

NEURÁLIS ÉS NÖVEKVŐ HÁLÓZATOK STATISZTIKUS TULAJDONSÁGAI

A doktori értekezés tézisei

Zalányi László

Magyar Tudományos Akadémia, KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet,
Biofizika Osztály

CNS Csoport

Témavezető: Dr. Érdi Péter

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar

Fizika Doktori Iskola, Statisztikus fizika, biológiai fizika és kvantumrendszerek
fizikája doktori program

A Doktori Iskola vezetője: Dr. Horváth Zsolt

Programvezető: Dr. Vicsek Tamás

Budapest, 2004

A disszertációról

Dolgozatom két részből áll. Első részében a sztochasztikus rezonancia jelenségét vizsgálom előrecsatolt modell neuron hálózatban, második részében egy növekvő hálózat statisztikai jellemzőit elemzem.

Sztochasztikus rezonancia előrecsatolt modell-neuron hálózatban

Bevezetés

A sztochasztikus rezonancia (SR) elnevezés Benzi, Sutera és Vulpiani-tól származik, ők a jégkorszakok periodikus váltakozását magyarázták a Föld-pálya paramétereinek periodikus változása és zaj segítségével. Egy rendszer akkor mutatja a sztochasztikus rezonancia jelenségét, ha létezik optimális zaj, amely mellett maximális a be és kimeneti jelek „hasonlósága”. A kezdeti vizsgálatok tárgya egyben a jelenség egyszerű szemléltetésére alkalmas a dupla potenciálvölgyben csillapított mozgást végző részecske a völgyek közötti ugrásainak időszora. A kis perturbáló erőt adunk a potenciálhoz nem jönnek létre ugrások. Ha zajt is adunk a rendszerhez előfordulnak átmenetek, melyek egy bizonyos zajintenzitás mellett legjobban hasonlítanak a perturbáló jelre. A jelenséget számos rendszerben kimutatták Schmitt-triggerben, lézer rendszerekben és ion csatornáknak is. A jelenséghez három fontos tényező kell: egy nem lineáris rendszer, gyenge jel és zaj. Mivel a nemlineáris rendszerben a gyenge jel is tud a zaj segítségével a jelre jellemző nagy változásokat indukálni ezért szokás az SR-t a zaj „jótékony” megnyilvánulásának tekinteni.

Az idegsejteknek minden szükséges tulajdonsága megvan az SR jelenségének produkálásához, számos kísérlet erősítette meg elvárásainkat. Elméleti vizsgálatok legtöbbször az ún. szivárgó integrál és tüzel neuron modelleken (LIF) folynak, mert ezen egyszerű modell is alkalmas a jelenségek produkálására és nyomkövető az egyes paraméterek szerepe a jelenségben.

Célkitűzések

Dolgozatomban ilyen LIF sejtmodellekből álló előreccsatolt hálózatban vizsgáltam a sztochasztikus rezonanciát. Az előzőleg vizsgált eredményekhez képest, ahol a sok sejt viselkedését átlagolva javították a SR kimutatására használt jel-zaj arányt (SNR), egy a valósághoz közelebbi, a szenzoros rendszerekre jellemző előreccsatolt hálózatban vizsgáltam az optimális kimenet feltételeit, és hogy létezik-e olyan biológiai mechanizmus mely tovább javíthatja a hálózat kimeneti SNR-ét.

Módszerek

A zajos LIF modell viselkedését csak közelítőleg tudjuk meghatározni analitikusan. Ha időfüggő gerjesztést kap a modell, akkor már numerikus megoldást kell alkalmaznunk. Tovább bonyolítja a rendszert, ha a csatolásoknak belső dinamikája is van. A hálózat viselkedésének meghatározására ezért numerikus szimulációkat végeztem a NEURON nevű programmal.

A tüzelési idősorok elemzését a SCILAB és R szabadon hozzáférhető tudományos programcsomagokkal végeztem.

Megvizsgáltam, hogy akár csak kis hálózatméret esetén is, közelíthető-e a statisztikailag független rendszerek együttesének kimenete inhomogén Poisson folyamattal. Ha igen, akkor a Poisson folyamat paramétere meghatározható az egyedi hálózat tüzelési fáziseloszlásából és így ebből a hálózat teljesítményspektruma.

A hálózatban „normált” sejtmodelleket kapcsoltam össze, azaz mértékegység nélküli egyenleteket implementáltam a számítások egyszerűsítésére, így pl. az idő egysége a membrán időállandó volt. A vizsgálatok a bemeneti jel amplitúdójának és frekvenciájának, a zaj intenzitásának, a sejtek számának, refrakter idejüknek és a kapcsolaterősségnek az SR jelenség kialakításában játszott szerepére irányultak.

Megvizsgáltam a szinaptikus depresszió mechanizmusát, hogy alkalmas lehet-e a hálózat kimeneti jel-zaj arányát optimális szinten tartani adott körülmények között.

Eredmények

T/I.1. *Statisztikai módszerekkel igazoltam, hogy a sztochasztikusan gerjesztett előreccsatolt hálózatok sokaságának kimenete inhomogén Poisson folyamatként (IPP) írható*

le. Érvényes a közelítés akkor is, amikor a hálózat kimeneti sejtjének bemenete még rosszul közelíthető IPP-tal. Ebből következik, hogy hierarchikusan felépített hálózatok sokaságának leírására is jó közelítés lehet az IPP.

T/I.2. Megmutattam, hogy az előrecsatolt neurális hálózatban a $g_{opt}(D)$ szükségképpen csökkenő lépcsős függvény, alakját a bementi sejtszámon kívül elsősorban a kimeneti sejt refrakter ideje határozza meg. Az optimális kapcsolaterősség értéke kevésbé függ a gerjesztő jel paramétereitől, tehát egy adott hálózattal a küszöb alatti jelek széles frekvencia és amplitúdó tartományban optimálisan detektálható.

T/I.3. Megmutattam, hogy ha a csatolási erősséget a szinaptikus depresszió szabályozza, akkor a hálózat képes az SR jelenség előállítására, továbbá képes a szükséges mértékűre állítani a csatolási erősséget.

Konklúzió

Az eredmények azt mutatják, hogy lehetséges a külvilágból érkező jelek széles spektrumában érzékeny adaptív hálózatot készíteni. Az optimális csatolási erősséget elsősorban a belső korlátok szabják meg.

Növekvő hálózatok statisztikus elemzése

Bevezetés és célkitűzések

Napjaink tudományos gondolkodásában látványosan előtérbe került az élet különféle területein megtalálható sokféle hálózat. Vizsgálatuk során fény derült számos olyan strukturális jellegzetességre, melyek sokukban közös: él-eloszlásuk gyakran mutat hatványfüggvény eloszlást, sokuk rendelkezik az ún. kis-világ tulajdonsággal, stb.

A vizsgált hálózatok egy speciális esetét jelentik azok, ahol a csomópontok embereket szimbolizálnak – az ún. szociális hálózatok. Az ilyen hálózatokat is több irányból lehet vizsgálni, pl. kisléptékű szerkezetüket, valamilyen feladat ellátására való alkalmasságukat, az egyes elemek szerepét a struktúra kialakításában, vagy kialakulásuk mechanizmusait és szerkezetükre gyakorolt hatását. A szociális hálózatok kialakulásának leírását természetesen módon az embereket szimbolizáló csomópontokat tulajdonságokkal felruházva, azok alapján kapcsolva képzeljük el. Munkám második részében

egy ilyen modell egyszerűsített, átlagolt változatának statisztikus vizsgálatát végeztem el.

Módszerek

Analitikus számításokkal és numerikus, számítógépes szimulációkkal vizsgáltam az átlagolt növekvő hálózati modellt. Ekkor a csomópontok azonosak voltak, köztük a kapcsolatok azonos valószínűséggel, véletlenül alakulhattak ki. Az eloszlások meghatározásakor feltételeztem, hogy a gráf fa szerkezetű lesz $t \rightarrow \infty$ határestben. A fázisátalakulás vizsgálatához generátorfüggvény módszer alkalmaztam.

Eredmények

T/II.1. *Analitikus számításokkal megmutattam, hogy a növekvő hálózatok egy új modelljében a csomópontok fokszám eloszlása exponenciális.*

T/II.2. *Analitikus (heurisztikus) módszerekkel kimutattam, hogy a hálózatban fázisátalakulás figyelhető meg. Egzakt formulát adtam a fázisátalakulás helyére:*

$$\delta_c = \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{1}{k}}}{2}$$

T/II.3. *Numerikus módszerekkel megbecsültem a fázisátalakulás rendjét és az óriás-klaszter S növekedésének ütemét. Az átalakulás végtelen rendűnek, a legnagyobb komponens pedig $S(\delta) \sim \exp \alpha(\delta - \delta_c)^\beta$ méretűnek adódott a kritikus pontban. Becslést adtam a β kitevőre: $-1/2$.*

Konklúzió, kitekintés

A növekvő hálózatok újszerű példái a végtelenrendű fázisátalakulásnak, ahol a fázisátalakulás rendjéért a növekedés mechanizmusa a felelős, mintegy lehűti, lelassítja az átmenetet, az átmenet helyét az egyéb paraméterek szabják meg.

Publikációs lista

A tézisek alapjául szolgáló közlemények

- Zalányi L, Bazsó F, Érdi P: The effect of synaptic depression on stochastic resonance. *Neurocomputing* 38-40 (2001) 459-465
- Zalányi L, Csárdi G, Kiss T, Lengyel M, Warner R, Tobochnik J, Érdi P: Properties of a random attachment growing network. *Physical Review E* 68 066104 (2003)

A dolgozat témájában megjelent egyéb közlemények

- Bazsó F, Zalányi L, Csárdi G: Channel Noise in Hodgkin-Huxley Model Neurons. *Physics Letters A*, 311/1 (2003) 13-20
- Csárdi G, Strandburg, KJ, Zalányi L, Tobochnik J, Érdi P: Modeling innovation by a kinetic description of the patent system, *Physica A*, 374, 783-793 (2007)
- Strandburg KJ, Csárdi G, Tobochnik J, Érdi P, Zalányi L: Law and the Science of Networks: an Overview and an Application to the "Patent Explosion", *Berkeley Technology Law Journal*, 21:4, in press (2006)