

区域电磁环境的动态特性表征

郭淑霞¹, 张磊¹, 董文华¹, 高颖²

(1.西北工业大学 无人机特种技术国防重点实验室, 陕西 西安 710065)
(2.西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710072)

摘要:区域电磁环境中各种电磁干扰辐射信号种类繁多、调制体制各异,信号参数的动态变化,传播路径及其相应影响的不确定性,表现为电磁信号在时间、能量上相互干扰发生异常变化造成电磁环境动态性异常激烈,导致区域内接受设备系统性能下降。针对这一问题,提出基于分形理论与数学形态学相结合的方法,研究区域电磁环境动态特征,利用分形维数表征电磁环境动态性。首先,基于信号基础理论对区域接收点处电磁信号的集合进行建模;其次,利用数学形态学滤波原理对接收的电磁信号集合进行交替滤波,滤除电磁信号中的脉冲噪声和白噪声;最后,运用分形理论求解电磁环境接收点集合的关联维数,并对计算结果进行仿真分析,表明该方法能从时间、空间和能量上为电磁环境的动态性提供有利支撑。

关键词:电磁环境;数学形态学;动态性;分形理论;分形维数

中图分类号:TN03 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-2758(2016)04-0703-05

区域电磁信号在时间、能量和频率上发生异常变化,反映了被观察区域内电台异常活动情况的激烈程度,目前还没有相关文献直观地感触表示这一动态特性。文献[1]如何对电磁环境的动态特性进行量化描述和表征,是当前复杂电磁环境研究面临的重点和难点问题。然而由于电磁环境的不规则性和不可感知性,研究其动态特性显得尤为困难。文献[2-4]电磁环境主要是由电磁信号强度、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综合特性,但是这些度量方法只是从单一角度表示电磁环境动态性和复杂性;文献[5]运用分形理论验证了电磁信号具有分型特性,运用 Matlab 模拟度量电磁环境动态特性;文献[6]在文献[4-5]的基础上增加了异动信号率,采用自适应神经模糊推理方法解算对战场电磁环境的动态性进行定量评估;文献[7-8]将文献[5-6]异动信号率应用在心电信号、肌电信号、脑电信号等生物信号的分析与研究中,对生物心音信号的动态特征进行提取与分析;文献[9]提出在高分辨率原则下,利用小波变换对电磁信号在时、频

域分解,然后计算分解后信号的分形维数,分析其每一个信号的动态性与不规则性。

文献[10]提出一种基于数学形态学的形态金字塔信号分析方法,提高了信号描述能力和抗脉冲噪声性能;文献[11-13]是接收到的电磁信号不受噪声信号的幅值范围和旋转的影响,提高计算效率,使对电磁环境动态性表征更加稳定和精确。

文献[14-15]在处理复杂非线性系统中具有独特优点,对于区域电磁环境空间某一点的电磁信号,在一定时间内,其信号波形具有分形特征,因此,我们拟基于分形理论与数学形态学原理,借助分形维数这一特征量,表征空间某点处合成电磁信号的时变动态性与复杂性,对区域电磁环境的时变动态特性用分形维数来表征。

本文提出分形理论和数学形态学理论相结合对空间中接收点的集合复杂电磁信号进行处理;运用分形理论解算空间点集合处电磁环境的分形维数,从而对该区域电磁环境动态特性进行表征。

1 区域电磁环境信号建模

设某一空间区域中,有 N 个辐射源,第 i 个辐射源产生的电磁信号可表示为

$$E_{ir}(t) = A_i(t) \cos(2\pi f_i(t)t + \phi_i(t)) \mathbf{e}_i \quad (1)$$

式中, $A_i(t)$ 为电场的幅值, $f_i(t)$ 为频率, $\phi_i(t)$ 为相位, \mathbf{e}_i 为场强方向或极化方向。当其到达空间某接收点时,由于传播环境(地形、地物、散射体等)对信号造成反射、绕射、散射、以及路径损耗等,这时接收信号可表示为

$$E_{ir}(t) = \sum_{j=1}^M A_i(t) H_{ij} F_i(\theta_{ij}(t), \phi_{ij}(t)) \cdot \cos(2\pi(f_i(t) + \Delta f_i(t))t + \phi_i(t)) \mathbf{e}_i \quad (2)$$

式中, F_i 为辐射天线方向图, H_{ij} 为第 i 个辐射源的第 j 径信号受传播环境影响的传递函数, $Y_k = H(X_k)$ 表示传输信号多径合成, $\Delta f_i(t)$ 为辐射源 i 相对接收点运动速度为 $v_i(t)$ 时产生的频移。

因此, N 个辐射源,在空间某一接收点形成的合成电磁信号可表示为

$$E_i(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M A_i(t) H_{ij} F_i(\theta_{ij}(t), \phi_{ij}(t)) \cdot \cos(2\pi(f_i(t) + \Delta f_i(t))t + \phi_i(t)) \mathbf{e}_i \quad (3)$$

(3)式中的输入参数含义与(1)式、(2)式相同;因此, N 个辐射源在某空间区域形成的电磁信号环境可表示为 L 个合成信号的集合

$$\{E_i(1), E_i(2), \dots, E_i(L)\} \quad (4)$$

从(3)式可以看出,在区域电磁环境中,空间某接收点合成电磁信号是由多个辐射信号非线性叠加而成的时变信号,因此,(4)式表示的区域电磁环境也是时变动态的。

2 区域电磁环境信号处理

2.1 腐蚀与膨胀

其处理的基本思想是通过等价的移动改变电磁交互信号的形态。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,其中腐蚀是剔除边界不平滑的凸起部分,减少了峰值、加宽了谷域;膨胀是填平边界不平滑的凹陷部分,增大了谷值、扩展了峰顶 2 种算子定义如下

$$(E_i \oplus g)(n) = \max_{m \in G} \{E_i(n-m) + g(m)\} \quad (5)$$

$$(E_i \ominus g)(n) = \max_{m \in G} \{E_i(n-m) - g(m)\} \quad (6)$$

式中: $E_i(t)$ 是接收点一维离散电磁信号,取值范围为 $E_i(t) = \{0, 1, 2, \dots, N-1\}$; $g(m)$ 是结构元素,取值范围为 $G = \{0, 1, 2, \dots, M-1\}$ 。

2.2 开运算与闭运算

腐蚀和膨胀是不可逆运算,先腐蚀后膨胀称为开运算,先膨胀后腐蚀是闭运算。这 2 种运算的结果通常不同。一维离散电磁信号的开闭运算分别定义为

$$(E_i \circ g)(n) = E_i \ominus g \oplus g \quad (7)$$

$$(E_i \cdot g)(n) = E_i \oplus g \ominus g \quad (8)$$

开闭运算均具有低通特性,其组合起来就是形态学滤波。对于一维离散电磁信号,开运算使目标轮廓光滑,并去掉毛刺和孤立点,它可以抑制信号中的峰值(正脉冲)噪声;闭运算则填平了小沟,弥合了孔洞和裂缝,由此可以滤除信号中的低谷(负脉冲)噪声。然后通过形态学混合开、闭运算交替滤波,滤除电磁信号中的脉冲噪声和白噪声。滤波结构如图 1 所示。

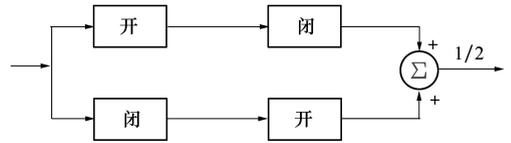


图 1 形态学混合滤波器的结构图

文献[16]形态学中上述 2 种运算具有消除信号噪声和平滑信号的功能,为了同时抑接收的电磁信号中峰值噪声和低谷噪声,本文选取正弦结构元素下的数学形态学对接收的信号进行降噪处理,与传统的基于傅立叶变换方法相比能更好地将噪声与有用信号进行分离。

3 区域电磁环境信号关联维数解算

$\{E_1, E_2, \dots, E_i, \dots\}$ 为区域形成的电磁合成信号的集合,重构延时后得到新集合记为 $Y_n(m, \tau) = (E_n, E_{n+1}, \dots, E_{n+(m-1)\tau})$, $n = 1, \dots, N_m, \tau$ 为延迟时间, $\tau = k\Delta t, \Delta t$ 是时间序列的采样时间间隔, $N_m = N - (m-1)\tau$ 为的总点数。从 N_m 个点中任意选定参考点 Y_i , 计算其余 $(N_m - 1)$ 个点到 Y_i 的距离 r_{ij}

$$r_{ij} = d_2(Y_i, Y_j) \cdot \left[\sum_{l=0}^{m-1} (E_{i+l\tau} - E_{j+l\tau})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

定义关联积分 C_r 为

$$C(r) = \frac{2}{N_m(N_m - 1)} \sum_{i,j=1}^{N_m} H(r - r_{ij}) \quad (10)$$

式中, H 是 Heaviside 函数式中 H 当 $r > 0, H(r)$ 为 1, $r \leq 0$ 是 $H(r)$ 为 0。

对于适当选取的 r , 存在如下关系

$$C_m(r) \approx r^{D(m)} \quad (11)$$

可以推导出

$$D(m) = \lim \frac{\ln C_m(r)}{\ln(r)} \quad (12)$$

$D(m)$ 即为关联维数。

4 区域电磁环境分形特性的仿真

将仿真产生的 FBM 信号值, 代入 Matlab 程序。采用关联维数和最小二乘拟合解算仿真信号的分形维数。由上述对 FBM 信号的仿真分析可以看出, 对具有分形特征的 FBM 信号进行数学形态学处理, 通

过关联维数解算 FBM 信号的分形维数并通过最小二乘拟合后取得了很好的估计效果, 与真实的分形维数相比误差较低。

模拟某区域电磁环境, 选择用仿真的方法来表征该区域电磁环境的动态特征, 首先运用 Matlab 模拟产生了 4 种不同调制方式的通信信号作为构成复杂区域电磁环境的主要要素, 其次对于其余的信号和杂波一并作为噪声信号模拟产生。利用基于数学形态学和分形理论对该 4 种不同调制的通信信号及其相互作用后信号关联维数的计算, 解算其分形维数对区域电磁环境动态性进行特征。

表 1 仿真信号参数设置

频率/Hz	调制方式
12 000	ASK
14 000	QPSK
11 000	DPSK
12 000	16QAM

通过对上述复杂区域电磁环境所接受到不同信号以及不同信号的组合进行数学形态处理, 运用关联维数的与最小二乘拟合法解算其分形维数。具体仿真图如下:

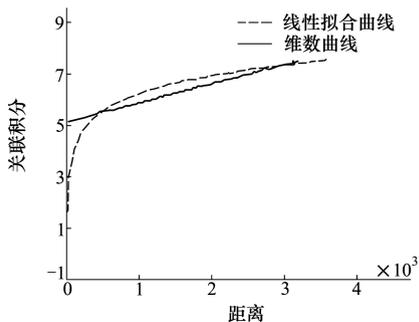


图 2 QPSK 信号关联维数 $D=1.9$

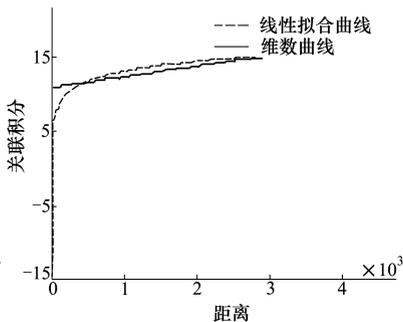


图 3 QPSK 和 16QAM 合成关联维数 $D=1.6$

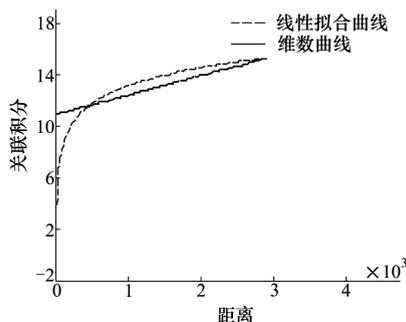


图 4 DPSK 和 ASK 合成关联维数 $D=1.8$

图 2~图 5 是对区域接收到的点集关联维数仿真图, 在此基础上, 对区域点集的关联维数进行最小二乘拟合, 清晰表达分形维数在时间、空间上的关联性, 得到区域电磁环境的分形维数, 表示区域电磁环境动态特征。从图中可以看出随着不同通信信号频率和通信信号数量的增加关联维数在变大, 关联维数的大小上集中地反映了电磁环境激烈冲突的程度。

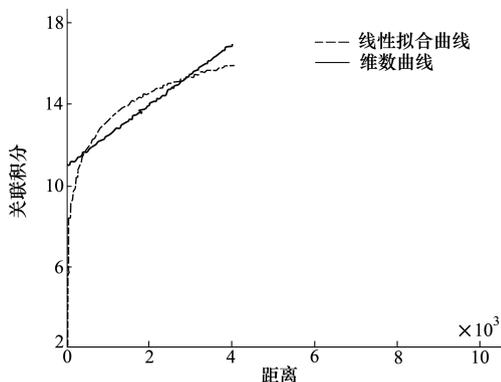


图 5 DPSK ASK 16QAM QPSK 合成关联维数 $D=2.2$

5 结 论

区域电磁环境,如战场电磁环境存在这在时间、能量和频率上发生异常变化的敌方威胁信号和可疑信号,这些变化异常的信号往往具备较高的威胁等级,或是违规电台信号,或是敌方通信信号,集中地反映了电磁环境激烈的动态性。本文提出基于数学形态学与分形理论相结合研究区域点集合电磁环境

动态性的方法,对区域电磁环境动态性进行表征,首先,通过对区域接收点集合处电磁信号进行建模和滤波处理,解算点集的关联维数。其次,利用仿真模拟对区域电磁环境动态性表征进行验证;为从整体特性角度区分不同区域电磁环境的特性提供依据。在实际应用中,本文的区域电磁环境动态性,还需要考虑与区域接收设备效应之间的关联性,为接收机性能分析奠定基础。

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, 2009: 2440-2442
- [2] 尹成友. 战场电磁环境分类与分级方法研究[J]. 现代军事通信, 2008, 16(2): 33-37
Yin Chengyou. Classification and Gradation Methods for Battlefield Electromagnetic Environment[J]. Journal of Modern Military Communication, 2008, 16(2): 33-37 (in Chinese)
- [3] Bai Lizhou, Wang Lin, Wang Baikuan, et al. Effects of Paddle Configurations on the Uniformity of the Reverberation Chamber [C]//IEEE Symposium on EMC, 1999: 12-16
- [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 Lunwen, Sun Wei, Pan Gaofeng. An Evaluating Quickly Method for Electromagnetic Environment Complexity[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(12): 2942-2947 (in Chinese)
- [5] 董俊, 蒲秀英, 韩慧, 洪丽娜. 电磁环境分形特性分析与量化[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(3): 428-432
Dong Jun, Pu Xiuying, Han Hui, Hong Linan. Fractal Characteristics and Quantification Method of Electromagnetic Environment[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014, 12(3): 428-432 (in Chinese)
- [6] 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 Jiyang, Wang Lunwen. An Improved Method of the Quantificational Evaluation on the Complexity of Electromagnetic Environment[J]. Journal of Microwaves, 2011, 27(6): 37-41 (in Chinese)
- [7] 刘晓芳, 叶志前, 周海燕. 麻醉期心率变异性的非线性动力学分析[J]. 中国医学物理学杂志, 2001, 18(4): 237-239
Liu Xiaofang, Ye Zhiqian, Zhou Haiyan. Nonlinear Dynamic Analysis of Heart Rate Variability during Anesthesia[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2001, 18(4): 237-239 (in Chinese)
- [8] 梁仲刚, 严洪, 吴斌, 等. 分形维数在头低位期间心率变异分析中的应用[J]. 航天医学与医学工程, 2005, 18(1): 58-61
Liang Zhonggang, Yan Hong, Wu Bin, et al. Application of Fractal Dimension in Heart Rate Variability Analysis during Head-Down Tilt[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2005, 18(1): 58-61 (in Chinese)
- [9] He Z J, Zhao J Y, He Y B, et al. Wavelet Transform and Multiresolution Signal Decomposition for Machinery Monitoring and Diagnosis[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology, 1996: 724-727
- [10] Goutsias J, Heijmans H J A M. Multiresolution Signal Decomposition Schemes, Part I: Linear and Morphological Pyramids[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2000, 9(11): 1862-1876
- [11] 吴军基, 吴伊昂, 贺济峰, 杨伟. 数学形态学在行波滤波中的应用[J]. 继电器, 2005, 133(17): 21-26
Wu Junji, Wu Yiang, He Jifeng, Yang Wei. Mathematical Morphology Filtering of Traveling Wave[J]. Relay, 2005, 133(17): 21-26 (in Chinese)
- [12] 田絮资, 杨建, 黄力宇. 心电信号去噪的数学形态学滤波器[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(2): 124-126
Tian Xuzi, Yang Jian, Huang Liyu. Morphological Filter to Remove Power-line Interference and Baseline Wander in Electrocardiogram[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(2): 124-126 (in Chinese)

- [13] 门丽丽,许长辉,高井祥. 基于数学形态学细化算子的改进 Canny 算法研究[J]. 测绘科学,2010,35(2):82-84
Men Lili, Xu Changhui, Gao Jingxiang. Refinement Operators Improvement of Canny Algorithm Based on Mathematical Morphology[J]. Science of Surveying and Mapping, 2010,35(2): 82-84 (in Chinese)
- [14] 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 Heping. Application of Fractal Mathematics and Methods[M]. Beijing, Science Press, 1997 (in Chinese)
- [15] 朱波华. 基于分形理论的信号处理与分析的研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2008
Zhu Bohua. The Study of Signal Processing and Diagnosis[D]. Wuhan, Wuhan University of Technology, 2008 (in Chinese)
- [16] 袁志会. 基于分形理论的心音信号特征分析与分类识别研究[D]. 重庆:重庆大学,2013
Yuan Zhihui. The Fractal Characteristics Analysis and Recognition Research of Heart Sound Based on Fractal Theory[D]. Chongqing, Chongqing University, 2013 (in Chinese)

Manifestion of Electromagnetic Environment Based on Mathematical Morphology and Fractal Theory

Guo Shuxia¹, Zhang Lei¹, Dong Wenhua¹, Gao Ying²

(1.Science and Technology on UAV Laboratory at Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710065, China)
(2.School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A novel scale indicator calculation method is introduced based on fractal theory in order to solve the problem of too much subjectivity, different modulation system, various of electromagnetic signals and great calculation difficulty in indicator extraction by using conventional electromagnetic environment measurement method. Proposed fractal theory and mathematical morphology theory is applied on the region of the electromagnetic environment to characterize the complexity of standard. First, we use basic principle of the area signal combining several radiation sources to model the receiving electromagnetic signals synthesized at one point, 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 favorable information to distinguish the complexity of region of the electromagnetic environment in both space and time.

Keywords: electromagnetic environment, mathematical morphology, complexity, fractal theory, fractal dimension