

文章编号: 2095-4980(2014)03-0428-05

电磁环境分形特性分析与量化

董俊¹, 蒲秀英², 韩慧¹, 洪丽娜¹

(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. 电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003)

摘要: 为了解决传统电磁环境度量方法中指标提取主观因素多, 计算难度大等问题, 提出将分形理论应用于电磁环境度量指标计算的方法。首先证明了电磁环境的分形特征, 然后提出基于数学形态学的电磁环境分形维数计算方法, 并阐述了将电磁环境分形维数作为度量其复杂度指标的意义。对计算结果进行分析, 表明该方法能从时间和空间上为区分电磁环境的复杂程度提供多维的信息。

关键词: 电磁环境; 复杂度; 分形

中图分类号: TN806

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201403.0428

Fractal characteristics and quantification method of electromagnetic environment

DONG Jun¹, PU Xiu-ying², HAN Hui¹, HONG Li-na¹

(1. State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, Luoyang Henan 471003, China; 2. LEETC, Luoyang Henan 471003, China)

Abstract: A novel scale indicator calculation method is introduced based on fractal theory in order to solve the problems of too much subjectivity and great calculation difficulty in indicator extraction by using conventional electromagnetic environment measurement method. After demonstrating the fractal characteristics of the electromagnetic environment, the fractal dimension calculation method based on mathematical morphology is investigated, and then applied to calculating the electromagnetic environment complexity index. The calculation results indicate that this method can provide multidimensional information to distinguish the electromagnetic environment complexity in both space and time.

Key words: electromagnetic environment; complexity; fractal dimension

电磁环境是一种不规则的特殊自然现象, 它无法直观地感触却又无处不在。如何对电磁环境的复杂性进行定量化描述和评估, 是当前复杂电磁环境研究面临的重点和难点问题^[1]。然而由于电磁环境的不规则性和不可感知性, 研究其复杂性显得尤为困难。文献[2]选择了电磁信号强度、频谱占用度、电磁信号密度、背景信号强度、频率重合度以及电磁信号类型与样式来表示电磁环境的复杂性。文献[3]根据电子系统受电磁环境影响程度, 采用模糊分析法建立复杂度计算模型。文献[4-5]在文献[2]的基础上增加了异动信号率, 采用自适应神经模糊推理系统建立复杂度计算模型。目前的度量方法基本都是从时域、频域、空域和能量域上选取指标进行建模来计算复杂度值, 在指标选取和指标权重计算等方面存在较多的主观因素, 难免会忽视少数重要信号的影响。而且指标采集和计算过程复杂。为了克服传统度量方法指标选取存在的问题, 本文提出将研究自然界不规则现象的理论——分形理论用于电磁环境度量指标的计算。为电磁环境度量研究提供一种新的思路和方法。

1 分形理论原理

分形理论是非线性科学的一个重要分支, 主要研究的就是自然界和非线性系统中出现的不光滑和不规则的具有自相似性且没有特征长度的形状和现象。分形是指没有特征长度, 但具有一定意义下的自相似结构的总称。自相似性是分形事物最明显的特征, 它建立在块与整个集合是几何相似但尺度更小些的基础上^[6-7]。

分形维数是度量信号复杂度的重要参数。本文主要是研究分形维数在描述电磁环境信号复杂度特征方面的应用，采用了一种更加精确的分形维数的计算方法——基于数学形态学的分形维数计算方法。与传统的盒计数法把一维信号转化为二维图像进行网格划分不同，形态学分形维数的估计采用一维形态学覆盖，因此具有更高的计算效率，同时形态学操作不采用网格划分，不受信号的幅值范围和信号旋转的影响，估计结果更加稳定和精确。

数学形态学信号处理的基本思想是通过等价的移动改变信号的形态。这种转变主要通过信号与一种被定义为结构元素的对象之间的相互作用实现，基本的算子包括膨胀和腐蚀。2 种算子定义如下^[8-9]：

$$(f \oplus g)(n) = \max_{m \in G} \{f(n-m) + g(m)\} \tag{1}$$

$$(f \ominus g)(n) = \min_{m \in G} \{f(n+m) - g(m)\} \tag{2}$$

式中： $f(n)$ 是一维离散信号，取值范围为 $F = \{0, 1, 2, \dots, N-1\}$ ； $g(m)$ 是结构元素，取值范围为 $G = \{0, 1, 2, \dots, M-1\}$ ； \oplus 表示膨胀算子； \ominus 表示腐蚀算子。

然后设 ε 是结构元素 g_ε 的尺度，在尺度为 ε 时形态学覆盖 $A_g(\varepsilon)$ 定义为：

$$A_g(\varepsilon) = \sum_{n=1}^N (f \oplus g_\varepsilon - f \ominus g_\varepsilon)(n) \tag{3}$$

此时的分形维数由式(4)计算得到：

$$D_M = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log(A_g(\varepsilon) / \varepsilon^2)}{\log(1 / \varepsilon)} \tag{4}$$

2 电磁环境的分形特性分析

2.1 分形特征验证方法

自相似性是分形事物最明显的特征，验证一种事物是否具有分形特征，最有效的方法就是验证该事物是否具有自相似性。目前最常用的自相似性检测参数是 Hurst 系数。

尽管现有文献提出多种估计 H 指数的方法，但是 R/S 类方法由于其简洁性而一直受到研究者的青睐，迄今为止仍是估计 H 指数最常用的方法。

1) $H=0.5$ 时，信号序列为独立同分布的随机序列，属于标准布朗运动。

2) $0 < H < 0.5$ ，信号序列的未来数据倾向于返回历史点，因此其发散得比标准布朗运动慢。变量之间是负相关的，在特定的时间内表现为突变性或易变性， H 越接近于 0，负相关性越强。

3) $0.5 < H < 1$ ，信号序列是正相关的，其自相似性是趋势增强的，表示未来的增长趋势相当于过去的某个增长趋势，而且，越接近 1，这种持久相关性就越具有相似性，这是分形序列的关键特性。

4) $H=1$ ，这种情况较少见，表示完全可预测，此时，时间序列近似一条直线。

2.2 电磁环境分形特征验证

为了证明复杂电磁环境的自相似性，首先运用 Matlab 模拟了 4 种不同复杂程度的电磁环境。选择目标电磁辐射中的通信信号、雷达信号和电子干扰信号作为构成复杂战场电磁环境的主要要素，其余的信号和杂波一并作为噪声信号。模拟仿真了 96 种通信信号、120 种雷达信号和 24 种电子干扰信号。表 1 至表 3 是仿真信号参数及调制方式。

表 1 通信信号仿真参数

frequency/MHz	modulation type
	2ASK
	4ASK
50	8ASK
100	2PSK
150	4PSK
200	8PSK
250	2FSK
300	4FSK
350	8FSK
400	8QAM
	16QAM
	32QAM

表 2 雷达信号仿真参数设置

frequency/MHz	PW/ μ s	pulse repetition interval/ μ s	modulation type
440			CW
880	0.05	0.1	LFM
1 300	0.10	0.2	NLFM1
2 400	0.20	0.4	NLFM2
3 200	0.25	0.5	8PSK
			8FSK

表 3 干扰信号仿真参数设置

frequency/MHz	jamming signal type
200	
500	radio frequency noise
1 000	amplitude modulation noise
1 500	frequency modulation noise
2 000	phase modulation noise
3 000	

基于上述生成的信号构建了简单、轻度复杂、中度复杂和重度复杂 4 个等级的电磁信号环境。表 4 列出了构建 4 个复杂度等级的电磁环境所选择的信号数量。

采用上述方法对 4 种不同复杂程度电磁环境信号进行分析。采集信号时设置采样频率为 10 GHz, 采样时间为 0.819 2 s, 每个等级信号采样点数 8 192 个, 运用 Matlab 中的 Hurst 系数运算函数进行计算。结果如表 5 所示。由表 5 可以看出, 4 种电磁环境信号的 Hurst 系数均大于 0.5 而小于 1, 具有明显的分形特性。

3 电磁环境度量的分形量化指标计算

3.1 基于数学形态学的分形维数计算方法的有效性

分形仿真信号 WCF(Weierstrass Cosine Function), 用于验证基于数学形态学的分形维数估计方法有效性。WCF 信号的定义为^[10]:

$$W(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^{-k(2-D)} \cos(2\pi\gamma^k t) \quad (5)$$

其中 $\gamma > 1$ 。WCF 信号为连续函数, 但不是处处可微, 其分形维数为 D 。仿真信号的采样频率为 4 096 Hz, 采样点数为 1 024, 参数设置为 $\gamma=5, k=20$ 。图 1 为 5 种不同维数($D=1.1, 1.3, 1.5, 1.7, 1.9$)下的 WCF 信号, 图 1 中 FD 表示分形维数, 以下同。

将采集到的 WCF 信号值, 代入 Matlab 程序。分别采用盒计数函数和数学形态学函数计算仿真信号的分形维数。表 6 给出了 2 种方法的分形维数估计值和相对误差。

由表 6 可以看出, 盒计数法估计的分形维数明显偏低, 误差较大, 最大误差达到了 17.71%。形态学分形维数取得了较好的估计效果, 能够比较精确地反映 5 种不同信号的分形特性, 相对误差较低, 均在 7%以下。

3.2 电磁环境信号形态学广义分形维数

在自相似分形中, 一个分形物体可由单一分形维数进行表征, 称之为一致分形。然而, 对于电磁环境而言, 它并不具有理想情况下的自相似性, 它的统计分布是非均匀的, 要准确反映其分形特征, 仅用单一的分形维数是不够的。由于广义维数所定量描述的内容比单一的分形维数要丰富得多, 本课题提出一种基于数学形态学的广义分形维数的计算方法, 并将其应用于电磁环境信号的表征。

仍然采用第 2 部分所构建的 4 种不同复杂程度的电磁环境仿真信号。采样参数设置不变, 每种程度下采集信号样本 20 个。

采用单一数学形态学方法计算 4 种不同复杂程度电磁环境信号的分形维数。单位结构元素 g 和最大尺度 ϵ_{\max} 是基于数学形态学的分形维数估计中 2 个关键参数。本文采用长度为 3 的扁平结构元素作为单位结构元素, 即 $g = \{0, 0, 0\}$, 选择扁平结构元素的好处是既可以保证估计结果不受信号幅值范围的影响, 同

表 4 4 种复杂程度电磁环境信号构成

complexity degree		simple	light	medium	heavy
radar signal	frequency	1	2	3	5
	PW (PRI)	2	2	3	4
	modulation	4	4	6	6
communication signal	frequency	2	4	6	8
	modulation	6	6	8	12
jamming signal	central frequency	0	2	4	6
	jamming type	0	2	3	4
amount of signal types		20	44	114	240

表 5 4 种复杂程度电磁环境信号的 Hurst 系数

complexity degree	simple	lightly	media	heavily
Hurst coefficient	0.670 6	0.637 7	0.584 9	0.549 3

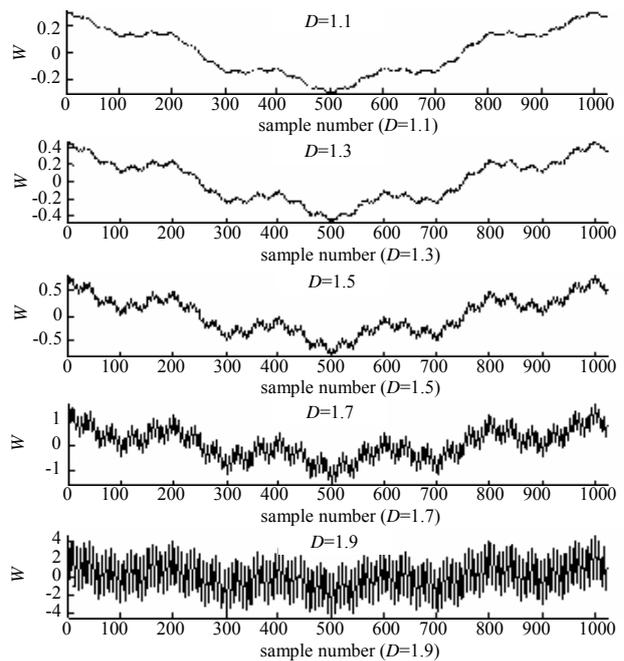


Fig.1 WCF signals with five different dimensions

图 1 5 种不同维数的 WCF 分形信号

表 6 WCF 信号的分形维数估计

method	actual value	D=1.1	D=1.3	D=1.5	D=1.7	D=1.9
box-counting	estimated value	0.991 9	1.131 0	1.234 3	1.429 6	1.599 0
	relative error	0.098 3	0.130 0	0.177 1	0.159 1	0.158 4
morphology theory	estimated value	1.179 8	1.327 8	1.495 0	1.674 6	1.836 2
	relative error	0.072 6	0.021 4	0.003 3	0.015 0	0.033 6

样既可以保证估计结果不受信号幅值范围的影响, 同

时又可以减少一部分计算量，即在对信号的腐蚀和膨胀中可以省去加和减操作。尺度 ε 的选择并没有固定的方法，选择的尺度太大会带来较大的计算量，同时会影响估计的精确度，因此本文在分析电磁环境信号时，选择尺度为 $\varepsilon=[1, 2, 4, 8:8:128]$ 。

图 2 为 4 种复杂程度电磁环境信号的单一形态学分形维数的分布图。可以看出，单一的形态学分形维数能够区分出简单和重度状态，但轻度和中度复杂状态的分形维数有所重叠，不能很好地区分。

广义分形维数计算与单一分形的区别在于其配分函数 $\chi(\varepsilon, q)$ 中参数 q 的值不能为零。采用广义分形维数计算时，单位结构元素为 $g=\{0,0,0\}$ ，选择尺度为 $[2,4,8,16,32,64,128,256]$ ，广义分形配分函数参数 q 设置为 $[-20:2:20]$ 。图 3 给出了 4 种不同复杂程度的电磁环境信号广义分形维数。可以看出，电磁环境信号的多重分形特性比较明显，随着参数 q 的变化，信号的分形维数具有一定的动态范围。相比单一的分形维数，多重分形可为有效区分电磁环境的复杂程度提供更加丰富的信息。

3.3 电磁环境信号形态学多尺度分形维数

广义分形维数考虑了信号在空间上的非严格自相似性，本节将从另外一个角度来考虑，即信号在尺度上的非严格自相似性。在现实世界中，满足严格的几何自相似的物体是不存在的，大量存在的是统计意义上的自相似。对于严格的自相似分形体，根据尺度不变性，其在不同最大观测尺度下的分形维数均相等，而对于电磁环境信号这样的统计意义上自相似分形体，由于受到观测分辨率等因素的影响，其不同观测尺度下的分形维数会在一定范围内变化。因此，在此引入形态学多尺度分形维数的概念，并将其应用于电磁环境信号的特征。

图 4 为 4 种复杂程度信号中的重度复杂电磁环境信号的多尺度分形维数，可以看出，在不同的尺度下其局部分形维数并不是一个固定的值，而是变化范围比较大的一个区间，由此可以证明，现实世界中的大部分信号并不具备严格的自相似性，其分形维数在不同的尺度下是动态变化的，采用单一的分形维数对其进行表征具有一定的局限性。同时，采用多尺度分形维数为描述信号的分形特征提供了更多的信息，有利于区分不同的信号类型。

图 5 为 4 种复杂程度的电磁环境信号的形态学多尺度分形维数，由图中可以看出，不同复杂程度的电磁环境信号在不同的尺度下其分形维数具有明显的差异，多尺度分形维数能够更好地区分 4 种复杂程度，在某些尺度下，各种状态之间存在着部分的重叠，但在其他尺度下又具有很好的可分性，因此形态学多尺度分形维数为区分电磁环境的复杂程度提供了更全面的信息。

4 结论

复杂电磁环境在不同空间和时间上存在非线性、动态变化和不确定性等特点，但在这种复杂现象背后，电磁环境在时间和空间上(如在不同时刻采样的信号波形)存在着某种相似性。针对这种自相似性，提出了利用分形理论研究复杂电磁环境复杂性的方法，通过计算电磁环境的

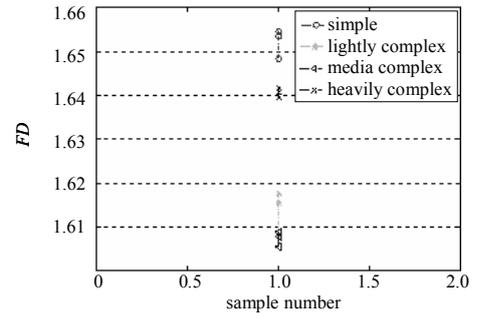


Fig.2 The single fractal dimension of EM signal with four types of complexity
图 2 4 种复杂程度电磁环境信号单一分形维数

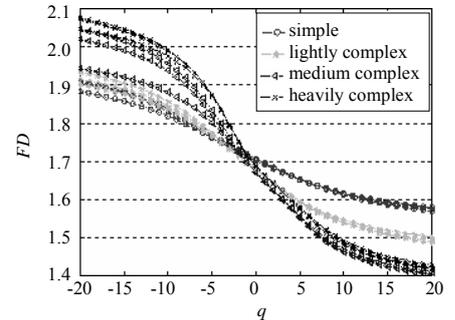


Fig.3 Generalized fractal dimension of EM signal with four types of complexity
图 3 4 种复杂程度的电磁环境信号广义分形维数

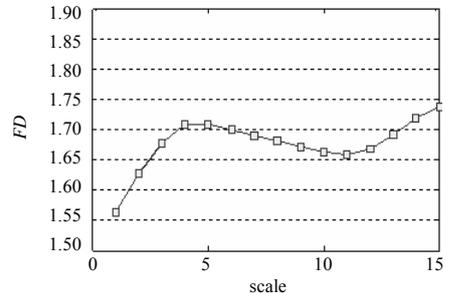


Fig.4 Multiscale fractal dimension of heavily complex EM signal
图 4 重度复杂电磁信号的多尺度分形维数

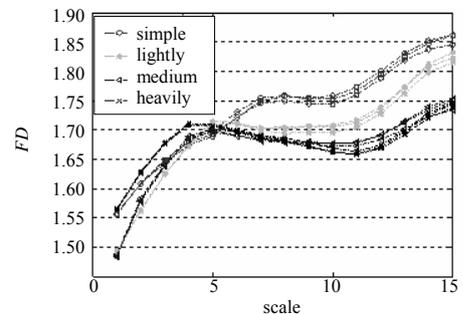


Fig.5 Multiscale fractal dimension of EM signal with four types of complexity
图 5 4 种复杂程度电磁环境信号多尺度分形维数

分形维数来区分电磁环境的复杂程度。通过分析不同角度的分形维数计算结果表明,该方法能为区分电磁环境的复杂程度提供多方面的信息。

参考文献:

- [1] CAI X F, SONG J S. Analysis of complexity in battlefield electromagnetic environment[C]// 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Xi'an, China: IEEE, 2009.
- [2] 邵涛, 胡以华, 石亮, 等. 战场电磁环境复杂度定量评估方法研讨[J]. 电光与控制, 2010, 17(1): 81-83. (SHAO Tao, HU Yi-hua, SHI Lian, et al. Methods for Quantitative Evaluation of Battlefield Electromagnetic Environment Complexity[J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(1): 81-83.)
- [3] 李杰然, 张瑞峰. 基于模糊算法的战场电磁环境复杂性定量评估[J]. 舰船电子对抗, 2011, 34(1): 106-108. (LI Jie-ran, ZHANG Rui-feng. Quantificational Evaluation on the Complexity of Battlefield Electromagnetic Environment Based on Fuzzy Algorithm[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2011, 34(1): 106-108.)
- [4] 王伦文, 孙伟, 潘高峰. 一种电磁环境复杂度快速评估方法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 2942-2947. (WANG Lun-wen, SUN Wei, PAN Gao-feng. An Evaluating Quickly Method for Electromagnetic Environment Complexity[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(12): 2942-2947.)
- [5] 章季阳, 王伦文. 一种改进的电磁环境复杂度定量评估方法[J]. 微波学报, 2011, 27(6): 37-41. (ZHANG Ji-yang, WANG Lun-wen. An Improved Method of the Quantificational Evaluation on the Complexity of Electromagnetic Environment[J]. Journal of Microwaves, 2011, 27(6): 37-41.)
- [6] 李金萍. 分形理论的发展及其研究前景[J]. 英才高职论坛, 2008, 4(4): 55-59. (LI Jin-ping. Development and Forecast of Fractal Theory[J]. The Forum of Yingcai Higher Vocational Education, 2008, 4(4): 55-59.)
- [7] Mandelbrot B. 分形对象: 形、机遇和维数[M]. 文志英, 译. 北京: 世界图书出版社, 1999. (Mandelbrot B. Fractal object: shape, opportunities and dimension[M]. Translated by WEN Zhi-ying. Beijing: World Publishing Corporation, 1999.)
- [8] 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.
- [9] Maragos P, Schafer R W. Morphological filters-part I: Their set-Theoretic Analysis and Relations to Linear Shift-invariant Filters[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1987, 35(8): 1153-1169.
- [10] 谢和平. 分形应用中的数学基础与方法[M]. 北京: 科学出版社, 1997. (XIE He-ping. Application of fractal mathematics and methods[M]. Beijing: Science Press, 1997.)

作者简介:



董俊(1980-), 男, 湖北省当阳市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为复杂电磁环境特性与模拟. email: dj0636@sina.com.

蒲秀英(1980-), 女, 重庆市人, 学士, 工程师, 研究方向为通信对抗.

韩慧(1980-), 女, 成都市人, 学士, 工程师, 研究方向为复杂电磁环境特性与模拟.

洪丽娜(1975-), 女, 辽宁省灯塔市人, 学士, 工程师, 主要研究方向为复杂电磁环境特性与模拟.