

复杂电磁环境信号分形特性验证

董俊¹, 洪丽娜¹, 韩慧¹, 李兵²

(1. 电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 河南 洛阳 471003; 2. 军械工程学院, 石家庄 050003)

摘要: 为了证明复杂电磁环境信号是否具有分形特征, 根据分形的基本性质, 采用基于数学形态学的分形维数估计方法, 验证了电磁环境信号的标度不变性; 通过分析长程相关性与自相似性的关系, 推导 Hurst 指数验证分形自相似性的方法, 验证电磁环境信号的自相似性; 通过分析电磁环境信号局部分形特征, 验证了其多重分形特性。理论分析和仿真计算结果表明, 复杂电磁环境信号具有分形特征, 为利用分形理论研究复杂电磁环境奠定了基础。

关键词: 电磁环境; 信号处理; 分形; 标度不变性; 自相似性

中图分类号: TN97

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2015)05-0034-03

Validation of Complex Electromagnetic Environment Fractal Characteristics

DONG Jun¹, HONG Li-na¹, HAN Hui¹, LI Bing²

(1. State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, Luoyang 471003, China; 2. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In order to clarify whether the complex electromagnetic environment is of fractal characteristics or not, a fractal dimensional estimation method based on mathematics morphologic was applied to validate the scale invariance of the signal in electromagnetic environment according to the basic fractal property. Then, self similarity of the signal in the electromagnetic environment was validated by analyzing the relationship between long range dependence and self similarity, and calculating the Hurst index. The multifractal character was also validated by analyzing the partial fractal character of the signal in the electromagnetic environment. Theoretical analysis and simulation results proved that the signal in complex electromagnetic environment possesses fractal characteristic. It lays a foundation for studying complex electromagnetic environment by using fractal theory.

Key words: electromagnetic environment; signal processing; fractal; scale invariance; self similarity

0 引言

复杂电磁环境作为一种客观存在的非规则物理现象, 广泛存在于人类的生产生活中, 它不仅对电子、电器设备产生影响, 还会对人的身体健康构成威胁。因此, 为了提高电子信息设备在复杂电磁环境中的生存能力, 保证人员的身体健康, 探究电磁环境的本质特性已经成为一个紧迫的任务。

然而, 由于复杂电磁环境的无规则性和动态变化性, 采用传统的线性近似处理方法无法深入认识其非

线性特性。而分形理论能以新的观念和手段来处理这些复杂性和随机性的问题, 使人们在探索复杂电磁环境这种极为复杂的现象背后所存在的规律性时有了很好的理论工具。

近年来, 分形理论在信号处理领域展现出良好的应用前景, 是否具有分形特性, 是能否应用分形理论进行复杂电磁环境特性研究的前提。若对复杂电磁环境的内在特征信息进行精细描述和准确提取, 有必要对复杂电磁环境信号的分形特性进行分析和验证。

1 分形的基本性质

至今, 分形并没有一个严格的定义, 要直接证明一个事物是分形并不容易, 只能从某些性质上加以判断。

根据分形理论创始人 MANDELBROT B B 教授给

分形下的定义^[1]和 FALCONER K 对分形的描述^[2]可以得出,分形最突出的特点就是标度不变性(或无标度性)和自相似性,从形式上看,可能指几何形状,也可能指时间过程。

1.1 标度不变性

标度不变性是指在分形对象上任选一个局部区域对其进行放大或缩小,其具有形态特征、复杂程度、不规则性等均不发生变化的特性,即存在如下关系^[3]

$$N(\lambda r) = (\lambda r)^{-D} = \lambda^{-D} N(r) \quad (1)$$

式中: r 为观测尺度; λ 为尺度因子。

1.2 自相似性

分形的自相似性是指分形对象的局部经过放大后与整体相似的一种性质^[4]。自然界中存在的分形现象多是近似自相似或者统计自相似,它们的自相似性仅存在于具有标度不变性的一段区间范围内。因此,对于研究分形事物的特性来说,标度不变性和自相似性是统一的。

1.3 多重分形

在现实大多数物理现象中并不具有严格的自相似性,不是局域放大一定倍数后简单地和整体重合,而是具有比较复杂的表现形式,仅用单一的分形维数过于简单化,并不能完全揭示出经过复杂的非线性动力学演化过程而形成的结构,其局域条件也十分重要^[5]。

为了获得只用单一分形维数所不能描述的信息,需要引进另外的参量,这就是多重分形,也称为多标度分形,它是从系统的不同层次和特征出发来研究其最终的整体特征。多重分形所描述的参量信息比仅利用一维分形这样一个数字去描述复杂形状和现象更加准确和全面,能够对分形集的局部空间行为进行精细的描述。

2 复杂电磁环境信号标度不变性分析

对于事物标度不变性的证明,最直观的方法是在不同的观测尺度下计算其维数,看是否为恒定的分数维。分形维数的计算方法主要有盒维数法、豪斯道夫维数、关联维数等,但是这些方法在不同尺度时对不规则事物的覆盖并不稳定^[6]。因此,本文采用文献^[7]提出的基于数学形态学的分形维数估计方法,主要计算过程如下所述。

1) 设 f 为离散信号, g 为单位结构元素,定义尺度 ε 下的结构元素为

$$\varepsilon g = \underbrace{g \oplus g \oplus \dots \oplus g}_{\varepsilon \text{次}} \quad (2)$$

2) 定义信号在尺度 ε 下的形态覆盖面积 $A_g(\varepsilon)$ 为

$$A_g(\varepsilon) = \sum_{n=1}^N [f \oplus \varepsilon g - f \ominus \varepsilon g](n) \quad (3)$$

当 $\varepsilon \rightarrow 0$ 时,有

$$\lg \frac{A_g(\varepsilon)}{\varepsilon^2} \cong D_M \lg \frac{1}{\varepsilon} + \lg c \quad (4)$$

3) 采用线性最小二乘拟合数据点对 $\left\{ \lg A_g(\varepsilon) / \varepsilon^2, \lg 1/\varepsilon \right\}$, 其斜率即为信号的分形维数 D_M 。

基于上述方法,利用 Matlab 仿真产生 4 种不同复杂程度的电磁环境信号,其时域图形如图 1 所示。

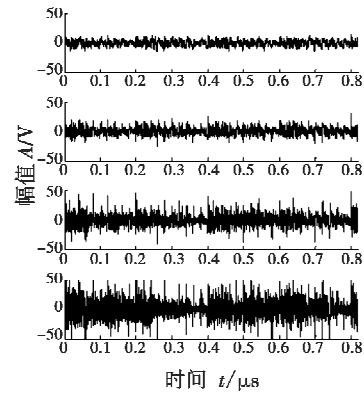


图1 4种复杂电磁环境信号时域图

Fig. 1 Time domain graph of EM signal with four types of complexity

根据上述步骤,采用不同尺度通过 Matlab 编程分别计算如图 1 所示的 4 种复杂程度的电磁环境信号数据,得到 4 组 $\left\{ \lg \frac{A_g(\varepsilon)}{\varepsilon^2}, \lg \frac{1}{\varepsilon} \right\}$ 的双对数关系,见图 2。

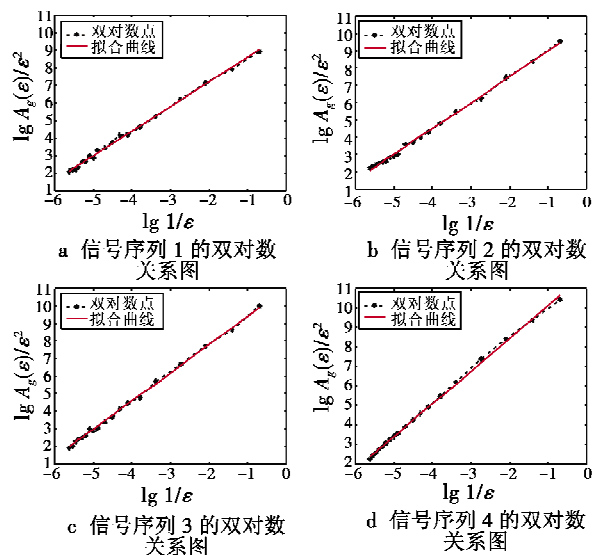


图2 4种复杂电磁环境信号双对数图

Fig. 2 Double logarithm graph of EM signal with four types of complexity

从图 2 可以看出,4 种不同复杂程度的电磁环境信号的双对数点基本在一条直线上,表明在一定尺度范围内,双对数的斜率大约是恒定的,也就是说,在此区间内通过改变标度 ε ,电磁环境信号具有大致上恒

定的分数维,从而证明电磁环境信号的标度不变性。

3 复杂电磁环境信号自相似性分析

根据分形的基本性质,分形最突出的特点就是在不同尺度下表现出的自相似性。本文将证明电磁环境信号是否具有自相似性。

3.1 自相似性验证方法

通常研究复杂电磁环境,是在所关注的某一个剖面上采集一定时间区间的电磁环境信号数据进行分析,因此可以将其看作一个离散的复杂时间随机序列,下文所指随机过程均为离散随机序列。

为了得到验证自相似随机序列的方法,首先提出一个与自相似随机序列有重要联系的参数——Hurst 指数。

文献[8]中详细地讨论了 Hurst 指数的意义和作用,并通过详细推理证明了 Hurst 指数可以用来衡量一个非线性随机序列是否具有自相似性。本文对电磁环境信号序列的自相似性验证将通过 Hurst 指数值的估计来实现。

3.2 复杂电磁环境信号自相似性验证

现有文献提出多种估计 Hurst 指数的方法,但是应用得比较广泛的方法是英国水文专家 HURST H E 于 1965 年首先提出的 R/S 分析法,基本思想是通过改变时间域上的观测尺度大小,在不同的观测尺度下研究分形事物的统计特性及其变化规律,并计算不同尺度下的 Hurst 指数的值,从而验证其是否具有分形特性^[9],具体步骤如下所述。

1) 将原始序列划分成若干子序列。合适选定某标度长度 n ,将原始序列 $\{y_t\}_{t=1}^T$ 划分成 M 个互不重叠的长度为 n 的子序列: $(y_1, y_2, \dots, y_n), (y_{n+1}, y_{n+2}, \dots, y_{2n}), \dots, (y_{(M-1)n+1}, y_{(M-1)n+2}, \dots, y_{Mn})$ 。其中, $M = [T/n]$, $[\cdot]$ 表示取整,下同。

2) 计算出与标度长度 n 所对应的标度统计量。首先计算出根据标度长度 n 所划分出的所有子序列的局部统计量 $LS_{n,m}$,然后利用所有局部统计量计算出标度长度 n 对应的标度统计量 SS_n ,此处标度统计量是所有局部统计量的平均值,即为 $SS_n = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M LS_{n,m}$ 。

3) 改变标度长度 n ,重复前面的步骤,这样得到一系列的标度长度 n 及其相应的标度统计量序列 SS_n 。

4) 若标度统计量序列与标度长度序列存在如下的标度关系: $SS_n \sim Cn^H$,其中, C 为某常数,则可以采用如下的双对数回归方式估计 H 指数

$$\lg SS_n = \lg C + H \lg n \quad (5)$$

R/S 分析法使用如下的局部统计量为

$$(R/S)_{n,m} = R_{n,m}/S_{n,m} \quad (6)$$

式中: $R_{n,m} = [\max_{1 \leq k \leq n} \sum_{t=1}^k (y_{t,m} - \bar{y}_{n,m}) - \min_{1 \leq k \leq n} \sum_{t=1}^k (y_{t,m} - \bar{y}_{n,m})]$,为第 m 个子样本的极差; $S_{n,m} = \left[\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_{t,m} - \bar{y}_{n,m})^2 \right]^{1/2}$,为第 m 个子样本的标准差; $\bar{y}_{n,m} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n y_{t,m}$,为第 m 个子样本的均值。

仍然以图 1 所示的 4 个电磁环境信号时间序列为例,基于 Matlab 编程实现 R/S 算法,分别对 4 种电磁环境信号序列估计 Hurst 指数,结果如表 1 所示。

表 1 4 种复杂程度电磁环境信号的 Hurst 指数

Table 1 Hurst index of EM signal with four types of complexity

电磁环境信号序列	1	2	3	4
Hurst 指数	0.7703	0.6372	0.5860	0.5631

由表 1 可以看出,4 种电磁环境信号的 H 指数均在 $1/2 < H < 1$ 范围,即表明电磁环境信号具有自相似性。

4 复杂电磁环境信号多重分形特性分析

为了能够更加精细地描述电磁环境信号局部特征,需要证明其具有多重分形特征。

非高斯性与长程相关性是时间信号序列具有多重分形特性的一个重要标志^[10-11]。电磁环境信号的长程相关性(与自相似性一致^[8])已经得到了证明。然而,电磁环境信号时间序列是一个构成复杂的随机序列,无法用表达式描述,从而无法检验非高斯性。因此本文根据多重分形的定义,通过分段拟合的方式求取信号在局部尺度下的分形维数。

设信号的尺度为 $\varepsilon = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_L]$,则定义在局部尺度 ε_i 下的局部分形维数的值为 $[\varepsilon_i, \varepsilon_{i+1}, \dots, \varepsilon_{i+w-1}]$ 窗内的最小二乘拟合值,其中, w 为窗的宽度值。从尺度 ε_1 依次移动窗的位置,可以得到 $L - w + 1$ 个分形维数值。

根据 2 节的计算方法,采用尺度为 $\varepsilon = [1, 2, 4, 8 : 8 : 128]$ 的结构元素对图 1 中第 4 个信号序列进行覆盖。选择局部窗的长度为 5,图 3 中给出了多重分形维数的局部尺度窗的示意图。

从图 3 可以看出,当改变电磁信号序列的时间尺度计算局部分形维数时,在尺度足够小的情况下得到的局部分形维数并不是一个很恒定的值,而是在一定范围内有所波动。由此可以证明,电磁环境信号并不具备严格的自相似性,其分形维数在局部尺度下是动态变化的,即具有多重分形特性。

(下转第 88 页)

参 考 文 献

- [1] 朱闻渊,尹家伟,蒋祺明. 新型航空电子系统总线互连技术发展综述[J]. 计算机工程,2011,37(s):398-402. (ZHU W Y, YIN J W, JIANG Q M. Development summary of new avionic system bus interconnection technology [J]. Computer Engineering, 2011, 37(s):398-402.)
- [2] 牛文生,王乐. 机载计算技术的新进展[J]. 航空科学技术,2012(4):1-4. (NIU W S, WANG L. Latest development of airborne computing technology [J]. Aeronautical Science & Technology, 2012(4):1-4.)
- [3] 周强,熊华钢. 新一代民机航空电子互连技术发展[J]. 电光与控制,2009,16(4):1-6. (ZHOU Q, XIONG H G. Development of the new generation civil avionic interconnection technology [J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(4):1-6.)
- [4] EVELEENS R L C. DO-297 Integrated Modular Avionics (IMA) development guidance and certification considerations[M]. Washington, DC:RTCA, 2006.
- [5] 刘帅,张喜民,郭鹏. TTE 通信技术在混合安全关键系统的应用[J]. 航空计算技术,2013,43(2):120-122. (LIU S, ZHANG X M, GUO P. Application of TTE communication technique in mixed safety criticality system [J]. Aeronautical Computing Technique, 2013, 43(2):120-122.)
- [6] SAE International. SAE AS6802 Time-Triggered Ethernet[Z]. The United States:SAE, 2011.
- [7] GE. TTEthernet—A powerful network solution for advanced integrated systems[Z]. GE Intelligent Platforms White Paper gft751a, 2010.
- [8] 刘晚春,李峭,何峰,等. 时间触发以太网同步及调度机制研究[J]. 航空计算技术,2011,41(4):123-127. (LIU W C, LI Q, HE F, et al. Research on Time-Triggered-Ethernet synchronization and scheduling mechanism [J]. Aeronautical Computing Technique, 2011, 41(4):123-127.)

(上接第 36 页)

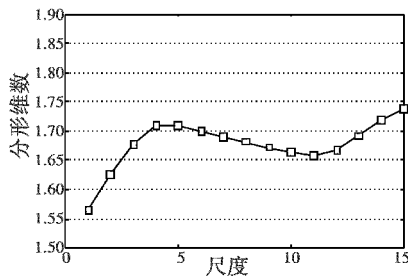


图 3 多重分形维数

Fig. 3 Multifractal dimensions of EM signal

5 结 束 语

分形理论为研究非线性复杂系统中的各种课题提供了新的理论和方法。为了证明分形理论能否应用于复杂电磁环境信号研究,根据分形的基本性质从标度不变性和自相似性两个方面验证了电磁环境信号的分形特征,并通过研究电磁环境信号局部分形特征,证明了其多重分形性。为应用分形理论研究复杂电磁环境的本质特征奠定了理论基础。

参 考 文 献

- [1] 朱华,姬翠翠. 分形理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2011. (ZHU H, JI C C. The fractal theory and its application [M]. Beijing: Science Press, 2011.)
- [2] 李水根,吴纪桃. 分形与小波[M]. 北京:科学出版社,2002. (LI S G, WU J T. Fractal and wavelet [M]. Beijing: Science Press, 2002.)
- [3] 鹿瑾,张剑英,牛光东,等. 煤矿瓦斯浓度时间序列的分形特性研究[J]. 微计算机信息,2010,26(7):213-215. (LU J, ZHANG J Y, NIU G D, et al. Study on fractal characters of gas concentration series [J]. Microcomputer Information, 2010, 26(7):213-215.)
- [4] 张济忠. 分形[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2011. (ZHANG J Z. Fractal [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.)
- [5] 张传忠,吴素琴,段田东,等. 数字调制信号多重分形特性分析[J]. 信息工程大学学报,2011,12(2):179-183. (ZHANG C Z, WU S Q, DUAN T D, et al. Multifractal characteristic analysis of digital modulation signal [J]. Journal of Information Engineering University, 2011, 12(2):179-183.)
- [6] CHAUDHURI B B, SARKAR N. Texture segmentation using fractal dimension [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995, 17(1):72-77.
- [7] MARAGOS P, SUN F K. Measuring the fractal dimension of signals: Morphological covers and iterative optimization [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(1):108-121.
- [8] 王艳琼. DNA 序列分形特性研究[D]. 重庆:重庆大学,2005. (WANG Y Q. Study on fractal characteristics of DNA sequence [D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.)
- [9] COX D R. Long-range dependence: A review in statistics: An appraisal [M]. Ames: Iowa State University Press, 1984:55-74.
- [10] KINSNER W, VINCENT C, CANNONS K, et al. Signal classification through multifractal analysis and complex domain neural networks [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetic, 2006, 36(2):196-203.
- [11] 杨娟,卞保民,闫振纲,等. 典型随机信号特征参数统计分布的分形特性[J]. 物理学报,2011,60(10):100506-1-100506-7. (YANG J, BIAN B M, YAN Z G, et al. Fractal characteristics of characteristic parameter statistical distributions of typical random signals [J]. Acta Phys. Sin., 2011, 60(10):100506-1-100506-7.)