

一类混沌序列调频数字合成信号模糊特性分析

刘诗华, 王德石, 谌 龙

(海军工程大学兵器工程系, 湖北武汉 430033)

摘 要: 提出运用直接数字合成技术的混沌调频信号生成方案, 并对信号的模糊特性进行分析. 以随机过程理论为基础, 分析了有限字长条件下混沌序列的随机特性, 得出满足应用要求的字长条件. 以直接数字合成技术和混沌序列复本相关技术为基础, 将混沌序列作为频率控制字生成混沌调频信号. 用宽带模糊度函数统计平均方法研究了信号的模糊特性, 并对信号的抗干扰性能进行了分析.

关键词: 混沌; DDS (Direct Digital Synthesis); 调频; 模糊度函数

中图分类号: TN97 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 09-1784-05

Analysis of the Ambiguity Characteristic of Digital Synthesis Signals with Chaotic Frequency Modulation

LIU Shi-hua, WANG De-shi, CHEN Long

(Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China)

Abstract: A scheme of signals with chaotic frequency modulation on the basis of direct digital synthesis technology (DDS) is presented, and the ambiguity characteristic of the signals is analyzed. Based on stochastic process theory, the stochastic characteristic of limited word length chaotic sequences is studied and proper condition of word length for application is obtained. With DDS and chaotic sequence duplicate correlation method, signals of chaotic frequency are generated. The ambiguity characteristic of the signals are researched by the statistic average of wideband ambiguity function, and the anti interference performance is analyzed.

Key words: chaos; DDS(Direct Digital Synthesis); frequency modulation; ambiguity function

1 引言

波形设计是声纳和雷达等探测系统的一个重要方面. 信号波形不仅决定了信号处理方法, 而且直接影响到系统的分辨率、测量精度、抗干扰能力以及目标跟踪性能等^[1]. 根据 Woodward 提出的雷达模糊原理, 人们对各种波形进行了深入研究. 应用最为广泛的是线性调频脉冲压缩信号(LFM), 此外非线性调频、相位编码和相参脉冲串等大时宽带宽信号也逐步得到应用. 理论分析和数值仿真表明, 在信号参数中引入随机编码可以使信号的模糊图接近理想的图钉形, 提高距离和速度分辨力, 如伪随机相位编码脉冲信号, 伪随机频率、间隔参差脉冲串信号等. 但是, 常用的随机及伪随机信号也存在一些不足之处. 首先, 理想的随机信号实现起来非常困难; 其次, 对于具有确定特性的伪随机信号而言, 由于线性复杂度较低, 因而抗干扰性和模糊特性常不能满足要求^[2].

混沌信号是一种良好的伪随机信号, 是确定性系统内在随机性的表现. 由于具有随机性强、样本容量大等特点, 混沌序列已在扩频通讯等应用领域取得了众多成果^[3, 4]. 与传统的随机信号和伪随机信号相比, 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及伪随机数量较少等不足之处. 另外由于混沌信号的初值敏感性和随机性, 混沌编码使得雷达系统有着很强的抗干扰性能, 使得混沌信号应用与雷达系统成为可能^[5]. 将混沌的随机性引入波形设计是获得高分辨率探测信号的有效途径之一. 由于在有限字长条件下混沌信号可以由给定的系统参数与初值精确复制, 因此相比于一般随机信号, 采用混沌调制方式的接收机的实现过程可得到简化. 这一特点也十分有利于在双基地和多基地探测系统中采用伪随机信号, 以进一步提高其抗干扰和反截获性能, 实现隐蔽探测.

自从直接数字合成信号技术(DDS)问世以来, 复杂信号波形的实现得到了技术上的保证. 此技术可对信号

波形进行精确的频率、幅度、相位控制,是实现频率捷变信号的理想方式^[1]。将混沌序列作为频率调制控制信号,应用直接数字合成技术可以获得瞬时频率呈现混沌变化规律的信号波形。因此,以 DDS 技术和混沌序列复本相关技术为基础,可以克服传统伪随机信号在产生和处理方面遇到的主要困难,获得具有高分辨率的伪随机探测信号。

2 有限字长混沌序列统计特性分析

2.1 混沌系统随机过程建模

对于混沌系统 $y = \Phi(t, x)$, 考虑其初值敏感性, 可将非线性流 $\Phi(t, x^0)^{[6]}$ 视为一伪随机过程。令 x^0 表示系统初值, $\{x_n^0\}$ 表示不同初值构成的初值序列, $\{t_n\}$ 表示时间 t 的采样点构成的序列, 则 $\Phi(t, x_n^0)$ 表示对应不同初值序列的样本集合, 而 $\Phi(t_n, x^0)$ 为表示对应于某一初值的样本在不同时刻的采样值构成的序列, 即样本的离散形式。对离散混沌系统 $x_{n+1} = \Phi(x_n)$, 可由 $\{x_n | x_1 = x^0\}$ 表示对应于某一初值的样本, 同理, 此系统也可构成一伪随机过程。

由于混沌系统是确定性的, 混沌序列的局部特性与随机序列并不完全相同, 即混沌轨迹可以短期预测。但从长期统计分析来看, 其基本特征符合随机过程的要求, 并且由于混沌系统固有的遍历特性^[7], 以此为基础的伪随机过程也是一遍历的平稳随机过程。

2.2 有限字长影响分析

在计算机系统中, 由数据存储的有限字长限制而导致的舍入误差不可避免, 而混沌系统会将初值误差以指数速率扩大, 因此有限字长条件下不可能得到混沌系统的精确实现。即使字长很长, 混沌轨道中总会出现两相距极近而不能被分辨的点, 从而系统进入周期轨道^[7]。在工程应用中, 如果仅仅需要利用混沌序列的随机特性, 当字长较长时, 序列周期也将足够长, 其截断序列可以满足应用要求。

以常用的双精度数据存储系统为例, 每一浮点数占 8 字节, 共 64 比特, 其中小数部分 53 比特(含一个符号位), 指数部分 11 比特(含一个符号位), 因此系统能分辨的最小距离为 $d_w = 2^{-52}$ 。一般情况下指数部分字长足够, 不会产生误差; 小数部分最小分辨距离为 d_w , 一旦两混沌轨迹的距离小于 d_w , 系统就会重复以前的运动, 因此通过数值计算得出的混沌轨迹必定为一长周期伪随机序列, 是混沌系统的近似轨迹。若将其小于周期长度的序列视为伪随机过程的一个样本, 在研究混沌数据的概率分布时, 设所划分的统计区间长度为 d_s , 则当两数据落入同一区间时可认为在概率分布上是等价的, 为了从统计角度分析有限字长条件下近似轨

迹与精确轨迹的联系, 现以一维离散混沌系统为例进行分析。系统中两相邻轨迹的发散程度可用 Lyapunov 指数 λ 来描述^[7]:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_0 \exp(n\lambda) \quad (1)$$

其中 ε_0 为相邻轨迹初始距离, ε_n 为迭代 n 次后的距离。令 N_s 为一阈值, 当 $n < N_s$ 时, $\varepsilon_n \leq d_s$, 近似轨迹与精确轨迹始终在相同的统计区间, 统计特性相同; 当 $n \geq N_s$ 时, $\varepsilon_n \geq d_s$, 两者将分别落入不同的统计区间。假设由字长舍入误差形成的初始距离为 $\varepsilon_0 = d_w$, 则由式(1)可得

$$N_s = (\ln d_s - \ln d_w) / \lambda \quad (2)$$

当 $n \geq N_s$ 时, 受系统初值敏感性的影响, 近似轨迹将与真实轨迹相关程度迅速减小, 因此可将其视为随机过程的另一样本。由以上分析可知有限字长条件下所得的混沌序列可视为同一伪随机过程不同样本片断的组合, 即复合样本, 样本片断的平均长度为 N_s 。由于混沌系统可表示为遍历的平稳过程, 因此复合样本的统计特性与精确轨迹是相同的。

以 Logistic 混沌映射^[7]为例:

$$x_{n+1} = \mu x_n (1 - x_n) \quad (3)$$

式中参数 $\mu = 4$, 此时系统(3)为满映射, 初值 $x_0 \in (0, 1)$, 系统的 Lyapunov 指数为 $\lambda = \ln 2$, 数据以双精度形式存储, 统计区间长度 $d_s = 0.01$, 则由(2)式可得 $N_s = 49$, 即双精度条件下 Logistic 映射(3)生成的混沌序列的样本片断平均长度为 49。对于多维映射和连续混沌系统按此方法可进行类似分析。

根据以上分析可以看出, 混沌系统在有限字长条件下的近似轨迹尽管会不可避免地偏离精确轨迹, 但在双精度或更高精度数据条件下, 其统计特性没有明显变化, 在利用混沌内在随机性方面完全可以满足应用要求。

2.3 部分自相关特性

当混沌系统选取合适的参数和初值, 所得混沌信号具有较理想的部分自相关特性。考虑 Logistic 混沌系统(3), 当 $\mu = 4$ 时混沌序列 $\{x_n\}$ 的概率密度函数为^[8]:

$$\rho(x) = 2 / [\pi \sqrt{1 - (2x - 1)^2}]^2, \quad x \in (0, 1) \quad (4)$$

此即系统(3)的不变分布, 有 $\rho(x_n) = \rho(x_{n+1})$, $\{x_n\}$ 与移位序列的相关系数为

$$\begin{aligned} r(1) &= E\{(x_n - Ex_n)(x_{n+1} - Ex_{n+1})\} / (Dx_n Dx_{n+1})^{1/2} \\ &= \left[\int_0^1 \mu x^2 (1-x) \rho(x) dx - (Ex_n)^2 \right] / (Dx_n Dx_{n+1})^{1/2} \\ &= (1/4 - 1/4) / (Dx_n Dx_{n+1})^{1/2} = 0 \end{aligned}$$

由数学归纳法易证当 $k > 1$ 时,

$$r(k) = E\{(x_n - Ex_n)(x_{n+k} - Ex_{n+k})\} / (Dx_n Dx_{n+k})^{1/2} = 0$$

因此序列 $\{x_n\}$ 的移位相关系数可表示为

$$r(k) = \delta(k) = \begin{cases} 1, & k = 0 \\ 0, & k \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

即为理想单位冲击信号,与噪声序列相同.实际应用中通常分析有限长序列 $\{x_n\}$ 的部分自相关函数^[9]

$$R(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-k} x_n x_{n+k} \quad (6)$$

其中 N 为序列长度.由于混沌序列遍历特性,当 N 较大时,迭代序列 $\{x_1, \dots, x_N\}$ 的分布近似满足理想分布(4),因此有

$$\lim_{N \rightarrow \infty} R(k) = r(k)$$

从而可知随着序列长度的增加 Logistic 混沌序列具有非常接近 $\delta(k)$ 的部分自相关函数

3 混沌调频信号的数字合成方案

3.1 直接数字合成波形技术

直接数字合成波形技术(DDS)是近年来发展迅速的一种信号产生技术^[1],它可以通过数控电路对输出信号波形进行精确的频率、幅度、相位控制,且具有极高的频率分辨率和极短的频率转换时间,且能保证频率捷变时的相位连续,在信号检测领域具有广阔的应用前景.

DDS 系统由相位累加器、波形存储器、数模转换器、低通滤波器和参考时钟等部分组成.若相位累加器字长为 N ,则将所对应的 2^N 个相位点的基本信号波形的幅度值存储于波形存储器中,在频率控制字 K 的作用下,相位累加器给出不同的相位码对波形存储器寻址,从而实现相位到幅度的变换.然后经数模转换器和低通滤波器便可得到模拟信号输出.输出信号的瞬时频率可表示为:

$$f = Kf_c/2^N \quad (7)$$

其中 K 为频率控制字, f_c 为时钟频率.

以 DDS 技术为基础,以混沌信号为调制信号对常规正弦信号进行调频,可以利用其内在随机性方便地实现探测信号随机化,同时实现频率捷变,有利于提高信号的距离速度联合分辨力,降低探测信号截获概率,增强反有源干扰能力.由于 DDS 技术可以方便地对波形参数进行设定而无需改变硬件和软件系统,因此改变混沌系统参数后就可获得具有不同随机特性的探测信号,更加有利于保持探测隐蔽性,增强电子对抗能力.

3.2 一类混沌序列调频方案

通过对 DDS 系统工作原理的分析可知当波形存储器数据固定时,输出波形相位和频率的变化由频率控制字 K 来实现.若将混沌信号引入对 K 的控制,使其在一定范围内随混沌信号变化,则系统即可输出瞬时频率具有混沌特性的伪随机信号.由于一维混沌映射形式简单,易于用数字系统实现,下面以 Logistic 映射(3)为例,给出一类基于混沌序列的调频方案,并对信号特

性进行分析.

设 DDS 系统输出信号瞬时频率范围为 $f_{\min} = \beta_1 f_c$, $f_{\max} = \beta_2 f_c$,相位累加器字长为 N ,波形存储器存储余弦信号 2^N 个均匀相位点对应的幅度值,即 $A(n) = \cos(2\pi n/2^N)$.由式(7)可知对应的频率控制字范围为 $K_{\min} = \beta_1 2^N$, $K_{\max} = \beta_2 2^N$.设双精度存储条件下由 Logistic 系统(3)生成混沌序列为 $\{x_n\}$,则频率控制字的控制规律为

$$K = [\beta_1 + (\beta_2 - \beta_1)x_n]2^N \quad (8)$$

对应输出信号瞬时频率为

$$f_n = [\beta_1 + (\beta_2 - \beta_1)x_n]f_c \quad (9)$$

为保证瞬时频率变化时相位及波形导数连续,规定 K 在信号幅度为1时发生跳变,则输出信号瞬时频率改变时波形导数连续,信号在经过低通滤波器时不会发生波形畸变.第 k 个频率 f_k 对应的输出波形为

$$u_k(t) = \sum_{m=0}^{M_k-1} \cos(2\pi K_k m/2^N) q_k(mT_c), \quad 0 \leq t \leq M_k T_c$$

其中 $T_c = 1/f_c$ 为时钟周期, $M_k T_c$ 为 $u_k(t)$ 的周期且 $M_k = 2^N / \text{GCD}(2^N, K_k)$,这里 $\text{GCD}(x, y)$ 表示取 x, y 的最大公约数. $q_k(mT_c)$ 定义为

$$q_k(mT_c) = U(t - nT_c - N_k T_c) - U[t - (n+1)T_c - N_k T_c]$$

$$U(t) \text{ 为阶跃函数, } N_k T_c = \left[N_f \sum_{n=1}^{k-1} M_n \right] T_c \text{ 为第 } k \text{ 个频率}$$

信号的时延, N_f 为已调信号每一瞬时频率持续周期数

设混沌序列长度为 M ,则输出信号表达式为

$$u(t) = \sum_{k=1}^M u_k(t) \quad (10)$$

4 混沌序列调频信号模糊特性分析

4.1 混沌序列调频的模糊度函数

在信号检测领域,模糊度函数是定量分析各种信号的分辨力的主要工具,它能够表征信号波形的基本特征^[1].信号的波形设计实际上就是根据特定的技术指标和噪声背景寻求理想的模糊度函数.一般情况下,信号模糊图主瓣越尖锐,旁瓣越低,则能量在频域和时域上越集中,信号的分辨力也越强.常用探测信号按模糊图形式可分为四类:正刀刃形,斜刀刃形,板钉形和图钉形,其中图钉形信号的距离速度联合分辨力最好.

由于混沌序列调频信号具有较大的时宽带宽积,且具有随机特性,因此要用宽带模糊度函数的统计平均^[10, 11]对其进行分析,形式如下:

$$|A(T_d, F_d)| = E \left| \int_{-\infty}^{\infty} u(t) u^*(t + T_d) e^{2\pi F_d t} dt \right| \quad (11)$$

式中 $u(t)$ 为以混沌调频信号为样本的随机过程模型, T_d 为时延差, F_d 为多普勒频率差,“*”表示求共轭函

数.

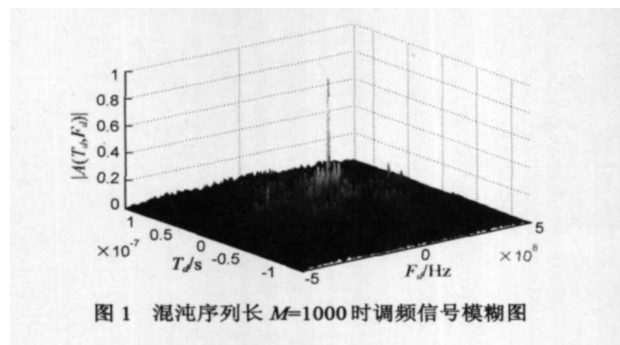
在进行目标检测时信号时宽总是有限的, 所以可将时宽为 T 的一段信号样本的计算作为模糊度函数的近似估计, 其表达式为

$$\begin{aligned} |A(T_d, F_d)| &= \frac{1}{2T} \left| \int_{-T}^T u(t) u^*(t + T_d) e^{j2\pi F_d t} dt \right| \\ &= \frac{1}{2T} \left| \int_{-T}^T \sum_{k=1}^M u_k(t) \sum_{k=1}^M u_k^*(t + T_d) e^{j2\pi F_d t} dt \right| \end{aligned} \quad (12)$$

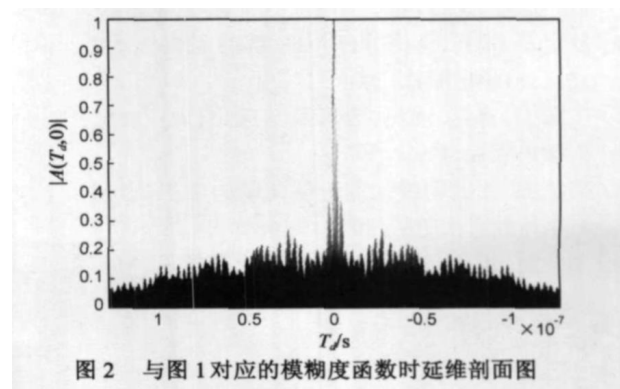
由于混沌信号平稳遍历且具有理想的自相关函数, 因此已调信号样本在有限时间内的部分自相关函数随时宽增大无限逼近于其精确模糊度函数.

4.2 数值计算结果

设 DDS 系统时钟频率 $f_c = 4 \times 10^6 \text{ Hz}$, 波形存储器字长 $N = 20$, 瞬时频率系数 $\beta_1 = 0.01$, $\beta_2 = 0.1$, $N_f = 1$, Logistic 混沌序列长度 $M = 10^3$, 其初值由随机数产生器随机产生. 以式(12)为计算模型, 得出混沌序列调频信号

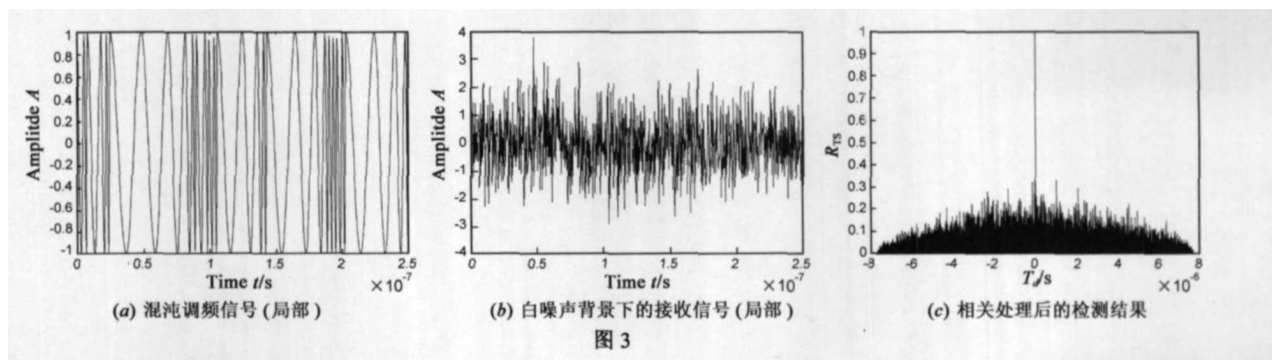


的模糊度函数仿真结果, 如图 1、图 2 所示. 可以看出其图形为近似图钉形, 主瓣尖锐且旁瓣较低, 说明信号具有很高的距离和速度联合分辨率, 是一种非常理想的高分辨率探测信号形式.



4.3 抗干扰性能分析

为分析混沌序列调频探测信号的抗干扰性能, 以 4.2 中波形数据为基础, 设信号传播损失为 20dB, 背景噪声为服从高斯分布的白噪声, 接收端输入信号的信噪比为 $\text{SNR} = -23 \text{ dB}$, 采用混沌序列调频信号复本相关方法可以得出白噪声干扰条件下的信号模糊特性. 有关计算结果如图 3 所示, 其中 (a) 为发射的混沌调频信号波形, (b) 为白噪声背景下的接收信号波形, (c) 为接收信号经相关处理^[5]后的接收机检测结果, 其结果记为 R_{TS} . 可见当接收信号信噪比较低时, 接收机输出有一定高度的旁瓣, 但依然能够有很高的检测概率和较高的目标分辨率.



5 结论

本文给出了基于 DDS 技术的一类混沌序列调频探测信号的实现方案, 并对其模糊特性进行了分析和计算. 有限字长条件下的混沌序列分析表明在双精度或更高精度数据条件下, 混沌系统生成序列的统计特性和随机特性可以满足应用要求. 将混沌的随机性引入波形设计, 可以获得高分辨率探测信号. 借助于 DDS 技术和混沌序列复本相关技术, 可以生成高分辨率探测信号, 并使接收机实现过程得以简化. 信号的模糊特性

分析表明此类信号具有接近于图钉形的模糊图, 是一种具有高分辨率、较强抗干扰能力和低截获概率的伪随机探测信号.

参考文献:

- [1] 费元春, 苏广川, 等. 宽带雷达信号产生技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [2] 曹晓峰, 李夕海, 刘代志. 混沌二相编码雷达引信研究[J]. 上海航天, 2002, (1): 45-48.
- [3] Parlitz U, Ergezing S. Robust communication based on chaotic spreading sequences[J]. Phys Lett A, 1994, 188: 146-150.

- [4] Mazzini G, Chaotic complex spreading sequences for asynchronous DS-SS CDMA-Part I: System modeling and results[J]. IEEE Trans on Circuit and System I, 1997, 44(10): 937-947.
- [5] 刘国岁, 顾红, 苏卫民. 随机信号雷达[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [6] 罗定军, 张祥, 董梅芳. 动力系统的定性与分支理论[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [7] 王东生, 曹磊. 混沌、分形及其应用[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1995.
- [8] 郝柏林. 从抛物线谈起—混沌动力学引论[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 1993.
- [9] 刘德树. 雷达反对抗的基本理论与技术[M]. 北京: 北京

理工大学出版社, 1989.

- [10] 沈颖, 顾红, 等. 基于精确混沌映射的噪声雷达信号产生器分析[J]. 兵工学报, 2000, 21(2): 180-183.
- [11] 林茂庸, 柯有安. 雷达信号理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984.

作者简介:

刘诗华 男, 1979年4月出生于湖北武汉, 博士. 主要研究方向为混沌雷达信号产生技术及其应用. E-mail: kyoliu@tom.com

王德石 男, 1963年2月出生于山东龙口, 现为海军工程大学兵器工程系教授、博士生导师. 主要从事非线性动力学及信号处理等方面的研究. E-mail: wdeshi@sina.com