

Ölçeksiz Nöral Ağlarda Periyodik Kuplajın Eşik-Altı Sinyal Kodlamaya Etkileri

Influences of Time-Periodic Coupling Strength on the Subthreshold Signal Encoding in Scale-free Neuronal Networks

Veli BAYSAL¹, Ergin YILMAZ¹, Mahmut ÖZER²

¹ Biyomedikal Mühendisliği Bölümü

Bülent Ecevit Üniversitesi

veli.baysal@beun.edu.tr, erginyilmaz@yahoo.com

² Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Bülent Ecevit Üniversitesi

mahmutozer2002@yahoo.com

Özetçe

Bu çalışmada, nöronlar arasında ki kuplaj şiddetini sabit kabul eden diğer çalışmalardan farklı olarak zamanla periyodik olarak değişen kuplajın ölçeksiz ağ dinamiklerine etkileri incelenmiştir. Bunun için stokastik Hodgkin-Huxley (H-H) nöronlarından meydana gelen ölçeksiz (scale-free, SF) bir ağda periyodik kuplajın eşik altı sinyal kodlamaya etkileri iyon kanal gürültüsüne bağlı olarak ele alınmıştır. Periyodik kuplajın hem genliğinin hem de frekansının ateşleme düzenliliğine etkileri ayrı ayrı ele alınmıştır. Ayrıca ağın ortalama bağlantı derecesinin düzenlilik üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan, periyodik kuplajın frekansına bağlı olarak çoklu stokastik rezonans bulgusu tespit edilmiştir. Ayrıca bu rezonansın periyodik kuplajın genliğinin artmasına bağlı olarak arttığı belirlenmiştir. İlave olarak ağda düzenliliğin maksimum olduğu optimal bir ortalama bağlantı derecesinin varlığı bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler — *periyodik kuplaj, stokastik rezonans, iyon kanal gürültüsü.*

Abstract

In this paper, different from previous studies, where only constant coupling are considered among the neurons, we primarily examine the effects of time periodic coupling on the dynamics of a scale-free network. To this end the effects of time-periodic coupling on the encoding of a subthreshold signal have been investigated depending on ion channel noise in a scale-free network (SF) consisting of stochastic Hodgkin-Huxley neurons. The effects of both the frequency and amplitude of periodic coupling on the firing regularity have been tackled, separately. Besides, the effects of the average degree on the firing regularity is analyzed. We find the multiple stochastic resonance phenomenon depending on the frequency of periodic coupling. This resonance also increases with the increasing of amplitude of periodic coupling. Additionally, the presence of an optimal average degree, which ensures maximum firing regularity, has been found.

Keywords — *time-periodic coupling, stochastic resonance, ion channel noise.*

1. Giriş

Sinir sisteminin en temel birimi olan sinir hücreleri (nöronlar) bulundukları ortamdan kaynaklanan dış gürültüye ve gerilim-kapalı iyon kanallarının rastgele açılıp kapanmasından dolayı içsel gürültüye (iyon kanal gürültüsüne) maruzdurlar. İyon kanal gürültüsü hücre zarında elektriksel sinyalin oluşmasında ve yayılmasında önemli bir rol oynamaktadır [1]. Bundan dolayı, yapılan teorik çalışmalarda iyon kanallarının neden olduğu gürültüler de dikkate alınmalıdır [1]. Doğal yaşamda, gürültü istenmeyen bir bileşendir ve sistemler üzerinde olumsuz etkileri mevcuttur. Ancak, nöron sistemlerinde gürültünün bilgi sinyalinin taşınmasında ve kodlanmasında olumlu etkilerinin olduğu belirtilmiştir [2-3]. Literatürde yapılan çalışmalarda iyon kanal gürültüsüne bağlı olarak ortaya çıkan Stokastik Rezonans (Stochastic Resonance, SR) [4-8] görüngüsü sinir sisteminde bilgi işleniminde ve kodlanmasında önem arz ettiğinden geniş bir şekilde çalışılmıştır.

Sinir sisteminde nöronlar topluluklar halinde bulunmaktadır. Bilginin kodlanması ve taşınması nöron ağları aracılığıyla gerçekleşmektedir. Birbirine bağlı nöronlar arasındaki bağlantının tipi ve şiddeti bilgi sinyallerinin nöron ağları vasıtasıyla iletilmesinde önemli roller üstlenmektedir. Nöronlar arasındaki kuplajın tipinin ve şiddetinin doğrusal olmayan nöron sistemlerinde ortaya çıkan SR ve uyum rezonansı (coherence resonance, CR) [9-13] üzerindeki etkileri geniş bir şekilde ele alınmıştır [14-16]. Örneğin, Yılmaz ve Özer [16], stokastik Hodgkin-Huxley nöronlarından oluşan ölçeksiz bir ağda en uygun bir kanal gürültü değerinde zamanla değişmeyen kuplaj şiddetine bağlı olarak ağın ateşleme düzenliliğinin SR etkisi gösterdiğini bulmuşlardır. Ancak yapılan deneysel çalışmalarda nöronlar arasındaki kuplaj şiddetinin esnek olduğunu dolayısıyla kuplaj şiddetinin zamanla değiştiği gösterilmiştir [17-19]. Dolayısıyla kuplaj şiddetinin değişken olması nöron dinamikleri üzerinde yeni etkilere neden olacaktır. Literatürde periyodik kuplajın nöronların ateşleme davranışları üzerindeki etkileri geniş biçimde çalışılmıştır [20-23]. Örneğin Birzu ve Krischer [20] global ağda FHN (FitzHugh-Nagumo) nöron modeli kullanarak yaptığı çalışmada nöronlar arasındaki periyodik kuplajın frekansına bağlı olarak rezonans elde etmişlerdir. Lin

ve arkadaşları [21] periyodik kuplajın frekansı tarafından tetiklenen çoklu uyum rezonansının varlığını küçük dünya ağlarında göstermişlerdir.

Bu çalışmada, stokastik H-H nöronlarından oluşan ölçeksiz bir ağda periyodik kuplajın eşik altı sinyal kodlamaya etkileri iyon kanal gürültüsüne bağlı olarak ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlardan, periyodik kuplajın frekansının H-H nöronlarının eşik-altı dalgalanma frekansının tam katlarına eşit olduğunda ateşleme düzenliliğinde SR etkisi görülmüştür. Bu rezonansın periyodik kuplaj şiddetinin genliğine artmasına bağlı olarak arttığı belirlenmiştir. Ayrıca ateşleme düzenliliğini maksimum yapan optimal bir ortalama bağlantı derecesinin bulunduğu görülmüştür.

2. Model ve Metot

Stokastik H-H nöronlarından meydana gelen ölçeksiz ağda bir nörona ait zar potansiyelinin zamanla aşağıdaki denklem ile verilmektedir:

$$C_m \frac{dV_i}{dt} = -g_{Na}^{maks} m^3 h (V_i - V_{Na}) - g_K^{maks} n^4 (V_i - V_K) - g_L (V_i - V_L) + \sum_j \varepsilon_{ij} [V_j(t) - V_i(t)] + I_{ext}$$

$$i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

Burada $C_m = 1 \mu F/cm^2$ hücre zar kapasitesini, V_i ağdaki i . nöronun zar potansiyelini $g_{Na}^{maks} = 120 mS/cm^2$, $g_K^{maks} = 36 mS/cm^2$ ve $g_L^{maks} = 0.3 mS/cm^2$ sırasıyla sodyum, potasyum ve kaçak iyonlara ait maksimum iletkenlik değerlerini göstermektedir. $E_{Na} = 50 mV$, $E_K = -77 mV$ ve $E_L = -54.4 mV$ sırası ile dinlenme durumunda sodyum, potasyum ve kaçak iyonlara ait denge potansiyel değerlerini temsil etmektedir. N ağda bulunan toplam nöron sayısını ifade etmektedir. I_{ext} nöronlara uygulanan eşik altı uyartım işaretini ifade etmekte olup $I_{ext} = \sin(0.3t)$ olarak alınmıştır. ε_{ij} ise ağdaki i . nöron ile j . nöron arasındaki kuplaj şiddetini ifade etmekte olup bu kuplajın şiddeti zamanla periyodik olarak değişmektedir [30]:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_0 (1 + \cos(\omega t)) \quad (2)$$

Burada ε_0 periyodik kuplaj şiddetinin genliğini, ω ise frekansını temsil etmektedir. m ve n sırasıyla sodyum ve potasyum aktivasyon kapılarının açık olma olasılığını temsil etmektedir. h ise sodyum in-aktivasyon kapısının açık olma olasılığını göstermektedir. İyon kanallarının sistem dinamiklerine kattığı stokastik etkiyi ifade etmek için Fox algoritmasından yararlanılmıştır. Fox algoritmasında kapı olasılıklarının stokastik etkisi aşağıda verilen Langevin eşitliği kullanılarak modellenilebilmektedir [25]:

$$\frac{dx_i}{dt} = \alpha_x (1 - \alpha_x) - \beta_x x_i + \xi_{x_i}(t), \quad x_i = m_i, n_i, h_i \quad (3)$$

Burada α_x ve β_x kapı değişkenlerine ait hız fonksiyonları olup hücre zar gerilimine bağlı olarak değişmektedir. Hücre zarında bulunan iyon kanallarının rasgele açılıp kapanmaları hücre zar geriliminde gürültü meydana getirmektedir. Çok fazla iyon kanallarının bulunduğu durumda yani büyük hücre zar alanlarında bu gürültü ihmal edilebilecek seviyelerde olmasına rağmen az sayıda iyon kanalının bulunduğu durumlarda gürültü ihmal edilemeyecek seviyelerdedir [25]. Bu gürültüyü ifade etmek amacı ile denklem (3)'teki $\xi_{x_i}(t)$ gürültü kaynağı

olarak eklenmektedir. $\xi_{x_i}(t)$ beklenen değeri sıfır ve öz-ilişki fonksiyonu aşağıdaki gibi verilen beyaz Gauss gürültüsü olarak modellenmektedir [25]:

$$\langle \xi_m(t) \xi_m(t') \rangle = \frac{2\alpha_m \beta_m}{N_{Na}(\alpha_m + \beta_m)} \delta(t - t') \quad (4a)$$

$$\langle \xi_h(t) \xi_h(t') \rangle = \frac{2\alpha_h \beta_h}{N_{Na}(\alpha_h + \beta_h)} \delta(t - t') \quad (4b)$$

$$\langle \xi_n(t) \xi_n(t') \rangle = \frac{2\alpha_n \beta_n}{N_K(\alpha_n + \beta_n)} \delta(t - t') \quad (4c)$$

Burada N_{Na} ve N_K sırasıyla toplam sodyum ve toplam potasyum kanal sayılarını ifade etmektedir. Kanal sayısı $N_{Na} = \rho_{Na} S$, $N_K = \rho_K S$ eşitlikleri ile hesaplanır. Burada $\rho_{Na} = 60 \mu m^{-2}$ ve $\rho_K = 18 \mu m^{-2}$ sırasıyla sodyum ve potasyum kanal yoğunluğunu ifade etmektedir. S iyon kanal gürültüsünü ölçeklemede kullanılan hücre zar alanını temsil etmektedir. Büyük S değeri düşük iyon kanal gürültü şiddetini göstermektedir.

Kompleks sistemlerin dinamikleri araştırılırken farklı ağ topolojileri kullanılmıştır [26,27]. Ölçeksiz ağ (SF) ve küçük dünya ağ modelleri gerçek ağların topolojik özelliklerini daha iyi yansıttıklarından dolayı nöron ağlarının modellenmesinde yaygın olarak kullanılmıştır [28,29]. SF ağları büyüme (growth) ve tercihli bağlanma (preferential attachment) özelliklerine sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı bu çalışmada ağ oluşturulurken Barabasi ve Albert [30] tarafından önerilen SF ağ algoritmasından yararlanılmıştır.

Stokastik H-H nöronlarından oluşan SF ağının spayk (spike) treninin düzenliliğini incelemek için öncelikle her bir nöronun spayk oluşum anları tespit edilerek ağdaki tüm nöronlar için düzenlilik parametresi λ_i hesaplanmıştır. Spayk treni düzenliliğini gösteren λ_i spayklar arası zaman aralığının (Interspike interval, ISI) standart sapmasının ortalamasına oranı olarak tanımlanan varyasyon katsayısının CV (coefficient of variation), tersi olarak hesaplanmıştır.

$$\lambda_i = \frac{\langle ISI \rangle}{\sqrt{\langle ISI^2 \rangle - \langle ISI \rangle^2}} \quad (5)$$

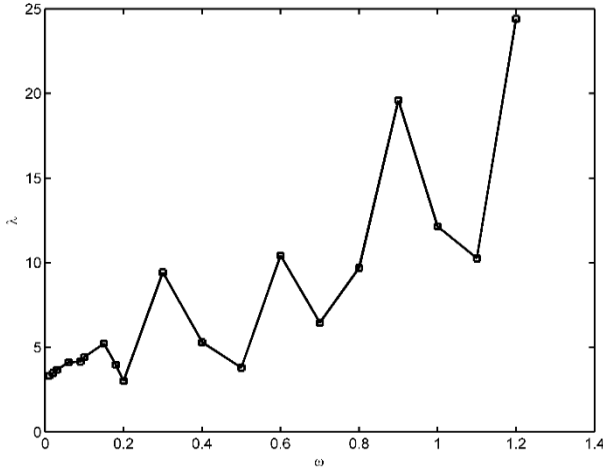
$$\lambda = \frac{1}{N} \sum_i^N \lambda_i \quad (6)$$

Yukarıdaki eşitlikte $\langle ISI \rangle = \frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{N'} (t_{i+1} - t_i)$ ve $\langle ISI^2 \rangle = \frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{N'} (t_{i+1} - t_i)^2$ sırasıyla spayklar arası zaman aralığının ortalamasını ve spayklar arası zaman aralığının karesel ortalamasını göstermektedir. t_i ise j . nöronun zar gerilimi $V_j(t)$ den elde edilen i . spaykın oluşum zamanını göstermektedir. N' ise toplam spayk sayısıdır. $V_j(t) = 0$ değeri spayk oluşum eşiği olarak alınmıştır. Her bir nörona ait bireysel λ_i hesaplandıktan sonra denklem (6) ile ortalama λ değeri hesaplanmıştır. Büyük λ değerleri ateşleme düzenliliğinin yüksek olduğunu yani eşik altı uyartım kodlamanın daha iyi olduğunu göstermektedir. Grafiklerde verilen her bir değer istatistiksel tutarlılığı sağlamak adına 100sn'lik 20 farklı ağ gerçekleştirilmeden elde edilen sonuçların ortalaması olarak hesaplanmıştır.

3. Sonuçlar

Bu çalışmada ilk olarak nöronlar arasındaki kuplaj şiddetinin frekansının ağın ateşleme düzenliliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. $\omega = 0.01 ms^{-1}$ ile $\omega = 1.2 ms^{-1}$ arasında

değişen kuplaj frekansları için hücre zar alanına bağlı olarak düzenlilik parametresi olan λ değerleri hesaplanmış ve Şekil 1’de gösterilmiştir. Nöronlar arası kuplaj şiddetinin genliği $\varepsilon_0 = 0.1$, ölçeksiz ağı ortalama bağlantı derecesi $k_{avg} = 10$ ve hücre zar alanı $S = 6 \mu m^2$ olarak alınmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde periyodik kuplajın frekansına bağlı olarak çoklu stokastik rezonans (multiple stochastic resonance, MSR) bulgusunun ortaya çıktığı belirlenmiştir. Dolayısıyla periyodik kuplajın frekansının H-H nöronlarının eşik altı dalgalanma frekansı olan $\omega = 0.3 ms^{-1}$ [31] ve bunun harmoniklerine eşit olduğunda ağı ateşleme düzenliliğinde belirgin artışların olduğu görülmüştür.

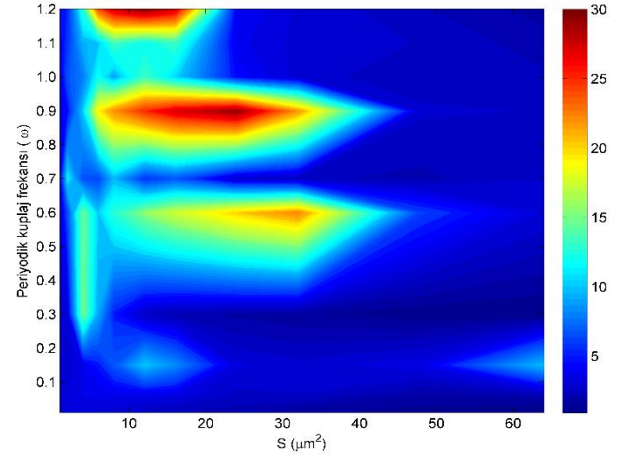


Şekil 1: Hücre zar alanı sabit iken SF nöral ağının ateşleme düzenliliğinin kuplaj şiddetinin frekansı ile değişimi ($N = 200, \varepsilon_0 = 0.1, S = 6 \mu m^2, k_{avg} = 10$)

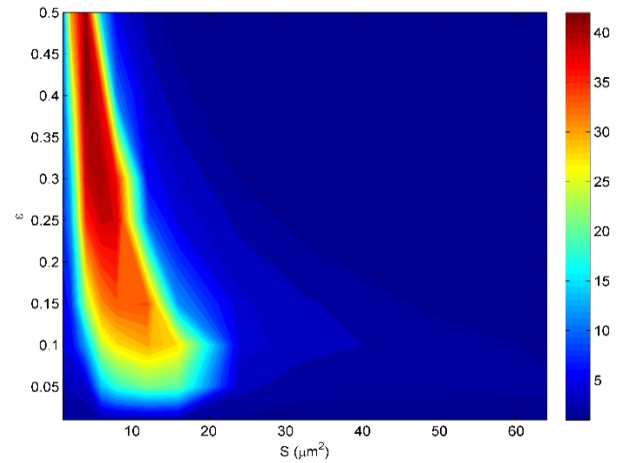
Ayrıca kuplaj frekansı $\omega = 1.2 ms^{-1}$ olduğunda düzenlilik maksimum değerine çıkmaktadır. Periyodik kuplajın frekansının SR'ye olan etkisini daha geniş bir kanal gürültü aralığında ortaya koymak adına ateşleme düzenliliğinin hem kuplaj frekansına hem de hücre zar alanına bağlı olarak değişimi Şekil 2’de verilmiştir. Şekil 2’den görüldüğü gibi ölçeksiz ağı eşik altı sinyal kodlama kapasitesinin yüksek olduğu üç farklı bölge edilmiştir. Artan kuplaj frekansına bağlı olarak bu rezonans bölgelerinin daralarak küçük zar alanlarına kaydığı belirlenmiştir. Şekil 1 ve Şekil 2 den elde edilen sonuçlar ışığında kuplaj frekansının H-H nöronlarını zayıf sinyal kodlama kapasiteleri üzerinde önemli etkileri olduğu ve uygun kuplaj frekansı değerlerinde bu kapasitenin önemli bir ölçüde arttığı tespit edilmiştir. Yapılan bu çalışmada ikinci olarak periyodik kuplajın genliğinin (ε_0) SF nöron ağının ateşleme düzenliliği üzerindeki etkileri başka bir değişle eşik altı uyartımı kodlama başarımları üzerindeki etkileri incelenmiştir. SF nöron ağında nöronlar arası kuplajın frekansı bir önceki aşamada maksimum düzenliliği sağlayan frekans değeri olan $\omega = 1.2 ms^{-1}$ seçilmiş ve ölçeksiz ağı ortalama bağlantı derecesi $k_{avg} = 10$ olarak alınmıştır. SF nöral ağının ateşleme düzenliliğinin farklı kuplaj genliklerinde kanal gürültüsüne bağlı olarak değişimi Şekil 3 de verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan görüldüğü gibi kuplaj genliğinin artmasına paralel olarak SF nöron ağının ateşleme düzenliliğinin arttığı aynı zamanda kuplaj genliğinin değerine bakılmaksızın kanal gürültüsüne bağlı olarak SR gösterdiği görülmüştür. Elde edilen rezonans bölgesinin alanının kuplaj genliğinin artmasıyla

daraldığı ve daha küçük zar alanlarında ortaya çıktığı belirlenmiştir.

Şu ana kadar yapılan analizlerde ağı ortalama bağlantı derecesi k_{avg} sabit kabul edilmiştir. Ancak bu değer ağdaki bağlantı yoğunluğunu belirleyen önemli bir parametredir. Dolayısıyla ölçeksiz nöron ağının eşik altı sinyal kodlama başarımları üzerindeki etkilerinin incelenmesi önem arz etmektedir. Bu yüzden çalışmada son olarak ağı ortalama bağlantı derecesinin ağı ateşleme düzenliliği üzerindeki etkileri incelenmiştir (Şekil 4). Elde edilen sonuçlardan ortalama bağlantı derecesinin ateşleme düzenliliğini önemli ölçüde değiştirdiği ve optimal bir değerinde ($k_{avg} = 10$) ağı ateşleme düzenliliğinin maksimum olduğu belirlenmiştir.

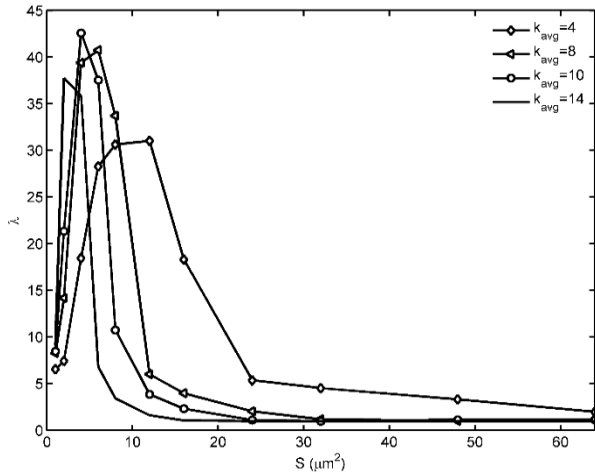


Şekil 2: SF nöral ağının ateşleme düzenliliğinin kuplaj şiddetinin frekansı ile değişimi ($N = 200, \varepsilon_0 = 0.1, k_{avg} = 10$)



Şekil 3: SF nöral ağının ateşleme düzenliliğinin kuplaj şiddetinin genliği ile değişimi ($N = 200, \omega = 1.2, k_{avg} = 10$)

Stokastik HH nöronlarından oluşturulan bir SF nöron ağında, ağı ateşleme düzenliliğinin maksimum olabilmesi için (eşik altı sinyal kodlama başarımının maksimum olabilmesi) ağdaki iyon kanal gürültüsünün yanı sıra nöronlar arasındaki kuplajın frekansının, genliğinin ve ağı ortalama bağlantı derecesinin en uygun değerlerinde olması gerektiği tespit edilmiştir.



Şekil 4: SF nöral ağıının ateşleme düzenliliğinin ağıın ortalama bağlantı ile değişimi ($N = 200$, $\varepsilon_0 = 0.4$, $\omega = 1.2$)

4. Kaynakça

- [1] White, J.A., Rubinstein, J.T., and Kay, A.R. "Channel noise in neurons", *Trends Neurosci*, Vol. 23, p 131-137, 2000.
- [2] Gammaitoni, L., Hänggi, P., Jung, P. and Marchesoni, F. "Stochastic resonance", *Rev. Mod. Phys.*, Vol. 70, p223-228, 1998.
- [3] Moss, F. (G. H. Weiss), *Contemporary Problems in Statistical Physics*, SIAM, Philadelphia, 1994.
- [4] Fox, R.F. and Lu, Y. "Emergent collective behavior in large numbers of globally coupled independently stochastic ion channels", *Phys Rev E*, Vol. 49, 1994, p 3421-3431
- [5] Bezrukov, S.M. and Vodyanoy, I. "Noise-induced enhancement of signal transduction across voltage-dependent ion channels", *Nature*, Vol. 378, p 362-364, 1995.
- [6] Schmid, G., Goychuk, I. and Hänggi, P. "Stochastic resonance as a collective property of ion channel assemblies", *Europhys Lett.*, Vol. 56, p 22-28, 2001.
- [7] Hänggi, P. "Stochastic resonance in biology", *ChemPhysChem*, Vol.3, p 285-290, 2002
- [8] Ozer, M., Perc, M. and Uzuntarla, M. "Stochastic resonance on Newman-Watts networks of Hodgkin-Huxley neurons with local periodic driving", *Phys Lett A*, Vol. 373, p 964-968, 2009.
- [9] Pikovsky, A. S. and Kurths, J. "Coherence Resonance in a Noise-Driven Excitable System", *Phys. Rev. Lett*, Vol 78, p 775-778, 1997.
- [10] Horikawa, Y., "Coherence resonance with multiple peaks in a coupled FitzHugh-Nagumo model", *Phys. Rev.*, Vol.64, p 031905, 2001..
- [11] Baltanás, J. P. and Casado, J. M., "Noise-induced resonances in the Hindmarsh-Rose neuronal model", *Phys. Rev.*, Vol. 65, p 041915, 2002.
- [12] Hu, B and Zhou, C.S. "Phase synchronization in coupled nonidentical excitable systems and array-enhanced coherence resonance", *Phys Rev E*, Vol. 61, p 1001-1004, 2000.
- [13] Wang, Y.Q., Chik, D.T.W. and Wang, Z.D." Coherence resonance and noise induced synchronization in globally coupled Hodgkin-Huxley neurons", *Phys Rev E*, , Vol.61, p 740-746, 2000.
- [14] Li, Q and Lang, XF., "Internal signal transmission in one-way coupled excitable system: Noise and coupling effects", *Phys. Rev.*, Vol 74, p 031905, 2006.
- [15] Li, Q. S. and Liu, Y., "Enhancement and sustainment of internal stochastic resonance in unidirectional coupled neural system", *Phys. Rev.*, Vol 7, p 016218, 2006.
- [16] Yilmaz, E and Ozer, M. "Collective firing regularity of a scale-free Hodgkin-Huxley neuronal network in response to a subthreshold signal", *Phys Lett A*, Vol.377, p 1301-1307, 2013.
- [17] Hughes, J. R., "Post-tetanic Potentiation", *Physiological Reviews*, Vol. 38, p 91-113, 1958.
- [18] Gerrow K, Triller A., "Synaptic stability and plasticity in a floating World", *Curr Opin Neurobiol*, Vol. 20,p.631-640, 2010.
- [19] Haas J.S, Nowotny T, Abarbanel HDI., "Spike-timing-dependent plasticity of inhibitory synapses in the entorhinal cortex" *J Neurophysiol*, Vol. 96, p 3305-3318, 2006.
- [20] Birzu, A. and Krischer, K. "Resonance tongues of a system of globally coupled Fitzhugh-Nagumo oscillators with time-periodic coupling strength", *Chaos*, Vol. 20, p 043114, 2010.
- [21] Lin, X., Gong, Y.B. and Wang, L., "Multiple coherence resonance induced by time-periodic coupling in stochastic Hodgkin-Huxley neuronal networks." *Chaos* Vol. 21, 043109, 2011.
- [22] Lin, X., Gong, Y.B., Wang, L. And XiaoGuang, M.A . "Coherence resonance and bi-resonance by time-periodic coupling strength in Hodgkin-Huxley neuron networks", *Science China Chemistry*, Vol.55, p 256-261, 2012.
- [23] Wang, L., Gong, Y.B., Lin, X. And Xu, B. "Multiple coherence resonances by time-periodic coupling strength in scale-free networks of bursting neurons", *Eur. Phys. J. B*, Vol. 85p 14-18, 2012.
- [24] Hodgkin, A. and Huxley, A. "A quantitative description of rare current and its application to conduction and excitation in nerve", *J. Physiol.*, Vol 117, p 500-544, 1952.
- [25] Fox, R. F., "Stochastic versions of the Hodgkin-Huxley equations," *Biophys. J.*, Vol. 72, p 2069-2074, 1997.
- [26] Albert, R. and Barabási, A.-L., "Statistical mechanics of complex networks", *Rev. Mod. Phys.*, Vol. 74, p 47, 2002
- [27] Hou, Z.H. and Xin, H., "Oscillator death on small-world networks", *Phys. Rev.*, Vol. 68, p 055103, 2003.
- [28] Jeong, H., Mason, S. P., Barabási, A.-L. and Oltvai, Z. N., "Lethality and centrality in protein networks", *Nature*, Vol. 411, p 41, 2001.
- [29] Camacho, J., Guimerà, R. and Nunes Amaral LA., "Robust patterns in food web structure.", *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 88, p 228102, 2002.
- [30] Barabási, A.L., Albert, R., "Emergence of Scaling in Random Networks", *Science*, Vol. 286, p509-512, 1999.
- [31] Yu, Y., Wang, W., Wang, J.F., Liu, F., "Resonance-enhanced signal detection and transduction in the Hodgkin-Huxley neuronal systems", *Phys. Rev. E* Vol. 63, 021907, 2001.