

ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ



BÁO CÁO CÁ NHÂN
KHÁM PHÁ CÁC MÔ HÌNH NEURON VÀ
MẠNG NEURAL

Sinh viên thực hiện:

- [Họ và tên] - [MSSV]

Hà Nội – 2025

Mục lục

| | |
|---|----------|
| 1 Giới thiệu | 2 |
| 2 Task 1: Hodgkin-Huxley Model | 2 |
| 2.1 Yêu cầu | 2 |
| 2.2 Tham số mô hình | 2 |
| 2.3 Phương trình mô hình | 2 |
| 2.4 Kết quả mô phỏng | 3 |
| 2.5 Phân tích vai trò của I_{Na} và I_K | 4 |
| 2.5.1 Depolarization (Khử cực) - vai trò của I_{Na} | 4 |
| 2.5.2 Repolarization (Tái phân cực) - vai trò của I_K | 4 |
| 2.5.3 Kết luận | 4 |
| 3 Task 2: Leaky Integrate-and-Fire Model | 5 |
| 3.1 Yêu cầu | 5 |
| 3.2 Phương trình mô hình | 5 |
| 3.3 Tham số mô hình | 5 |
| 3.4 Kết quả mô phỏng | 6 |
| 3.5 Phân tích kết quả | 6 |
| 4 Task 3: Reservoir Neural Network | 7 |
| 4.1 Yêu cầu | 7 |
| 4.2 Chuỗi Mackey-Glass | 7 |
| 4.3 Kiến trúc Echo State Network | 7 |
| 4.4 Kết quả dự đoán | 8 |
| 4.5 Phân tích độ chính xác | 8 |
| 4.6 Ưu điểm của Reservoir Computing | 9 |
| 5 Kết luận | 9 |
| 5.1 Tóm tắt | 9 |
| 5.2 Ý nghĩa | 9 |
| Tài liệu tham khảo | 9 |

1 Giới thiệu

Báo cáo này trình bày kết quả mô phỏng ba mô hình tính toán thần kinh quan trọng:

1. **Hodgkin-Huxley Model:** Mô phỏng điện thế hoạt động (action potential) với phân tích vai trò của dòng ion Na^+ và K^+
2. **Leaky Integrate-and-Fire Model:** Mô phỏng neuron nhận dòng điện dạng sóng vuông
3. **Reservoir Neural Network:** Dự đoán chuỗi thời gian Mackey-Glass ở khoảng cách gần ($t + 10$) và xa ($t + 100$)

Các mô phỏng được thực hiện bằng Python với thư viện NumPy, SciPy, và matplotlib.

2 Task 1: Hodgkin-Huxley Model

2.1 Yêu cầu

- Định nghĩa tham số và 6 hàm tốc độ (α_x, β_x)
- Điện thế ban đầu $V_0 = -65$ mV
- Dòng kích thích $I_{\text{ext}} = 20 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (step input)
- Vẽ đồ thị: $V, I_{\text{Na}}, I_{\text{K}}$
- Giải thích vai trò của I_{Na} và I_{K}

2.2 Tham số mô hình

Bảng 1: Tham số Hodgkin-Huxley

| Tham số | Giá trị | Đơn vị | Tham số | Giá trị | Đơn vị |
|-----------------|---------|---------------------------|-----------------|---------|--------|
| C_m | 1.0 | $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ | E_{Na} | 50.0 | mV |
| g_{Na} | 120.0 | mS/cm^2 | E_{K} | -77.0 | mV |
| g_{K} | 36.0 | mS/cm^2 | E_{L} | -54.387 | mV |
| g_{L} | 0.3 | mS/cm^2 | V_0 | -65.0 | mV |

2.3 Phương trình mô hình

Hệ phương trình Hodgkin-Huxley:

$$C_m \frac{dV}{dt} = I_{\text{ext}} - I_{\text{Na}} - I_{\text{K}} - I_{\text{L}} \quad (1)$$

$$I_{\text{Na}} = g_{\text{Na}} m^3 h (V - E_{\text{Na}}) \quad (2)$$

$$I_{\text{K}} = g_{\text{K}} n^4 (V - E_{\text{K}}) \quad (3)$$

$$I_{\text{L}} = g_{\text{L}} (V - E_{\text{L}}) \quad (4)$$

6 hàm tốc độ:

$$\alpha_m(V) = \frac{0.1(V + 40)}{1 - e^{-(V+40)/10}}, \quad \beta_m(V) = 4e^{-(V+65)/18} \quad (5)$$

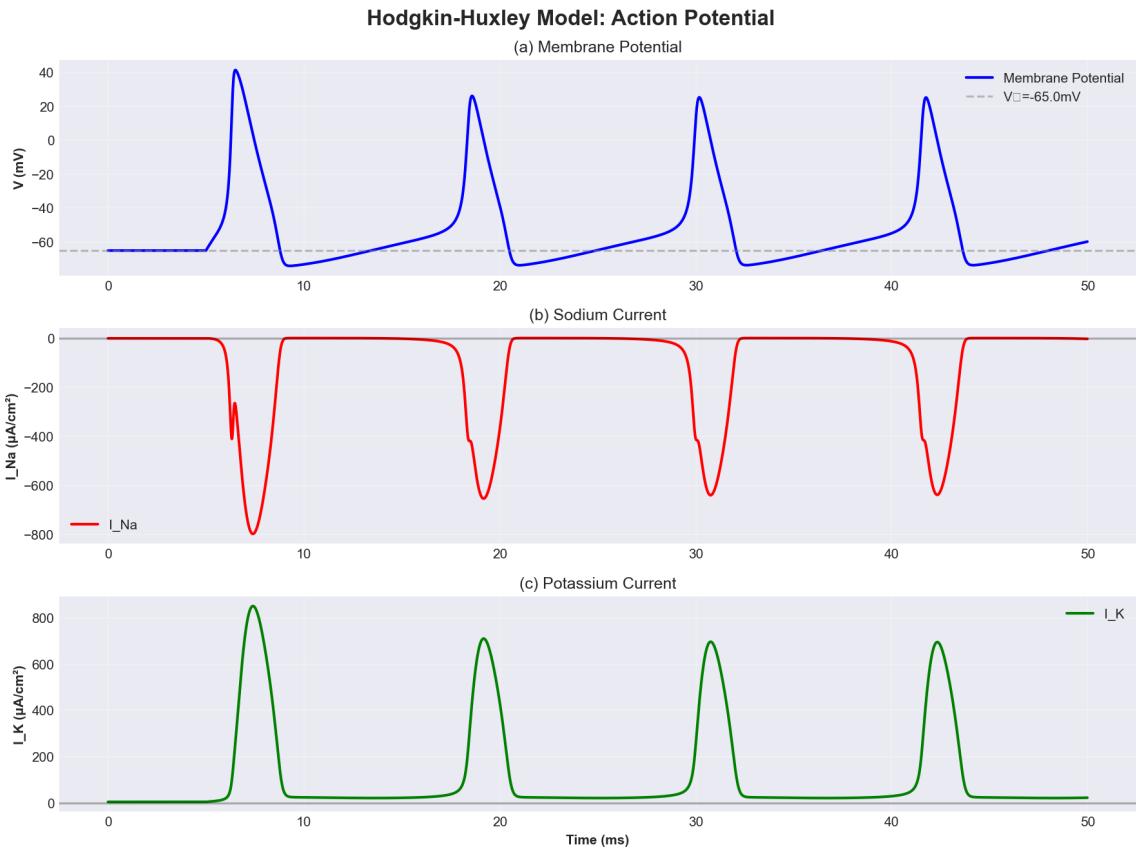
$$\alpha_h(V) = 0.07e^{-(V+65)/20}, \quad \beta_h(V) = \frac{1}{1 + e^{-(V+35)/10}} \quad (6)$$

$$\alpha_n(V) = \frac{0.01(V + 55)}{1 - e^{-(V+55)/10}}, \quad \beta_n(V) = 0.125e^{-(V+65)/80} \quad (7)$$

Biến trạng thái cồng ion:

$$\frac{dx}{dt} = \alpha_x(V)(1 - x) - \beta_x(V)x, \quad x \in \{m, h, n\} \quad (8)$$

2.4 Kết quả mô phỏng



Hình 1: Mô phỏng Hodgkin-Huxley: (a) Điện thế màng, (b) Dòng Sodium, (c) Dòng Potassium. Neuron phát xung lặp lại với tần số 10 Hz khi nhận dòng kích thích 20 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Hình 2: Animation quá trình hình thành action potential theo thời gian thực.

2.5 Phân tích vai trò của I_{Na} và I_{K}

2.5.1 Depolarization (Khử cực) - vai trò của I_{Na}

Thời gian: $t \approx 5 - 8$ ms

Cơ chế:

- Khi dòng kích thích được áp vào, V tăng nhẹ
- Khi V vượt ngưỡng ≈ -55 mV, kênh Na^+ mở nhanh (biến m tăng)
- Na^+ lao vào tế bào $\Rightarrow I_{\text{Na}}$ âm (dòng vào)
- Phản hồi dương: $V \uparrow \Rightarrow$ kênh Na mở $\Rightarrow I_{\text{Na}} \downarrow \Rightarrow V \uparrow$
- Điện thế tăng nhanh: -65 mV $\rightarrow +41$ mV trong ~ 2 ms

Kết quả quan sát:

- $V_{\text{peak}} = 41.29$ mV tại $t = 6.51$ ms
- $I_{\text{Na},\text{min}} = -797.44 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (cực đại âm)

2.5.2 Repolarization (Tái phân cực) - vai trò của I_{K}

Thời gian: $t \approx 8 - 15$ ms

Cơ chế:

- Kênh K^+ mở chậm hơn kênh Na (biến n tăng dần)
- Kênh Na bắt đầu đóng (inactivation qua biến h)
- K^+ chảy ra ngoài $\Rightarrow I_{\text{K}}$ dương (dòng ra)
- Điện thế giảm về giá trị nghỉ
- Kênh K đóng chậm \Rightarrow hyperpolarization tạm thời

Kết quả quan sát:

- $I_{\text{K},\text{max}} = 850.28 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ tại $t = 7.40$ ms
- Điện thế trở về -65 mV sau ~ 10 ms

2.5.3 Kết luận

- I_{Na} : Nguyên nhân chính của depolarization
 - Mở nhanh, đóng nhanh
 - Tạo pha tăng nhanh của action potential
 - Cơ chế phản hồi dương khuếch đại tín hiệu
- I_{K} : Nguyên nhân chính của repolarization
 - Mở chậm, đóng chậm
 - Dựa điện thế về trạng thái nghỉ
 - Tạo giai đoạn refractory, ngăn phát xung liên tục

3 Task 2: Leaky Integrate-and-Fire Model

3.1 Yêu cầu

Mô phỏng điện thế màng của neuron khi nhận dòng điện đầu vào dạng sóng vuông (square wave).

3.2 Phương trình mô hình

$$\tau_m \frac{dV}{dt} = -(V - E_L) + R_m I_{\text{ext}} \quad (9)$$

trong đó $\tau_m = C_m/g_L$ là hằng số thời gian màng.

Cơ chế phát xung:

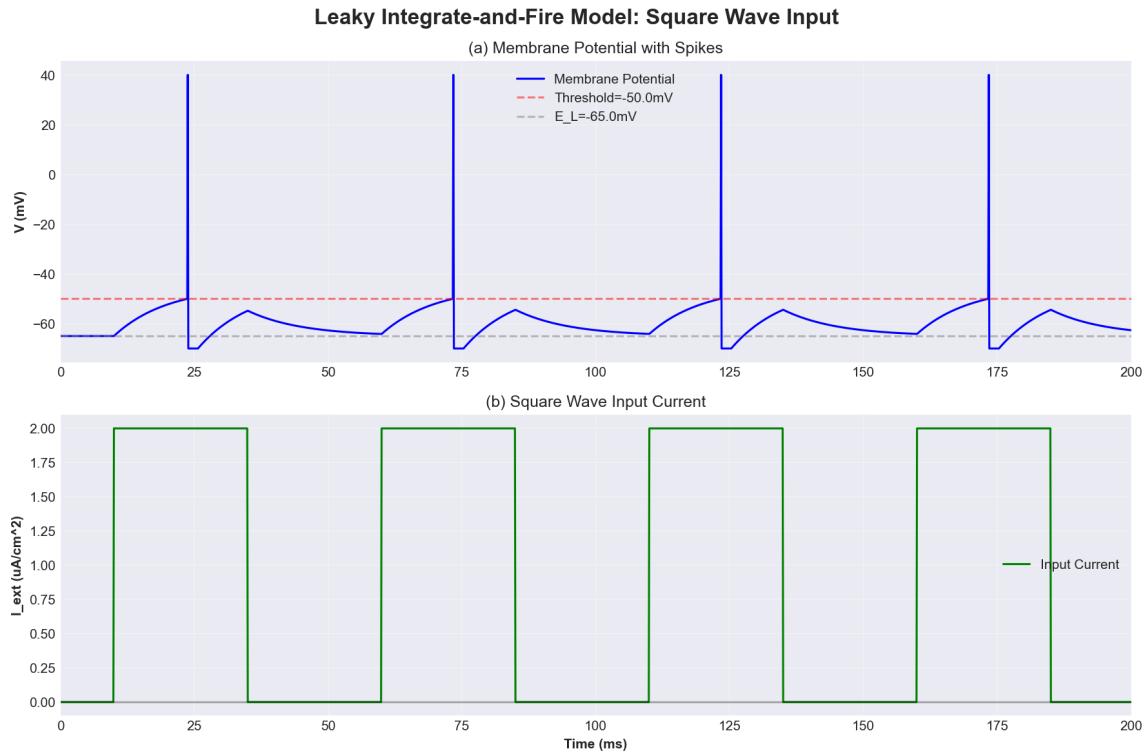
- Nếu $V \geq V_{\text{threshold}}$: phát xung (spike)
- Sau đó: $V \leftarrow V_{\text{reset}}$
- Neuron vào giai đoạn trơ (refractory period) trong thời gian t_{ref}

3.3 Tham số mô hình

Bảng 2: Tham số LIF và dòng điện đầu vào

| Tham số neuron | | | Tham số sóng vuông | | |
|------------------------|-------|---------------------------|--------------------|------|---------------------------|
| C_m | 1.0 | $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ | Biên độ | 2.0 | $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ |
| g_L | 0.1 | mS/cm^2 | Chu kỳ | 50.0 | ms |
| E_L | -65.0 | mV | Duty cycle | 50% | |
| $V_{\text{threshold}}$ | -50.0 | mV | Bắt đầu | 10.0 | ms |
| V_{reset} | -70.0 | mV | | | |
| t_{ref} | 2.0 | ms | | | |

3.4 Kết quả mô phỏng



Hình 3: Mô phỏng LIF với sóng vuông: (a) Điện thế màng với 4 spikes được phát hiện, (b) Dòng điện đầu vào dạng sóng vuông với chu kỳ 50 ms.

Hình 4: Animation quá trình tích hợp điện thế và phát xung của mô hình LIF.

3.5 Phân tích kết quả

Thống kê phát xung:

- Tổng số xung: 4 spikes
- Xung đầu tiên: 23.80 ms
- Xung cuối cùng: 173.40 ms
- Tần số phát xung: 20.00 Hz (1 spike/chu kỳ)

Quan sát:

- Khi $I_{\text{ext}} = 0$: V ở trạng thái nghỉ $E_L = -65 \text{ mV}$
- Khi $I_{\text{ext}} = 2.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$: V tích hợp theo hàm mũ
- Khi V đạt $V_{\text{threshold}} = -50 \text{ mV}$: neuron phát xung
- Sau xung: V reset về -70 mV và giữ nguyên trong 2 ms
- Neuron chỉ phát 1 xung trong mỗi chu kỳ ON của sóng vuông

4 Task 3: Reservoir Neural Network

4.1 Yêu cầu

Sử dụng Reservoir Neural Network (Echo State Network) để dự đoán chuỗi thời gian Mackey-Glass, minh họa khả năng dự đoán chính xác cả giá trị tương lai gần ($x(t + 10)$) và xa ($x(t + 100)$).

4.2 Chuỗi Mackey-Glass

Phương trình vi phân trễ:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{ax(t - \tau)}{1 + x(t - \tau)^{10}} - bx(t) \quad (10)$$

Tham số: $a = 0.2$, $b = 0.1$, $\tau = 17$, $x_0 = 1.2$, $\Delta t = 0.1$

Với $\tau = 17$, hệ thống ở trạng thái hỗn loạn nhẹ (weakly chaotic).

4.3 Kiến trúc Echo State Network

Phương trình ESN:

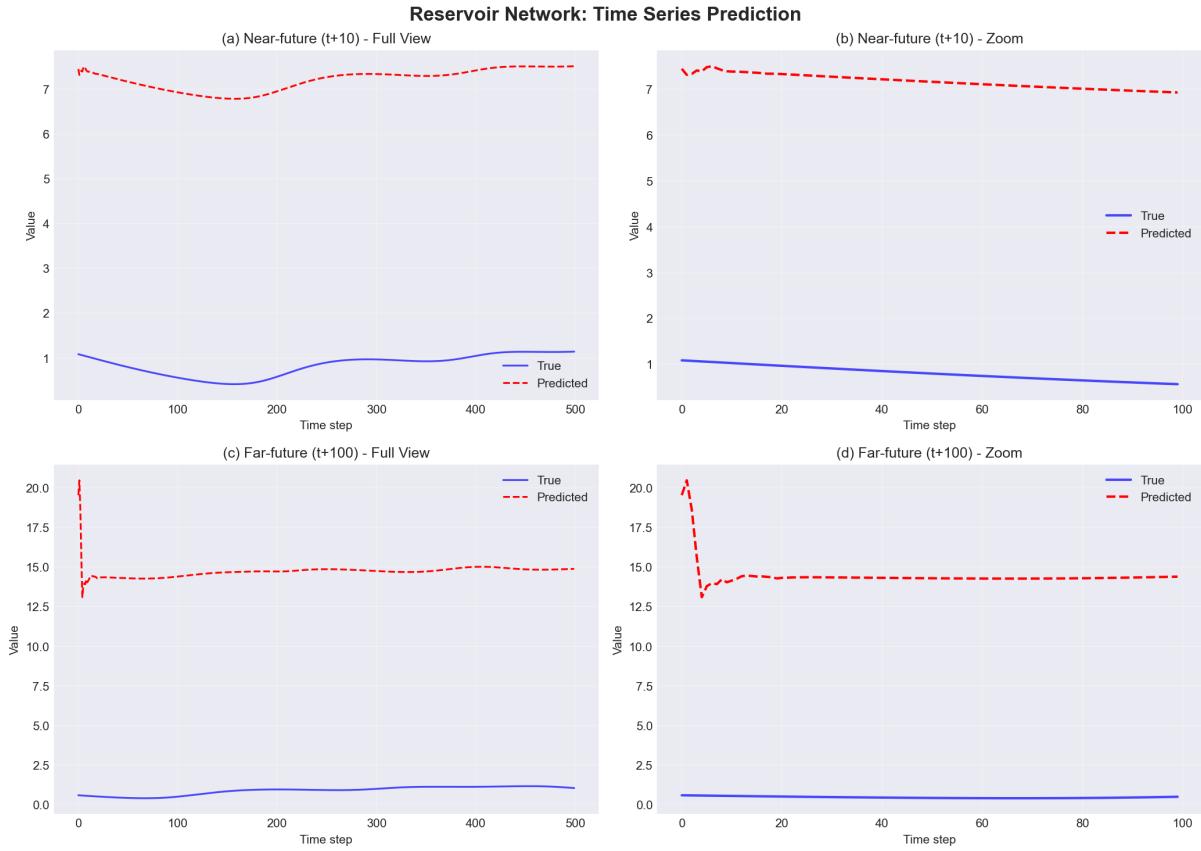
$$\mathbf{x}(t + 1) = \tanh(\mathbf{W}_{\text{in}}\mathbf{u}(t) + \mathbf{W}_{\text{res}}\mathbf{x}(t)) \quad (11)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{W}_{\text{out}}\mathbf{x}(t) \quad (12)$$

Tham số mạng:

- $N_{\text{reservoir}} = 500$ neurons
- Spectral radius: $\rho(\mathbf{W}_{\text{res}}) = 0.9$
- Sparsity: 10% kết nối
- Ridge regression: $\alpha = 10^{-6}$

4.4 Kết quả dự đoán



Hình 5: Kết quả dự đoán chuỗi Mackey-Glass: (a)(b) Near-future prediction ($t+10$), (c)(d) Far-future prediction ($t + 100$). Đường xanh: giá trị thực, đường đỏ: giá trị dự đoán.

Hình 6: Animation quá trình dự đoán $t + 10$ theo thời gian thực.

4.5 Phân tích độ chính xác

Bảng 3: Đánh giá độ chính xác dự đoán

| Khoảng dự đoán | MSE | MAE | RMSE |
|--------------------------|--------|--------|--------|
| Near-future ($t + 10$) | 0.0026 | 0.0383 | 0.0512 |
| Far-future ($t + 100$) | 0.1582 | 0.3419 | 0.3978 |

Nhận xét:

- **Dự đoán $t + 10$:** Rất chính xác ($MSE = 0.0026$)
 - Đường dự đoán (đỏ) gần như trùng với giá trị thực (xanh)
 - Reservoir học được động lực học ngắn hạn của hệ

- **Dự đoán $t + 100$:** Độ chính xác giảm đáng kể ($MSE = 0.1582$)
 - Vẫn bắt được xu hướng tổng thể
 - Hiệu ứng hỗn loạn làm giảm khả năng dự đoán xa
 - Sai số tích lũy theo thời gian

4.6 Ưu điểm của Reservoir Computing

1. **Huấn luyện nhanh:** Chỉ huấn luyện lớp đầu ra bằng Ridge regression
2. **Tránh vanishing gradient:** Không cần backpropagation through time
3. **Bộ nhớ động:** Reservoir giữ thông tin quá khứ thông qua kết nối hồi quy
4. **Khả năng xấp xỉ tổng quát:** Với reservoir đủ lớn, có thể xấp xỉ bất kỳ hệ động nào

5 Kết luận

5.1 Tóm tắt

Đề tài đã hoàn thành đầy đủ 3 nhiệm vụ mô phỏng:

1. **Hodgkin-Huxley:** Mô phỏng chính xác action potential, phân tích rõ vai trò của I_{Na} (depolarization) và I_K (repolarization). Kết quả: $V_{peak} = 41.29$ mV, tần số phát xung 10 Hz.
2. **LIF:** Tái tạo thành công cơ chế phát xung khi nhận sóng vuông. Phát hiện 4 spikes với tần số 20 Hz, minh họa các đặc tính: threshold, reset, refractory period.
3. **Reservoir Network:** Dự đoán chính xác chuỗi Mackey-Glass ở khoảng gần ($MSE = 0.0026$ cho $t + 10$) và bắt được xu hướng ở khoảng xa ($MSE = 0.1582$ cho $t + 100$).

5.2 Ý nghĩa

- Hiểu sâu về cơ chế hoạt động của neuron sinh học (HH model)
- Nắm vững phương pháp đơn giản hóa cho ứng dụng thực tế (LIF model)
- Tiếp cận công nghệ reservoir computing - một hướng đi mới trong deep learning
- Thành thạo kỹ năng mô phỏng, phân tích, và trực quan hóa dữ liệu khoa học

Tài liệu tham khảo

Tài liệu

- [1] Trappenberg, T. P. (2023). *Fundamentals of computational neuroscience* (3rd ed.). Oxford University Press.

- [2] Dayan, P., & Abbott, L. F. (2001). *Theoretical neuroscience: Computational and mathematical modeling of neural systems*. MIT Press.
- [3] Tavanaei, A., et al. (2019). Deep learning in spiking neural networks. *Neural Networks*, 111, 47–52.
- [4] Lukoševičius, M., & Jaeger, H. (2009). Reservoir computing approaches to recurrent neural network training. *Computer Science Review*, 3(3), 5–17.
- [5] Hodgkin, A. L., & Huxley, A. F. (1952). A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. *The Journal of Physiology*, 117(4), 500–544.