, 22(1): 55 – 60.
- [3] 袁永斌, 徐继麟, 等. 一种混沌雷达波形的模糊函数. 电子科学学刊, 1998, 20(5): 641 – 647.
- [4] 袁永斌. 混沌信号及在雷达系统中的应用研究. [博士论文], 成都: 电子科技大学, 1999.
- [5] Wu X, Liu W, Zhao L, Fu Jeffrey. Chaotic phase code for radar pulse compression. IEEE National Radar Conference Proceedings, Atlanta, GA, 2001: 279 – 283.
- [6] Flores B C, Solis E A, *et al.*. Chaotic signals for wideband radar imaging. Proceedings of SPIE--The International Society for Optical Engineering. Orlando, FL, United States, 2002. Vol. 4727: 100 – 106.
- [7] 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: 第三章.
- [8] Axelsson S R J. Noise radar for range/doppler processing and digital beam forming using low-bit ADC. *IEEE Trans. on Geosciences and Remote Sensing*, 2003, 41(12): 2703 – 2720.

丁 凯: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为混沌扩频信号技术.

杨汝良: 男, 1943 年生, 研究员, 博士生导师, 长期从事星载、机载合成孔径雷达系统研究.