

跳频通信和捷变频雷达跳频码的混沌特性¹

甘建超 * ** 肖先赐 *

*(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

** (电子对抗国防科技重点实验室 成都 610036)

摘 要 该文通过对实测跳频通信和捷变频雷达跳频码的混沌动力学特征量,如奇异吸引子、最大李亚普诺夫指数、关联维数的分析和计算,说明了跳频通信和捷变频雷达跳频码确实具有混沌特性,是一种混沌现象。这对从理论上认识跳频通信和捷变频雷达跳频码的本质,具有重要的理论意义。

关键词 跳频,混沌,奇异吸引子,李亚普诺夫指数,关联维数

中图分类号 TN711.4, TN951

1 引言

由于跳频技术具有抗干扰、抗截获能力等特点,因此在民用和军事上被广泛应用。但是,对跳频现象的认识,在理论上还不成熟。比如,跳频信号是什么样的伪随机现象,怎样描述它,怎样对抗跳频电台或捷变频雷达?在电子战领域里,接收机在实际环境中收到的一系列跳频码数据是否呈现一定的规律性?如果具有一定规律性,就可以用预测的方式来引导干扰;如果不具有一定规律性,呈现出完全杂乱无章的随机特性,则预测干扰的方式是不可行的。这些问题都需要有一个理性的认识。本文通过实测跳频通信和捷变频雷达跳频码的研究,力求解决跳频信号的本质和规律性。

文献 [1, 2] 指出了自然界的许多现象都是混沌的,比如海洋回波、两端固定突然震荡的绳子、人咳嗽时震荡的声波、水波涟漪、太阳黑子、核磁共振、胎儿心电图等现象都具有混沌特性。文献 [3] 指出了几种混沌跳频码的混沌动力学特性,对于混沌动力学特性量的描述,文献 [1-9] 都有分析;跳频信号是否也具有这种特性呢?答案是肯定的。本文通过对实测跳频码的混沌动力学特征量,如奇异吸引子、最大李亚普诺夫指数、关联维数的分析和计算,说明了跳频现象确实具有混沌特性。

2 混沌的特征描述

混沌的特征主要表现为对初始值的敏感性,具有小数维的奇异吸引子,具有短期可预测性与长期不可预测性。

初始值的敏感性就是对经过初始值 x_0 的某一轨道加以微小扰动,随着时间的演化,两条轨道会出现显著的差别,表现为指数分离的性态,这是定常系统和周期运动系统所不具有的。其指数分离的程度通常用最大李亚普诺夫指数 λ 来反映,如果 λ 越大,表示两条轨道分离得越厉害,反之分离程度越小。对于混沌过程,不仅具有有限的正的最大李亚普诺夫指数 λ ,而且具有负的指数 λ ,因此混沌过程具有局部不稳定性和全局稳定性。对于定常系统和周期运动系统,指数 $\lambda \leq 0$,其中的不稳定因素来自外部;对于混沌系统,其指数 λ 为有限的正数,其中的不稳定因素不仅来自于外部,也来自于内部;对于随机过程,其指数 λ 为无穷大^[7]。Rosenstein 等人提出了计算最大李雅普诺夫指数的算法^[10],该算法不仅易于实现,而且最主要的是它对嵌入维数、延时参数、数据的长短及噪声等因素的变化,表现出较好的鲁棒性。

¹ 2002-03-25 收到, 2002-08-26 改回
国家部级项目资助

混沌具有小数维的奇异吸引子, 表现为十分复杂的具有自相似性的分形结构. 吸引子的维数说明了描述吸引子所必需的变量个数, 最常用的是相关维数. 一种计算相关维数的算法称作 Grassberger-Procaccia 算法^[11]. 对于定常系统, 其吸引子维数是 0; 对于周期系统, 其吸引子维数是 1^[12]; 对于混沌系统, 其吸引子维数是小数; 对于随机过程, 其吸引子维数是无穷维.

对于定常系统和周期运动系统而言, 它们无论短期和长期都是可以预测的. 随机过程从理论上说是不可预测的. 混沌所独有的特性是短期可预测性与长期不可预测性. 混沌是由某种非线性动力学机制产生的, 因此在一定程度上是可以预测的, 但是由于其具有对初始值的敏感性, 又具有长期不可预测性.

表 1 反映了定常系统、周期系统、混沌系统与随机过程的各种特征量之间的关系. 它是鉴定一个时间序列性质的标准. 如果一个时间序列具有复杂的吸引子, 其吸引子维数 D 为小数, 反映两条相邻轨道分离程度的最大李亚普诺夫指数 $0 < \lambda < \infty$, 而且具有短期可预测性, 就可以断定这个序列是混沌序列. 表 1 也为区分一个序列是混沌过程还是随机过程提供了依据.

表 1 各种系统的特征量的关系

系统类型	吸引子维数 D	最大李亚普诺夫指数 λ	预测性能
定常系统	$D = 0$	$\lambda < 0$	短期长期均可以预测
周期系统	$D = 1$	$\lambda = 0$	
混沌系统	$D = \text{小数}$	$0 < \lambda < \infty$	短期可预测但长期不可预测
随机过程	$D = \infty$	$\lambda = \infty$	不可预测

3 实测跳频通信和捷变频雷达跳频码的混沌特性

以下的仿真数据来源于实测跳频无线电台和捷变频雷达, 其中跳频无线电台的跳频码有 10 组, 每组 2000 个载波频率, 其跳频点数为 256, 跳变范围是 30MHz-88MHz; 捷变频雷达的跳频码只有一组, 共 10000 个载波频率, 其编码规律未知, 观测的频带大约在 2GHz 至 4GHz. 在以下的仿真过程中, 都经过了归一化处理.

3.1 跳频通信和捷变频雷达跳频码的奇异吸引子

奇异吸引子反映了一个动力学系统复杂的动力学特性, 通常通过动力学系统的相图来反映. 由于 10 组跳频无线电台的吸引子是相同的, 限于篇幅, 下面的相图只描绘了其中一个相图. 跳频无线电台跳频码的奇异吸引子如图 1(a) 所示, 捷变频雷达跳频码的奇异吸引子如图 1(b) 所示.

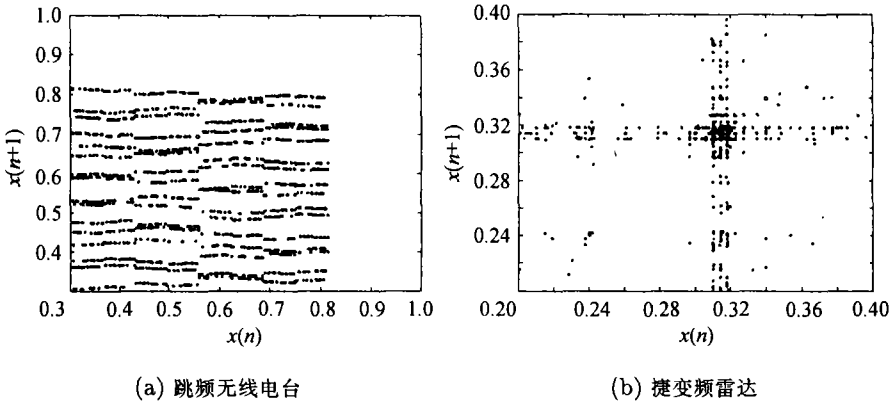


图 1 跳频码的奇异吸引子

图 1(a) 说明, 跳频无线电台的跳频码确实具有奇异吸引子, 而且其结构层次分明, 具有分形结构; 图 1(b) 说明, 捷变频雷达的跳频码也具有奇异吸引子, 结构表现为“十字”形。这些都是随机现象、定常系统(固定点)、周期系统(极限环)不具备的特征。

需要说明的是, 不同动力学机制产生的跳频码的吸引子结构是不同的, 并不是所有跳频码的吸引子都是上述结构。但是, 来自同一部雷达或电台因为拥有共同的动力学机制使得吸引子的结构是固定的, 不会随时间的变化而变化。

3.2 跳频通信和捷变频雷达跳频码的最大李亚普诺夫 (Lyapunov) 指数

最大李亚普诺夫指数 λ 是对一个动力学系统对初始值敏感性的定量描述。 λ 越大, 说明该系统对初始值越敏感; λ 越小, 说明该系统对初始值越不敏感。本文采用的是 Rosensein 等人提出的算法^[10], 通过对跳频码序列进行相空间重构, 如果记 $d_j(i)$ 表示第 j 条轨道与其邻近轨道在 i 时刻的距离, Δt 表示时间间隔, 则最大李亚普诺夫指数 λ 就是 $\ln d_j(i) - i\Delta t$ 曲线的斜率。为了得到比较可靠的结果, 可以计算 $\ln d_j(i)$ 的统计平均值 $\langle \ln d_j(i) \rangle$ 来代替 $\ln d_j(i)$ 。对于混沌系统, 其 $\ln d_j(i) - i\Delta t$ 曲线有一段比较平直的区域(也称无“标度区”), 这段区域的斜率就是指数 λ 。对于随机过程, 其 $\ln d_j(i) - i\Delta t$ 曲线没有一段比较平直的区域可以用来计算指数 λ 。

对于混沌系统, 在嵌入维数增加到一定程度后, 不同嵌入维数所对应的平直区域大致相同, 而最大李亚普诺夫指数 λ 又是一个统计结果, 因此在计算最大李亚普诺夫指数 λ 时, 通常取共同的平直区域。本文所取的嵌入维数为 $m = 5, 6, 7, 8, 9$, $\Delta t = 1$ 。图 2(a) 反映了跳频电台跳频码的 $\langle \ln d_j(i) \rangle - i$ 曲线, 图 2(b) 反映了捷变频雷达跳频码的 $\langle \ln d_j(i) \rangle - i$ 曲线。从图 2 可以看出, 跳频电台与捷变频雷达跳频码的 $\langle \ln d_j(i) \rangle - i$ 曲线都有一段比较平直的区域(虚线区域), 由此可以计算出跳频电台的跳频码的最大李亚普诺夫指数 λ 约为 0.1364(统计平均值), 捷变频雷达跳频码的最大李亚普诺夫指数 λ 约为 0.1889(统计平均值)。

由图 2 计算出来的指数 λ 定量地说明了跳频通信和捷变频雷达跳频码序列对初始值的敏感程度, 而且其最大李亚普诺夫指数是有限值, 不是无穷大。因此, 所得到的跳频通信和捷变频雷达跳频码序列具有混沌特性, 其相邻轨道随着时间的演化呈现指数分离。

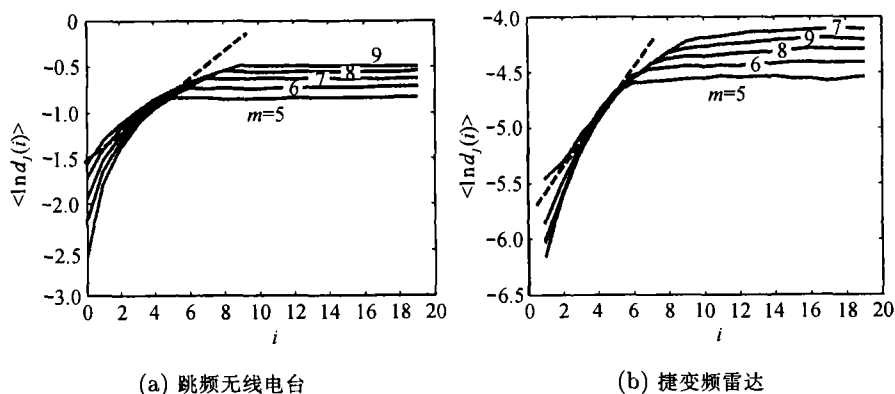


图 2 跳频码的 $\langle \ln d_j(i) \rangle - i$ 曲线

3.3 跳频通信和捷变频雷达跳频码的吸引子的关联维数

吸引子的维数反映了刻画吸引子特性至少需要的自由变量的个数, 而吸引子的维数有多种形式, 通常使用的是关联维数, 其计算的方法中比较好、使用多的是 Grassberger-Procaccia 算法^[11], 本文就是采用这种方法来计算跳频码吸引子的关联维数。这种方法的主要过程是根据

相空间的重构矢量 X , 计算这些矢量的关联和 $C_m(r)$, 然后作出 $\ln C_m(r) - \ln(r)$ 曲线 (r 可取任意小正数), 取其中比较直的一段平滑曲线的斜率 D_c 作为吸引子关联维数的估计值。

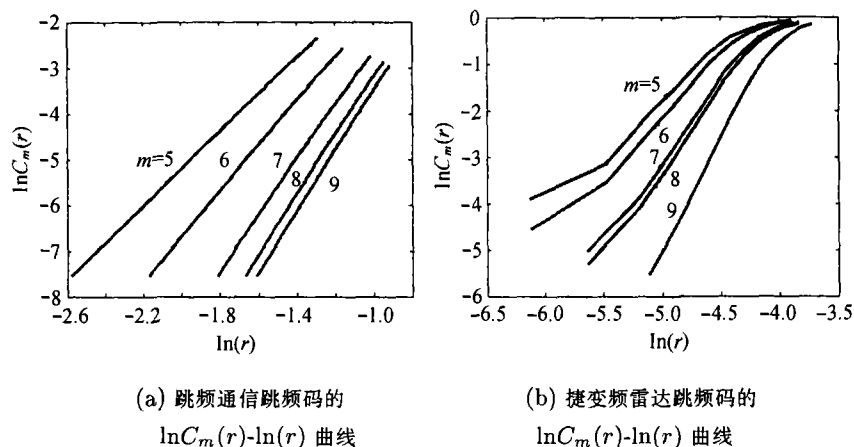


图 3 跳频通信和捷变频雷达跳频码的 $\ln C_m(r) - \ln(r)$ 曲线

当嵌入维数比较小时, 斜率 D_c 还不是真实值; 当嵌入维数逐渐增加到一定程度后, 斜率 D_c 将会趋于一个稳定值, 这个稳定值就是吸引子的关联维数。为了保证 D_c 趋于稳定值, 本文所取嵌入维数为 $m = 5, 6, 7, 8, 9$ 。图 3(a) 反映了跳频通信跳频码的 $\ln C_m(r) - \ln(r)$ 曲线, 图 3(b) 反映了捷变频雷达跳频码的 $\ln C_m(r) - \ln(r)$ 曲线。从图 3 可以看出, 跳频通信电台与捷变频雷达跳频码的 $\ln C_m(r) - \ln(r)$ 曲线都有一段比较平直的区域, 由此可以计算出跳频电台跳频码的关联维数约为 $D_c = 6.8706$ (统计平均值), 捷变频雷达跳频码吸引子的关联维数约为 $D_c = 3.3078$ (统计平均值)。

对跳频通信电台的 10 组数据进行计算, 其关联维数也是在 $D_c = 6.8706$ 左右, 这说明同一部发射机发射的跳频信号的吸引子关联维数是相同的。要从数学上描述所观测的跳频通信的跳频码至少需要 7 个变量, 而描述所观测的捷变频雷达的跳频码至少需要 4 个变量。同时, 跳频通信和捷变频雷达跳频码的吸引子的关联维数都是有限的正小数, 这也说明观测序列具有混沌特性, 其吸引子具有分形特征。

3.4 跳频通信和捷变频雷达跳频码的短期可预测性

由跳频通信和捷变频雷达跳频码的最大李亚普诺夫指数为正数, 可以判断它们对初始值很敏感, 但是随机过程对初始值也很敏感, 因此二者在这点上相似的。众所周知, 严格的随机过程因为对初始值极度敏感造成了根据第 N 时刻预测下一时刻的概率为 0。跳频通信和捷变频雷达跳频码也对初始值很敏感, 是否它们也无法由第 N 时刻预测下一时刻的值。为了进一步将它们区分开来, 就需要验证跳频通信和捷变频雷达跳频码是否在某种程度上可预测。如果能够找到某种方法, 这种方法能够在一定的精度范围内实现对跳频码的预测, 那么就可以断定跳频码具有短期可预测性。

限于篇幅, 图 4(a) 和图 4(b) 代表性地描述了跳频通信电台的一步预测结果, 所采用的算法是一种简单的非线性预测方法 S-M 算法^[13]。在图 4(a) 中, “o” 表示实测跳频码 $x(n)$, “◆” 表示预测的跳频码 $x_p(n)$; 图 4(b) 中, 横轴表示实测跳频码 $x(n)$, 纵轴表示预测的跳频码 $x_p(n)$ 。从图 4(b) 可以看出, 点对 $(x(n), x_p(n))$ 分布在对角线附近, 这说明跳频码能够在某种精度范围内进行短期预测, 这是随机现象不可能拥有的性质。

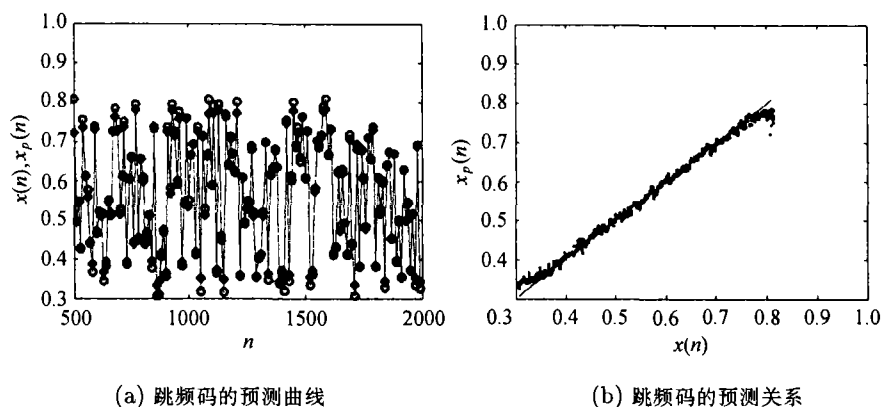


图 4 跳频码的预测

4 结 论

本文利用混沌理论对实测的跳频码序列的动力学特性(吸引子的相关维数、反映相邻轨道分离程度的最大李雅普诺夫指数、序列的预测性能)作了分析,从上面的分析可以得出如下结论:

(1) 跳频通信和捷变频雷达跳频码具有混沌特性。跳频码序列在相空间中有奇异吸引子,吸引子的维数是小数,具有分形结构;它们对于初值十分敏感,其相邻轨道随着时间的推移呈指数分离状态,分离程度量化为最大李亚普诺夫指数 λ ,它是一个有限的正数;同时它们在一定精度范围内具有短期可预测性。而随机现象虽然对于初值极端敏感,却不会出现稳定的吸引子;相空间中两状态,随着时间的推移也不会呈现固定的指数分离。因此,跳频码具有混沌特性。

(2) 相同的跳频通信和捷变频雷达跳频码序列有相同维数的奇异吸引子、相同的最大李亚普诺夫指数 λ 。

(3) 跳频通信和捷变频雷达跳频码是由其内部的非线性动力学机制所决定,这种动力学机制控制的结果导致了跳频码具有混沌特性。

由于所用的数据来自实测跳频码序列,因此所得结论可靠,具有实际意义。在工程应用中,对于跳频信号,可以根据其混沌特性利用混沌理论的方法来进行研究、处理。

参 考 文 献

- [1] 董华春, 宗成阁, 权太范, 高频雷达海洋回波信号的混沌特性分析, 电子学报, 2000, 28(3), 25-28.
- [2] H. Kantz, T. Schreiber, Nonlinear Time Series Analysis, Cambridge, Cambridge University Press, 2000, chapter 1.
- [3] 郭双冰, 肖先赐, 几种混沌跳频码的混沌动力学特性及预测分析, 系统工程与电子技术, 2000, 22(12), 29-32.
- [4] F. Takens, Detecting strange attractors in fluid turbulence, 1981, Dynamical Systems and Turbulence, eds., D. Rand, L. S. Young, (Berlin, Springer), 366-381.
- [5] 袁坚, 肖先赐, 低信噪比下的状态空间重构, 物理学报, 1997, 46(7), 1290-1299.
- [6] 袁坚, 肖先赐, 淹没在噪声中的混沌信号的最大李亚普诺夫指数的提取, 电子学报, 1997, 25(10), 134-139.
- [7] N. H. Packard, J. P. Crutchfield, J. D. Farmer, R. S. Shaw, Geometry from a time series, Phys. Rev. Lett., 1980, 45(9), 712-716.
- [8] J. P. Eckmann, D. Ruelle, Fundamental limitations for estimating dimensions and Lyapunov exponents in dynamic systems, Physica D, 1992, 56, 185-189.
- [9] J. Theiler, Spurious dimension from correlation algorithms applied to limited time-series data, Phys. Rev. A, 1986, 34(3), 2427-2432.

- [10] M. T. Rosenstein, J. J. Collins, C. J. D. Luca, A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets, *Physica D*, 1993, 65, 117–123.
- [11] P. Grassberger, I. Procaccia, Measuring the strangeness attractors, *Phys. Rev. Lett.*, 1983, 50(5), 346–349.
- [12] 肖先赐, 混沌信号处理, 电子对抗, 2002, 83(2), 20–30.
- [13] G. Sugihara, R. M. May, Nonlinear forecasting as a way of distinguishing chaos from measure error in time series, *Phys. Rev. Lett.*, 1990, 64(9), 734–741.

CHAOTIC PECULIARITIES OF HF CODE IN HF COMMUNICATION AND FREQUENCY AGILE RADAR

Gan Jianchao* ** Xiao Xianci*

*(Dept. of Electron. Eng., UEST of China, Chengdu 610054, China)

**(National Electronic Warfare Laboratory, Chengdu 610036, China)

Abstract This paper illustrates that Hopping Frequency (HF) communication and frequency agile radar have chaotic peculiarities, and are chaotic phenomena, with computing singular attractor and their correlative dimensions and Lyapunov exponents from simulation. It has important significance to recognizing HF communication and frequency agile radar on theory and essence.

Key words Hopping Frequency (HF), Chaos, Singular Attractor, Lyapunov exponents, Correlative dimensions

甘建超: 男, 1968 生, 博士生, 主要研究方向是混沌信号处理, 小波变换及其应用, 现代阵列信号处理.

肖先赐: 男, 1933 生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向是混沌信号处理, 信号谱估计, 现代阵列信号处理.