电磁场耦合忆阻神经元的相位同步与电路实现

谭安杰, 韦笃取*, 周倩, 覃英华

广西师范大学电子工程学院, 桂林 541004

* E-mail: weiduqu@gxnu.edu.cn

收稿日期: 2019-05-29; 接受日期: 2019-09-18; 网络版发表日期: 2019-11-25

国家自然科学基金(批准号: 11562004, 61263021)和广西研究生教育创新计划(编号: XJGY201808, XYCSZ2019074)资助项目

摘要 神经元是大脑处理信息的基本单元,也是目前发现的最复杂的非线性动力学系统之一,其动力学行为已为广大科研工作者所关注,并成为神经科学、物理学、非线性动力学等多学科交叉领域具有较大挑战性的一个前沿性研究内容. 根据电磁感应定律,基于神经系统内部生物电互相影响关系,建立了一个含电耦合和磁耦合的Izhikevich神经元模型,其中磁通量和膜电位之间的耦合由磁控忆阻器实现. 然后,通过数值仿真研究电磁场耦合Izhikevich神经元的相位同步行为,发现直接-交叉耦合共存的耦合方式相较于其他耦合方式更容易使神经元达到相位同步. 最后,利用Pspice为电磁场耦合Izhikevich神经元模型设计仿真电路,证明了数值仿真结果的可靠性. 考虑电磁场效应对膜电位动力学及其神经元同步的影响,可以为进一步认知神经元及神经元网络信息编码、信号传递提供重要信息.

关键词 相位同步, 磁耦合, 电耦合, 忆阻器, Izhikevich神经元

1 引言

大脑由数十亿个神经元组成,其中每个神经元通过突触相连,组成复杂的神经网络,并呈现出复杂的非线性动力学行为^[1]. 神经元作为产生感觉、学习、记忆和思维等认知功能器官的基本单元,其动力学行为与脑功能密切相关. 大脑对神经信号的辨析是通过不同脑部的大量神经元共同实现,因此同步作为神经元集群放电的典型表现形式,是神经信号处理的重要机制. 特别是当神经元互相耦合时,会呈现出一种簇放电同步,即发生在簇放电时间尺度上的同步,也被

称为相位同步. 当前,神经元相位同步受到国内外广大学者的关注. 文献[2]构建了一个含电场耦合的链式Hodgkin-Huxley神经网络,然后研究神经元节点间耦合强度和距离权重对神经网络相同步的影响. 文献[3]建立了一个具有电磁感应的链式神经网络,并研究场耦合作用下神经系统的同步行为,发现选择合适的耦合强度,可以提高神经元放电的同步性. Dragoi和Grosu^[4]得出了在单向、闭环式抑制性化学耦合的Fitz-Hugh-Nagumo神经元中实现完全同步状态的充要条件;王青云等人^[5]利用动力系统的渐进稳定性理论和矩阵理论,研究了对称结构的耦合神经元的同步动力

引用格式: 谭安杰, 韦笃取, 周倩, 等. 电磁场耦合忆阻神经元的相位同步与电路实现. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 175–182

Tan A J, Wei D Q, Zhou Q, et al. Phase synchronization and circuit implementation in neurons with electromagnetic field coupled memristor (in Chinese). Sci Sin Tech, 2020, 50: 175–182, doi: 10.1360/SST-2019-0196

学行为, 得到了对称耦合神经元相同步的充分条件; Majhi等人^[6]研究了由大量异类神经元组成的神经元的同步现象, 发现神经网络的相同步是研究集体行为的关键, 其他有关神经元相位同步的研究可见文献^[7~9].

神经系统中神经元的电活动行为依赖于复杂的电生理条件, 现有的神经元模型主要考虑离子通道电流对细胞膜电位的影响^[10]. 例如, Izhikevich^[11]讨论了离子通道电流对Izhikevich神经元模型动力学行为的影响. Innocenti和Genesio^[12]研究了电活动模式的转换. 张季谦等人^[13]根据耦合神经系统的大小讨论了电活动的转变. 实际上, 细胞内外带电离子的分布是不均匀的, 根据法拉第电磁感应定律, 细胞内外的带电离子穿越细胞膜会产生电磁感应效应. 因此在传统的神经元模型引入磁通变量并研究磁感应对电活动模式的影响更具有实际意义. 忆阻器是蔡少棠教授1971年根据经典电磁场理论预测出的一种新电子器件^[14]. 2008年美国惠普实验室在研究二氧化钛的时候发现并证实了纳米电子忆阻器的存在^[15]. 忆阻器的纳米尺寸、信息存储能力和掉电后信息的非易失性^[16~19], 使其广泛应用在各个领域, 如温世平等人^[20]提出一种利用忆阻器实现突触的新型MOSFET晶体管, 该器件相对传统的CMOS电路, 降低了92%~98%的面积消耗; 他们还提出一种基于忆阻器的长短期记忆(MLSTM)网络, 并应用于文本的情感分析^[21]. 另一方面, 忆阻器作为描述电荷和磁通关系的一个无源二端电路元件, 主要分为磁控和荷控忆阻器两种, 由于荷控忆阻器需要将电压转换成电流, 设计困难, 而磁控忆阻器通过运放、乘法器等器件实现比较容易^[22], 因此用磁控忆阻器来实现神经元磁通量与膜电位之间的耦合受到人们的广泛关注^[23], 如王春妮团队^[24]采用磁控忆阻神经元膜电位耦合诱导相同步; 马军等人^[25]基于磁控忆阻神经元研究磁通耦合诱导完全相位同步行为, 他们还发现磁控忆阻神经元在外界刺激和自突触协同下多种放电模式的转换^[26], 赵勇等人^[27]用磁控忆阻器实现神经元的电磁耦合, 并研究其相位同步行为. 本文用磁通量模拟细胞内的电磁感应效应, 用磁控忆阻器实现磁通量和膜电位之间的耦合, 建立了一个含电耦合和磁耦合的忆阻Izhikevich神经元耦合模型, 然后通过数值仿真研究电磁场耦合Izhikevich神经元的相位同步行为, 重点讨论耦合强度和反馈增益参数对相同步的影响, 并发现

直接-交叉耦合共存的耦合方式相较于其他耦合方式更容易使神经元达到相位同步. 此外, 利用Pspice为电磁场耦合Izhikevich神经元模型设计了仿真电路, 进一步论证数值仿真结果的可靠性. 最后, 通过与单向直接耦合方式下的相同步作比较, 突出本文所设计的忆阻神经元模型的优势.

2 模型描述

基于电磁感应原理并考虑神经元的记忆功能, 忆阻Izhikevich神经元动力学方程如下:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = 0.04v^2 + 5v + 140 - u + I - k\rho(\varphi)v, \\ \frac{du}{dt} = a(bv - u), \\ \frac{d\varphi}{dt} = k_1v - k_2\varphi, \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{if } v \geq 30 \text{ mV, then } \begin{cases} v \leftarrow c, \\ u \leftarrow u + d, \end{cases} \quad (2)$$

其中, v 和 u 分别表示神经元的膜电位和恢复变量, 在尖峰达到其顶点(+30 mV)时, 膜电位和恢复变量根据式(2)重置; 变量 I 表示注入的外界刺激电流; a, b, c, d 是无量纲参数, 通过对这些参数值调节, 该模型可以呈现各类放电模式. 在本文中, 取参数 $a=0.02, b=0.2, c=-65$ 和 $d=8$. 变量 φ 表示穿过膜的磁通量, $k\rho(\varphi)v$ 可认为是当磁通量改变时在细胞膜上的反馈电流, 是对细胞膜电位的抑制调节, 其方程式如下:

$$i = \frac{dq(\varphi)}{dt} = \frac{dq(\varphi)}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt} = \rho(\varphi)V = k\rho(\varphi)v. \quad (3)$$

膜电位磁控忆导为 $\rho(\varphi)=\alpha+3\beta\varphi^2$, k 描述了电磁感应通过产生感应电流对膜电位的反馈增益, 其中参数 $\alpha=0.1, \beta=0.02$, 磁通量 $k_1=0.1$, 膜电位相互作用 $k_2=1$.

考虑电耦合和磁耦合的两个忆阻Izhikevich神经元动力学方程如下:

$$\begin{cases} \frac{dv_1}{dt} = 0.04v_1^2 + 5v_1 + 140 - u_1 + I - k\rho(\varphi_1)v_1 \\ \quad + g[b_{vv}(v_2 - v_1) + b_{v\varphi}(\varphi_2 - \varphi_1)], \\ \frac{du_1}{dt} = a(bv_1 - u_1), \\ \frac{d\varphi_1}{dt} = k_1v_1 - k_2\varphi_1 + g[b_{\varphi v}(v_2 - v_1) + b_{\varphi\varphi}(\varphi_2 - \varphi_1)], \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{dv_2}{dt} = 0.04v_2^2 + 5v_2 + 140 - u_2 + I - k\rho(\varphi_2)v_2 \\ \quad + g[b_{vv}(v_1 - v_2) + b_{v\varphi}(\varphi_1 - \varphi_2)], \\ \frac{du_2}{dt} = a(bv_2 - u_2), \\ \frac{d\varphi_2}{dt} = k_1v_2 - k_2\varphi_2 + g[b_{\varphi v}(v_1 - v_2) + b_{\varphi\varphi}(\varphi_1 - \varphi_2)], \end{cases}$$

if $v_{1,2} \geq 30$ mV, then $\begin{cases} v_{1,2} \leftarrow c, \\ u_{1,2} \leftarrow u_{1,2} + d, \end{cases}$ (4)

其中, v 和 u 分别表示神经元的膜电位和恢复变量, φ 表示穿过膜的磁通量, 下标 1, 2 分别表示神经元 1 和神经元 2. 式(4)不仅包含直接 v - v 和 φ - φ 直接耦合, 还有神经元之间磁通量和膜电位的交叉耦合, 通过变量 b_{vv} , $b_{v\varphi}$, $b_{\varphi v}$, $b_{\varphi\varphi}$ 构建旋转耦合矩阵的元素^[28,29]:

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} b_{vv} & b_{v\varphi} \\ b_{\varphi v} & b_{\varphi\varphi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varnothing & \sin \varnothing \\ -\sin \varnothing & \cos \varnothing \end{pmatrix}. \quad (5)$$

因此, 矩阵 $\mathbf{B}$ 由耦合相位 $\varnothing$ 确定, 具体分如下三种情况: (1) 当 $\varnothing=0$, 变量 v , φ 直接耦合; (2) 当 $\varnothing = \frac{\pi}{2}$, 变量 v , φ 交叉耦合; (3) 当 $\varnothing = \frac{\pi}{4}$, 变量 v , φ 直接耦合与交叉耦合共存. 本文通过改变耦合相位 $\varnothing$ 、耦合强度 g 和反馈增益 k 取值来研究在不同磁通情况下耦合神经元的相同步. 本文首先采用振动极值法计算耦合神经元相位:

$$\theta_{1,2}(t) = 2\pi \frac{t - t_j}{t_{j+1} - t_j} + 2\pi j, \quad (6)$$

($t_j < t < t_{j+1}$, $j = 1, 2, \dots, N$),

其中, N 表示神经元在演化时间内产生的簇放电数目, t_j 是神经元 1, 2 的第 j 次簇放电的时间, $t_{j+1} - t_j$ 是簇周期,

并且每产生一次簇放电, 相位增加 2π .

然后我们定义两个神经元间的相位差来判断是否相位同步:

$$\Delta\theta(t) = |\theta_1(t) - \theta_2(t)|. \quad (7)$$

如果 $\Delta\theta(t)=0$ 则表示达到相位同步.

3 数值仿真与Pspice电路实现

数值仿真采用四阶龙格-库塔算法, 时间步长为 $h=0.01$, 两个忆阻神经元初始值分别取为 $v_1(0)=1.7$, $u_1(0)=1$, $\varphi_1(0)=1.001$, $v_2(0)=1.8$, $u_2(0)=1.1$, $\varphi_2(0)=1.1$. 在没有电磁场耦合情况下, 单个忆阻神经元随着忆阻反馈增益 k 的变化, 可以呈现尖峰放电、簇放电状态, 如图 1(a) 和 (b) 所示.

接着研究电磁场耦合下忆阻 Izhikevich 神经元相位同步. 为了全局观察电磁场耦合强度 g 与反馈增益 k 对耦合神经元相位同步的影响, 以反馈增益 k 和耦合强度 g 作变量, 可以得到耦合神经元系统的相位同步参数 k - g 相图, 结果如图 2 所示, 分别对应变量 v - v 直接耦合、变量 v - φ 交叉耦合、变量 v - φ 直接耦合与交叉耦合共存 3 种情况, 其中白色区域代表非相位同步状态, 黑色区域代表相位同步状态. 从图 2(a) 可以发现, 对于直接耦合, 当电磁场耦合强度 g 取值很小时, 无论反馈增益 k 取何值, 系统不会出现相位同步状态. 而对于较大的耦合强度 g , 当反馈增益 k 逐渐增大到某个阈值时, 系统进入相同步状态. 值得注意的是, 对于不同的耦合方式, 出现相位同步所需的参数阈值是不同的. 图 2(b) 中发现 k 在 $[0.28, 0.88]$ 区间内产生间歇相位同步. 对比图 2(a)~

图 1 (网络版彩图)不同的反馈增益 k 取值下单个忆阻神经元膜电位的时间序列. (a) $k=0.1$; (b) $k=1$

Figure 1 (Color online) The time series of membrane potential of single memristor neuron with different feedback gain k . (a) $k=0.1$; (b) $k=1$.

图 2 神经元相位同步的参数区域图(黑色区域代表相位同步状态). (a) 直接耦合; (b) 交叉耦合; (c) 直接-交叉耦合共存

Figure 2 Parameter region diagram of phase synchronization. The black area represents the phase synchronization state. (a) Directly coupled neurons; (b) cross-coupled neurons; (c) direct-cross coupling co-existing neurons.

图 3 直接-交叉耦合共存耦合神经系统的时序图. (a) $(k, g)=(0.8, 0.04)$; (b) $(k, g)=(0.8, 0.5)$

Figure 3 Time series of the coupled nervous system with direct-cross coupling co-existence. (a) $(k, g)=(0.8, 0.04)$; (b) $(k, g)=(0.8, 0.5)$.

(c), 发现直接-交叉耦合共存耦合方式相较于其他两种耦合方式更能增大相位同步区域. 换言之, 直接-交叉耦合共存耦合方式更容易使神经元达到相位同步.

此外, 我们还观察了直接-交叉耦合共存耦合神经系统参数 k 和 g 值固定时, 系统时间序列波形, 结果如图3(a)和(b)所示, 分别对应系统的非相位同步状态

($k=0.8$, $g=0.04$)和相位同步($k=0.8$, $g=0.5$)状态.

最后, 我们利用Pspice电路仿真软件验证数值仿真的可靠性, 仿真电路如图4所示. 为了减少篇幅, 文中仅显示一个神经元, 主要采用运放TL08X、单刀双掷开关ADG419和行为乘法器等元件实现, 具体如图4(a)所示, 其中红色虚线框内的分立元件用于实现

忆阻器. 图4(b)是两个神经元耦合部分的电路, 其中Izhikevich_1和Izhikevich_2分别代表两个不同神经元电路. 反馈增益 k 取决于电阻 R_6 阻值, 耦合强度 g 取决于封装模块里的线性电阻阻值. 我们通过调节上述电阻观察神经元膜电位的电压相位同步情况. 图5是参数(k , g)=(0.8, 0.5)时神经元 v_1 , v_2 直接-交叉耦合情况下膜电

图 4 耦合Izhikevich神经元仿真电路. (a) 任意一个神经元模型电路图, 其中虚线框内的分立元件用于实现忆阻器; (b) 两个神经元直接-交叉耦合电路封装

Figure 4 Simulation circuit of coupling Izhikevich neuron. (a) The circuit diagram of any neuron model where the discrete elements in the dashed frame are used to realize the memristor; (b) circuit encapsulation of two neurons directly-cross coupled.

图5 Pspice电路仿真结果: 直接-交叉耦合($k=0.8$, $g=0.5$)时耦合神经元 v_1 , v_2 时间序列图

Figure 5 Time series of v_1 and v_2 in neurons with directly-cross coupled ($k=0.8$, $g=0.5$) by Pspice simulation.

位的相位同步时序波形, 验证了数值仿真结果的可靠性.

正如前言所述, 当前有关神经元相同步研究已有一些工作, 但这些工作主要集中在单向直接耦合方式下的相同步. 为了突出本文所设计忆阻神经元模型的优势, 在系统参数取值相同的情况下, 研究单向直接耦合神经元相位同步的参数区域图, 结果如图6所示. 由图可知, 本文提出的耦合方式相较于单向直接耦合方式有更大的相位同步区域.

4 结论

本文研究三种电磁耦合方式下忆阻Izhikevich神经元间的相位同步, 重点利用数值仿真研究反馈增益 k 和耦合强度 g 参数对相位同步状态的影响, 发现直接-交叉耦合共存的耦合方式相较于其他耦合方式更容易使神经元达到相位同步. 此外, 基于Pspice电路验证数值仿真结果的正确性. 最后, 通过与单向直接耦合方式下的相同步作比较, 突出本文所设计忆阻神经元模型

图6 单向直接耦合神经元相位同步的参数区域图(黑色区域代表相位同步状态)

Figure 6 Parameter region diagram of phase synchronization of unidirectional direct coupled neurons (the black area represents the phase synchronization state).

的优势. 研究结果对分析大规模神经网络的集群放电同步行为有重要指导价值和参考意义.

参考文献

- 1 Perc M, Jordan J J, Rand D G, et al. Statistical physics of human cooperation. *Phys Rep*, 2017, 687: 1–51
- 2 Xu Y, Jia Y, Ma J, et al. Collective responses in electrical activities of neurons under field coupling. *Sci Rep*, 2018, 8: 1349
- 3 Xu Y, Jia Y, Wang H, et al. Spiking activities in chain neural network driven by channel noise with field coupling. *Nonlinear Dyn*, 2019, 95: 3237–3247
- 4 Dragoi V, Grosu I. Synchronization of locally coupled neural oscillators. *Neural Process Lett*, 1998, 7: 199–210
- 5 Wang Q Y, Lu Q S, Chen G R, et al. Chaos synchronization of coupled neurons with gap junctions. *Phys Lett A*, 2006, 356: 17–25
- 6 Majhi S, Perc M, Ghosh D. Chimera states in uncoupled neurons induced by a multilayer structure. *Sci Rep*, 2016, 6: 39033
- 7 Sun X J, Han F, Wiercigroch M, et al. Effects of time-periodic intercoupling strength on burst synchronization of a clustered neuronal network. *Int J Non-Linear Mech*, 2015, 70: 119–125

- 8 Wang Q, Gong Y B, Li H Y. Effects of channel noise on synchronization transitions in Newman-Watts neuronal network with time delays. *Nonlinear Dyn*, 2015, 81: 1689–1697
- 9 Gu H G, Zhao Z G, Ma J. Dynamics of time delay-induced multiple synchronous behaviors in inhibitory coupled neurons. *PLoS ONE*, 2015, 10: e0138593
- 10 Wu X Y, Ma J, Xie Z B. Effect of inhomogeneous distribution of ion channels on collective electric activities of neurons in a ring network (in Chinese). *Acta Phys*, 2013, 62: 240507 [吴信谊, 马军, 谢振博. 离子通道的非均匀分布对环链神经网络电活动的影响. *物理学报*, 2013, 62: 240507]
- 11 Izhikevich E M. Simple model of spiking neurons. *IEEE Trans Neural Netw*, 2003, 14: 1569–1572
- 12 Innocenti G, Genesio R. On the dynamics of chaotic spiking-bursting transition in the Hindmarsh-Rose neuron. *Chaos*, 2009, 19: 023124
- 13 Zhang J Q, Wang C D, Wang M S, et al. Firing patterns transition induced by system size in coupled Hindmarsh-Rose neural system. *Neurocomputing*, 2011, 74: 2961–2966
- 14 Chua L. Memristor—The missing circuit element. *IEEE Trans Circuit Theor*, 1971, 18: 507–519
- 15 Strukov D B, Snider G S, Stewart D R, et al. The missing memristor found. *Nature*, 2008, 453: 80–83
- 16 Li C B, Thio W J C, Iu H H C, et al. A memristive chaotic oscillator with increasing amplitude and frequency. *IEEE Access*, 2018, 6: 12945–12950
- 17 Xu Q, Lin Y, Bao B C, et al. Multiple attractors in a non-ideal active voltage-controlled memristor based Chua's circuit. *Chaos Solitons Fractals*, 2016, 83: 186–200
- 18 Li C B, Min F, Li C. Multiple coexisting attractors of the serial-parallel memristor-based chaotic system and its adaptive generalized synchronization. *Nonlinear Dyn*, 2018, 94: 2785–2806
- 19 Bao B C, Shi G D, Xu J P, et al. Dynamics analysis of chaotic circuit with two memristors (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2011, 41: 1135–1142 [包伯成, 史国栋, 许建平, 等. 含两个忆阻器混沌电路的动力学分析. *中国科学: 技术科学*, 2011, 41: 1135–1142]
- 20 Wen S P, Xiao S X, Yang Y, et al. Adjusting learning rate of memristor-based multilayer neural networks via fuzzy method. *IEEE Trans Comput-Aided Des Integr Circuits Syst*, 2018, 38: 1084–1094
- 21 Wen S P, Wei H Q, Yang Y, et al. Memristive LSTM network for sentiment analysis. *IEEE Trans Syst Man Cybern Syst*, 2019, 1–11
- 22 Hong Q H, Zeng Y C, Li Z J. Design and simulation of chaotic circuit for flux-controlled memristor and charge-controlled memristor (in Chinese). *Acta Phys*, 2013, 62: 230502 [洪庆辉, 曾以成, 李志军. 含磁控和荷控两种忆阻器的混沌电路设计与仿真. *物理学报*, 2013, 62: 230502]
- 23 Lv M, Wang C, Ren G, et al. Model of electrical activity in a neuron under magnetic flow effect. *Nonlinear Dyn*, 2016, 85: 1479–1490
- 24 Ren G D, Xu Y, Wang C N. Synchronization behavior of coupled neuron circuits composed of memristors. *Nonlinear Dyn*, 2017, 88: 893–901
- 25 Ma J, Mi L, Zhou P, et al. Phase synchronization between two neurons induced by coupling of electromagnetic field. *Appl Math Comput*, 2017, 307: 321–328
- 26 Ren G D, Wu G, Ma J, et al. Simulation of electric activity of neuron by setting up a reliable neuronal circuit driven by electric autapse (in Chinese). *Acta Phys*, 2015, 64: 58702 [任国栋, 武刚, 马军, 等. 一类自突触作用下神经元电路的设计和模拟. *物理学报*, 2015, 64: 58702]
- 27 Zhao Y, Sun X, Liu Y, et al. Phase synchronization dynamics of coupled neurons with coupling phase in the electromagnetic field. *Nonlinear Dyn*, 2018, 93: 1315–1324
- 28 Semenova N, Zakharova A, Anishchenko V, et al. Coherence-resonance chimeras in a network of excitable elements. *Phys Rev Lett*, 2016, 117: 014102
- 29 Schöll E. Synchronization patterns and chimera states in complex networks: Interplay of topology and dynamics. *Eur Phys J Spec Top*, 2016, 225: 891–919

Phase synchronization and circuit implementation in neurons with electromagnetic field coupled memristor

TAN AnJie, WEI DuQu, ZHOU Qian & QIN YingHua

College of Electronic Engineering, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China

A neuron is the basic information-processing units of the brain, and also one of the most complicated nonlinear dynamic systems. Dynamic behavior of a neuron has been concerned by a large number of researchers, and it has become a research hotspot in the fields of neuroscience, informatics, nonlinear dynamics, and other interdisciplinary fields. Following the electromagnetic induction theorem, and using the internal bioelectric interaction relationship of the nervous system, an improved model of Izhikevich neuron with electric and magnetic coupling is established, where the interconnection between the magnetic flux and electromagnetic is implemented by a Magnetron memristor. The phase synchronization of the Izhikevich neurons with the electromagnetic field coupling was studied by numerical simulation. It was found that the coexistence of direct-cross coupling provided phase synchronization over a much larger domain of parameters in comparison with the other coupling modes. Finally, a simulation circuit implemented by Pspice was designed. By changing the simulation parameters, different discharge modes were obtained, and the device layout was changed accordingly, such that to obtain two other neuron-coupled modes. The reliability of the numerical simulation results was verified. This paper considers the effect of electromagnetic field on neurons in an innovative way. The presented results may provide new insights into the signal coding and transmission mechanisms in the nervous system.

phase synchronization, magnetic coupling, electric coupling, memristor, Izhikevich neurons

doi: [10.1360/SST-2019-0196](https://doi.org/10.1360/SST-2019-0196)