

一类混沌二相码序列信号的产生及性能分析¹

宋耀良 是湘全 刘 中

(南京理工大学电子工程系 南京 210094)

摘 要 该文采用 Wien 电桥产生了基于双卷吸引子的混沌二相序列, 通过 PSPICE 模拟及计算, 分析了电路参数对混沌二相序列的随机分布及相关特性的影响. 结果表明在参数选择适当情况下, 该混沌二相序列的主要性能优于基于 Logistic 映射的二相序列, 与 Bernoulli 序列相近, 非常适于作为雷达波形.

关键词 混沌, 二相序列, 相关特性, 雷达波形

中图分类号 TN957, TN711

1 引 言

混沌动力学现象是 20 世纪最重要的科学发现之一. 混沌动力学的特殊性及其存在的普遍性, 使其在社会、物理、化学、生物、大气及电子学领域有着广泛的应用前景, 因此, 对于混沌动力学的研究在许多领域已经形成热潮, 并取得了令人瞩目的成就. 在电子学领域, L.O.Chua 构筑了简单而又有丰富的混沌动力学行为的蔡氏电路^[1], 使混沌信号的观察显得异常方便. T.L.Carroll 和 L.M.Picora 等发现了混沌同步现象^[2], 使混沌信号在通信(特别是保密通信)方面的应用研究得以逐步深入地开展. 雷达作为一种特定的电子系统, 与传统的通信系统有着许多共同之处, 人们自然不会忘记将混沌引入其中. McMaster 大学的 Hakin 教授在研究海杂波的分形维时, 发现海杂波具有混沌动力学的特性, 并以海杂波数据为基础, 获得了对应的混沌编码^[3]. 俄国 V.Ya.Kislov 和 A.Bauer 等也根据混沌信号的随机性及其宽带性, 提出了类似于噪声雷达的混沌信号雷达的设想^[4]. 我国黄香馥教授等人也提出了用迭代的 Tent 映射产生雷达波形的办法, 并分析了混沌连续波和截断混沌序列调制的单载频矩形脉冲的模糊特性^[5]. 本文将根据双卷吸引子的动力学行为, 采用一种基于 Wien 电桥的混沌二相码产生方法^[6], 并结合实际, 对由此产生的混沌二相的二值均衡性、游程分布及自相关特性进行了分析, 证明该序列性能优于 Logistic 序列, 与理想的 Bernoulli 序列接近, 非常适于作为雷达波形.

2 双卷吸引子及混沌二相码的产生

利用混沌信号产生二相序列的方法有多种, 其中最常用的有迭代映射结合门限判据方法^[5]和基于数字滤波器的混沌伪随机序列产生法^[7]. 这两种方法的优点都是混沌序列的分布特性可以控制, 且其二值均衡性较好. 由于都存在有限字长效应, 序列存在周期性, 特别是 Tent 映射周期非常短. 为此, 本文提出利用模拟电路产生双卷吸引子的方法, 并根据双卷吸引子两叶产生周期为无限的二相序列(序列子脉冲宽度由 Wien 电桥振荡频率决定). 从理论上, 双卷吸引子可以通过三段线性电路来产生, Chua 氏电路是最典型的一种. 考虑到二相信号电路实现的方便性, 本文采用 Wien 电桥和由二极管、运放(OP1, OP2)组成的混沌产生电路. 电路基本模型如图 1 所示. 电路由两个部分组成, 虚线左边是由 $R_1C_1 - R_2C_2$ 组成、中心频率为 $\omega_0 = 1/(R_1C_1R_2C_2)^{1/2}$ 的 Wien 电桥, 右边为负阻转换器(NIC). 当取

¹ 1999-02-11 收到, 1999-08-14 定稿
国家部级科学研究基金资助项目

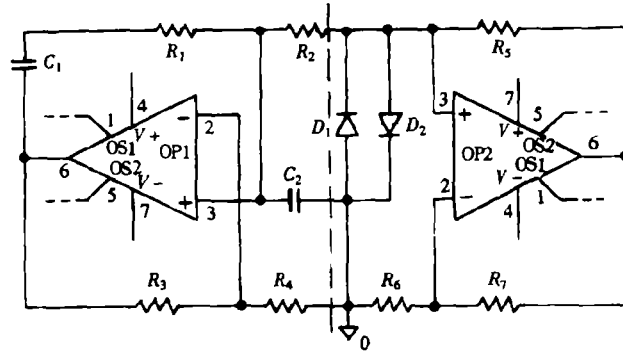


图 1 双卷吸引子产生电路

$R_1 = R'_2 = R$, $C_1 = C_2 = C$ 时, $\omega_0 = 1/RC$, 其中 $R'_2 = R_2 + R_z$, R_z 为虚线右边 NIC 的等效电阻, 当其两端输入电压小于二极管正向压降 U_0 , 即 $|U_1| < U_0$ 时, $R_z \approx R_6$, 当 $|U_1| > U_0$ 时, 二极管 D_1, D_2 中必有一个导通, 设正向导通电阻为 R_d , 那么此时 NIC 的输入电阻为 $R_z = R_6 \parallel R_d$. 由此可以获得 NIC 的电流与电压的关系曲线, 如图 2 所示. 据图 1 可获得微分方程组 (1) 式:

$$\left. \begin{aligned} C_1 du_{c1}/dt &= [-u_{c1} + (k-1)u_{c2}]/R, \\ C_2 du_{c2}/dt &= [-u_{c1} + (k-1)u_{c2}]/R_1 - (u_{c2} + u_d)/R_2, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 $k = (R_3 + R_4)/R_1$, $U_d = f(U_1)$ 由下式给出:

$$f(u_1) = \begin{cases} U_0, & \text{当 } U_1 \geq U_0, \\ -U_0, & \text{当 } U_1 \leq -U_0. \end{cases} \quad (2)$$

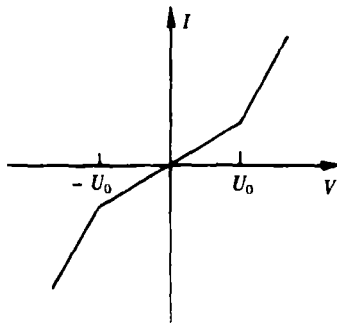


图 2 NIC 的 I-V 曲线

当参数取 $R_1 = R_2 = 3.9\text{k}\Omega$, $R_3 = 5.6\text{k}\Omega$, $R_4 = 1.392\text{k}\Omega$, $R_5 = R_7 = 13\text{k}\Omega$, $R_6 = 1\text{k}\Omega$, $C_1 = 15\text{nF}$, $C_2 = 33\text{nF}$. D_1 和 D_2 为 1N914, OP1 和 OP2 为 uA741 时, 通过 PSPICE 模拟可得到如图 3(a),3(b) 的结果, 其中 3(a) 为 OP1 输出的混沌信号时间波形; 3(b) 为 OP2 输出的二相序列, 其中高低电平分别表示混沌信号处于双卷吸引子两个状态; 3(c) 是以 U_{out1} 为横坐标, 单位为 (V), $U_{out2} + U_{c1}$ 为纵坐标的双卷吸引子图. 图中模拟参数为 $k=4.023$, $U_0=0.5\text{V}$. 通过调节 k , 可以获得分布不同的二相码波形, 这在下节中将要讨论.

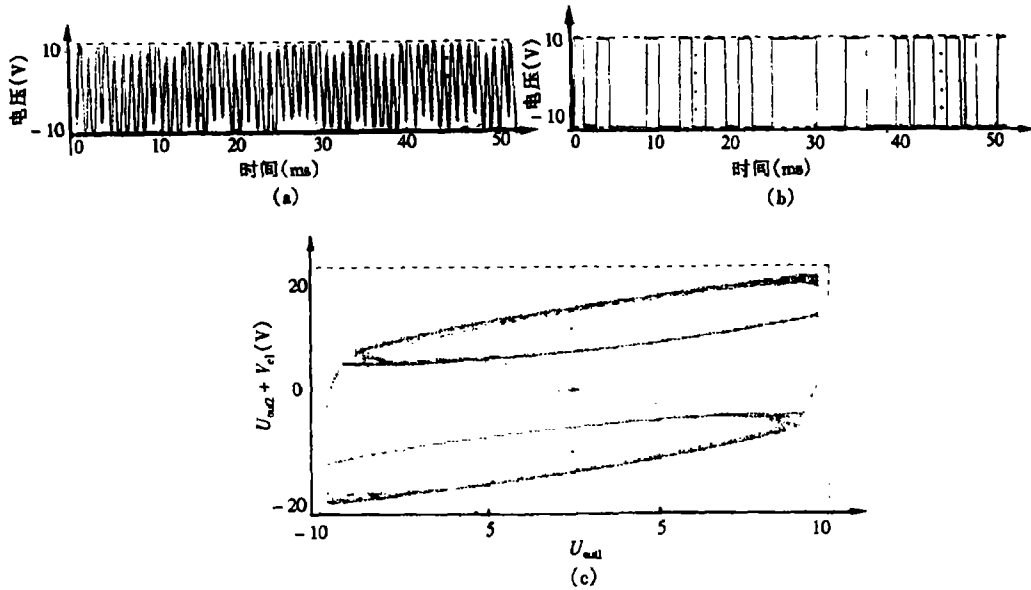


图3 混沌电路 SPICE 模拟结果
(a) OP1 输出时间波形 (b) OP2 输出二相脉冲序列
(c) 双卷吸引子 $(V_{c1} + U_{out2}) - U_{out1}$ 关系曲线

3 二相序列的均衡性、游程分布和相关特性分析

熵是人们用于衡量信号信息量大小的特征量, 它也是衡量信号随机性的重要参量. 对于用于雷达或保密通信中的二相序列而言, 在长度一定的情况下, 如何获取最大熵, 从而获得低的截获概率是判断码序列性能优劣的重要标志. 从熵的表达式 (3) 式:

$$H(X_N) = -E\{\log[P(X_N)]\} \quad (3)$$

可看出信号熵完全取决于序列 X_N 的联合分布律 $P(X_N)$, 式中 $X_N = [x_1, x_2, \dots, x_N]$, $x_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 代表第 i 个子码. 对于用 Bernoulli 试验而得到的随机二相序列, 人们习惯于用序列 X_N 中出现 k 个 1 这一事件 Y 的概率二项分布来描述, 亦即

$$P(Y = k) = C_N^k p^k (1-p)^{N-k}, \quad (4)$$

式中 $p = P(x_i = 1) (i = 1, 2, \dots, N)$. 二项分布的特征参量 $E(Y) = Np$, $D(Y) = Np(1-p)$. 当 $p = 1/2$ 时, 序列可以获得最大熵, 此时 $E(Y) = N/2$, $D(Y) = N/4$. 对于伪随机序列和混沌二相序列, 由于子码间并非完全独立, 显然欲获得联合分布律 $P(X_N)$ 是困难的, 但仍然可以用上述类似的概率分布 $P(Y = k)$ 来描述序列的分布特性, 并用二值均衡性 ($E(Y)$)、游程分布及序列相关性来判断序列的随机性.

3.1 均衡性分析

从理论上讲, 长度为无穷的平衡型双卷吸引子二相序列具有理想的二值均衡性, 但由于雷达实际应用中处理的序列长度是有限的, 故讨论二相序列的二值均衡性只能根据信号处理时间, 从序列中截取相应长度的子序列来加以讨论. 二相码雷达的处理时间长短主要取决

于雷达目标的多普勒频率 f_d 的高低, 多普勒频率越高, 则信号处理时间越短 ($T \leq 1/2f_d$)。考虑到截断序列的均衡性在一定程度上受起始时间的影响, 本文对同一长度, 但初始值不同的二相序列的均衡性进行了平均处理。表 1 给出了 12 个初值不同、长度为 128、256 和 512 的截断序列 ($Y_{N1}, Y_{N2}, \dots, Y_{N12}$) 的子样平均 Z_N 的均值及其方差, 并与同样长度的 Logistic 序列及二项分布的子样平均 Z_N 进行了比较。由此表可以看出基于双卷吸引子的不同长度二相序列的均值略优于基于 Logistic 二相序列, 但其标准差则前者明显优于后者。

表 1 混沌二相序列与 Logistic 映射的均衡性比较

Y 分布	长度均衡性					
	128		256		512	
	$E(Z_N)$	$\sigma(Z_N)$	$E(Z_N)$	$\sigma(Z_N)$	$E(Z_N)$	$\sigma(Z_N)$
双卷序列	63.42	2.74	130.5	2.96	259.25	6.35
Logistic 序列	63.1	19.8	126.75	59.52	259.67	49.3
二项序列	64	2.309	128	3.266	256	4.619

3.2 游程分布

游程分布对二相序列的分布特性有着重要影响, 混沌序列的游程分布与电路参数有着密切的关系。如何调节电路参数, 使混沌二相序列的游程分布接近于较为理想的二项分布, 是使混沌序列相关特性达到理想状态的关键。图 4 给出了当电路参数 k 取不同值时, 基于双卷吸引子的混沌二相序列的游程分布情况。图中序列长度为 786, 参数 k 分别取 4.028、4.023、4.014、4.000、3.986。从此图可以看出, 当 k 从大到小逐渐变化时, 最长游程变大, 且游程小的出现频率明显降低, 且分布形状类似二项分布。当 k 变化时, 电路可以从周期振荡向混沌状态过渡, 而在混沌状态, OP2 的输出则可以从二相状态向单相状态转换。由此可见, 参数 k 对于游程分布起着重要作用。所以, 适当调节 k 可以使游程趋向于较为理想的分布。

3.3 混沌序列的相关特性

混沌序列的相关特性很大程度上取决于所截取子序列二值均衡性与游程分布情况, 当参数调节适当和序列初始值变化时, 混沌序列的相关函数可以与最佳二相序列的相关函数相逼近。图 5 为长度 512 的截断混沌序列的相关特性, 从此图可看出其主瓣较高 ($>18\text{dB}$)。

4 结 论

通过上面的分析可知, 通过调节电路参数, 基于双卷吸引子的混沌二相序列具有良好的二值均衡性、较理想的游程分布和相关特性。通过比较可以看出其性能优于常用的 Logistic 映射序列。若将该混沌序列作为雷达波形, 不仅可以获得良好的距离分辨力, 而且具有很强的抗干扰能力和非常低的截获概率。

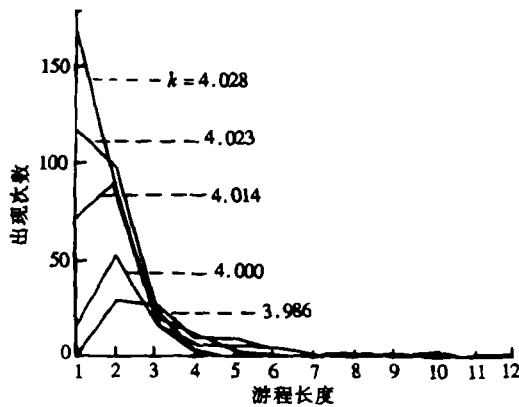


图 4 二相序列的游程分布

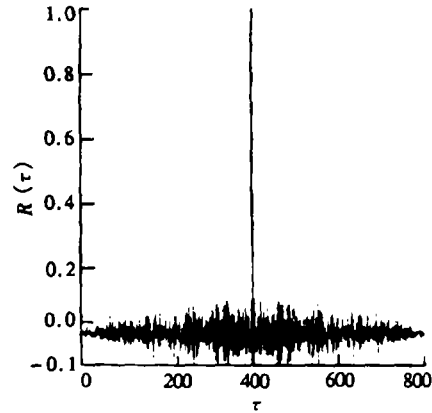


图 5 混沌序列的相关特性

参 考 文 献

- [1] Matsumoto T, Chua L O, Komuro M, The double scroll. IEEE Trans. on CAS, 1985, 32(8): 798-818.
- [2] Pecora L M, Corroll T L. Synchronization in chaotic circuits, Phys. Rev. Lett., 1990, 64(8): 821-824.
- [3] Box X Li, Haykin S. Chaotic characterization of sea clutter. l'Onde Electrique, Special. Issue on Radar, SEE, France: 1994, 60-65.
- [4] Kislov V Y, Dynamical chaos and its use in electronics for the generation, reception, and processing of oscillations and information. J. of Comm. Tech. & Electron, 1993, 38(16): 82-109.
- [5] 袁永斌, 徐继麟, 黄香馥. 一种混沌雷达波形的模糊函数. 电子科学学刊, 1998, 20(5): 641-647.
- [6] Tamasevicus A, Mykolaitis G, Namajunas A. Double scroll in a simple '2D' chaotic oscillator. Electron. Lett., 1996, 32(14): 1250-1251.
- [7] Lin T, Chua L O. A new class of pseudo-random number generator based on chaos in digital filters. Int. J. of Circuit Theory and Application, 1993, 21: 473-480.

ANALYSIS OF A KIND OF CHAOTIC BINARY SEQUENCE SIGNAL
AND ITS MAIN PROPERTIES

Song Yaoliang Shi Xiangquan Liu Zhong

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

Abstract Chaotic binary sequence based on double scroll attractor is produced by Wien bridge in this paper. Effects of the circuit parameters on the stochastic distribution properties and the correlation property of the proposed binary sequence are analyzed by means of the PSPICE simulation. The results show that properties of the binary sequence is better than that of the binary sequence based on logistic map and is similar to that of Bernoulli sequence so long as selecting parameters properly. It is suitable for the radar waveform.

Key words Chaos, Binary sequence, Correlation property, Radar waveform

宋耀良：男，1960年生，副教授，在职博士，从事雷达系统及现代信号处理的教学与科研工作。
是湘全：男，1945年生，教授，博士生导师，从事雷达系统及现代信号处理的教学与科研工作。
刘中：男，1962年生，教授，博士生导师，从事信号系统及现代信号处理的教学与科研工作。