Sinapsinio plastiškumo įtaka pirmo tipo neuronų sinchronizacijos režimams

FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

Irmantas Ratas (irmantas.ratas@ftmc.lt), Kęstutis Pyragas

Fizinių ir technologijos mokslų centras, Saulėtekio al. 3, Vilnius, Lietuva

Išvados

- Sinapsinis sujungimas (pagal STDP taisyklę), leidžia egzistuoti jungčiai iš lėtesnio į greitesnį neuroną;
- Esant šiai jungčiai neuronai sinchronizuojasi lėtesniojo dažniu (tiek dviejų neuronų, tiek tinklo atveju);
- STDP apsunkina neuronų sinchronizacijos galimybes.

Modelis

Sinchronizacija tarp neuronų gali atlikti tiek konstruktyvų, tiek destruktyvų vaidmenį, todėl svarbu suprasti šio reiškinio atsiradimo bei egzistavimo sąlygas. Neuronų galimybes sinchronizuotis nulemia individualios neuronų savybės, jų sujungimo tinklo struktūra, taip pat ir ryšio stiprumas. Tinklo jungtys ir jungčių stiprumas keičiasi priklausomai nuo individualių neuronų veiklos. Ši jungčių savybė vadinama sinapsiniu plastiškumu. Taigi turime grįžtamąjį ryšį tarp individualių neuronų ir pačio tinklo dinamikos, kurį šiame darbe ir tirsime.

Pasirinkome pirmo tipo neuronus, nes jie, priklausomai nuo pridėtos pastovios išorinės jėgos, gali generuoti dažnius iš plataus spektro. Dažniausiai pridėjus teigiamo ženklo stimuliaciją tokie neuronai greitina savo dinamiką. Tirti kvadartiškai integruojantys neuronai, Morris–Lecar ir Wang–Buzsáki modeliai.

Laikas, kai neurono potencialas viršija tam tikrą kritinę vertę ir gali perduoti signalą kitam neuronui, yra vadinamas aktyvavimo laiku. Mūsų modelyje neuronai tarpusavyje sąveikauja delta impulsais. Darbe ryšio dinamiką aprašėme nuo neuronų aktyvavimo laiko priklausomu sinapsiniu plastiškumu (angl. Spike-timing-dependent plasticity (STDP)). Tai reiškia, kad ryšio kitimas tarp dviejų neuronų priklauso nuo jų aktyvavimo laikų skirtumo. Kuo tas laikas yra trumpesnis, tuo labiau šis ryšys pakinta. Pokyčio ženklas priklauso nuo aktyvacijos eiliškumo.

Neuroną aprašančios lygtys — *Sąveikos narys*

$$
\begin{aligned}
C_m \dot{v}_i &= F(v_i, \mathbf{w}_i, \eta_i) + g \sum_{j=1}^{N} W_{ij}(t) S_j(t), \\
\dot{\mathbf{w}}_i &= \mathbf{G}(v_i, \mathbf{w}_i, \gamma_i).
\end{aligned}
$$

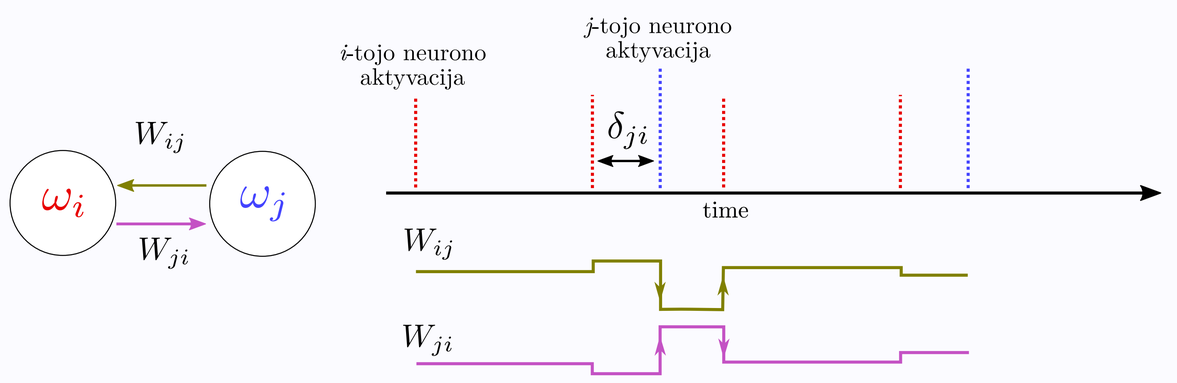
$S_j(t)$ – delta impulsų seka (sugeneruota kitų neuronų),

$W_{ij}(t)$ – sinaptinio ryšio iš j-tojo į i-tąjį neuroną stipris.

$$W_{ji}(t_j) \leftarrow W_{ji}(t_j) + p e^{-\delta_{ji}/\tau_p}$$

$$W_{ij}(t_j) \leftarrow W_{ij}(t_j) - d e^{-\delta_{ji}/\tau_d}$$

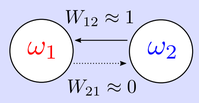
Sinaptinio sujungimo dinamikos pavyzdys:



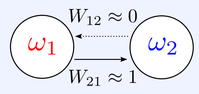
Dviejų neuronų atvejis

Dviejų neuronų atveju ($\omega_1 > \omega_2$) galimos trys asimptotinės tinklo konfigūracijos:

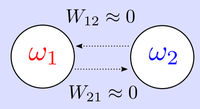
(i) Tarp neuronų nusistovi vienkryptis ryšys – iš lėtesnio į greitesnį, osciliuoja lėtesniojo dažniu;



(ii) Vienkryptis ryšys iš greitesnio į lėtesnį;

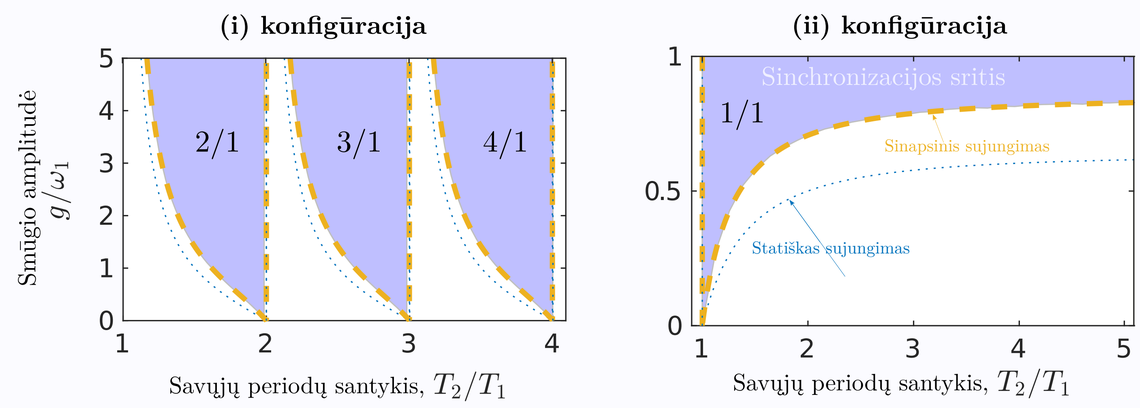


(iii) Ryšys tarp neuronų išnyksta.



STDP poveikis sinchronizacijai gali būti nagrinėjamas tiriant Arnoldo liežuvius (AL). AL parodo kokia delta impulso amplitudė (g) reikalinga duotam neuronų periodų santykiui, kad būtų pasiekta sinchronizacija. Bendru atveju AL analitinis pavidalas gali būti rastas tik netoli rezonansų. Žemiau esančiame paveikslėlyje pavaizduoti AL kvadratiškai integruojančių neuronų atvejui. Analitiškai apskaičiuotas kreives (mėlyna ir geltona) patvirtina skaitmeniniai skaičiavimai (melsvas plotas tarp kreivių).

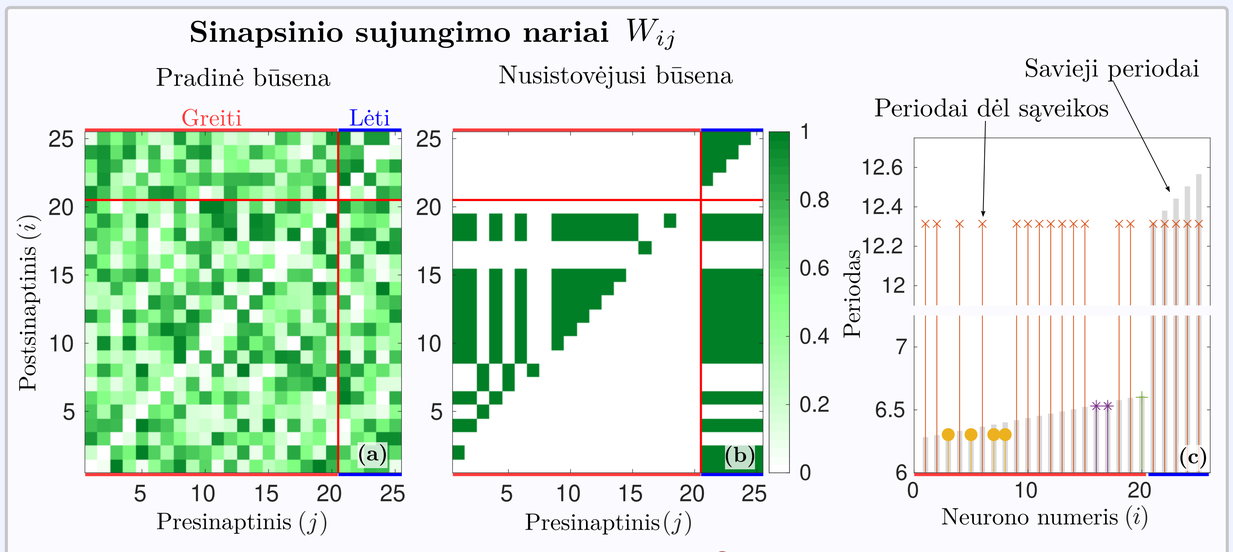
Kvadratiškai integruojančių neuronų sinchronizacija

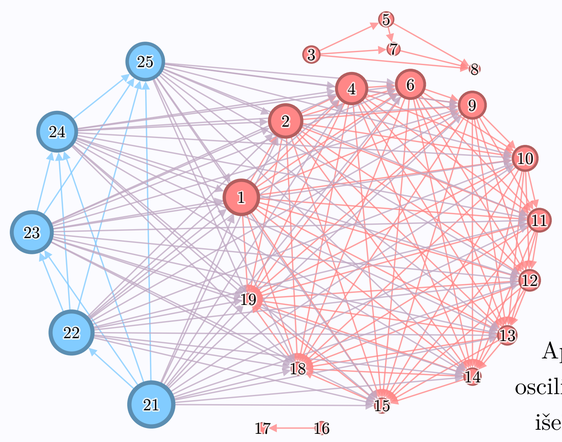


Tinklas

Pirmos konfigūracijos egzistavimas leidžia lėčiausiam neuronui pavergti greitesnius neuronus. Žemiau pavaizduoti tinklo dinamikos modeliavimo rezultatai. Pradinėje būsenoje (a) sujungimo nariai išmėtyti atsitiktinai. Po pereinamojo proceso susiformuoja trys atskiros neuronų grupės ((b) ir (d) grafikai). Iš grafiko (c) matyti, kad didžiausia neuronų grupė osciliuoja 21 neurono dažniu (greičiausio iš lėtųjų pogrupio 21-25).

Sinapsinio sujungimo nariai W_{ij}





Apskritimo vaizduojančio osciliatorių dydis proporcingas išeinančių jungčių skaičiui.

I. Ratas and K. Pyragas, Interplay of different synchronization modes and synaptic plasticity in a system of class I neurons, Sci. Rep. 12, 19631 (2022).