

生物科学

大鼠初级视皮层神经元整合野调制的多重分形去趋势波动分析

胡 玥^{1*} 刘晓芳¹ 朱妍雯¹

(河南城建学院电气与信息工程学院,平顶山 467000;郑州大学电气工程学院¹,郑州 450001)

摘要 初级视皮层(V1 区)神经元整合野的外周调制作用是动物执行视觉图像-背景分割和目标识别的神经基础。采用多重分形去趋势波动的方法,分析了整合野调制下神经元响应的多重分形性,并分析了其与整合野抑制作用的关系。结果表明:不同模式下神经元的响应信号均具有多重分形特征,谱宽 $\Delta\alpha$ 能显著区分两种典型的整合野调制状态,且神经元的分形强度与整合野的抑制指数呈正相关。该研究表明整合野的调制作用改变了神经元响应的复杂程度,提高了其携带信息的能力。

关键词 整合野 初级视皮层 多重分形性 去趋势波动

中图法分类号 Q6.33; 文献标志码 A

初级视皮层(V1 区)的神经元只对视野特定区域的视觉刺激产生响应,该特定区域叫做感受野。大量研究表明,在感受野的周围环绕着整合野,整合野内的刺激单独出现不会直接引起神经元响应,但是会调制感受野内刺激所诱发的响应^[1]。整合野的外周调制作用对于分辨视觉刺激的轮廓、边角和局部特征起到关键作用,该作用机制被认为是视觉图像-背景分割和目标识别的神经基础^[2,3]。此外,神经元的响应往往表现出丰富的非线性特性,分形动力学是分析神经信号非线性特性的有效手段。因此,从分形特性角度分析 V1 区神经元整合野的调制特性,有助于加深对视觉系统复杂非线性信息处理机制的理解。

常规关于整合野调制特性的研究大多侧重于分析神经元的发放率特征和局部场电位的能量,主要得出的结论有:V1 区神经元的整合野主要包括抑制型(占 68%)和易化型,且随着时间的推移,抑制性调制作用逐渐趋于主导^[4];整合野的抑制性调制作用能够提高神经元的朝向选择性^[5],增加 V1 区神经元响应的稀疏性^[6],能够减少视觉响应的持续时间^[7],提高神经元在特定类型刺激下做出响应的效率。近年来,随着研究的逐渐深入,人们发现大脑神经元的放电模式具有混沌、分形等非线性动力学特征^[8],已有研究者通过对神经元复杂的放电模式进行模拟仿真,验证了神经元的非线性不规则放电并

不是噪声引起的,而是神经系统本身的结构所决定的^[9]。其近期的研究表明,整合野的调制作用能够增强神经元放电信号的混沌性^[10],从而提高信息的传递效率。尚缺乏从分形特性角度分析整合野调制作用的研究报道。

分形原意指的是“分裂和分化”,这个概念最早由 Mandelbrot 提出,用于描述不规则的图形,后来才广泛应用于神经科学领域。对于研究神经信号而言,并不能找出组成复杂神经信号的基本元素。因此,利用分形原理可以直接由原始时间序列通过分形算法准确地描述信号非线性特征。随着非线性理论研究的深入,对时间序列的多重分形分析提出了多种方法。其中,最简单的方法是基于标准分配函数的多重分形理论^[11,12]。但是此方法要求时间序列是规则的、平稳的,因此不适用于分析神经元响应信号。1994 年,Peng 等提出了去趋势波动分析方法(DFA)^[13]。之后,Kantelhardt 等又在 DFA 基础上提出了多重分形去趋势波动分析方法(MF-DFA)^[14],此方法是基于去趋势均方差对非平稳的时间序列进行拟合消除趋势,能够获取时间序列的长程相关性,并方便地得到标度指数和多重分形谱。已陆续有研究者将该方法成功地应用在分析心电信号^[15]和颅内外脑电信号^[16]的多重分形性,分别证明了该分析方法提取的多重分形特征对于诊断心律失常与癫痫疾病等都具有一定的借鉴意义。

现以朝向信息为例,采用去趋势波动的多重分形法,分析整合野朝向信息调制下神经元响应信号的多重分形特性,并对比分析分形特征与整合野调

2015 年 6 月 10 日收到

第一作者简介:胡 玥,女,硕士,讲师。研究方向:电子信息。
E-mail:hy12713@sina.com。

制作作用强度之间的关系。分析结果表明:神经元整合野的调制作用显著增强了神经元间的多重分形性;神经元响应的分形特性与受整合野抑制的强度有关,受整合野抑制较强的神经元在整合野的调制下,其响应表现出了更高的分形值。

1 材料与方法

1.1 数据来源

数据来自于已发表文章^[10]中的6只大鼠。关于动物手术以及信号采集的步骤在该文章中有详细介绍,这里不再赘述。

1.2 刺激模式

采用与已发表文章^[10]相同的三种类型刺激模式,如图1所示。模式1:单独刺激神经元的经典感受野,光栅半径设为经典感受野的半径;模式2:整合野和感受野具有相同朝向,光栅半径设为整合野的半径;模式3:整合野和感受野的朝向呈正交,外圆的半径为测定的整合野的半径,内圆半径设为经典感受野的半径。三种模式的空间频率、对比度和时间频率均为最佳值,共设置12个不同朝向(0°~330°,30°递进),刺激过程中不同模式随机出现1 s,中间用1 s灰屏间隔,三种刺激模式全部出现一次算一个周期,共重复10个周期。

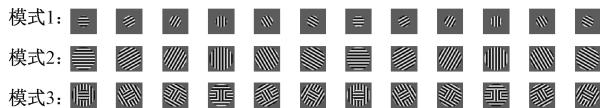


图1 本文所用的三类典型刺激模式

Fig. 1 Three kinds of typical stimuli

1.3 提取非线性分形特征

采用多重分形去趋势波动互相关分析(MF-DC-CA)的方法提取两两神经元间的分形特征。对于长度为N的非平稳时间序列 $x(t), t = 1, 2, \dots, n$,其q阶去趋势波动的多重分形分析步骤如下

(1)计算序列的均值 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x(t)$ 。

(2)计算时间序列的累积差

$$y(j) = \sum_{t=1}^j [x(t) - \bar{x}]; j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

(3)将序列 $y(j)$ 划分成 N_l 个小区间,则每个区间均含有l个数据。当n不能整除l时, $x(t)$ 将会有一段剩余,为了能够不丢失数据,再针对序列的尾部数据重复这一分割过程,最终将得到 $2N_l$ 个等长小区间,将序列的所有数据包含在里面。

(4)对各个区间的l个点,采用最小二乘法估算出局部的趋势 $y_h(j)$

$$y_h(j) = a_1 j^k + a_2 j^{k-1} + \dots + a_k j + a_{k+1}; j = 1, 2, \dots, l \quad (2)$$

$$\dots, l; k = 1, 2, \dots \quad (2)$$

(5)对于区间 $h(h = 1, 2, \dots, 2N_l)$ 内的每段数

据,去除局部趋势项,求其均方误差 $F_{(l,h)}$

$$F(l, h) =$$

$$\begin{cases} \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \{y[l(h-1)l+i] - y_h(i)\}^2, & 1 \leq h \leq N_l \\ \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \{y[N_l - (h-N_l)l+i] - y_h(i)\}^2, & N_l + 1 \leq h \leq 2N_l \end{cases} \quad (3)$$

(6)对每段数据的均方误差进行叠加平均,即得到如下 q 波动函数

$$F(q, l) = \left[\frac{1}{2N_l} \sum_{h=1}^{2N_l} F(l, h)^{\frac{q}{2}} \right]^{\frac{1}{q}} \quad (4)$$

式(4)中, q 为任意不为0的实数。另 $F(q, l)$ 和 l 满足幂律关系,即

$$F(q, l) \sim l^{\lambda(q)} \quad (5)$$

式(4)中,指数 $\lambda(q)$ 即为 q 阶广义Hurst指数。对于较大的正 q ,大幅波动占主导地位, $\lambda(q)$ 描述了大波动的标度行为;另外,对于负的或者较小的正 q ,描述了小幅波动的标度行为。根据多重分形理论, $\lambda(q)$ 和 q 的关系可以表示为

$$\tau(q) = q\lambda(q) - 1 \quad (6)$$

式(6)中, $\tau(q)$ 为质量指数,若与 q 是线性关系,则时间序列呈单分形性;若不是纯线性关系,则时间序列呈多重分形性。奇异指数 α 和多重分型谱 $f(\alpha)$ 可通过下述公式得到:

$$\alpha = \lambda(q) + q\lambda'(q) \quad (7)$$

$$f(\alpha) = q[\alpha - \lambda(q)] + 1 \quad (8)$$

奇异指数 α 用来描述序列各个区间不同的奇异程度,其值与奇异程度成反比。 $f(\alpha)$ 反映了奇异指数 α 的分形维数,计算过程中,可通过选取不同的 q 值,不同程度地消除时间序列中的趋势所带来的影响,以达到减少或消除非平稳性的目的。分形谱宽度 $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$,用来表征多重分形性的强度, $\Delta\alpha$ 越大,表示时间序列分布越不均匀,多重分形性越强。

2 数据分析结果

重点分析V1区神经元在整合野信息调制下的多重分形性。共在6只LE大鼠上采集了50个神经元,对其进行统计分析。限于篇幅,仅对其中一例神经元在不同刺激模式下的分析结果进行阐述,并给出所有神经元的统计结果。

示例神经元在三种模式刺激下的分形谱和质量指数函数 $\tau(q)$ 分别如图2和图3所示。

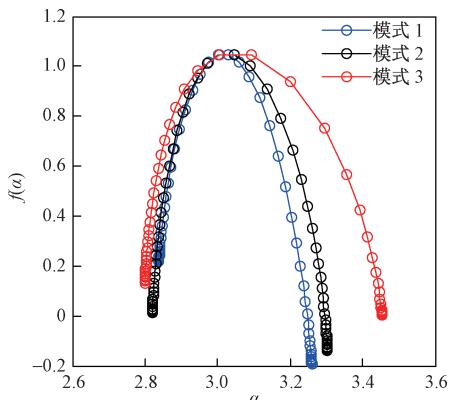


图 2 三种模式刺激下神经响应信号的多重分形谱

Fig. 2 Multifractal spectrums of neuronal response to three kinds of typical stimuli

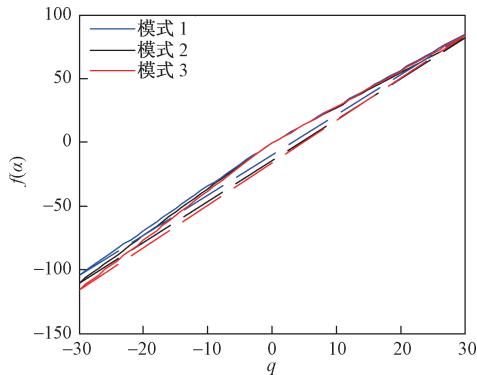


图 3 三种模式刺激下神经响应信号的质量指数函数

Fig. 3 Quality index function of neuronal response to three kinds of typical stimuli

从图 2 可以看出,该神经元在三种模式下的多重分形谱均为钟形,最大值都趋于 1,可得知这几种模式刺激下的神经元响应信号都具有多重分形特性。图 3 中的虚线是对应的线性直线,已作对比。从图 3 可以看出,三种模式刺激下 $\tau(q)$ 随 q 的变化曲线都不是线性关系,从而证明了这三种模式对应的响应信号之间具有多重分形特性,与图 2 所得到的结论相符。

进一步计算每种刺激模式下多重分形谱宽度(即 $\Delta\alpha$),并将 40 次重复刺激下的结果进行统计分析,结果汇总在表 1 中。

表 1 三种模式下神经元响应信号多重分形谱宽的统计结果

Table 1 Statistics of multifractal spectrum widths of neuronal response to three kinds of typical stimuli

	模式 1	模式 2	模式 3
平均值	0.408 2	0.468 2	0.663 0
标准差	0.020 0	0.023 1	0.034 0

从表 1 中可以看出,模式 1 条件下(即仅刺激经典感受野时)神经元响应的多重分形性最弱,模式 3

条件下(同时刺激感受野和整合野,且朝向正交时)神经元的多重分形性最强,而模式 2 条件下(同时刺激感受野和整合野,且朝向相同时)下神经元的多重分形性居中。其中后两种模式均有整合野信息调制作用的参与。由神经元整合野的调制特性可以知道,神经元在整合野的刺激下会出现一定的抑制状态,当内外朝向一致时(即模式 2)抑制性最强,而内外朝向正交情况下(模式 3),抑制性最弱。通过将该神经元在两种典型整合野调制模式下的 40 组谱宽数据进行 t 检验,结果表明谱宽 $\Delta\alpha$ 能够显著地($p < 10^{-5}$)区分不同的整合野调制模式。

为了说明该结论的通用性,本文计算了所有神经元(50 个)在每种刺激模式下响应的谱宽,并将多次重复刺激下的结果进行叠加平均。图 4 给出了两种典型整合野调制模式下谱宽的对比图。

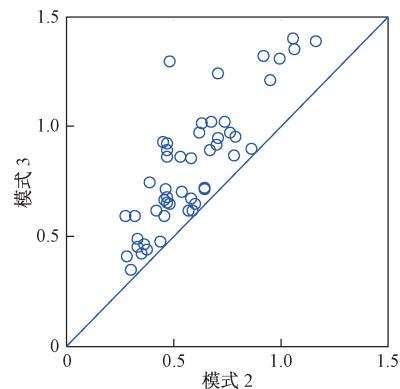


图 4 两种典型整合野调制状态神经元响应间的多重分形谱宽比较

Fig. 4 Comparison of multifractal spectrum widths of neuronal response under two typical nCRF modulation

图 4 中的直线是表示斜率为 1 的直线。数据出现在直线的左上角,表示纵轴的值大于横轴的值。反之则表示横轴对应的值较大。从图 4 可以看出,虽然在同一种模式刺激下不同神经元的谱宽差异比较大,但是对于任意一个神经元,它在模式 3 刺激下的谱宽均大于模式 2,即当整合野的抑制作用较弱时,神经元响应的多重分形性较大。对比表 1 和图 4 可以得出,神经元整合野的调制作用能够改变神经元响应的多重分形性,使其响应的复杂程度更高,其携带信息的潜力也越大。

进一步分析神经元响应的分形性与整合野的抑制指数[表示为 IS,采用式(9)计算]间的关系。

$$IS = 1 - \frac{R_{nCRF}}{R_{CRF}} \quad (9)$$

式(9)中, R_{nCRF} 表示神经元在整合野(即模式 2)刺激下的平均发放率, R_{CRF} 表示经典感受野刺激(即模式 1)下的平均发放率。

50个神经元的抑制指数与它们在三种模式下多重分形谱宽($\Delta\alpha$)的对比结果如图5所示。对于每种模式下的数据,分别采用线性方程进行线性拟合。拟合的参数汇总在表2中。

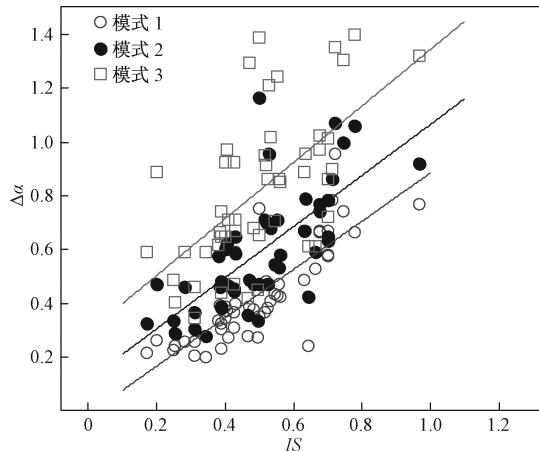


图5 不同模式下神经元响应的多重分形谱宽与其抑制指数间的关系

Fig. 5 Relationship between multifractal spectrum widths of neuronal response to three typical stimuli and their inhibition index

表2 图5中每组数据对应的拟合参数

Table 2 Fitting parameters for each group of data shown in fig. 5

刺激模式	拟合优度	最小均方误差
模式 1	0.646 3	0.108 4
模式 2	0.499 7	0.155 4
模式 3	0.357 8	0.226 7

从图5可以看出,不同模式下神经元响应的多重分形性均与抑制指数呈正向线性相关关系,这说明,神经元在整合野的调制下,若它的响应会发生较大波动(即抑制指数较大),则其在三种模式下响应的多重分形性会变大。这表明整合野的调制作用对神经元响应的多重分形性有一定的影响,该结论与前面分析的结论相一致。

3 讨论

采用多重分形去趋势波动分析方法,分析了不同整合野调制模式下V1区神经元响应的多重分形性特征,以及神经元响应的多重分形性与其受整合野抑制程度之间的关系。研究结果如下。

1)不同模式下V1区的神经元响应信号均具有多重分形的非线性动力学特征。因此,采用非线性动力学的研究能够更贴切地反应神经元的响应机制。

2)神经元的分形性强度与整合野的抑制指数呈正相关,且整合野的调制作用能够显著增强神经

元响应的多重分形谱 $\Delta\alpha$ 的值,从而增强神经元复杂程度,提高其携带信息的能力。

该研究从非线性动力学的角度探究整合野对神经元响应的调制作用机制,为理解V1区整合野的调制作用提供了新的思路,是对目前神经科学领域神经元整合机制相关研究的有效补充。

参 考 文 献

- 1 Akasaki T, Sato H, Yoshimura Y, et al. Suppressive effects of receptive field surround on neuronal activity in the cat primary visual cortex. *Neuroscience Research*, 2002; 43: 207—220
- 2 Zetsche C, Rohrbein F. Nonlinear and extra-classical receptive field properties and the statistics of natural scenes. *Network*, 2001; 12: 331—350
- 3 Song X M, Wang Y, Zhu Z, et al. Morphological bases of suppressive and facilitative spatial summation in the striate cortex of the cat. *Plos One*, 2011; 5 (11):1—11
- 4 Liu Y J, Hashemi N M, Lyon D C. Dynamics of extraclassical surround modulation in three types of V1 neurons. *Journal of Neurophysiol*, 2011; 105 (3):1306—1317
- 5 Xing D, Shapley R M, Dario L M J. Effect of stimulus size on the dynamics of orientation selectivity in macaque V1. *Journal of Neurophysiol*, 2005; 94 (1): 799—812
- 6 Baker D H, Graf E W. Contextual effects in speed perception may occur at an early stage of processing. *Vision Research*, 2010; 50 (2): 193—201
- 7 Alitto H J, Usrey W M. Surround suppression and temporal processing of visual signals. *Journal of Neurophysiol*, 2015; 113 (7): 2605—2617
- 8 Cantrell D R, Cang J, Troy J B, et al. Non-centered spike-triggered covariance analysis reveals neurotrophin-3 as a developmental regulator of receptive field properties of ON-OFF retinal ganglion cells. *PLoS Computational Biology*, 2010; 6 (10):1—16
- 9 Danca M, Wang Q. Synthesizing attractors of hindmarsh-rose neuronal systems. *Nonlinear Dynamics*, 2010; 62 (1—2):437—446
- 10 师黎,朱妍雯,牛晓可,等.大鼠初级视皮层整合野朝向信息调制的混沌性研究.科学 技术 与 工 程,2015;15(13):20—24,35
Shi L, Zhu Y W, Niu X K, et al. The chaotic analysis of the orientation information modulation of the non-classical receptive field in rat's primary visual cortex. *Scientific Technology and Engineering*, 2015;15 (13): 20—24,35
- 11 Peitgen H O, Jurgens H, Saupe D. Chaos and fractals: new frontiers of science. New York: Springer, 1992:183—228
- 12 Bacry E, Delour J, Muzy J F. Multifractal random walks. *Phys Rev E*, 2001; 64: 026103—026105
- 13 Peng C K, Buldyrev S V, Havlin S, et al. Mosaic organization of DNA nucleotides. *Phys Rev E*, 1994;49(2):1685—1389
- 14 Kantelhardt J W, Zschiegner S A, Koscielny-bunde E, et al. Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series. *Physica A*, 2002; 316 (1—4): 87—114
- 15 赵烨南,王俊.心律失常的多重分形去趋势波动分析.北京生物医学工程, 2012;31(5):474—477
Zhao Y N, Wang J. Multifractal detrended fluctuation analysis for

- the pathological electrocardiograph signals. Beijing Biological Medical Engineering, 2012;31(5):474—477
- 16 邹 鸣,高 庸,等.脑电信号的多重分形去趋势波动分析.北京生物医学工程, 2013;32(3):226—229
- Zou M, Gao Y, Wang X M, et al. Multifractal detrended fluctuation analysis on electroencephalography. Beijing Biological Medical Engineering, 2013;32(3):226—229

Multifractal Detrended Fluctuation Analysis upon Modulation of Non-classical Receptive Field in Rat's Primary Visual Cortex

HU Yue¹, LIU Xiao-fang¹, ZHU Yan-wen²

(School of Electrical and Information Engineering of Henan University of Urban Construction¹, Pingdingshan 467000, P. R. China;

School of Electrical Engineering of Zhengzhou University², Zhengzhou 450001, P. R. China)

[Abstract] The surrounding modulation of neurons by non-classical receptive field (nCRF) in primary visual cortex (V1) is hypothesized to be the basis of visual feature integration and figure-ground segregation. Multifractal detrended fluctuation analysis method was used to analyze the nonlinear dynamic characteristics of neuronal response under the modulation of nCRF, as well as the relationship between multifractal characteristics of neuronal response with their inhibition strengths modulated by nCRF. The results showed that the neuronal response to different visual stimuli presented multifractal. The width of multifractal singular spectrums $\Delta\alpha$ could discriminate different modulation conditions effectively, and was also positively correlated with the inhibition strengths of nCRF. Those results suggested that the modulation of nCRF produced much complex response, which helped to carry more information.

[Key words] non-classical receptive field primary visual cortex multifractal characteristics detrended fluctuation

(上接第 96 页)

- 6 杨昌柱,崔艳萍,黄 健,等. 三维电极反应器氧化降解苯酚. 化工进展, 2006;25(5):551—556

Yang Changzhu, Cui Yanping, Huang Jian, et al. Three dimensional

electrode reactor oxidating and degrading Phenol wastewater. Chemical Progress, 2006;25(5):551—556

The New Application of LiFePO₄ Three-dimensional Electrode that Processing the Phenol Wastewater

LU Si-ming, LI Tian-ren, LI Jing-wei, ZHANG Ling-yue, GUO Xin, LI Zhuan, LIU Meng, LIU Miao*

(School of Environmental Science and Resource, Jilin University, Changchun 130012, P. R. China)

[Abstract] a new method was introduced to improve the removal rate of phenol wastewater. LiFePO₄ as three-dimensional electrode, comparing with the removal rate of phenol wastewater, while processing the phenol wastewater. The results showed that using the LiFePO₄ three-dimensional electrode removing the phenol wastewater, the removal rate of phenol wastewater is higher 10 percent than using the two-dimensional electrode in the 75 minutes.

[Key words] Lithium iron phosphate three-dimensional electrode phenol wastewater