

舰船辐射噪声的分段自仿射 IFS 模型

陈向东 高翔 陆佶人

(东南大学无线电工程系, 南京 210018)

摘要 本文根据舰船辐射噪声具有连续不可导和非平稳的特性, 建立了分段自仿射 IFS(Iterated Function System 迭代函数系统)模型。提取出 IFS 参数并计算出 IFS 分形维数。结果表明: 1 在一定的压缩比下, 由 IFS 参数所恢复的信号具有较高的信噪比。2 两类不同目标的 IFS 分形维数具有较好的离散度。本文为水声目标的分类与识别提供了新的特征参数。

关键词 非线性, 分形, 自仿射, 目标识别, 参数提取

Self-affine iterated function system model of ship radiated noise

CHEN Xiangdong GAO Xiang LU Jiren

(Radio Engineering Department, Southeast University Nanjing, 210018)

Abstract In this paper, the self-affine iterated function system (IFS) model of ship radiated noise is established according to the continuous, non-derivative and non-stationary characteristics of the temporal signal of ship radiated noise. Based on the model, the IFS fractal dimension is extracted. The experiments show that: 1. Under certain compression ratio, the reconstructed signal from IFS parameters has the higher SNR value. 2. The fractal dimension of IFS is different referring to the two kinds of ship targets. A new characteristic parameter is provided for the classification and recognition of underwater acoustic targets.

Key words non-linear, fractal, self-affine, target recognition, parameter extraction

1 引言

非线性特性研究是当前智能信息处理研究的重要新课题之一。近年来人们越来越多地运用如混沌、分形等非线性处理方法来分析时间序列, 并提取其特征参数^[1]。1975 年 Mandelbrot 出版的专著《分形、机遇及维数》标志着分形理论的诞生。目前, 在图象压缩^[2]、语音信号处理等领域^[3], 分形理论已得到了广泛的应用。分形具有比例自相似(自仿射)的特性, 即在不同的尺度下具有相

似的几何特性, 分形信号的显著特点是连续不可导和非平稳。到目前为止, 在研究、构造一大类存在于人为的或自然的具有比例自相似的集合中, IFS 是最为成功的系统。

对时域序列进行拟合及特征提取是信号处理的一个重要任务。传统的方法主要有多项式和 ARM R 模型拟合。多项式拟合的值由多项式的输出值表示, 多项式的阶数预先给定, 而多项式的系数通过计算样本值与多项式输出值的最小方差而得到。ARM R 模型则以用脉冲或白噪声为输入的滤波器的输出值来表示拟合值。滤波器的系数通过计算

第一作者: 陈向东, 男, 1967 年 1 月生, 博士研究生

收稿日期: 1998-10-27; 修回日期: 98-12-15

滤波器的输出与样本的最小方差而得出。多项式拟合适于变化缓慢的时间序列, ARMR 模型适于平稳的随机序列^[4]。当对复杂的连续不可导和非平稳时间序列, 如舰船辐射噪声进行建模时, 传统的方法就有一定的局限性。分段自仿射 IFS 模型恰好能克服传统模型的这些缺点, 它利用数据序列本身进行插值, 对于非平稳的时间序列具有较好的拟合信噪比。

本文根据舰船辐射噪声的复杂、非平稳和连续不可导的特性, 建立了分段自仿射 IFS 模型, 提取出 IFS 参数并计算出 IFS 分形维数。实验结果表明: 舰船辐射噪声的分段自仿射 IFS 模型能较好地拟合原始数据, 两类目标的 IFS 分形维数具有较好的可分性。IFS 分形维数为水声目标分类识别提供了一种新的特征参数。本文所提出的方法简单、有效, 易于实现。

2 分段自仿射 IFS 分形插值

2.1 IFS 的基本原理与拼贴定理

2.1.1 IFS 的定义

在一个具有距离测度为 h 的完备的距离空间 X 中, 存在一个有限的收缩映射 $\{w_i: X \rightarrow X, i = 1, 2, \dots, M\}$ 。每个 w_i 通常为具有收缩因子 s_i 的自仿射变换且满足:

$$h(w_i(x), w_i(y)) \leq s_i h(x, y) \quad (1)$$

$x, y \in X$ 且 $0 < s_i < 1$

IFS 的核心为自仿射变换 w_i , 一般 IFS 的收缩仿射变换 w_i 可用下式表示:

$$\left\{ \begin{aligned} X \mid w_i \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e \\ f \end{pmatrix} ; \quad i = 1, 2, \dots, M \end{aligned} \right. \quad (2)$$

从(2)式中可看出收缩仿射变换 w_i 相当于一种最为广泛的线性变换, 它可以完成旋转、缩放、平移等操作。

2.1.2 拼贴定理

设 (X, h) 为一完备的距离空间, 其中 h

为距离测度。令 H 为给定的函数且 > 0 , 若选择一个具有 $M(w_1, w_2, \dots, w_M)$ 个映射的 IFS, 其收缩因子为 $s = \max\{s_i, i = 1, 2, \dots, M\}$ 。使下式成立:

$$h(H, \bigcup_{i=1}^M w_i(H)) \leq s h(H, H) \quad (3)$$

那么, $h(H, G) = \frac{1}{1-s}$, G 为 IFS 的吸引子。

拼贴定理给出了在不需计算吸引的情况下测试 IFS 的方法。从中可以看出, 如果试图找一个 IFS, 使其吸引子与给定的函数 H 相似或相近, 我们必须在给定的空间中找一组收缩仿射变换, 使得由这些变换对原给定函数变换后的结果所组成的集合在 Hausdorff 距离下尽量地相近于原给定函数。这样就可以用映射参数来作为原函数的编码。

2.2 分段自仿射 IFS 参数估计方法^[5]

2.2.1 IFS 及其参数的估计

在进行分形内插时, 对于一给定的单值时间序列 $H = \{(u_n, v_n) \mid n = 0, \dots, N; u_n < v_n\}$ 和插值点 $\{(x_i, y_i) \mid i = 0, \dots, M; M < N\}$, 其中 u_n 为采样点, v_n 为与采样点 u_n 相对应的采样值, 插值点取自数据序列本身且 $(x_0, y_0) = (u_0, v_0)$, $(x_M, y_M) = (u_N, v_N)$ 。则空间 X 为 (x, y) 平面, 内插函数由下面 M 个自仿射映射组成:

$$w_i \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_i & 0 \\ b_i & d_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_i \\ f_i \end{pmatrix} \quad (5)$$

$i = 1, 2, \dots, M$

注意与(2)式相比, (5)式中 $b_i = 0$, 这就意味着原来垂直的线段经过变换后仍然为垂直的线段。此外 d_i 为收缩因子, 为满足映射收敛 d_i 应在 $(-1, 1)$ 区间内。每个映射将映射区间的端点 (x_0, y_0) 和 (x_M, y_M) 映射为相邻的两个内插点, 即:

$$w_i \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{i-1} \\ y_{i-1} \end{pmatrix} ; \quad w_i \begin{pmatrix} x_M \\ y_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} \quad (6)$$

$i = 1, 2, \dots, M$

由(6)式可以列出下面 4 个方程:

$$a_i = \frac{x_i - x_{i-1}}{x_M - x_0} \quad (7)$$

$$e_i = \frac{x_M x_{i-1} - x_0 x_i}{x_M - x_0} \quad (8)$$

$$c_i = \frac{y_i - y_{i-1}}{x_M - x_0} - d_i \frac{y_M - y_0}{x_M - x_0} \quad (9)$$

$$f_i = \frac{x_M y_{i-1} - x_0 y_i}{x_M - x_0} - d_i \frac{x_M y_0 - x_0 y_M}{x_M - x_0} \quad (10)$$

当收缩因子 d_i 求出后, 就可以根据式(7)~(10)求出其它映射参数。收缩因子 d_i 可以通过计算映射函数值与原函数值的均方误差求取, 公式如下:

$$d_i = \sqrt{\frac{\sum_{n=x_{i-1}}^{x_i} B_n A_n \sum_{n=x_{i-1}}^{x_i} A_n^2}{\sum_{n=x_{i-1}}^{x_i} B_n A_n}} \quad (11)$$

$$\text{其中 } A_n = v_n - [p_n v_0 + (1 - p_n) v_N] \quad (12)$$

$$B_n = v_m - [p_n y_{i-1} + (1 - p_n) y_i] \quad (13)$$

$$m = \text{int}(a_n + e) \quad (14)$$

$$p_n = (u_N - n) / (u_N - u_0) \quad (15)$$

由式(7)~(11)可知, 当插值区间端点 (x_0, y_0) 和 (x_M, y_M) 及插值点 $\{(x_i, y_i) \mid i = 0, \dots, M\}$ 确定后, 就可求出映射函数 $\{w_i \mid i = 1, \dots, M\}$ 。由映射函数 w_i 和插值点即可求出原函数的插值拟合函数 H , $H = \sum_{i=1}^M w_i(H)$ 。

2.2.2 分段自仿射 IFS 参数估计算法

实际的信号, 如舰船辐射噪声信号仅在某个段内存在自仿射的特性, 因而对整个数据段进行 IFS 自仿射运算并估计 IFS 参数将会存在较大的误差。基于 IFS 参数的估计方法和信号的段内自仿射特性, 我们建立了舰船辐射噪声信号的分段自仿射 IFS 模型。

设时间序列为 $S(n) (n = 1, 2, \dots, N)$ 。首先将 $S(n)$ 分为 M_1 段, 令 $N/M_1 =$ 为整数, 取内插点为 $Y(m) = S(* (m-1) + 1) (m = 1, 2, \dots, M_1)$ 。则对于第 $j (j = 1, 2, \dots, M_1)$ 段的内插端点为 $(x_{j,1}, x_{j,2})$ 。其次将 $S(n)$ 分为 M 个区间作为映射区间, 映射区间长度为 $\Delta x = N/M$ 为整数且 $\Delta x \ll$ 。分段自仿射 IFS 参数的估计就是寻求 M_1 个

映射函数 $\{w_i \mid i = 1, \dots, M_1\}$ 以及与每个映射函数相对应的映射区间。与自仿射 IFS 模型相比, 分段自仿射 IFS 模型要从 M 个映射区间中找出一个误差最小的映射区间。

估计分段自仿射 IFS 参数的算法如下:
I 选择段长度 Δx 和映射区间长度 Δy 且 $\Delta x \ll \Delta y$ 。

II i 从 1 到 M , 做:

a) j 从 1 到 M_1 , 做:

(1) 计算与第 i 区间第 j 个段相联系的收缩因子 d 。

(2) 若 $|d| \leq 1$, 去第(6)步。

(3) 计算出与第 i 区间第 j 个段相联系的 $w \begin{cases} x \\ y \end{cases}$ 。

(4) 对第 j 个段内的点应用 $w \begin{cases} x \\ y \end{cases}$ 并将映其为 $H: H = w(H) \mid x \in [x_{j,1}, x_{j,2}]$ 将映

(5) 计算位于区间 $[x_{i-1}, x_{i-2}]$ 的映射值 H 和函数值之间的距离 h_j 。记为:

$$h_j = h(H, H \mid x \in [x_{i-1}, x_{i-2}])$$

(6) 下一个 j

b) 找出使 h_j 最小的 j

c) 将第 i 区间第 j 个段的映射参数存储起来。

d) 下一个 i

2.3 分段自仿射 IFS 分形维数的提取^[6]

在用 IFS 分形插值且 IFS 具有公式(5)的形式时, 若 $\sum_{i=1}^M |d_i| > 1$, 插值点不在同一直线上, 则插值函数图形的分形维数 D 满足:

$$\sum_{i=1}^M |d_i| a_i^{(D-1)} = 1$$

否则 $D = 1$ (16)

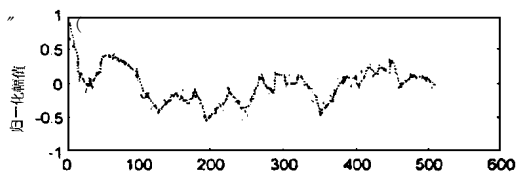


图 1 (a) 某水上目标(横轴为采样序号)

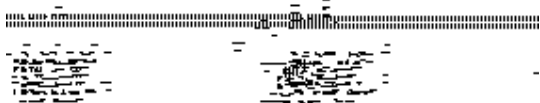


图1 (b) 某水下目标(横轴为采样序号)

图1为归一化后的两类舰船辐射噪声信号波形及用分段自仿射IFS算法进行插值后的结果。其中实线为原始数据,虚线为插值后拟合的数据。

3 实验结果

我们对海上实录舰船辐射噪声建立了分段自仿射IFS模型。舰船辐射噪声信号的采样率25kHz,数据长度16384。图1为用分段自仿射IFS算法对归一化后的两类舰船辐射噪声信号进行插值后的结果。其中实线为原始数据,虚线为插值后合成的数据。表1给出了插值参数以及压缩比、信噪比、IFS分形维数等结果。对于长度为 L 、段长度为 l 的数据,插值点有 $(L/l)+1$ 个,每段所需的参数为收缩比 d 和所选区间两个参数。因此压缩比计算公式为 $L/((L/l)*3)=l/3$ 。

为了进一步检验分段自仿射IFS分形维数的性质,我们取9个水下目标、10个水上目标,每个目标各取19个样本(每个样本长度16384,采样率25kHz)进行IFS分形维数的计算,将每个目标的IFS分形维数排序后结果表示在图2,其中,实线为水下目标,虚线为水上目标。从图可见IFS分形维数对于两类目标有较好的可分性。水下目标与水上目标相比有较大的IFS分形维数。

表1与图1相对应的分段自仿射IFS算法计算参数和实验结果

目标类型	段长度	区间长度	数据压缩比	信噪比(dB)	IFS分形维数
某水上目标	16	64	5 33 1	12 36	1 21
某水下目标	16	64	5 33 1	13 31	1 50

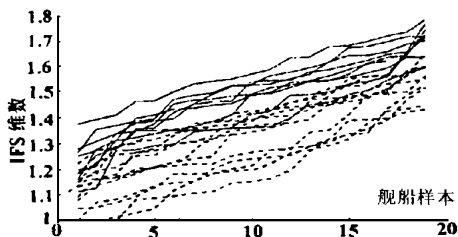


图2 计算IFS分形维数排序后所得的结果

4 结束语

本文以分形理论为基础,根据舰船辐射噪声的复杂、非平稳和连续不可导的特性,建立了分段自仿射IFS模型。该模型有别于传统多项式拟合和ARMR模型,能更好地表示原时间序列,有较高的拟合信噪比。从分段自仿射IFS模型所提取的IFS分形维数能作为有效的特征参数与目标的分类与识别。本文提出的非线性处理方法简单、有效,为水声目标特征提供了新的分析手段。

参考文献

- Henry D. I., Abarbanel, The analysis of observed chaotic data in physical system. Review of Modern Physics, 1993; 65(4): 1133~ 1388
- Jacquin A. E., Image coding based on a fractal theory of iterated contractive image transformation. IEEE Trans. Image Processing, 1992; 1: 18~ 30
- 韦岗. 混沌、分形理论与语音信号处理. 电子学报, 1996; 24(1): 34~ 39
- 杨叔子, 吴雅. 时间序列分析的工程应用. 华中理工大学出版社, 1994; 31~ 34
- D. S. Mazel, M. H. Hayes, . Using Iterated function system to model discrete sequences. IEEE Trans. Signal Processing, 1992; 40(7): 1724~ 1734
- 王东生, 曹磊. 混沌、分形及其应用, 1995; 144 ~ 145