

# 电磁感应效应对神经网络中相干共振的影响研究

周春慧子, 伦秋文

河南科技大学数学与统计学院, 河南 洛阳

收稿日期: 2024年3月9日; 录用日期: 2024年4月5日; 发布日期: 2024年4月12日

## 摘要

本文基于FitzHugh-Nagumo (FHN)神经元模型建立了含高斯白噪声和电磁感应电流的小世界神经网络模型, 仿真了噪声诱导神经网络产生相干共振, 并进一步研究了神经网络中电磁感应强度对相干共振现象的影响。研究表明: 中等强度的噪声可以诱导神经网络发生相干共振现象, 且相干共振的强度随着电磁感应的增强而增强。这是因为随着电磁感应强度的增大, FHN神经元的Hopf分岔点向静息态移动。本文的结果进一步丰富了神经网络的随机动力学, 同时也为神经系统中的相干共振现象的调控提供了有效方法。

## 关键词

噪声, 电磁感应, 神经网络, 相干共振

# Research on the Effect of Electromagnetic Induction on Coherent Resonance in Neuronal Networks

Chunhuizi Zhou, Qiuwen Lun

School of Mathematics and Statistics, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan

Received: Mar. 9<sup>th</sup>, 2024; accepted: Apr. 5<sup>th</sup>, 2024; published: Apr. 12<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

In this study, a small-world neuronal network model containing Gaussian white noise and electromagnetic induction current is established based on the FitzHugh-Nagumo (FHN) neuron model.

文章引用: 周春慧子, 伦秋文. 电磁感应效应对神经网络中相干共振的影响研究[J]. 应用数学进展, 2024, 13(4): 1226-1233. DOI: 10.12677/aam.2024.134113

The simulation focuses on the noise-induced coherent resonance of the neuronal network, specifically exploring the impact of electromagnetic induction intensity on this coherent resonance phenomenon. The findings indicate that a moderate level of noise intensity can induce coherent resonance in neuronal network. Moreover, the intensity of coherent resonance escalates with the increased strength of electromagnetic induction. This observation is attributed to the movement of the Hopf bifurcation point of FHN neurons towards the resting state as the electromagnetic induction intensity rises. The outcomes presented in this paper contribute to the broader understanding of stochastic dynamics in neuronal networks and offer an effective approach for modulating coherent resonance phenomena in neural systems.

## Keywords

Noise, Electromagnetic Induction, Neuronal Networks, Coherence Resonance

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

噪声在神经系统中是无处不在的[1]。它有很多不同的来源,也会产生很多不同的影响。神经元中噪声的来源主要包括通道噪声,即离子通道的随机开关,以及突触噪声,即突触随机释放神经递质[2]。通常,人们会认为噪声产生的影响是消极的。然而,大量的实验结果表明:在某些特定条件下,噪声对非线性系统的动力学有着积极影响[2]。其中两个积极影响就是诱导神经元产生随机共振和相干共振[3] [4]。随机共振是描述非线性系统中噪声的存在可以增加系统对外部刺激的输出响应[5] [6] [7]。相干共振与随机共振不同,即使在没有外部周期性刺激的情况下,噪声也可以使非线性系统呈现出类随机共振[8] [9] [10]。实验证明,生物神经系统中普遍存在着随机共振和相干共振。例如,噪声可以诱导小龙虾尾部神经元产生随机共振现象[11],也可以诱导猫的中枢神经系统发生相干共振现象[12],这表明噪声在神经系统的信息编码中起着重要作用。

一直以来,随机共振和相干共振现象都受到广泛学者的关注。例如,Benzi等人用随机共振现象来解释第四纪冰川问题[13]。Lee等人研究了无外部周期信号的Hodgkin-Huxley (HH)模型,发现相干共振发生在一定噪声强度处[14]。同时,神经系统中的不同因素对噪声诱导的随机共振和相干共振的影响也受到了广泛学者的关注。例如,随着突触时滞的增加,神经网络会产生多次随机共振或相干共振现象[15];对于较弱耦合强度的神经网络,相位噪声能诱导产生两次相干共振现象[16];对于较强耦合强度的神经网络,相位噪声能诱导产生一次相干共振现象[16];对于中等耦合强度的神经网络,小世界网络结构可以增强随机共振现象[17];在HH神经网络中,抑制性自突触增强相干共振[18]。在HH神经元中,抑制性自突触增强随机共振[3]。

最近,神经系统中电磁感应效应对随机共振和相干共振的影响受到了广泛关注。神经系统中的电磁感应效应主要来源于膜电位的波动[19] [20]。有研究利用忆阻器介导电磁感应在神经系统仿真随机共振和相干共振现象[21] [22] [23] [24]。在这些研究中,关注的是电磁感应效应对单神经元的相干共振的影响。然而,电磁感应效应对神经网络的相干共振的影响以及神经系统中多种因素对相干共振的影响受到的关注相对较少。

本文基于FitzHugh-Nagumo (FHN)神经元建立了一个静息态的神经网络模型,并仿真相干共振现

象, 进一步研究了电磁感应效应的强度对神经网络中相干共振的影响。

## 2. 模型与方法

### 2.1. FHN 神经元模型

FHN 神经元模型可以看作是 HH 神经元模型的简化[25], 其方程描述如下:

$$\begin{cases} \varepsilon \frac{dv}{dt} = v - \frac{v^3}{3} - w \\ \frac{dw}{dt} = v + a \end{cases} \quad (1)$$

其中  $v$  表示膜电位,  $w$  表示膜恢复变量。参数  $\varepsilon$  是 FHN 模型的系统参数, 可以保证神经元的膜电位随着时间快速变化, 本文将其固定为 0.01。兴奋性参数  $a$  决定了 FHN 神经元的放电行为, 当  $a > 1$  时, 模型有一个稳定的焦点, 其对应于模型的静息态, 如图 1(a)所示。当  $a < 1$  时, 模型有一个稳定的极限环, 其对应于模型的周期放电态, 如图 1(b)所示。当  $a = 1$  时, 模型发生 Hopf 分岔。本文将参数  $a$  固定为 1.1, 模型处于静息态。

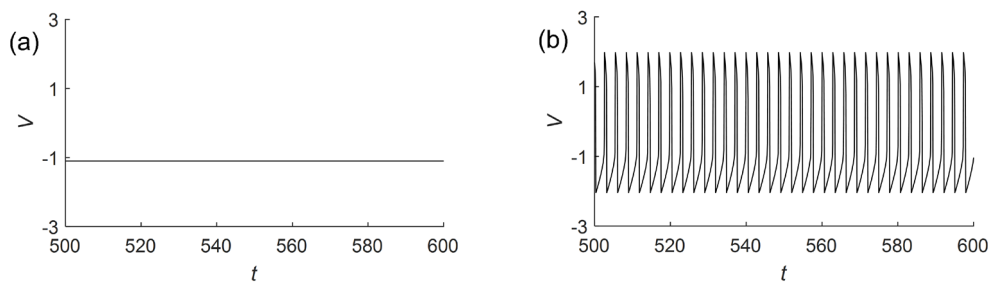


Figure 1. Plots of membrane potential over time. (a)  $a = 0.9$ ; (b)  $a = 1.1$

图 1. 膜电位随时间的变化图。(a)  $a = 0.9$ ; (b)  $a = 1.1$

### 2.2. 神经网络模型

构建含高斯白噪声和电磁感应的神经网络模型如下:

$$\begin{cases} \varepsilon \frac{dv_i}{dt} = v_i - \frac{v_i^3}{3} - w_i + k_0 \rho(\varphi_i)(v_i - v_e) + g \sum_{j=1}^N C_{ij} (v_j - v_i) \\ \frac{dw_i}{dt} = v_i + a + \xi_i(t) \\ \frac{d\varphi_i}{dt} = k_1 v_i - k_2 \varphi_i \end{cases} \quad (2)$$

模型中, 下标  $i (i=1, 2, \dots, N)$  表示神经网络中的第  $i$  个神经元。本文的研究考虑 WS 小世界神经网络[26], 神经元的总数固定为  $N = 100$ 。  $k_0$  代表电磁感应强度, 由磁通量  $\varphi$  控制的忆阻器的方程为:  $\rho(\varphi_i) = \alpha + 3\beta\varphi_i^2$ , 参数  $g$  表示耦合强度,  $g \sum_{j=1}^N C_{ij} (v_j - v_i)$  表示为第  $i$  个神经元接收到的耦合电流。  $(C_{ij})_{N \times N}$  是神经网络的连接矩阵, 当  $i \neq j$  时,  $C_{ij} = 0$ , 否则,  $C_{ij} = 1$ 。  $\xi_i(t)$  表示高斯白噪声, 其统计特征为:  $\langle \xi_i(t) \rangle = 0$  和  $\langle \xi_i(t) \xi_j(t') \rangle = 2D \delta_{ij} \delta(t - t')$ 。其中  $D$  表示噪声强度,  $\delta(\cdot)$  表示狄拉克函数。方程(1)是一个含高斯白噪声的高维的随机微分方程。

本文中, 将 FHN 模型的系统参数  $\varepsilon$  固定为 0.01,  $a$  固定为 1.1, 与电磁感应相关的参数固定为:  $\alpha = 0.1$ ,

$\beta = 0.1$ ,  $k_1 = 0.1$ ,  $k_2 = 1.0$ 。WS 小世界网络的重连概率  $p$  固定为 0.2, 不同神经元间的耦合强度  $g$  固定为 0.05, 重连概率  $p$  和耦合强度  $g$  的其它取值不会定性影响本文的结果[27] [28]。

### 2.3. 方法

本文使用欧拉方法数值求解随机微分方程(2), 积分步长为 0.001。所有神经元的峰峰间期(interspike interval, ISI)的变系数的倒数  $\lambda$  用于定量描述神经元网络的放电规则性。 $\lambda$  定义为 ISI 的均值与 ISI 的标准差的比值, 即  $\lambda = \langle \text{ISI} \rangle / \sqrt{\text{Var}(\text{ISI})}$ 。由定义可知: 较大的  $\lambda$  值代表神经元网络的放电规则性强。如果  $\lambda$  的值随噪声强度  $D$  的增大而先增大后减小, 那么神经网络产生相干共振。

## 3. 结果

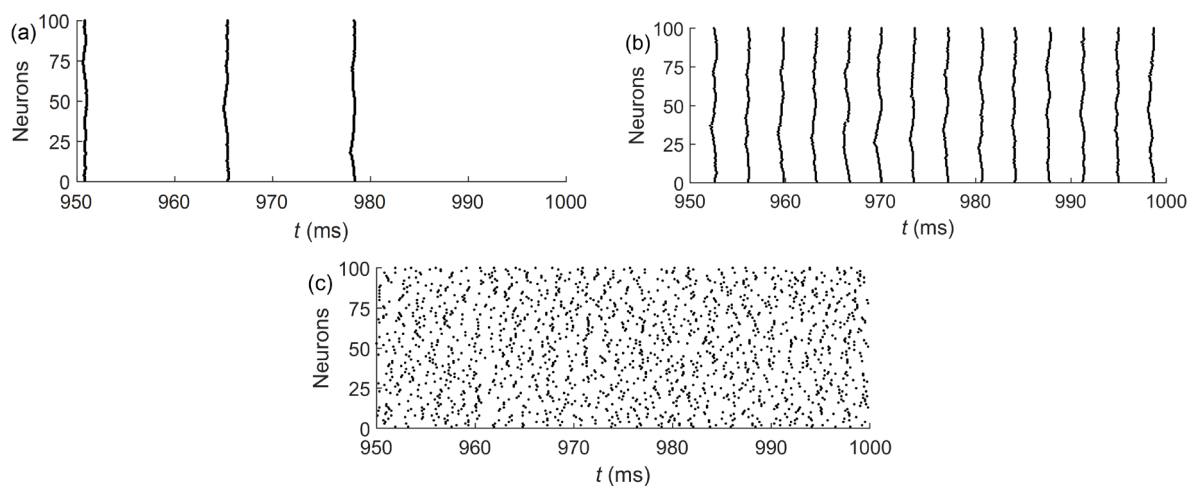
### 3.1. 当 $k_0 = 0$ 时, 神经网络模型中的相干共振现象

图 2 描绘了当神经网络中的电磁感应强度为 0 时, 在不同噪声强度下神经网络放电的时空图, 每个黑点对应于神经元的一次放电。当噪声强度  $D$  很小时(例如  $D = 0.001$ ), 网络中神经元的放电不规则且放电率较低(图 2(a))。当噪声强度  $D$  增大至  $D = 0.0063$  时, 网络中神经元的放电规则性增强且放电率也增大(图 2(b))。当噪声强度  $D$  进一步增大至  $D = 1$  时, 网络中神经元的放电规则性变弱, 但放电率继续增大(图 2(c))。图 2 表明, 神经网络放电规则性随着噪声强度的增大而呈现出先增大后减小的趋势, 即产生相干共振现象。

为了进行定量验证噪声可以诱导神经网络产生相干共振现象, 图 3 描绘了在  $k_0 = 0$  的条件下,  $\lambda$  随着噪声强度  $D$  的变化趋势(黑色圆形标注)。这条曲线显示,  $\lambda$  随着噪声强度  $D$  的增大而呈现出先增大再减小的趋势, 并且在  $D$  约为 0.0063 时达到最大值, 神经网络产生了相干共振。这与图 2 中的分析结果相一致。

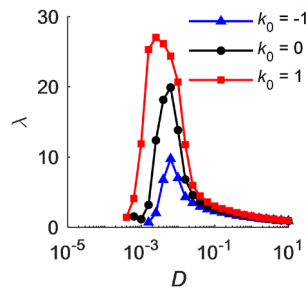
### 3.2. 当 $k_0 < 0$ 时, 神经网络模型中的相干共振现象

当神经网络中的电磁感应强度  $k_0 = -1$  时, 图 3 描绘了  $k_0 = -1$  时  $\lambda$  随噪声强度  $D$  的变化趋势(蓝色三角形标注)。这条曲线显示,  $\lambda$  随噪声强度  $D$  的增大而先增大再减小, 并在  $D$  约为 0.0063 时达到最大



**Figure 2.** When the electromagnetic induction intensity  $k_0 = 0$ , space-time plots of the neuronal networks for different  $D$  values. (a)  $D = 0.001$ ; (b)  $D = 0.0063$ ; (c)  $D = 1$

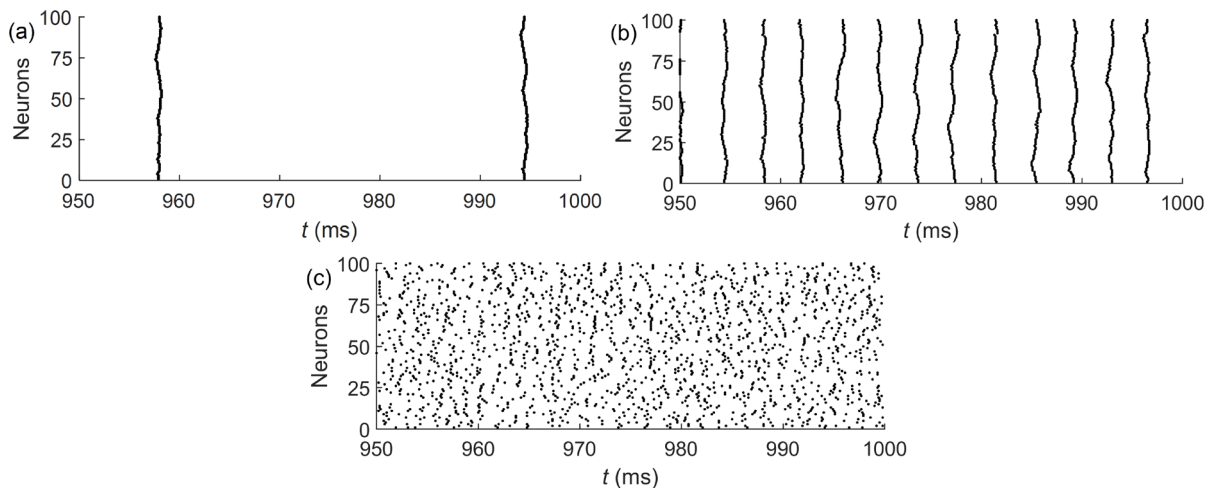
**图 2.** 当电磁感应强度  $k_0 = 0$  时, 不同噪声强度  $D$  下神经网络的时空图。(a)  $D = 0.001$ ; (b)  $D = 0.0063$ ; (c)  $D = 1$



**Figure 3.** Under different  $k_0$  values  $\lambda$  as the noise intensity  $D$  changes.  $k_0 = -1$  (blue triangle),  $k_0 = 0$  (black circle),  $k_0 = 1$  (red square)

**图 3.** 不同  $k_0$  值下  $\lambda$  随着噪声强度  $D$  的变化规律。  $k_0 = -1$  (蓝色三角形),  $k_0 = 0$  (黑色圆圈),  $k_0 = 1$  (红色正方形)

值, 神经网络产生了相干共振。另外, 图 4 刻画了不同噪声强度下神经网络放电的时空图。当噪声强度很小时(例如,  $D = 0.0016$  时), 网络中神经元的放电不规则且神经元的放电率较低(图 4(a))。当噪声强度增大至  $D = 0.0063$  时, 神经元放电的规则性变强且神经元的放电率增大(图 4(b))。当噪声强度进一步增大至  $D = 1$  时, 神经元放电的规则性减弱, 但神经元的放电率继续增大(图 4(c))。当  $D = 0.0063$  时, 神经元的放电状态最规则, 神经网络产生相干共振现象。这与图 3 中蓝色三角形标注的曲线一致。

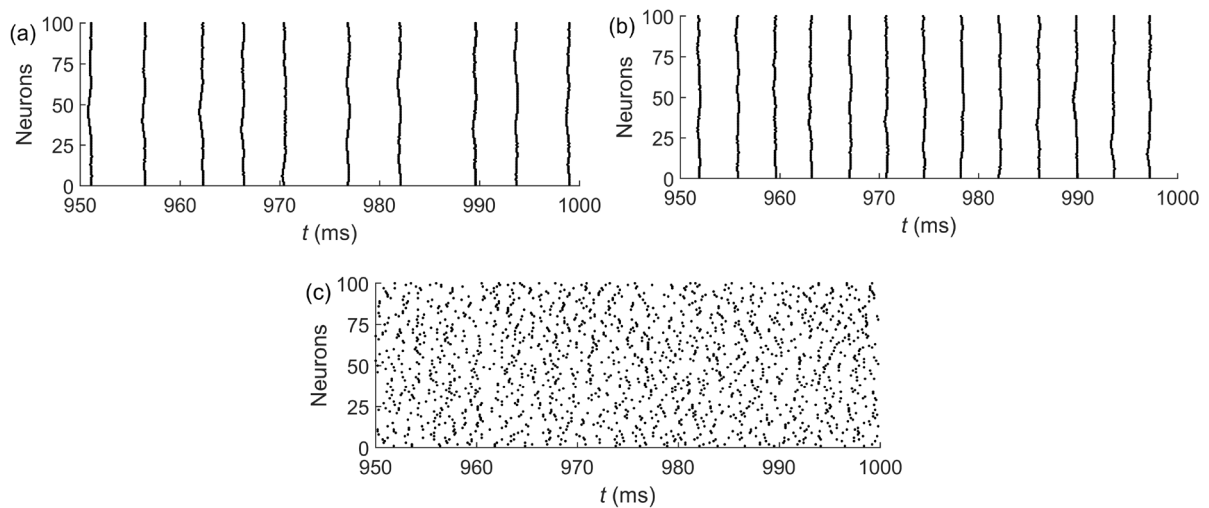


**Figure 4.** When the electromagnetic induction intensity  $k_0 = -1$ , space-time plots of the neuronal networks for different  $D$  values. (a)  $D = 0.0016$ ; (b)  $D = 0.0063$ ; (c)  $D = 1$

**图 4.** 当电磁感应强度  $k_0 = -1$  时, 不同噪声强度  $D$  下神经网络的空间图。(a)  $D = 0.0016$ ; (b)  $D = 0.0063$ ; (c)  $D = 1$

### 3.3. 当 $k_0 > 0$ 时, 神经网络模型中的相干共振现象

图 3 也描绘了当神经网络中的电磁感应强度  $k_0 = 1$  时,  $\lambda$  随噪声强度  $D$  的变化曲线(红色正方形标注)。这条曲线显示,  $\lambda$  随噪声强度  $D$  增大而呈现出先增大再减小的趋势, 并在  $D$  约为 0.0025 时达到最大值, 神经网络产生了相干共振现象。图 5 刻画了在不同的噪声强度下神经网络放电的时空图。  $D$  很小时(例如,  $D = 0.0006$  时), 网络中神经元的放电不规则且神经元放电率较低(图 5(a))。当  $D$  增大至 0.0025 时, 神经元放电的规则性变强且放电率增大(图 5(b))。当噪声强度  $D$  进一步增大至 1 时, 神经元放电的规则性变弱, 但放电率继续增大(图 5(c))。噪声强度  $D = 0.0025$  时, 神经元的放电状态达到最规则, 神经网络产生了相干共振。这与图 3 中红色正方形标注的曲线一致。



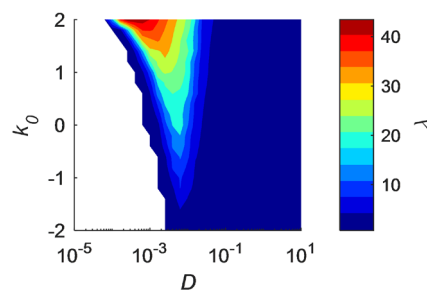
**Figure 5.** When the electromagnetic induction intensity  $k_0 = 1$ , space-time plots of the neuronal networks for different  $D$  values. (a)  $D = 0.0006$ ; (b)  $D = 0.0025$ ; (c)  $D = 1$

**图 5.** 当电磁感应强度  $k_0 = 1$  时, 不同噪声强度  $D$  下神经网络的时空图。(a)  $D = 0.0006$ ; (b)  $D = 0.0025$ ; (c)  $D = 1$

### 3.4. 不同电磁感应强度下神经网络的相干共振

上述研究结果表明: 在三个电磁感应强度下(即  $k_0 = 0$ 、 $k_0 = -1$ 、 $k_0 = 1$ ), 神经网络均会产生相干共振现象。此外, 针对这三个电磁感应强度  $k_0$ ,  $\lambda$  均有先增大后减小的趋势, 这进一步说明, 神经网络在三个不同的电磁感应强度下均会产生相干共振现象。同时, 电磁感应强度  $k_0$  从  $-1$  增大至  $1$ , 发生相干共振现象对应的  $\lambda$  值也会随之增大。这说明相干共振的强度会随着电磁感应强度的增大而增大。

为了进一步描述电磁感应强度  $k_0$  对神经网络的相干共振现象的影响, 图 6 刻画了  $\lambda$  随电磁感应强度  $k_0$  和噪声强度  $D$  的变化趋势。图 6 中的红色区域表示较大的  $\lambda$  值, 蓝色区域表示较小的  $\lambda$  值。图 6 表明, 在电磁感应强度  $k_0$  保持不变的情况下,  $\lambda$  随  $D$  的增大而呈现出先增大后减小的趋势。因此, 神经网络在不同电磁感应强度下均会产生相干共振现象。同时, 随着电磁感应强度的增加, 产生相干共振现象对应的  $D$  值会减小,  $\lambda$  值会增大。这表示随着网络中电磁感应强度的增大, 产生相干共振现象对应的噪声强度会减小, 同时相干共振的强度会随之增强。根据之前的研究, 诱导相干共振的噪声强度减小以及相干共振的强度增大是因为随着电磁感应强度的增大, 单个 FHN 神经元的 Hopf 分岔点向静息态移动 [28]。



**Figure 6.** The indicator  $\lambda$  varies with the changes in noise intensity  $D$  and electromagnetic induction intensity  $k_0$

**图 6.** 指标  $\lambda$  随着噪声强度  $D$  和电磁感应强度  $k_0$  的变化规律



## 4. 结论

本文研究了噪声诱导静息态神经网络产生相干共振现象, 研究结果发现在不同的电磁感应强度下, 中等强度的高斯白噪声均可以诱导静息态神经网络发生相干共振。尽管前人也研究了噪声能诱导神经元发生相干共振, 但是前人的研究中发现噪声可以诱导单神经元发生相干共振[29]。本研究揭示了噪声可以诱导神经网络发生相干共振, 本研究进一步丰富了神经网络的随机动力学。

此外, 本文还揭示了电磁感应的强度对神经网络的相干共振有重要影响。电磁感应强度的增大会使发生相干共振对应的噪声强度的临界值减小, 同时  $\lambda$  的最大值会增大, 即随着电磁感应的增强, 相干共振的强度也会随之增强。本文的结果揭示调节电磁感应强度是调控神经网络相干共振现象的重要手段。

## 参考文献

- [1] 贾雁兵. 噪声和耦合时滞作用下复杂神经网络的同步和共振动力学[D]: [博士学位论文]. 西安: 陕西师范大学, 2014.
- [2] Yamakou, M.E. and Jost, J. (2018) Coherent Neural Oscillations Induced by Weak Synaptic Noise. *Nonlinear Dynamics*, **93**, 2121-2144. <https://doi.org/10.1007/s11071-018-4311-1>
- [3] 李玉娇, 杨晓瑜, 曲艺贞. 抑制性自突触增强 Hodgkin-Huxley 神经元的随机共振[J]. 应用数学进展, 2022, 11(4): 2371-2381.
- [4] Van Der Groen, O. and Wenderoth, N. (2016) Transcranial Random Noise Stimulation of Visual Cortex: Stochastic Resonance Enhances Central Mechanisms of Perception. *Journal of Neuroscience*, **36**, 5289-5298. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4519-15.2016>
- [5] Benzi, R., Sutera, A. and Vulpiani, A. (1981) The Mechanism of Stochastic Resonance. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, **14**, L453. <https://doi.org/10.1088/0305-4470/14/11/006>
- [6] Gammaitoni, L., Hänggi, P., Jung, P., et al. (1998) Stochastic Resonance. *Reviews of Modern Physics*, **70**, 223-287. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.70.223>
- [7] Mompo, E., Ruiz-Garcia, M., Carretero, M., et al. (2018) Coherence Resonance and Stochastic Resonance in an Excitable Semiconductor Superlattice. *Physical Review Letters*, **121**, Article ID: 086805. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.086805>
- [8] Gang, H., Ditzinger, T., Ning, C, Z., et al. (1993) Stochastic Resonance without External Periodic Force. *Physical Review Letters*, **71**, 807-810. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.71.807>
- [9] Pikovsky, A.S. and Kurths, J. (1997) Coherence Resonance in a Noise-Driven Excitable System. *Physical Review Letters*, **78**, 775-778. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.78.775>
- [10] Semenova, N., Zakharova, A., Anishchenko, V., et al. (2016) Coherence-Resonance Chimeras in a Network of Excitable Elements. *Physical Review Letters*, **117**, Article ID: 014102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.014102>
- [11] Douglass, J.K., Wilkens, L., Pantazelou, E., et al. (1993) Noise Enhancement of Information Transfer in Crayfish Mechanoreceptors by Stochastic Resonance. *Nature*, **365**, 337-340. <https://doi.org/10.1038/365337a0>
- [12] Manjarrez, E., Rojas-Piloni, J.G., MENdez, I., et al. (2002) Internal Stochastic Resonance in the Coherence between Spinal and Cortical Neuronal Ensembles in the Cat. *Neuroscience Letters*, **326**, 93-96. [https://doi.org/10.1016/S0304-3940\(02\)00318-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3940(02)00318-X)
- [13] Benzi, R., Parisi, G., Sutera, A., et al. (1982) Stochastic Resonance in Climatic Change. *Tellus*, **34**, 10-16. <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1982.tb01787.x>
- [14] Lee, S.G., Neiman, A. and Kim, S. (1998) Coherence Resonance in a Hodgkin-Huxley Neuron. *Physical Review E*, **57**, 3292. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.57.3292>
- [15] Hao, Y., Gong, Y. and Lin, X. (2011) Multiple Resonances with Time Delays and Enhancement by Non-Gaussian Noise in Newman-Watts Networks of Hodgkin-Huxley Neurons. *Neurocomputing*, **74**, 1748-1753. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2011.02.005>
- [16] Jia, Y. and Gu, H. (2015) Transition from Double Coherence Resonances to Single Coherence Resonance in a Neuronal Network with Phase Noise. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, **25**, Article ID: 123124. <https://doi.org/10.1063/1.4938733>
- [17] Perc, M. (2007) Stochastic Resonance on Excitable Small-World Networks via a Pacemaker. *Physical Review E*, **76**,

---

Article ID: 066203. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.76.066203>

- [18] Jia, Y., Gu, H., Li, Y., *et al.* (2021) Inhibitory Autapses Enhance Coherence Resonance of a Neuronal Network. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, **95**, Article ID: 105643. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2020.105643>
- [19] Ma, J. and Tang, J. (2015) A Review for Dynamics of Collective Behaviors of Network of Neurons. *Science China Technological Sciences*, **58**, 2038-2045. <https://doi.org/10.1007/s11431-015-5961-6>
- [20] Lv, M., Wang, C., Ren, G., *et al.* (2016) Model of Electrical Activity in a Neuron under Magnetic Flow Effect. *Nonlinear Dynamics*, **85**, 1479-1490. <https://doi.org/10.1007/s11071-016-2773-6>
- [21] Wang, Y., Ma, J., Xu, Y., *et al.* (2017) The Electrical Activity of Neurons Subject to Electromagnetic Induction and Gaussian White Noise. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, **27**, Article ID: 1750030. <https://doi.org/10.1142/S0218127417500304>
- [22] Wu, F., Wang, C., Jin, W., *et al.* (2017) Dynamical Responses in a New Neuron Model Subjected to Electromagnetic Induction and Phase Noise. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **469**, 81-88. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2016.11.056>
- [23] Fu, Y.X., Kang, Y.M. and Xie, Y. (2018) Subcritical Hopf Bifurcation and Stochastic Resonance of Electrical Activities in Neuron under Electromagnetic Induction. *Frontiers in Computational Neuroscience*, **12**, Article 318199. <https://doi.org/10.3389/fncom.2018.00006>
- [24] Liu, X. and Yang, X. (2018) Coherence Resonance in a Modified FHN Neuron with Autapse and Phase Noise. *International Journal of Modern Physics B*, **32**, Article ID: 1850332. <https://doi.org/10.1142/S0217979218503320>
- [25] Börgers, C. (2017) An Introduction to Modeling Neuronal Dynamics. Springer, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-51171-9>
- [26] Watts, D.J. and Strogatz, S.H. (1998) Collective Dynamics of 'Small-World' Networks. *Nature*, **393**, 440-442. <https://doi.org/10.1038/30918>
- [27] Yang, X.L., Senthilkumar, D.V. and Kurths, J. (2012) Impact of Connection Delays on Noise-Induced Spatiotemporal Patterns in Neuronal Networks. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, **22**, Article ID: 043150. <https://doi.org/10.1063/1.4772999>
- [28] Yang, X.L., Jia, Y.B. and Zhang, L. (2014) Impact of Bounded Noise and Shortcuts on the Spatiotemporal Dynamics of Neuronal Networks. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **393**, 617-623. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2013.09.021>
- [29] Jia, Y., Lu, B. and Gu, H. (2019) Excitatory Electromagnetic Induction Current Enhances Coherence Resonance of the FitzHugh-Nagumo Neuron. *International Journal of Modern Physics B*, **33**, Article ID: 1950242. <https://doi.org/10.1142/S0217979219502424>