

局部场电位 γ 频带能量对朝向调谐特性研究

尚志刚, 冯平艳, 刘新玉, 牛晓可, 万红

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 朝向调谐特性是初级视觉皮层(V1区)神经元感受野的主要特性之一. 关于神经元朝向调谐特性的研究大多从锋电位(spike)发放率的角度出发, 然而 spike 信号易受噪声干扰, 在检测和采集过程中经常会发生假阳性、假阴性等问题, 影响了后续分析的结果. 研究了神经元局部场电位(LFP)信号 γ 频带能量对光栅朝向的调制机制, 发现 LFP γ 频带能量与刺激朝向有着较强的相关性, 携带视觉刺激朝向信息, 并且利用 LFP γ 频带能量和 spike 发放率获得的神经元偏爱朝向一致率达到了 67.4%, 朝向调谐一致率达到了 87.2%; 在低信噪比的情况下, LFP 比 spike 有更强的鲁棒性. 因此可知, 提取 LFP γ 频带能量是获得 V1 区神经元朝向调谐特性的又一有效途径, 而且在低信噪比时比 spike 发放率更有优势.

关键词: 初级视觉皮层; 局部场电位; 微电极阵列; 朝向调谐特性

中图分类号: TN911.73; R338.8 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2012.06.002

0 引言

朝向调谐特性是初级视觉皮层(Primary Visual Cortex, 又称 V1 区)神经元感受野的主要特性之一^[1]. 朝向调谐特性的传统研究方法是通过使用神经元 spike 发放率作为其朝向调谐指标. 然而, 由于在 spike 检测和分类过程中经常会发生假阳性和假阴性等问题^[2], 严重影响了后续分析的结果.

局部场电位(Local Field Potential, LFP)是电极尖端附近神经元响应信号的总和, 频带主要集中在 1~200 Hz^[3]. LFP 低频部分主要反映状态信息, 高频部分尤其是 γ 频带(30~90 Hz), 主要反映了与视觉刺激相关的信息. Juergens 等^[4]在研究初级视觉皮层局部场电位信号和 EEG 信号的关系时发现 γ 频带的能量反映了视觉刺激的信息. Frien 等^[5]研究指出 LFP γ 频带的功率会随着刺激朝向的改变而产生不同的调制作用; Siegel 和 König^[6]研究也发现 γ 频带的能量会随着朝向的改变而改变; Henrie 等^[7]用运动光栅刺激研究发现局部场电位 γ 频带的能量在不同的朝向下有选择性的加强. 但文献中没有给出两种信号对朝向调谐特性研究的定量比较.

以大鼠为研究对象, 将微电极阵列植入大鼠 V1 区, 以不同朝向的全屏光栅为视觉刺激, 同时记录 LFP 和 spike 信号, 研究 γ 频带能量对光栅朝向的调制作用. 结果表明: LFP γ 频带能量和 spike 发放率获得的神经元偏爱朝向一致率达到了 67.4%, 朝向调谐一致率达到了 87.2%. 并且仿真研究结果发现, 基于 LFP γ 频带能量的朝向调谐指数比 spike 发放率具有更强的抗噪能力.

1 原理与方法

1.1 朝向调谐指数的计算

不同朝向光栅刺激 LFP γ 频带能量朝向调谐指数 ρ_{LFP} ^[8] 计算如下:

$$\rho_{\text{LFP}} = \frac{P_p - P_o}{P_p + P_o} \quad (1)$$

若 $\rho_{\text{LFP}} > 0.7$, 则该神经元具有偏爱朝向. 其中 P_p 为最优朝向 γ 频带能量, P_o 为与最优朝向正交的两个朝向 γ 频带能量 P_1 、 P_2 的均值, 即: $P_o = (P_1 + P_2)/2$.

不同朝向光栅刺激 spike 发放率朝向调谐指数 ρ_s 可类似计算:

$$\rho_s = \frac{P_p - P_o}{P_p + P_o} \quad (2)$$

收稿日期: 2012-05-10; 修订日期: 2012-08-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60971110)

通信作者: 万红(1964-), 女, 辽宁沈阳人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事信息采集与信号处理研究, E-mail: wanhong@zzu.edu.cn.

若 $\rho_s > 0.7$, 则该神经元具有偏爱朝向. 其中 P_p 为最优朝向 spike 发放率; P_o 为与最优朝向正交的两个朝向 spike 发放率 P_3 、 P_4 的均值, 即: $P_o = (P_3 + P_4)/2$.

偏爱朝向一致率与朝向调谐一致率定义为: 设总神经元个数为 M , 其中两种信号都有偏爱朝向并且偏爱朝向一致的神经元个数为 N_1 , 两种都没有偏爱朝向的神经元个数为 N_2 , 偏爱朝向一致率为 $\lambda_1 = N_1/M$, 朝向调谐一致率为 $\lambda_2 = (N_1 + N_2)/M$.

1.2 LFP γ 频带的提取和功率谱估计

首先对原始数据使用通带为 0 ~ 250 Hz 的二阶 Butterworth 带通滤波器对信号进行滤波, 然后对滤波后的信号重采样, 得到采样频率为 2 kHz 的局部场电位信号.

由于 LFP 为非平稳非高斯信号, 在检测的过程中往往会出现一些短时瞬态脉冲, 这些瞬态脉冲信号可能包含刺激的信息. 传统的瞬态脉冲检测方法中, 匹配滤波^[9]是最常用的一种, 但是 LFP 非平稳性极强, 匹配模板需要不断更新. 因此, 采用小波变换的方法, 用逐渐精细的时间分辨率逼近信号的快变部分, 用逐渐精细的频率分辨率逼近信号的慢变部分.

小波基函数 $\psi(t)$ 不具唯一性, 不同的小波基函数分析得到的结果相差甚远. 笔者基于 LFP 信号的特点, 选择与 LFP 信号相似的 'db5' 作为小波的基函数.

小波分解公式为:

$$WT_f(j, k) = \int f(t) \psi_{j,k}^*(t) dt, j \in Z; \quad (3)$$

小波重构公式为:

$$f(t) = \frac{1}{A} \sum_{j,k} WT_f(j, k) \cdot \psi_{j,k}(t); \quad (4)$$

其中, 小波基函数为:

$$\psi_{j,k}(t) = a_0^{-\frac{j}{2}} \psi(a_0^{-j}t - k\tau_0). \quad (5)$$

式中: $a_0 > 0$; $j, k \in Z$; $f(t)$ 为原信号; a_0^{-j} 为尺度因子, $k\tau_0$ 为平移因子.

LFP 信号采样频率为 2 kHz, 为了精确获得 γ 频带信号, 按照式 (3) 的小波分解算法对原始信号进行 5 层小波分解, 经过 5 层分解后, 选择其中 62.5 ~ 125 Hz 频带再分解后获得 62.5 ~ 93.75 Hz 频带, 利用此频带与第一次分解得到的 31.25 ~ 62.5 Hz 频带进行重建, 得到 γ 频带信号 (30 ~ 90 Hz), 重构出的 γ 频带信号如图 1 所示. 小波重构出的 γ 频带较好地抑制了噪声并且保留了响应

的瞬态特征.

笔者选用 Welch 功率谱估计对 LFP 进行功率估计. Welch 功率谱估计的关键是选取合适的窗和窗长以适应不同分辨率的要求. 因此笔者选择分辨率和方差水平都较好的 Hamming 窗进行谱估计. 选用的 Hamming 窗分辨率为 8 Hz, 局部场电位频带信号带宽约为 60 Hz, 采样频率 2 kHz. 对比研究发现: 分辨率 8 Hz 较好地抑制了噪声, 并且可以准确地提取出频带的能量, 其对应的窗长 $N = 500$, 其功率谱估计如图 2 所示. 由图 2 可以看出, 该分辨率下谱估计方差和噪声水平都较好, 频带能量主要集中在 35 ~ 60 Hz 频带内.

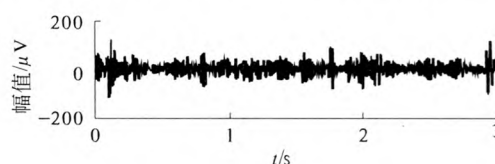


图 1 重构的 γ 频带

Fig. 1 Gamma band

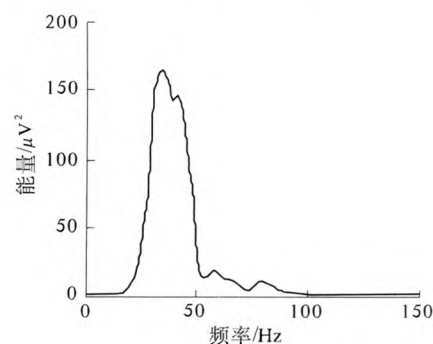


图 2 功率谱估计 ($N = 500$)

Fig. 2 Power spectral estimation ($N = 500$)

2 实验分析

2.1 实验数据采集

实验采用年龄 11 周左右, 体重 200 ~ 250 g 的成年雄性 Long Evans (LE) 大鼠. 术前实验动物用水合氯醛腹腔注射麻醉后, 固定于 Stoelting 脑立体定位仪上, 参考大鼠脑立体定位图谱在 V1 区植入 2×8 铂铱合金 Microprobes 微电极丝阵列. 植入电极 1.5 h 后, 对大鼠进行 12 个朝向 (0 ~ 330°, 间隔 30°) 的全屏光栅视觉刺激, 并用 Cerebus™ 数据采集系统记录大鼠 V1 区初级视觉皮层信号.

2.2 LFP γ 频带能量分析

为了研究 γ 频带能量是否能反应刺激的信息, 笔者首先分析了有光栅刺激和无光栅刺激 γ

频带的能量分布.图3为其中一个通道的分析结果.由图3可以看出: γ 频带能量主要集中在35~60 Hz,并且有刺激时 γ 频带能量比无刺激时有较为明显的变化,说明了 γ 频带的能量编码了刺激的信息.

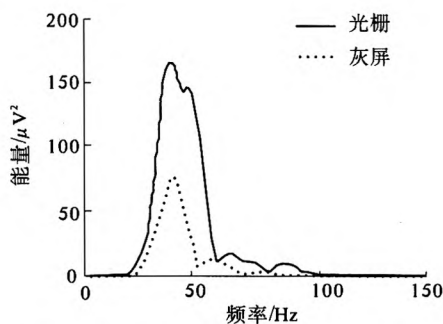


图3 有刺激和无刺激 γ 频带能量图
Fig.3 Power of gamma band with simulation and without simulation

为了研究 γ 频带的能量对于光栅朝向的调制作用,笔者采用最佳参数光栅刺激(时间频率4 Hz,空间频率0.2 cpd),随机变换其朝向,其中一个通道偏爱朝向和正交朝向的分析结果如图4所示.由图4可知,不同的朝向引起的神经元响应不同,其中偏爱朝向刺激前后 γ 频带能量差变化最为显著.

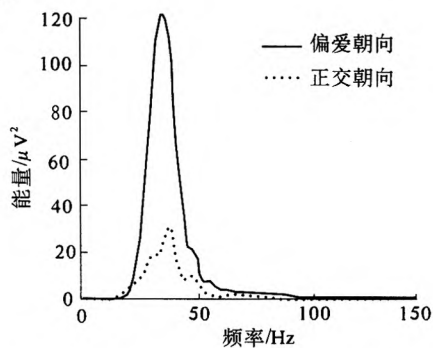


图4 偏爱朝向和正交朝向刺激前后 γ 频带能量差
Fig.4 Power increase of the preferred and orthogonal orientation

2.3 spike的提取和分类

对原始数据使用通带0.25~3 kHz的二阶带通 Butterworth 滤波器滤波,然后进行阈值检测,阈值水平设定为信号标准差的5倍^[10].利用主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)结合 k -means 聚类进行spike的分类提取^[11].

某通道第一和第二主成分利用 k -means 聚类后如图5(b)所示.锋电位被分为明显的两类,选用发放较多的一类(图5(c))做研究,其朝向调谐曲线如图5(d)所示.由图可以看出,该神经元

对90°光栅表现出较为明显的朝向选择性.

2.4 LFP γ 频带能量和spike的朝向调谐分析

2.4.1 LFP与spike朝向调谐对比

分别用两种信号研究了172个神经元的朝向调谐特性.其中两种信号有150个神经元(116个有偏爱朝向,34个无偏爱朝向)的分析结果保持一致,有偏爱朝向的一致率达到了67.4%,总体一致率达到了87.2%.这说明 γ 频带能量可以作为研究朝向选择性的有效指标,其中一个神经元的对比结果如图6所示.

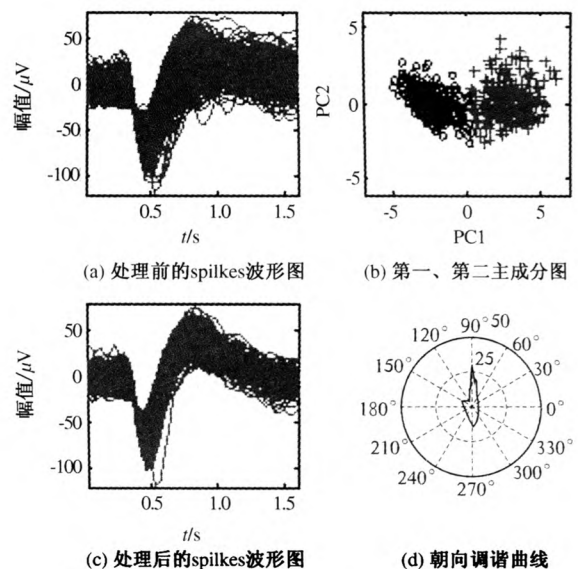


图5 PCA结合 k -means聚类的spike分类结果
Fig.5 The result of spike sorting based on PCA combined with k -means

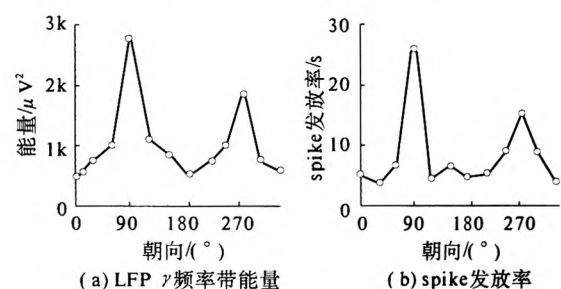


图6 LFP γ 频带能量与spike发放率朝向调谐曲线对比图
Fig.6 Tuning curve of orientations comparison between LFP gamma band power and spikes fire ratio

图6为某一通道两种方法的朝向调谐曲线图.图6(a)为基于LFP γ 频带能量的朝向调谐曲线,朝向调谐指数 $\rho_{LFP} = 0.7109$;图6(b)为基于spike发放率的朝向调谐曲线,朝向调谐指数 $\rho_s = 0.7041$.可以看出,该神经元LFP频带能量在研究朝向调谐特性时能达到和spike发放率一样的效果.

2.4.2 不同信噪比下实验数据分析

为研究利用 LFP 和 spike 两种信号分析朝向调谐特性时的抗噪能力,笔者研究了不同信噪比下两种信号的分析结果.实验数据由实测信号加白噪声组成.从原始信号中提取出 spike 信号和 LFP γ 频带信号,重构成纯净的神经放电信号,如图 7 所示.

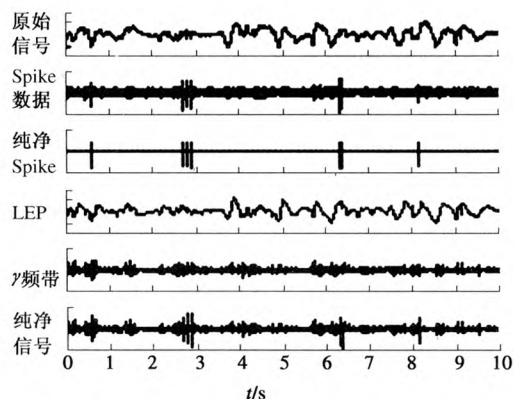


图 7 仿真数据的建立

Fig.7 The simulation data generation

将重构的原始纯净信号加入不同 SNR 的高斯白噪声^[12],分析不同信噪比下两种信号的朝向调谐特性.针对 LFP 频带能量和 spike 发放率,计算在不同信噪比时两种信号的朝向调谐指数和偏爱朝向.两种方法下偏爱朝向以及调谐指数的分析结果如表 1 所示.

表 1 不同信噪比下 LFP γ 频带能量与 spike 发放率的比较

Tab.1 The comparison between LFP Gamma band power and spike under different SNR

SNR/dB	spike 发放率		LFP γ 频带能量	
	偏爱朝向/(°)	调谐指数	偏爱朝向/(°)	调谐指数
—	90	0.704 1	90	0.708 3
25.0	90	0.700 6	90	0.707 0
20.0	90	0.691 0	90	0.704 0
15.0	90	0.680 1	90	0.702 3
10.0	90	0.660 7	90	0.702 2
5.0	90	0.641 7	90	0.700 9
0.0	90	0.505 0	90	0.700 4
-2.5	240	0.480 3	90	0.700 3
-5.0	210	0.410 2	90	0.700 3

由表 1 可以看出:随着信噪比的降低,两种算法的朝向调谐指数都有所降低,其中基于 spike 发放率的朝向调谐指数降低更快.当信噪比在 0 dB 以下时,基于 spike 发放率的偏爱朝向出现了改变.这说明,与 spike 发放率相比,LFP γ 频带能量在计算神经元感受野朝向调谐特性方面具有更

强的抗噪能力.

3 结论

利用 LFP 信号 γ 频带能量分析了 V1 区神经元感受野的朝向调谐特性.用小波变换结合 Welch 功率谱估计提取并计算了局部场电位 γ 频带在光栅朝向刺激下的能量分布,并对比分析了 LFP 和 spike 两种信号下的研究结果.

研究表明,与传统基于 spike 发放率的朝向调谐特性计算方法相比,基于 LFP γ 频带能量计算方法具有更强的抗噪能力,在低信噪比的情况下也能有效地估计出神经元感受野的朝向调谐特性.因此,LFP γ 频带能量在低信噪比的情况下,研究 V1 区神经元感受野的朝向调谐特性方面比 spike 发放率更有优势,为研究大鼠 V1 区神经元感受野的朝向调谐特性提供了另一种可行的方法.

参考文献:

- [1] MELIZA C D, DAN Y. Receptive field modification in rat visual cortex induced by paired visual stimulation and single cell spiking [J]. *Neuron*, 2006, 49: 183 - 189.
- [2] HILL D N, MEHTA S B, KLEINFELD D. Quality metrics to accompany spike sorting of extracellular signals [J]. *The Journal of Neuroscience*, 2011, 31 (24): 8699 - 8705.
- [3] GAWNE T J. The local and nonlocal components of the local field potential in awake primate visual cortex [J]. *Journal of Computational Neuroscience*, 2010, 29: 615 - 623.
- [4] JUERGENS E, GUETTLER A, ECKHORN R. Visual stimulation elicits locked and induced gamma oscillations in monkey intracortical and EEG potentials, but not in human EEG [J]. *Experimental Brain Research*, 1999, 129: 247 - 259.
- [5] FROMM A, ECKHORN R, WOELBEM T, et al. Fast oscillations display sharper orientation tuning than slower components of the same recordings in striate cortex of the awake monkey [J]. *European Journal of Neuroscience*, 2000, 12: 1453 - 1465.
- [6] SIEGE L M, KNIG P. Frequency distribution of stimulus dependent synchronization in area 18 of the awake cat [J]. *The Journal of Neuroscience*, 2003, 23: 4251 - 4260.
- [7] HENNE J A, SHAPLEY R. LFP power spectra in V1 cortex: the graded effect of stimulus contrast [J].

- Journal of Neurophysiology, 2005, 94(1): 479 - 490.
- [8] CARANDINIA M, FERSTE D. Membrane potential and firing rate in cat primary visual cortex [J]. The Journal of Neuroscience, 2000, 20(1): 470 - 484.
- [9] 万红, 郜丽赛, 牛晓可. 基于匹配小波变换的初级视皮层神经元锋电位分类[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2011, 32(3): 90 - 94.
- [10] VARGAS-IRWIN C, DONOGHUE J P. Automated spike sorting using density grid contour clustering and subtractive waveform decomposition [J]. Journal of Neuroscience Methods, 2007, 164(1): 1 - 18.
- [11] LEWICKI M S. A review of methods for spike sorting: the detection and classification of neural action potentials [J]. Computation in Neural Systems, 1998 (9): 53 - 78.
- [12] 王静, 封洲燕. 多通道神经元锋电位检测和分类的新方法[J]. 生物化学与生物物理进展, 2009, 36(5): 641 - 647.

Experimental Study on Orientation Tuning Characteristics Based on Gamma Band Power of Local Field Potential

SHANG Zhi-gang, FENG Ping-yan, LIU Xin-yu, NIU Xiao-ke, WAN Hong

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Orientation tuning characteristic is one of the main features in neuron from primary visual cortex (V1). Most studies of orientation tuning characteristics in neuron are based on the spike rating, however, spikes are susceptible to noise and often have some questions in the detection and sorting, such as false positive, false negative and so on, which affected spikes analysis results. In this paper, neuron orientation tuning characteristics to raster based on gamma band power of local field potential (LFP) are studied. We found that gamma band power carries information about the visual stimulus, and has a strong correlation with orientations. The test results of simulation and experiment show that the concordance rate of gamma power and spike preferenced orientation reaches 67.4%, orientation tuning reaches 87.2%; in the case of low signal-to-noise ratio (SNR), robustness of LFP is stronger than spike. Therefore, LFP gamma band power is also an effective way to acquire V1 orientation tuning characteristics, especially in the low SNR, which has more advantages than spike in orientation tuning characteristics form V1 neuron.

Key words: primary visual cortex; local field potential; microelectrode array; orientation tuning characteristics

(上接第4页)

Orientation Encoding of Primary Visual Cortex Based on Bayesian Estimation Theory

SHI Li, WANG Yi

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to recognize the orientation encoding mechanism in the primary visual cortex (V1), a hybrid encoding method integrating firing rates and the inter-spike-intervals of neurons in rats' primary visual cortex was proposed based on Bayesian estimation theory here. The gratings with different orientations were used to stimulate the anesthetic LE rats, and their spike sequences were collected by the microelectrode array, the firing rates and inter-spike-intervals were integrated to encode the orientation using Bayesian estimation theory. And the results were compared with the encoding ones with firing rates simply. The results showed that the encoding precision of the hybrid method was higher than the precision of the firing rate method. It is also proved that inter-spike-intervals and the firing rates in rats' area V1 encode the orientation together.

Key words: primary visual cortex; grating; orientation; firing rate; ISI; encode