

VỀ MỘT PHƯƠNG PHÁP XÁC ĐỊNH SỐ KẾT NỐI TRONG MẠNG NƠN TẾ BÀO BẬC CAO

Nguyễn Tài Tuyên^{1*}, Lương Khắc Định²

¹Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông

²Trường Đại học Hạ Long

* Email: tuyennt@ptit.edu.vn

Ngày nhận bài: 25/04/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 30/07/2024

Ngày chấp nhận đăng: 06/08/2024

TÓM TẮT

Bài báo trình bày nội dung phát triển phương pháp xác định số lượng kết nối trong mạng nơon tế bào bậc cao trên cơ sở của phương pháp xác định số lượng kết nối trong mạng nơon nơon tế bào được đưa ra bởi Leon O. Chua. Phương pháp xác định số kết nối của mạng nơon tế bào bậc cao được đưa ra bởi nhóm tác giả sẽ giúp các nhà nghiên cứu, tính toán và thực hiện mô phỏng. Bài báo trình bày các bước thực hiện trong quá trình xác định số kết nối với mạng bậc nhất, bậc hai và bậc ba. Với bậc càng cao thì số kết nối tăng theo hàm mũ, dẫn đến số nút kết nối rất lớn. Vì vậy, nhóm tác giả đề xuất phương pháp xác định số đầu vào ngoài của một tế bào với bán kính r khác nhau ở dạng tổng quát cho mạng nơon tế bào bậc cao, từ đó giúp cho việc phát triển ứng dụng mạng nơon tế bào, hệ thống nhúng, xử lý ảnh và các ứng dụng trong tương lai được thuận lợi hơn với mạng bậc cao, đồng thời tạo ra một công cụ cho việc kiểm chứng trong quá trình thiết kế mạng nơon tế bào.

Từ khóa: bậc cao, mạng nơon tế bào, nút mạng, số kết nối.

A METHOD FOR DETERMINING THE NUMBER OF CONNECTIONS IN HIGHER-ORDER CELLULAR NEURAL NETWORKS

ABSTRACT

This paper presents the content of developing a method for determining the number of connections in high-order cellular neural networks based on the method of determining the number of connections in cellular neural networks proposed by Leon O. Chua. The method of determining the number of connections in high-order cellular neural networks proposed by the author team will help researchers perform calculations and simulations. This paper presents the steps in the process of determining the number of connections with the first-order, second-order, and third-order networks. The higher the order, the more connections increase exponentially, leading to a large number of connection nodes. Therefore, We propose a method for determining the number of external inputs of a cell with different radius r in a general form for high-order cellular neural networks. This will facilitate the development of cellular neural network applications, embedded systems, image processing, and future applications with a high-order cellular neural network, while creating a tool for verification during the design process of the cellular neural network.

Keywords: cellular neural network, high-order, network nodes, number of connections.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Mạng nơron tế bào chuẩn có cấu trúc giống mạng Hopfield (Chua & Yang, 1988) được ghép nối thành một mảng (một mảng hay ma trận hai chiều). Đây là một mảng các bộ xử lý song song được gọi là phần tử mảng, mỗi phần tử mảng là một tế bào (cell). Hình 1 cho thấy một CNN hai chiều có kích thước $(M \times N)$ tế bào đặt trong hệ tọa độ Đề các, trong đó $C(i,j)$ là tế bào của mạng. Do vậy, việc xác định chính xác số lượng kết nối trong mạng là rất quan trọng. Khi số lớp và số bậc của mạng tăng lên, việc xác định số kết nối trở nên phức tạp và dễ gây ra lỗi ảnh hưởng đến hiệu suất và độ chính xác của toàn mạng.

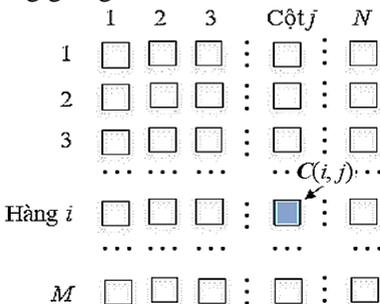
2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Để đảm bảo độ chính xác của mạng, nhóm tác giả đã phân tích lý thuyết về cấu trúc và nguyên lý hoạt động của mạng nơron tế bào chuẩn (CNN) qua việc đề xuất công thức toán học mô tả hoạt động của mạng như khái niệm như láng giềng trong CNN, sơ đồ nguyên lý hoạt động, mô hình toán học, mạch điện của một tế bào và mô hình toán học của CNN bậc hai, sử dụng phần mềm Matlab để mô phỏng sơ đồ của CNN chuẩn và CNN bậc hai. Kết quả mô phỏng giúp minh họa rõ hơn về hoạt động của mạng và cung cấp cơ sở thực tế để kiểm chứng lý thuyết. Dựa trên phân tích lý thuyết và kết quả mô phỏng, đưa ra các công thức xác định số kết nối trong mạng nơron tế bào với bán kính và bậc khác nhau. Công thức được đưa ra giúp đơn giản hóa quá trình thiết kế và mô phỏng mạng nơron tế bào bậc cao.

3. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

3.1. Mạng nơron tế bào chuẩn

Trong Hình 1 cho thấy một CNN hai chiều có kích thước $(M \times N)$ với $i = 1 \dots N; j = 1 \dots M$. Mỗi tế bào $C(i,j)$ đều có các tế bào lân cận hay láng giềng r .



Hình 1. Mạng CNN có kích thước $M \times N$

3.1.1. Định nghĩa láng giềng trong CNN

Láng giềng r của một tế bào $C(i,j)$ (Hình 1) trong một mạng CNN được xác định bởi biểu thức sau (Chua & Yang, 1988):

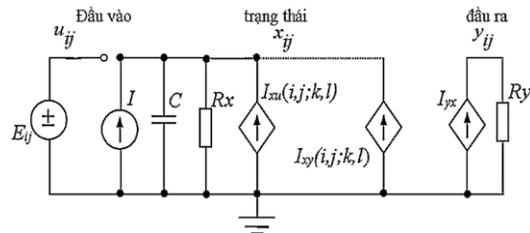
$$N_r(i, j) = \left\{ C(k, l) \mid \max \{ |k - i|, |l - j| \} \leq r, \right. \\ \left. 1 \leq k \leq M ; 1 \leq l \leq N \right\} \quad (1)$$

trong đó, r là một số nguyên dương.

3.1.2. Sơ đồ nguyên lý hoạt động của CNN

Sơ đồ nguyên lý của một tế bào nơron $C(i,j)$ dựa trên mô hình mạch điện (Hình 2) (Chua & Yang, 1988; Nguyễn Tài Tuyên và cs., 2022). Trong Hình 2, u_{ij} , x_{ij} , y_{ij} lần lượt là các tín hiệu đầu vào, trạng thái, đầu ra của nơron (i, j) . Trạng thái x_{ij} chuẩn hóa với giá trị trong khoảng $0 \leq x_{ij} \leq 1$. Điện áp đầu vào u_{ij} được giả định là hằng số với giá trị nhỏ hơn hoặc bằng 1 ($0 \leq u_{ij} \leq 1$). Mỗi một tế bào $C(i,j)$ chứa một nguồn điện áp $E(i,j)$, nguồn dòng I , tụ điện C , điện trở R_x ở mạch trạng thái và R_y ở mạch ra. $I_{xu}(i, j; k, l)$ và $I_{xy}(i, j; k, l)$ là các nguồn dòng đầu vào và nguồn dòng đầu ra, dòng điện được điều khiển bằng điện áp tuyến tính ở mạch ra, được xác định như sau (Chua & Yang, 1988):

$$I_{xu}(i, j; k, l) = B(i, j; k, l)u_{kl} \quad (3a)$$



Hình 2. Sơ đồ nguyên lý của một CNN

Để rõ về độ đo của B trong (3a) ta có v là điện áp được mặc định. Vì vậy, $u_{ij} = E_{kl}$, với E_{kl} là nguồn áp một chiều (là hằng số). Dựa vào công thức này, để xác định được đơn vị đo S thông qua (3a, 3b) và (4a, 4b), đây là độ dẫn (độ dẫn G : là đại lượng nghịch đảo của điện trở R có đơn vị đo là S – Siemen) như sau:

$$B(i, j; k, l) = \frac{I_{xu}(i, j; k, l)}{u_{kl}} \\ = \frac{1}{R_u} = \frac{1}{\Omega} = G \quad (3b)$$

và tương tự (3a)

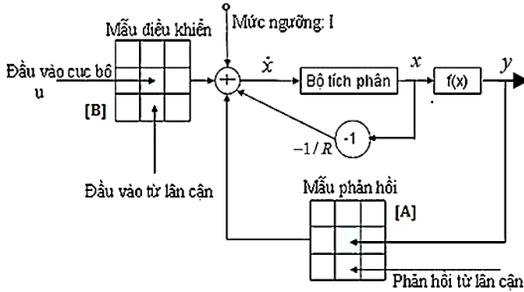
$$I_{xy}(i, j; k, l) = A(i, j; k, l)y_{kl} \quad (4a)$$

$$A(i, j; k, l) = \frac{I_{xy}(i, j; k, l)}{y_{kl}} = \frac{1}{R_y} = \frac{1}{\Omega} = G \quad (4b)$$

$$I_{yx} = \frac{1}{2R_y} \left(|x_{ij} + 1| - |x_{ij} - 1| \right) = \frac{1}{R_y} \left[\frac{1}{2} \left(|x_{ij} + 1| - |x_{ij} - 1| \right) \right] = \frac{1}{R_y} f(x_{ij}) \quad (5)$$

với mọi $C(k,l) \in N_r(i,j)$.

Mỗi phần tử phi tuyến (tế bào nơon) là một nguồn dòng được điều khiển bằng điện áp có $I_{xy} = \frac{1}{R_y} f(x_{ij})$. Các hệ số $A(i, j; k, l)$ và $B(i, j; k, l)$ được gọi là các hệ số mẫu hồi tiếp và hệ số mẫu điều khiển tương ứng.



Hình 3. Sơ đồ khối của một tế bào

Trong Hình 3, cho thấy phần tử của tế bào được tạo bởi mảng phân hồi ngoài $A = (2r + 1)^2$, phân hồi trong $-\frac{1}{R_x}$, mảng điều khiển $B = (2r + 1)^2$ phần tử và ngưỡng I .

Mỗi phần tử trong mạng có bán kính $r = 1$ được kí hiệu tương ứng $A_{11}, A_{12}, A_{13}; A_{21}, A_{22}, A_{23}$ đến A_{41}, A_{42}, A_{43} và $B_{11}, B_{12}, B_{13}; B_{21}, B_{22}, B_{23}; B_{31}, B_{32}, B_{33}$ đến số đầu vào ngoài từ mảng A và mảng B của nơon tế bào tương ứng là tổng các tế bào của mạng là: $2(2 \times 1 + 1)^2 + 1 + 1 = 20$ đầu vào, trong đó phần tử phân hồi ngoài $A = 9$; phần tử điều khiển $B = 9$; phần tử phân hồi trong $(-\frac{1}{R}) = 1$; phần tử ngưỡng $I = 1$.

3.1.3. Mô hình toán học của CNN

Phương trình động học của CNN (Chua & Yang, 1988):

Phương trình hệ thống (6a, 6b, 6c) mô tả trên (Hình 3), trong đó $C(k,l)$ là tế bào của ô giao bởi hàng k và cột l , C là tụ điện, R là điện

trở trong mạch trạng thái tương ứng với x ta có C_x và R_x .

Phương trình trạng thái:

$$C \frac{dx_{ij}(t)}{dt} = -\frac{1}{R_x} x_{ij}(t) + \sum_{C(k,l) \in N_r(i,j)} B(i, j; k, l) u_{kl} + \sum_{C(k,l) \in N_r(i,j)} A(i, j; k, l) y_{kl}(t) + I$$

$$1 \leq i, k \leq M; 1 \leq j, l \leq N \quad (6a)$$

Trong (6a), kí hiệu $\sum_{C(k,l) \in N_r(i,j)}$ được kí

hiệu ở dạng $\sum_{(k,l)}$ điều kiện (Chua & Yang, 1988).

Phương trình đầu ra:

$$y_{ij}(t) = \frac{1}{2} \left(|x_{ij}(t) + I| - |x_{ij}(t) - I| \right) = f(x_{ij}(t))$$

$$1 \leq i \leq M; 1 \leq j \leq N \quad (6b)$$

Phương trình đầu vào:

$$u_{ij} = E_{ij} \quad 1 \leq i \leq M; 1 \leq j \leq N \quad (6c)$$

Phương trình ràng buộc và giả định:

Các điều kiện ràng buộc:

$$|x_{ij}(0)| \leq 1 \quad 1 \leq i \leq M; 1 \leq j \leq N \quad (6d)$$

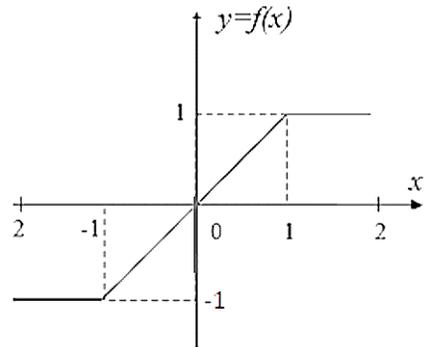
$$|u_{ij}| \leq 1 \quad 1 \leq i \leq M; 1 \leq j \leq N \quad (6e)$$

Các thông số giả định (chọn “1” với nghĩa chuẩn hóa về đơn vị):

$$A(i, j; k, l) = A(k, l; i, j)$$

$$1 \leq i, k \leq M; 1 \leq j, l \leq N \quad (6f)$$

$$C > 0 \quad R_x > 0 \quad (6g)$$



Hình 4. Hàm đầu ra tương ứng với (6b)

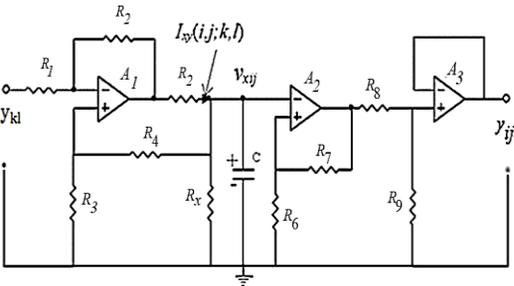
3.1.4. Mạch điện của một tế bào

Trong Hình 5 là mô hình neuron tế bào được mô phỏng trên mạch điện, điện áp điều khiển nguồn dòng $I_{xy}(i, j; k, l)$ được xác định bởi phân tử khuếch đại thuật toán A_1 và điện trở R_1, R_2, \dots, R_5 :

$$I_{xy}(i, j; k, l) = \left(\frac{-R_2}{R_1 R_5} \right) y_{kl} \quad (7)$$

với điều kiện

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4 + R_5}{R_3} \quad (8)$$



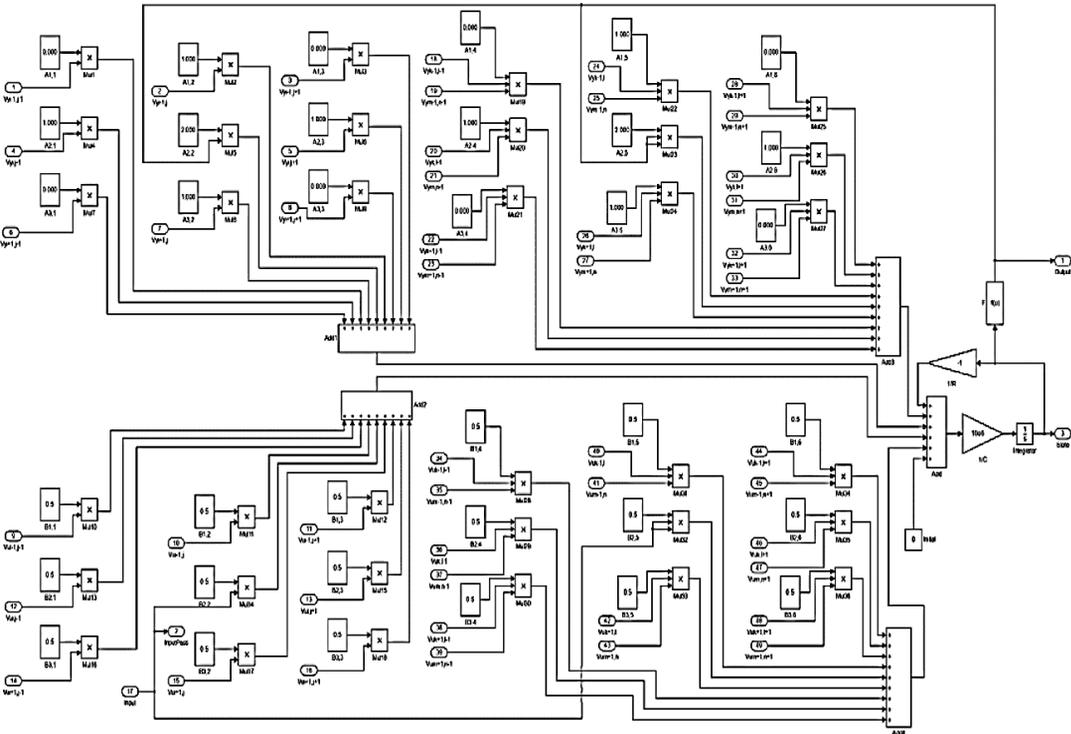
Hình 5. Mạch điện của một neuron tế bào

Điện trở đầu ra liên quan với $I_{xy}(i, j; k, l)$ là vô hạn, được xác định bởi (7). Hàm tuyến tính từng đoạn (piecewise linear function) $y_{ij}(x_{ij})$ là phân tử khuếch đại thuật toán A_2, A_3 và điện trở R_6, R_7, R_8, R_9 thỏa mãn điều kiện (8) là

$$\frac{R_6 + R_7}{R_6} = \frac{R_8 + R_9}{R_9} + |V_{cc}| \quad (9)$$

Ở đây, V_{cc} là điện áp nguồn cung cấp. Một CNN có thể mô phỏng bằng một mạch điện phi tuyến (Hình 4) được tạo nên từ việc ghép nối các liên kết cục bộ theo không gian bởi các khối mạch điện giống nhau, mỗi khối mạch điện được gọi là một tế bào (ở đây, với $r = 1$ và $M \times N = 3 \times 3$).

Từ sơ đồ khối ở Hình 2 và sơ đồ CNN trong Matlab được xây dựng theo phương trình (9) có thể biểu diễn mẫu CNN [A B I] như Hình 6, trong đó các giá trị được giả định.



Hình 6. Sơ đồ của CNN chuẩn trên Matlab

3.2. Xác định số kết nối của neuron tế bào chuẩn bậc nhất

Theo Leon O. Chua (Chua & Yang, 1988; Roska & Chua, 1993) thì số kết nối đầu vào của neuron tế bào chuẩn (bậc nhất), bán kính

$r = 1$ có kết nối đến bộ tổng gồm kết nối trong và kết nối ngoài của tế bào:

- + Đầu vào trong (đầu vào nội) của tế bào neuron;
- + Đầu vào ngoài của tế bào neuron (kí hiệu

- IO). Đầu vào ngoài kết nối đến bộ tổng của tế bào gồm:

* Kết nối từ mảng phản hồi A của noron, tương ứng $A = (2r + 1)^2$;

* Kết nối từ mảng điều khiển B của noron, tương ứng $B = (2r + 1)^2$;

* Kết nối từ ngưỡng I của noron.

Từ các kết nối được phân tích ở trên, ta tính toán số đầu kết nối tương ứng cho mỗi noron tế bào có bán kính r như sau:

3.2.1. Noron tế bào có bán kính r = 1

Hình 1 và Hình 3 trình bày về CNN có kích thước $M \times N$ và sơ đồ khối của một CNN với $r = 1$, lúc này $M = 3$ và $N = 3$. Trong Hình 3, các mảng phản hồi $A = (2r + 1)^2$ và mảng điều khiển $B = (2r + 1)^2$, ngưỡng I.

Mảng A (r = 1) Mảng B (r = 1)

C_{11}	C_{12}	C_{13}
C_{21}	C_{22}	C_{23}
C_{31}	C_{32}	C_{33}

C_{11}	C_{12}	C_{13}
C_{21}	C_{22}	C_{23}
C_{31}	C_{32}	C_{33}

Hình 7. Mảng A và B của CNN có r = 1

Xác định số đầu vào ngoài của noron: Áp dụng công thức tính kết nối $(2r + 1)^2$ trong (Chua & Yang, 1988; Nguyen Tai Tuyen, 2015), ta có số đầu vào ngoài từ mảng A và mảng B của noron sẽ là: $IO = A + B = (2 \times 1 + 1)^2 + (2 \times 1 + 1)^2 = 2(2 \times 1 + 1)^2 = 18$ đầu vào (số 1 in đậm là bán kính của mạng có kích thước là 1). Tổng số đầu vào ngoài của noron là 18. Tổng số đầu vào nội $-\frac{1}{R_x}$ của noron là 1.

Theo Leon O. Chua, ta có đầu vào nội của noron tế bào là tín hiệu phản hồi từ đầu ra trạng thái x của noron trở về bộ tổng. Số đầu vào của một noron chuẩn có $r = 1$ là:

$$\sum_{in}(cell) = 2(2 + 1)^2 + 1 + 1 = 20 \text{ đầu vào (trong đó có 01 đầu vào phản hồi từ x).}$$

3.2.2. Noron tế bào có bán kính r = 2

CNN có bán kính $r = 2$, lúc này $M = 5$ và $N = 5$, CNN có kích thước $M \times N = 5 \times 5$ như Hình 8.

Mảng A (r = 2) Mảng B (r = 2)

C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}
C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{24}	C_{25}
C_{31}	C_{32}	C_{33}	C_{34}	C_{35}
C_{41}	C_{42}	C_{43}	C_{44}	C_{45}
C_{51}	C_{52}	C_{53}	C_{54}	C_{55}

C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}
C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{24}	C_{25}
C_{31}	C_{32}	C_{33}	C_{34}	C_{35}
C_{41}	C_{42}	C_{43}	C_{44}	C_{45}
C_{51}	C_{52}	C_{53}	C_{54}	C_{55}

Hình 8. Mảng A và B của CNN có r = 2

Mảng phản hồi $A = (2r + 1)^2$ và mảng điều khiển $B = (2r + 1)^2$, ngưỡng I. Xác định số đầu vào ngoài của noron: Áp dụng công thức tính kết nối $(2r + 1)^2$ (Chua & Yang, 1988), ta có số đầu vào ngoài từ mảng A và mảng B của noron sẽ là:

$$IO = A + B = (2 \times 2 + 1)^2 + (2 \times 2 + 1)^2 = 2(2 \times 2 + 1)^2 = 50 \text{ đầu vào}$$

Tổng số đầu vào ngoài của noron:

$$IO = 50 + I = 50 + 1 + 1 = 52 \text{ đầu vào.}$$

Xác định số đầu vào nội của noron tế bào

Tương tự cách tính của CNN có $r=1$, ta có $\sum_{in} = 2((2 \times 2) + 1)^2 + 1 + 1 = 52$ đầu vào.

3.2.3. Noron tế bào có bán kính r = 3

Mảng phản hồi $A = (2r + 1)^2$ và mảng điều khiển $B = (2r + 1)^2$, ngưỡng I và trạng thái $-\frac{1}{R_x}$ lúc này noron tế bào có $M = 7$ và $N = 7$.

Noron tế bào có kích thước $M \times N = 7 \times 7$ Xác định số đầu vào ngoài của noron: Áp dụng công thức tính kết nối $(2r + 1)^2$ được đề xuất trong (Chua & Yang, 1988), ta có số đầu vào ngoài từ mảng A và mảng B của noron tế bào được tính:

$$IO = A \times B = ((2 \times 3) + 1)^2 (2 \times 3 + 1)^2 = 2(2 \times 3 + 1)^2 = 98 \text{ đầu vào.}$$

Tổng số đầu vào ngoài của noron tế bào:

$$IO = 98 + I = 98 + 1 = 99 \text{ đầu vào.}$$

Xác định số đầu vào nội của noron:

Theo cách tính được trình bày ở trên, chúng ta có đầu vào nội của noron tế bào là tín hiệu phản hồi từ đầu ra trạng thái x của noron bằng 1. Kết hợp với đầu vào nội của

noron (đầu vào phản hồi $-\frac{1}{R_x}$) ta có tổng số

đầu vào của một noron chuẩn có $r = 3$ là:

$$\sum in = 2((2 \times 3) + 1)^2 + 1 + 1 = 100 \text{ đầu vào.}$$

3.2.4. Noron tế bào có bán kính $r = 4, 5$ và R

a. Xét trường hợp $r = 4$

Mảng phản hồi $A = (2r + 1)^2$ và mảng điều khiển $B = (2r + 1)^2$, ngưỡng I và trạng thái $-\frac{1}{R_x}$ lúc này noron tế bào có $M = 9$ và $N = 9$.

Noron tế bào có kích thước $M \times N = 9 \times 9$. Tương tự các xác định số kết nối có $r = 1, 2, 3$ cho thấy số đầu vào từ mảng A và B của noron tế bào được tính như sau:

$$IO = A \times B = ((2 \times 4) + 1)^2 \times (2 \times 4 + 1)^2 = 2(2 \times 4 + 1)^2 = 162 \text{ đầu vào.}$$

Tổng số đầu vào ngoài của noron tế bào:

$$IO = 162 + I = 162 + 1 = 163 \text{ đầu vào.}$$

Kết hợp với đầu vào nội của noron (đầu vào phản hồi $-\frac{1}{R_x}$) ta có tổng số đầu vào của

một noron chuẩn có $r = 4$ là:

$$\sum in \text{ (cell)} = 2((2 \times 4) + 1)^2 + 1 + 1 = 164 \text{ đầu vào.}$$

b. Xét trường hợp $r = 5$

Trong trường hợp $r = 5$, mảng phản hồi $A = (2r + 1)^2$ và mảng điều khiển $B = (2r + 1)^2$, ngưỡng I và trạng thái $-\frac{1}{R_x}$, lúc này noron tế

bào có $M = 11$ và $N = 11$. Noron tế bào có kích thước $M \times N = 11 \times 11$, tương tự cách xác định số kết nối có $r = 1, 2, 3, 4$, ta có số đầu vào ngoài từ mảng A và mảng B của noron tế bào được tính như sau:

$$IO = A \times B = ((2 \times 5) + 1)^2 \times ((2 \times 5) + 1)^2$$

$$B = ((2 \times 5) + 1)^2 \times ((2 \times 5) + 1)^2 = 2(2 \times 5 + 1)^2 = 242 \text{ đầu vào.}$$

Tổng số đầu vào ngoài của noron tế bào:

$$IO = 242 + I = 242 + 1 = 243 \text{ đầu vào.}$$

Kết hợp với đầu vào nội của noron (đầu vào phản hồi $-\frac{1}{R_x}$) ta có tổng số đầu vào của

một noron chuẩn có $r = 5$ là:

$$\sum in = 2((2 \times 5) + 1)^2 + 1 + 1 = 244 \text{ đầu vào.}$$

c. Xét trường hợp tổng quát CNN có $r = R$

R là các số nguyên dương, tương tự cách xác định số kết nối của mạng có bán kính $r = 1, r = 2, r = 3, r = 4$ và $r = 5$, nhóm tác giả đưa ra dạng tổng quát để xác định số kết nối của mạng có r bất kỳ như sau: Mảng phản hồi $A = (2r + 1)^2$ và mảng điều khiển $B = (2r + 1)^2$, ngưỡng I và trạng thái $-\frac{1}{R_x}$. Lúc này noron

tế bào có $M = N = (R \times 2) + 1$. Noron tế bào có kích thước $M \times N = ((R \times 2) + 1)^2$ và số đầu vào của noron có bán kính R là:

$$\begin{aligned} \sum in \text{ (cell)} &= (2R + 1)^2 + (2R + 1)^2 + 1 + 1 \\ &= 2(2R + 1)^2 + 2 \text{ đầu vào.} \end{aligned}$$

Bảng 1. Tính đầu vào ngoài của một tế bào có bán kính r

Bán kính r	Kích thước ma trận A và B	Số đầu vào của tế bào noron IO = $A + B + I + (-1/R_x)$
$r=1$	$(2 \times 1 + 1)^2$	$3^2 + 3^2 + 1 + 1 =$
$r=2$	$(2 \times 2 + 1)^2$	$5^2 + 5^2 + 1 + 1 =$
$r=3$	$(2 \times 3 + 1)^2$	$7^2 + 7^2 + 1 + 1 =$
$r=4$	$(2 \times 4 + 1)^2$	$9^2 + 9^2 + 1 + 1 =$
$r=5$	$(2 \times 5 + 1)^2$	$11^2 + 11^2 + 1 + 1 =$
...
$r=R$	$(2R+1)^2 = (2R+1) \times (2R+1)$	$(2R+1)^2 + (2R+1)^2 + 1 + 1 = 2 \times (2R+1)^2 + 2$

Với cách xác định số kết nối vào của noron tế bào có bán kính $r = 1, r = 2, r = 3, \dots, R$ với hệ chuẩn của Leon O. Chua (Chua & Yang, 1988), nhóm tác giả đề xuất công thức xác định số đầu vào ngoài với $r = R$ được trình bày trong Bảng 1.

3.3. Mạng noron tế bào bậc cao

3.3.1. Mô hình toán học của CNN bậc hai

Cấu trúc của CNN bậc hai được mô tả bằng phương trình sau:

Phương trình trạng thái:

$$C \frac{dx_{ij}(t)}{dt} = -\frac{1}{R_x} x_{ij}(t) + I + \sum_{(k,l)} A(i, j; k, l) y_{kl}(t) + \sum_{(k,l)} B(i, j; k, l) u_{kl} + \sum_{(k,l)(m,n)} A(i, j; k, l; m, n) y_{kl}(t) y_{mn}(t) + \sum_{(k,l)(m,n)} B(i, j; k, l; m, n) u_{kl} u_{mn}$$

$$1 \leq i, k, m \leq M; 1 \leq j, l, n \leq N \quad (10a)$$

Trong đó: C là tụ điện, $C > 0$; R_x là điện trở, $R_x > 0$; I là ngưỡng; $C(k, l)$ là tế bào nơron ở vị trí (k, l) ; $N_r(i, j)$ là láng giềng (Neighborhood) của $C(k, l)$ với bán kính r ; $x_{ij}(t)$ trạng thái của tế bào (i, j) ; $A(i, j; k, l; m, n)$ và $B(i, j; k, l; m, n)$ là các hệ số phản hồi và hệ số điều khiển một cách tương ứng, liên kết tế bào trung tâm (i, j) với các tế bào láng giềng ở vị trí (k, l) , (m, n) ; $y_{kl}(t)$, $y_{mn}(t)$ và u_{kl} , u_{mn} là các tín hiệu phản hồi và điều khiển (đầu vào ngoài) một cách tương ứng ở vị trí (k, l) ; (m, n) .

Phương trình đầu ra: giống phương trình (6b) và Hình 3:

$$y_{ij}(t) = \begin{cases} 1 & \text{khí } x_{ij}(t) \geq 1 \\ x & -1 \leq x_{ij}(t) \leq 1 \\ -1 & \text{khí } x_{ij}(t) \leq -1 \end{cases} \quad (10b)$$

Phương trình đầu vào:

$$u_{ij} = E_{ij} = \text{Constant} \quad (10c)$$

Các điều kiện ràng buộc:

$$|x_{ij}(0)| \leq 1 \quad 1 \leq i \leq M; 1 \leq j \leq N$$

$$\text{với } x_{ij}(0): \text{ giá trị khởi tạo} \quad (10d)$$

$$|u_{ij}| \leq 1 \quad 1 \leq i \leq M; 1 \leq j \leq N \quad (10e)$$

Điều kiện ràng buộc đối với các mảng phản hồi cần đảm bảo đối xứng, tức là:

$$A(i, j; k, l) = A(k, l; i, j);$$

$$A(k, l; i, j; m, n) = A(k, l; m, n; i, j)$$

$$= A(m, n; i, j; k, l)$$

$$= A(m, n; k, l; i, j)$$

$$= A(i, j; k, l; m, n)$$

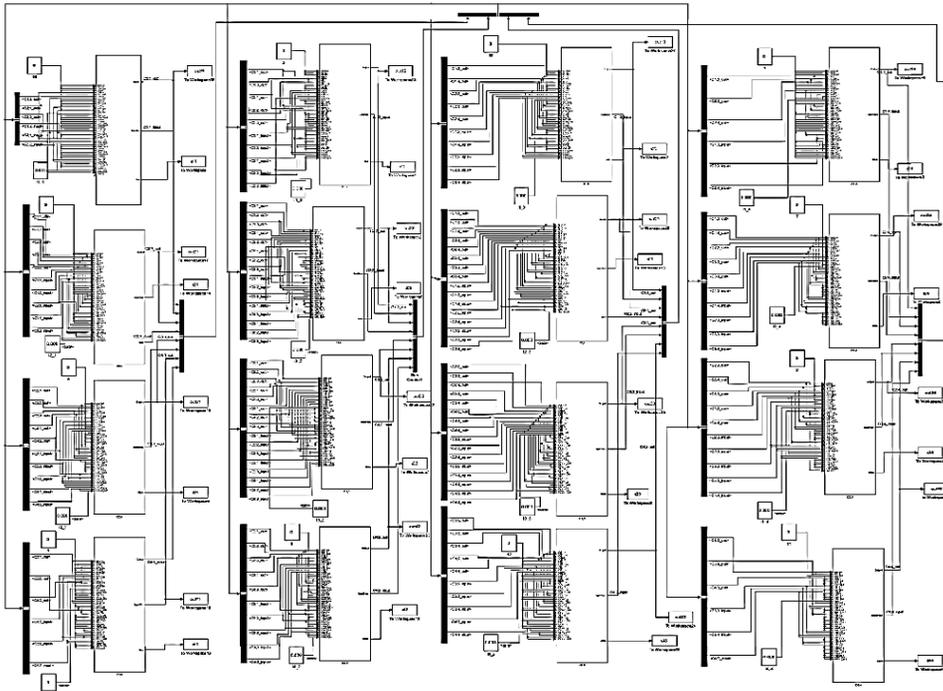
$$= A(i, j; m, n; k, l);$$

$$1 \leq i, k, m \leq M; 1 \leq j, l, n \leq N; \quad (10f)$$

$$C > 0 \text{ và } R_x > 0. \quad (10g)$$

3.3.2. Mạng nơron tế bào bậc hai trên Matlab

Từ mô hình toán học của CNN bậc 2, nhóm tác giả thực hiện dưới dạng sơ đồ trên Matlab như Hình 9.



Hình 9. Sơ đồ của CNN bậc hai trên Matlab

3.3.3. Xác định số kết nối của CNN bậc hai

Mạng nơron tế bào đa tương tác (bậc hai) (Nguyễn Tài Tuyên và cs., 2023; Nguyen Tai Tuyen, 2015; Roska, T & Leon. O. Chua, 1993) có bán kính $r = 1$ gồm hai phần:

Phần kết nối chuẩn (Chua & Yang, 1988) có đầu vào:

$$(r = 1) = 2(2r+1)^2 \quad (i)$$

Phần kết nối bậc hai có số đầu vào:

$$2[(2r+1)^2]^2 \quad (ii)$$

Số đầu vào ngoài của nơron bậc hai có $r = 1$:

$IO = 2(2r+1)^2 + 2[(2r+1)^2]^2 + 1 = 181$ đầu vào. Kết hợp với đầu vào nội của nơron (đầu vào phản hồi $-\frac{1}{R_x}$) cho kết quả:

$$\begin{aligned} \sum in &= 2(2r+1)^2 + 2\left[\left((2 \times 1) + 1\right)^2\right]^2 + 1 + 1 \\ &= 182 \text{ đầu vào.} \end{aligned}$$

Từ việc xác định số kết nối của mạng nơron tế bào chuẩn (Chua & Yang, 1988) và mạng nơron tế bào bậc hai (Nguyen Tai Tuyen, 2015), nhóm tác giả xác định số kết nối với mạng nơron tế bào bậc ba, tương tự như cách tính với mạng bậc hai được xác định như sau:

Số đầu vào của mạng gồm:

- Phần chuẩn ($r=1$)= $2(2r+1)^2$ (i)

- Phần bậc 2 (cộng thêm)= $2[(2r+1)^2]^2$ (ii)

- Phần bậc 3 (cộng thêm)= $2[(2r+1)^2]^3$ (iii)

Với i tương ứng bậc nhất; ii tương ứng bậc hai và iii tương ứng bậc ba.

Trong đó, phần đầu vào và phản hồi đều bằng $27 \times 27 = 3^3 \times 3^3 = [(2r+1)^2]^3$, số đầu vào ngoài của nơron bậc ba có $r = 1$ là:

$$\begin{aligned} IO &= 2(2r+1)^2 + 2[(2r+1)^2]^2 \\ &+ 2[(2r+1)^2]^3 + 1 = 929 \text{ đầu vào.} \end{aligned}$$

Kết hợp với một đầu vào nội của nơron (đầu vào phản hồi $-\frac{1}{R_x}$) ta có:

Tổng đầu vào = 930, được tính như sau:

$$\sum in = \sum 2(2r+1)^2 + 2[(2r+1)^2]^2 + 2[(2r+1)^2]^3 + 1 + 1$$

Từ lập luận trên, dạng tổng quát để xác định số đầu vào ngoài của nơron tế bào bậc cao (bậc với $Q = 1, 2, 3 \dots K-1, K$) được xác định bằng số kết nối chuẩn (Leon O. Chua & Yang, 1988) cộng thêm số kết nối của bậc tương ứng, như sau:

Bậc 1 có số kết nối = $2(2r+1)^2$ (i)

Bậc 2 (thêm) = $2[(2r+1)^2]^2$ (ii)

Bậc 3 (thêm) = $2[(2r+1)^2]^3$ (iii)

...

Bậc $K-1$ (thêm) = $2[(2r+1)^2]^{K-1}$ (K-1)

Bậc K (thêm) = $2[(2r+1)^2]^K$ (K)

số đầu vào ngoài của nơron bậc K có $r = 1$ là:

$$\begin{aligned} IO &= 2(2r+1)^2 + 2[(2r+1)^2]^2 + 2[(2r+1)^2]^3 + \\ &+ \dots + 2[(2r+1)^2]^{K-1} + 2[(2r+1)^2]^K + 1 \end{aligned}$$

Bảng 2. Xác định số đầu vào ngoài của tế bào nơron có bán kính ($r = 1.. R$) và bậc ($Q = 1, 2, 3 \dots K-1, K$)

Bậc (Q)	Số đầu vào ngoài CNN	Số đầu vào CNN	Tổng đầu vào CNN
1	$2(2r+1)^2$ (i)	(i)+1	20
2	$2[(2r+1)^2]^2$ (ii)	(i)+(ii)+1	182
3	$2[(2r+1)^2]^3$ (iii)	(i) + (ii) + (iii) + 1	930
...
$K-1$	$2[(2r+1)^2]^{K-1}$	bậc ($K-2$) +...+ ($K-1$) +1	bậc ($K-2$) +...+ bậc ($K-1$) +1+1
K	$2[(2r+1)^2]^K$	bậc ($K-1$) +...+ (K) +1	bậc ($K-1$) + bậc (K) +1+1

Từ cách tính trên, nhóm tác giả đề xuất công thức xác định số đầu vào ngoài của một tế bào với bán kính r khác nhau ở tổng quát cho mạng nơron tế bào bậc cao (Bảng 2).

Điều này cho thấy số đầu vào của mạng nơron tế bào khi có bậc đa thức tăng làm cho số đầu vào kết nối tăng rất lớn gây khó khăn cho việc tính toán số kết nối của mạng. Để giải quyết vấn đề này, nhóm tác giả chọn bậc hai làm đại diện để tính toán và sử dụng trong các trường hợp như mô phỏng kiểm chứng và chứng minh tính ổn định của mạng.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày phương pháp xác định số kết nối trong mạng nơron tế bào bậc nhất với các bán kính $r = R$ (với $R = 1, 2, 3, \dots$ nguyên dương) và đưa ra công thức tổng quát cho mạng nơron chuẩn có bán kính R . Trên cơ sở đó, nhóm tác giả thử nghiệm và đề xuất công thức xác định số kết nối cho mạng nơron tế bào bậc cao với bán kính $r = 1$. Cách xác định số kết nối giúp nhận biết được số liên kết của mạng trong quá trình thiết kế, từ đó giúp việc thực hiện với mô hình CNN được chính xác, hạn chế được các sai sót gây ảnh hưởng đến việc thiết kế, mô phỏng CNN khi số lớp, số bậc tăng cao trong quá trình phát triển ứng dụng phần mềm, phần sụn và phần cứng thiết kế chip CNN.

LỜI CẢM ƠN

Nhóm tác giả cảm ơn Ban Giám đốc Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông, lãnh đạo Trường Đại học Hạ Long, lãnh đạo Viện

Nghiên cứu Điện tử, Tin học, Tự động hóa đã tạo điều kiện để nhóm tác giả có điều kiện tốt nhất trong quá trình nghiên cứu, tính toán, hoàn thiện bài báo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Leon O. Chua & Yang, L. (1988), Cellular Neural Networks: Theory. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*, 35, 1257–1272.
- Nguyen Quang Hoan, Nguyen Tai Tuyen, Duong Duc Anh. (2020). Architecture and Stability of the Second-Order Cellular Neural Networks. *UTEHY Journal of Science and Technology*, 27, 91–97.
- Nguyen Tai Tuyen. (2015). On a structure of high order Multi-Interaction cellular neural network. *Academics World 15th International Conference, Bangkok, 2015*.
- Nguyễn Tài Tuyên, Dương Đức Anh, Nguyễn Quang Hoan. (2023). Bộ nhớ liên kết sử dụng mạng nơron tế bào tương tác bậc hai, *Journal of Science and Technology on Information and Communications (JSTIC) of Posts and Telecommunications Institute of Technology*.
- Roska, T & Leon. O. Chua. (1993). The CNN Universal Machine: An Analogic Array Computer. *IEEE. Transactions on Circuits and Systems II Analog and Digital Signal Processing*, 40(3), 163–173.