

空中目标信号相空间重构方法研究

黄 喆¹ 盛会平² 徐建平²

(海军驻长春地区军事代表室¹, 长春 130033; 中国人民解放军 91640 部队², 湛江 524064)

摘 要 为提取空中目标辐射噪声非线性和混沌特征, 需要对目标信号作非线性时间序列分析, 其第一步则是相空间的重构, 基于 Takens 定理进行相空间重构前必须先确定重构相空间的时滞和嵌入维数两个重要参数。分别采用互信息方法确定重构最佳时延和关联积分法确定重构嵌入维数。分别以经典混沌信号和实测目标噪声数据为研究对象进行计算仿真, 结果证明了该方法选择地参数进行相空间重构的有效性与准确性, 重构的相空间能很好反应原混沌系统的特性, 为下一步分析提取目标非线性特征奠定了良好的基础。

关键词 航空目标 相空间重构 时滞 嵌入维

中图分类号 TN957. 53; **文献标志码** A

随着非线性科学的不断发展, 空中目标噪声的非线性特征提取技术引起人们的极大关注。噪声类信号的非线性特征提取越来越受到人们的重视, 在非线形处理中, 相空间重构是解释时间序列数据内在本质特征的有效手段, 是非线性时间序列分析的重要基础。由于通常测得混沌时间序列都是标量时间序列, 而标量序列本身不能呈现出多维的相空间模型。因此必须使用某种方法来展开这个多维结构, 构造一个辅助的相空间。相空间重构的基本原理是 Takens. F 和 R. Mane 的延迟嵌入定理^[1,2], 它建立了观测信号系统时间波动和动力系统空间特征之间的桥梁。

在重构相空间中, 时滞 τ 和嵌入维数 m 的选取具有十分重要的意义, 同时这种选取也是很困难的。关于嵌入维数 m 和时间延迟 τ 的选择, 目前主要有两种观点: 第一种认为 m 和 τ 的选取相互独立, 这种情况下, 对于最小嵌入维数 m 的选取, 要首先计算系统的分形维数 D , m 取满足 $m \geq 2D + 1$ 条件下的整数, 目前主要有以下几种方法: 自相关函数法, G-P 算法, 伪最邻近点法等来选择最小嵌

入维数。以上各种放大, 或者是在预先假定一个合适的 τ 值的情况下求 m ; 或是在假定一个合适的 m 的情况下求 τ 。第二种观点认为 m 和 τ 是相关联的, 相应的联合算法主要有延迟时间窗口法, C-C 法, 嵌入维自动算法等^[3]。本文正对空中目标噪声信号干扰性强, 不平稳性等特点, 采用平均互信息法求取相空间重构时滞参数, 采用关联积分法求得最小嵌入维, 仿真结果证明了方法的有效性, 为空中目标信号非线性特征提取和目标识别提供了前期工作。

1 相空间的引入

相空间重构是单变量的数据映射到多维空间上的一个矢量点, 由单变量重构一个相空间, 重构相空间上的矢量点表现出具有与原真实空间相同的特性。这种非线性处理方法在复杂系统故障诊断、预测预报中得到了很好的应用^[4,5], 本文将此方法引入到目标噪声时间序列分析中检验其适用性。

相空间重构的基本原理是 Takens. F 和 R. Mane 的延迟嵌入定理, 假设时间序列为 $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, 相空间重构轨迹为:

$$X = [X_1, X_2, \dots, X_K] \quad (1)$$

式(1)中 $K = N - (m - 1)\tau$, τ 为时间延迟, m 为嵌入

2011年6月2日收到

第一作者简介: 黄 喆(1984—), 男, 天津人, 助理工程师, 研究方向: 信号处理, 时间序列分析。

维数,只要 $m \geq 2d + 1$,动力系统的几何结构可以完全打开,其中 d 是系统吸引子的分数维数, τ 是正整数,称为延迟时间间隔。 $X_i = (x_i, x_{i+\tau}, \dots, x_{i+(m-1)\tau})^T$ 称为嵌入空间状态矢量。嵌入维数 m 和时间延迟 τ 的选择是关键,也是比较困难的,正确选择参数 m 和 τ ,才能准确重构反应原动力系统特征的相空间^[6]。

2 目标噪声相空间重构时滞的选择

平均互信息方法是估计相空间重构时间延迟的一种有效方法,它在相空间重构中有广泛的应用。设有两个离散的信息系统 S 和 Q , S 系统由事件 $\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 构成,相应的事件发生概率为 $P_s(s_i), i = 1, 2, \dots, n$, Q 系统由事件 $\{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ 构成,相应的事件发生概率为 $P_q(q_j), j = 1, 2, \dots, n$ 。两个系统经过测量得到的平均信息称为信息流,表示式如下:

$$H(S) = - \sum_{i=1}^n P_s(s_i) \lg_2 P_s(s_i) \quad (2)$$

$$H(Q) = - \sum_{j=1}^n P_q(q_j) \lg_2 P_q(q_j) \quad (3)$$

式中 $P_s(s_i)$ 表示事件 s_i 出现在 S 区域的概率,同样 $P_q(q_j)$ 表示事件 q_j 出现在区域 Q 的概率。

假定 S 的条件下,由系统 Q 的信息表示系统 S 和 Q 的互信息,为

$$I(Q, S) = H(Q) - H(Q|S) \quad (4)$$

式(4)中

$$H(Q|S) = - \sum_j [p_{sq}(s_i, q_j)/p_s(s_i)] \times \lg_2 [p_{sq}(s_i, q_j)/p_s(s_i)] \quad (5)$$

从而

$$I(Q, S) = \sum_i \sum_j p_{sq}(s_i, q_j) \lg_2 [p_{sq}(s_i, q_j)/p_s(s_i)] \quad (6)$$

式(6)中 $P_{sq}(s_i, q_j)$ 表示事件 s_i 和 q_j 的联合分布概率。定义 $[s, q] = [x(t), x(t + \tau)]$, s 代表时间序列 $x(t)$, q 代表延迟时间序列 $x(t + \tau)$, τ 表示时间延迟,从而 $I(Q, S)$ 成为以时间延迟 τ 为自变量的函数,把它写作 $I(\tau)$ 。在系统 S 也即 $x(t)$ 给定的情况

下, $I(\tau)$ 表示系统 Q 也即 $x(t + \tau)$ 的值的取向, $I(\tau) = 0$ 则 $x(t + \tau)$ 将完全不可预测,即是 $x(t), x(t + \tau)$ 相互独立完全不相关。由此分析, $I(\tau)$ 的最小值的取值能最大程度地让 $x(t)$ 和 $x(t + \tau)$ 不相关,因此, $I(\tau)$ 取最小值时的横坐标所指的时间延迟 τ 可用作重构相空间的最佳时间延迟。

3 目标噪声相空间重构嵌入维的确定

关于嵌入维数, F. Takens 定理从理论上证明了当 $m \geq 2d + 1$ 时可获得一个吸引子的嵌入,其中 d 时吸引子的分形维数,但这只是一个充分条件,对观测时间序列选择 m 没有帮助。实际工程应用中,一般情况下,缺乏对系统动力维数的先验知识,所以对实际系统的嵌入维数 m 的选择比较困难,本文利用关联积分法来估计和确定嵌入维。

任意给定阈值 $r > 0$, 检查相空间中有多少个点 x_i 和 x_j 之间的距离小于 r , 距离小于 r 的点对在一切点对中所占的比例称为关联积分,为:

$$C_N(r) = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N H(r - \|x_i - x_j\|) \quad (7)$$

式(7)中 $H(\cdot)$ 表示 Heavside 函数。即

$$H(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases} \quad (8)$$

选取适当的阈值 r , 定义关联维数近似值为式(9)。

$$D = \frac{\ln C_m(r)}{\ln r} \quad (9)$$

给出 m 的最大可能值 $m_{\max}$, 然后从 1 开始增加, 每次增加 1, 逐渐增加到 $m_{\max}$ 。给定各个 m 值观察关联积分曲线, 当关联积分曲线的斜率 D 不再随着 m 值的增加而变化时最小 m 值即是所求的最小嵌入维数, 该最小嵌入维数为能容纳该系统想轨迹最小重构相空间维数。

4 仿真试验及结果分析

仿真试验首先以 Lorenz 混沌系统为考察对象, 验证本文相空间重构方法的有效性。Lorenz 混沌信

号表达式为式(10)。

$$\begin{cases} \mathrm{d}x/\mathrm{d}t = -\sigma x + \sigma y \\ \mathrm{d}y/\mathrm{d}t = -xz + rx - y \\ \mathrm{d}z/\mathrm{d}t = xy - bz \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中各量均为约化后的无量纲量, t 为无量纲时间; x,y,z 为系统变量; σ,r,b 为系统参量。用四阶 Runge-Kutta 法积分方程组,选择初始值 $[x,y,z] = [-1,0,1]$,参数值 $[\sigma,r,b] = [10,28,8/3]$,积分步长 $h = 0.01$,积分区间为 $[0,1\,000]$ 。取 x 分量为例,采用互信息法得到其互信息曲线如图 1(a)所示,取第一个极小值点所对应的时间延迟 τ 作为最佳重构时间延迟,即 $\tau = 17$ 。为保证数据的平稳性,忽略前 2 000 点,取数据长度为 1 000 点,计算其关联积分曲线 $\ln C_m(r) \sim \ln r$ 关系曲线如图 1(b)所示,从上到下分别代表嵌入维数 m 从 1 至 9,估计出其关联维数值为 $D = 1.625$,结果与其理论值相同,按 Takens 定理中求嵌入维的充分条件 $m \geq 2d + 1$,那么嵌入维数为 $m = 5$,然而从 $\ln C_m(r) \sim \ln r$ 关系曲线看出,在 $m \geq 3,D$ 不再增大且接近不变,表明最小嵌入维数为 $m = 3$,即此吸引子刚好可以无交点低嵌入到 3 维欧几里得空间。

为检验算法效果,采用不同参数对 Lorenz 吸引子 x 分量作相空间重构,重构相图和三维吸引子图如图 2 所示。由仿真重构轨迹可以看出,(a)通过本文算法得到的最佳参数下进行重构,吸引子展开效果比较理想,吸引子得到完全展开,即吸引子在相空间沿各个方向上的扩张应该大致相同。作为参照对比,区分效果,图 1-(b)、(c)分别在较小时延和较大时延下进行的重构,或是没有完全展开,丢失部分有用信息,或过于展开,出现冗余与折叠。通过对比说明了本文方法确定的重构参数进行相空间重构的有效性与准确性。

通过以上分析,最后仿真试验以实测空中目标噪声数据为研究对象,数据长度取 1 024 点,采样频率 51.2 kHz,目标辐射噪声原始数据时域波形图如图 3 所示,对其采用平均互信息法取重构相空间时滞计算如图 4 所示,取第一个极小值点所对应的时间延迟 τ 作为最佳重构时间延迟得 $\tau = 9$ 。采用关

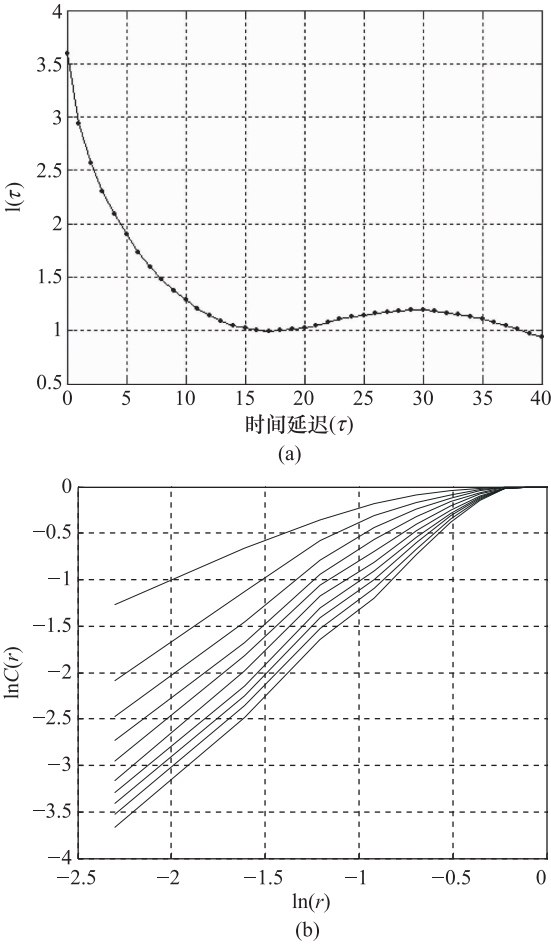


图 1 Lorenz 信号 x 分量互信息曲线和关联积分曲线

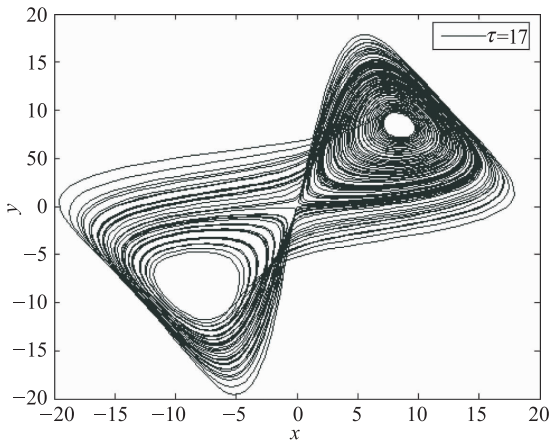


图 2 Lorenz 吸引子 x 分量相空间重构轨迹

联积分法求得 $\ln C_m(r) \sim \ln r$ 关系如图 5 所示,从上到下代表嵌入维数 m 从 1 至 20 取值,当 $m = 5$ 时,曲线斜率不再随 m 的增大而增大,所以最佳嵌入维

$m=5$ 。以此参数重构其相空间得到平面相图如图 6 所示,吸引子得到充分展开,且保留了原系统的特性。

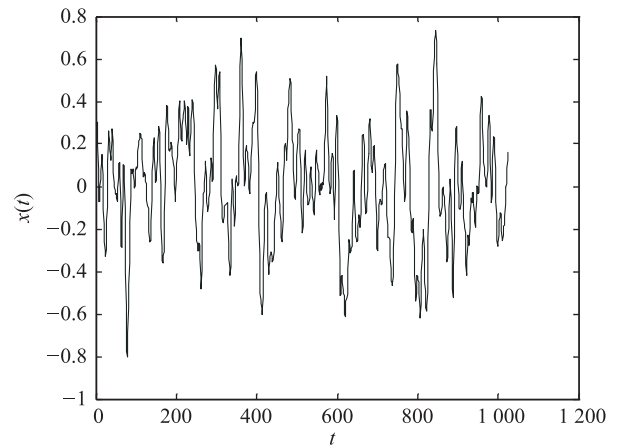


图3 目标信号时域波形

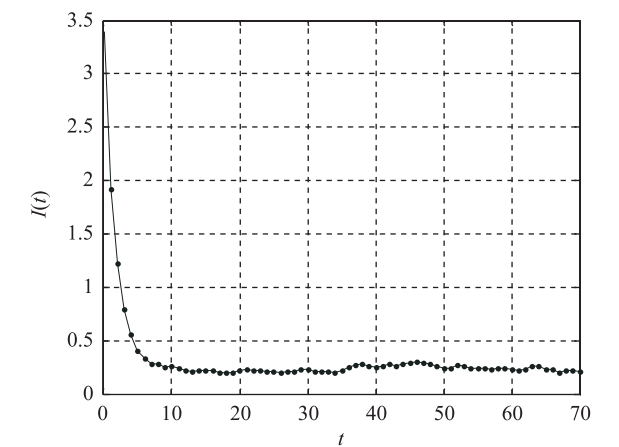


图4 互信息曲线时滞选取

5 结论

相空间重构时滞和嵌入维数的有效选择是相空间重构的关键和难点,也是利用非线性理论进行时间序列分析和特征提取的基础。本文在 Takens 定理的基础上,采用互信息法和关联积分法确定相空间重构参数,对目标实测数据进行仿真验证了算法的有效性和准确性。同时,算法具有实现简单,计算量小的特点,具有很好的实用性,这将为下一步采用非线性方法分析空中目标辐射噪声序列并

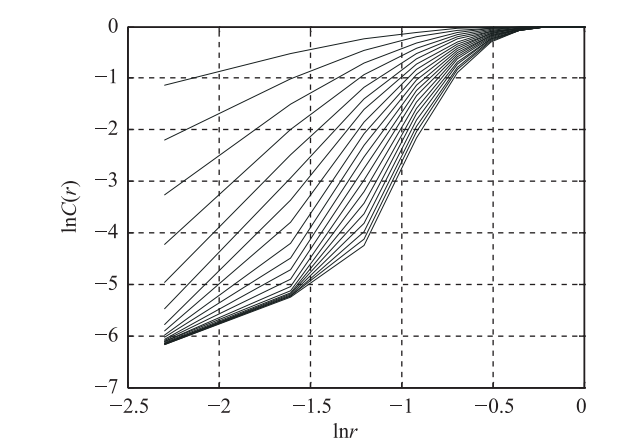


图5 关联积分曲线

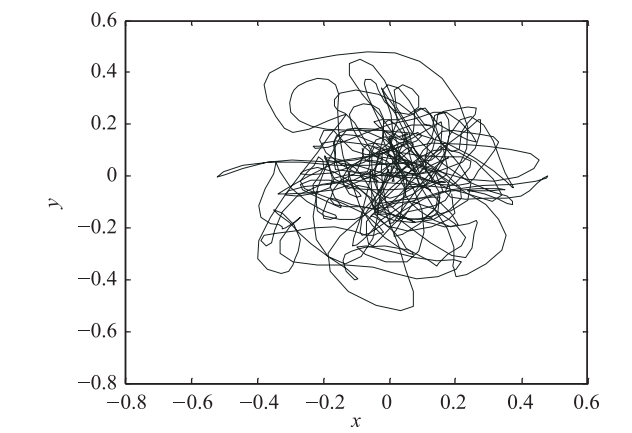


图6 重构相图

提取其非线性特征作分类识别打下良好的基础。

参 考 文 献

1 Takens F. Detecting strange attractors in turbulence. In: Dynamical Systems and Turbulence. Berlin: Springer-Verlag, 1981:366—381

2 Mane R. On the dimension of the compact invariant sets of certain nonlinear maps. In: Rand D, Young L S, editors. Dynamical systems and turbulence. Warwick, 1981; 898: 230

3 Lu Z B, Cai Z M. Determination of embedding parameters for phase space reconstruction based on improved C-C method. Journal of System Simulation, 2007; 19(11): 2527—2929

4 江龙平,徐可君,唐有才.基于分形维数的转子—机匣系统故障诊断研究.机械强度,2009;31(4):532—536

5 张玉梅,曲仕茹,温凯歌.交通流量的混沌特性分析及预测模型研究.土木工程学报,2009;42(1):119—123

6 王海燕,卢 山.非线性时间序列分析及其应用.北京科学出版社,2006

Study on Parameters Selection for Phase Space Reconstruction of Aerial Target

HUANG Zhe¹, SHENG Hui-ping², XU Jian-ping²

(Naval Military Representative Office in Changchun¹, Changchun 130033, P. R. China;

91640 Unit, the People's Liberation Army of China², Zhanjiang 524064, P. R. China)

[Abstract] For extracting the nonlinear and chaotic features of aerial target, nonlinear time series analysis was considered for the target signal, and the first step was phase space reconstruction. Selection of the optimal delay time and embedding dimension parameters was the key based on Takens theorem. Mutual information method and correlation integral method were presented to get the two optimal parameters. Take typical chaotic signal and measured target noise data as study objects, simulation results show that the reconstructed phase space is accurate and effective based on the selected parameters from this method. It can response characteristics of the original chaotic system effectively, and makes a good preparation for the next study of nonlinear features extraction for target signal.

[Key words] aerial target phase space reconstruction delay time embedding dimension

(上接第 6349 页)

Study on the Reasonable Layout of Shenzhen Mobile Communication Base Station Selected in the Specific Planning Environmental Impact Assessment

ZHUANG Yi-xuan^{1,2}, QI Yue-kun²

(Chongqing Environmental Engineering Design and Research Co., Ltd¹, Chongqing 400000, P. R. China ;

Shenzhen-Hongkong Insitution of Industry, Education & Research Environmental Enginnering Technique Co. Ltd², Shenzhen 518055, P. R. China)

[Abstract] The electromagnetic radiation predicting model is used to estimate the radiation level and compliance distant of single antenna with different mode and different set frequency, also the radiation level and compliance distant of co-existence modes provided by operators. And the maximum compliance distance (15 m) of single 2G and 3G style like as the minimum protection distance, while compliance distance (30 m) with three operators using the same address like as the maximum protection distance. Meanwhile, a method on classifying a suitable base station was build up. The results indicate that the method can directly divide different areas among suitable and unsuitable building area, and intermediate areas for the planning block, and this could provide reasonable criteria for the base station layout.

[Key words] base station radiation layout