

## BỘ NHỚ LIÊN KẾT DỰA TRÊN MẠNG NƠ RON TẾ BÀO

Nguyễn Quang Hoan<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông

\* Email: [quanghoanptit@gmail.com](mailto:quanghoanptit@gmail.com)

Ngày nhận bài: 02/12/2021

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 25/5/2022

Ngày chấp nhận đăng: 02/06/2022

### TÓM TẮT

Bài báo đề xuất bộ nhớ tự liên kết dựa trên mạng nơ ron tế bào. Đây là bộ nhớ thể hiện rõ nét khả năng học, khả năng nhớ của mạng nơ ron nhân tạo. Bài báo cũng tiến hành thử nghiệm khả năng nhận dạng, khả năng chịu lỗi của bộ nhớ liên kết dựa trên mạng nơ ron tế bào có kích thước mảng 3x3. Kết quả ban đầu cho thấy dung lượng nhớ của bộ nhớ liên kết trên mạng nơ ron tế bào cao so với các bộ nhớ liên kết mạng nơ ron Hopfield và mạng nơ ron liên kết hai chiều.

**Từ khóa:** bộ nhớ liên kết, khả năng học, luật học Hebb, mạng nơ ron tế bào

### PROPOSING AN ASSOCIATIVE MEMORY BASED ON CELLULAR NEURAL NETWORKS

#### ABSTRACT

This paper proposes an associative memory based on the cellular neural networks. The associative memories clearly become exemplified learning and memory abilities of the neural networks. In this paper, the pattern recognition, error separable ability presented on the design with associative memory of 3x3 cellular arrays. Some experimental results are noted: memory capacity of Associative Memories of the cellular neural networks better than memory capacity of associative memories based on Hopfield or bidirectional neural networks.

**Keywords:** associative memory, cellular neural networks, Hebbian learning rule, learning ability

#### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

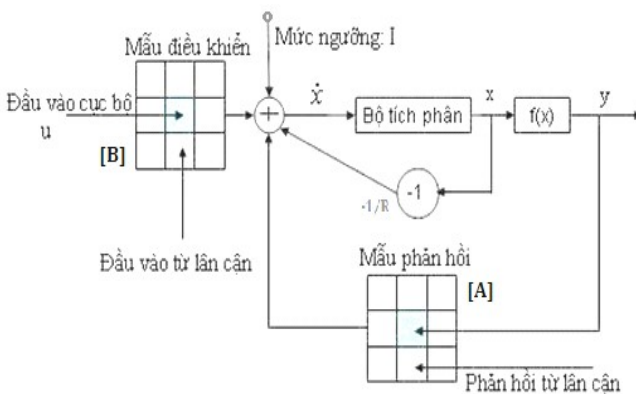
Mạng nơ ron tế bào (MTB) là một trong hàng trăm cấu trúc mạng nơ ron nhân tạo kèm với các luật học khác nhau. MTB có nguồn gốc từ mạng nơ ron Hopfield nhưng các tín hiệu được đưa vào hai chiều (hay một mảng). Mỗi phần tử nhớ của MTB là một tế bào nơ ron (Chua & Yang, 1998). Mạng MTB có nhiều ứng dụng kể cả phần cứng và phần mềm (Roska, 2005; Nguyen Tai Tuyen & Nguyen Quang Hoan, 2018).

Một trong những khả năng của mạng nơ ron nhân tạo là khả năng nhớ. Bộ nhớ của mạng nơ ron thể hiện rõ nhất ở lớp mạng truy hồi Hopfield với dung lượng nhớ  $n/4 \ln n$ , với  $n$  là số nơ ron trong mạng (Negnevitsky, 2002). Kiến trúc, luật học và khả năng nhớ của mạng nơ ron Hopfield được trình bày rõ trong (Negnevitsky, 2002; Nguyen Quang Hoan và nnk., 2020). Bộ nhớ dùng trong máy tính thuộc loại bộ nhớ được địa chỉ hóa. Bộ nhớ trong mạng nơ ron là bộ nhớ địa chỉ hóa nội dung. Một mẫu nhớ (gọi là nhớ tự liên kết

với nhau) được tạo thành từ một véc tơ ra (hoặc/và véc tơ vào) nhân với véc tơ chuyển vị của chính nó và được ghi lại trong ma trận trọng số của mạng nơ ron. Khi một mẫu bất kỳ đưa vào mạng, mạng nơ ron sẽ tự tìm (nói cách khác là học) tới mẫu gần nhất mà nó nhớ. Với tính chất đó, mạng có khả năng nhận dạng các mẫu được vào. Bộ nhớ liên kết được Hopfield xây dựng trên mạng nơ ron Hopfield và được Kosko xây dựng trên mạng nơ ron liên kết hai chiều gọi là BAM (Bidirectional Associative Memory) (Negnevitsky, 2002). Bài báo này phát triển bộ nhớ liên kết dựa trên MTB, một loại mạng thuộc lớp truy hồi (hay phản hồi). Các phần tiếp theo của bài báo gồm: mục 2: phương pháp nghiên cứu; mục 3.1: cấu trúc của mạng nơ ron MTB chuẩn; mục 3.2: bộ nhớ liên kết dựa trên MTB; mục 4: minh họa khả năng nhận dạng và khả năng chịu lỗi của bộ nhớ liên kết dựa trên MTB; mục 5 là kết luận và hướng phát triển.

**2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU**

Sử dụng phương pháp kế thừa từ (Chua & Yang, 1998), người đạt giải thưởng thường niên đầu tiên của IEEE Gustav Robert Kirchhoff năm 2005 (tương đương giải thưởng Nobel) về phát minh và chế tạo thành công máy tính nơ ron đầu tiên trên thế giới (Roska, 2005), khi áp dụng phương trình trạng thái (1) và phương trình đầu ra (2). Bài báo này sử dụng luật học không giám sát để xây dựng bộ nhớ liên kết, kiểm chứng nó bằng thực nghiệm.



**Hình 1. Một nơ ron tế bào**

**3. MẠNG NƠ RON TẾ BÀO VÀ BỘ NHỚ LIÊN KẾT**

**3.1. Mạng nơ ron tế bào chuẩn**

Hình 1 là sơ đồ mô tả một tế bào MTB với các tín hiệu vào  $u_{ij}$ , trong đó  $(i, j)$  là tế bào trung tâm,  $(k, l)$  là tế bào lân cận (hay láng giềng),  $C$  là tụ điện,  $R_x$  gắn với trạng thái  $x_{ij}(t)$ ;  $y_{kl}(t)$  là các đầu ra láng giềng,  $B(i, j; k, l)$  là ma trận vào,  $A(i, j; k, l)$  là ma trận phản hồi từ các đầu ra,  $I$  là ngưỡng (Bias) của tế bào. Định nghĩa tế bào và các láng giềng đã được trình bày trong (Chua & Yang, 1998). Phương trình trạng thái của MTB (Chua & Yang, 1998) được mô tả như sau:

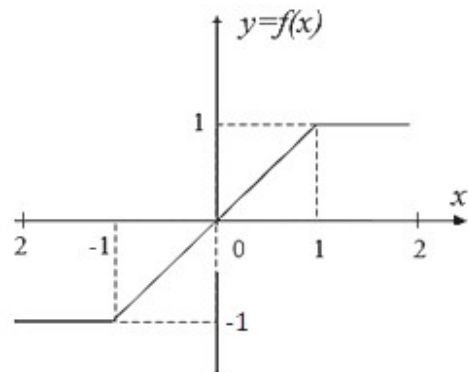
$$C \frac{dx_{ij}(t)}{dt} = -\frac{1}{R_x} x_{ij}(t) + \sum_{(k,l)} A(i, j; k, l) y_{kl}(t) + \sum_{(k,l)} B(i, j; k, l) u_{kl} + I, \quad (1)$$

với  $1 \leq i, k \leq M; 1 \leq j, l \leq N$ .

Phương trình đầu ra của tế bào  $(i, j)$  MTB là một hàm  $y_{ij}(t)$  dạng bão hòa (Hình 2) (Chua & Yang, 1998).

$$y_{ij}(t) = \frac{1}{2} (|x_{ij}(t)+1| - |x_{ij}(t)-1|) \quad (2)$$

Để nhận thấy từ (1), MTB là cấu trúc thuộc nhóm mạng phản hồi, có thể gây tự kích dao động, dẫn tới mạng mất ổn định. Việc chứng minh tính ổn định của MTB đã được (Chua & Yang, 1998) đảm bảo qua chứng minh với các ràng buộc kèm theo. Loại ổn định này gọi là ổn định đầy đủ theo (Slavova, 2003) dựa trên nguyên lý ổn định Liapunov của các hàm phi tuyến tính, được áp dụng cho loại mạng nơ ron có tính động học như MTB.



**Hình 2. Hàm đầu ra của một nơ ron**

### 3.2. Bộ nhớ liên kết của MTB chuẩn

Trong mạng nơ ron, học (Learning) gồm học cấu trúc và học tham số. Học tham số là xác định bộ tham số của ma trận phản hồi  $A(\cdot)$ , ma trận điều khiển  $B(\cdot)$  và ma trận ngưỡng  $I$ . Đây là bài toán khá phức tạp, đã và đang có nhiều công trình nghiên cứu (Slavova, 2003; Roska, 2005; Nguyen Tai Tuyen và nnk., 2016). Bài báo này giới hạn xác định ma trận  $A(\cdot)$  bằng luật học tham số không giám sát, là luật Hebb. Luật học Hebb (Negnevitsky, 2002) được sử dụng trong việc tính trọng số cho hầu hết các mạng nơ ron phản hồi. Nó được rút ra từ tiên đề của Hebb (1943) (Nguyen Quang Hoan và nnk., 2020) cho rằng, khi tế bào  $(i, j)$  quan hệ với các nơ ron láng giềng  $(k, l)$  thì giữa chúng xác lập một quan hệ gọi là trọng số  $A(i, j; k, l)$  theo công thức (5). Để xác lập mạng nơ ron tế bào tự liên kết, chúng ta hoàn toàn có thể giả thiết MTB không có đầu vào, tức là cho ma trận điều khiển  $B(\cdot) = 0$ , ma trận ngưỡng  $I = 0$ , đồng thời, để đơn giản mô hình, cho  $R_x = 1$ ;  $C = 1$  với "1" ám chỉ là một đơn vị đo lường xác định nào đó. Mặt khác, khi một mẫu vào  $u_{ij}$ , đầu ra  $y_{ij}(t)$ , trạng thái  $x_{ij}(t)$  của MTB được xác định bằng một giá trị cụ thể (tức là một hằng số), thì  $dx_{ij}(t)/dt = 0$  ở phương trình (1). Hơn nữa, khi mạng MTB đạt trạng thái ổn định đã xét ở (Chua & Yang, 1998; Roska, 2005; Nguyen Quang Hoan và nnk., 2020) thì  $y_{ij}(t)$  tiến tới  $\pm 1$  khi  $x_{ij}(t)$  tiến tới  $\pm\infty$  và phương trình (2) trở thành:

$$y_{ij}(t) = f(x_{ij}(t)) = \text{sgn}(x_{ij}(t))$$

Với lập luận đó, (1) và (2) trở thành:

$$x_{ij}(t) = \sum_{(k,l)} A(i, j; k, l) y_{kl}(t); \quad (3)$$

$$y_{ij}(t) = \begin{cases} +1 & \text{khi } x_{ij}(t) > 0 \\ -1 & \text{khi } x_{ij}(t) \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

Điều này dễ nhận biết từ đặc tính được mô tả ở Hình 2 và từ phương trình (2).

Để MTB hoạt động được, cần xác định các giá trị các trọng số  $A(i, j; k, l)$ . Các trọng số này chính là bộ nhớ liên kết cho MTB (sẽ làm rõ ở phần sau):

$$A(i, j; k, l) = \sum_{h=1}^p Y_{kl}^h (Y_{ij}^h)^T \quad (5)$$

trong đó:  $p$  là số mẫu,  $Y_{kl}^h$  là đầu ra  $(k, l)$  của mẫu thứ  $h$ ,  $h = 1..p$ ;  $T$  là chuyển vị của véc tơ.

## 4. BỘ NHỚ LIÊN KẾT VÀ BÀI TOÁN NHẬN DẠNG

### 4.1. Bài toán

#### Input:

Giả sử cho cấu trúc MTB như Hình 3 được dùng làm bộ nhớ liên kết với 3 mẫu đầu ra  $Y$  kích thước  $3 \times 3$ ; chuyển mảng hai chiều  $3 \times 3$  thành 9 phần tử dạng một chiều (véc tơ cột) với các giá trị như sau:

$$Y_{kl}^1 = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T;$$

$$Y_{kl}^2 = [-1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1]^T;$$

$$Y_{kl}^3 = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1]^T.$$

#### Output:

- 1) Tính  $A(i, j; k, l)$ . Xác minh nó là bộ nhớ;
- 2) Thử nghiệm khả năng chịu lỗi.

### 4.2. Thuật toán

Hình 4 mô tả quá trình tính toán. Đầu tiên, cho các véc tơ mẫu  $Y$  vào MTB (công tắc  $V2$  đóng). Ngay sau khi nhận được mẫu vào, công tắc  $V2$  mở để đo phản ứng của véc tơ  $Y$  ra (vòng đầu) để xác định khả năng nhớ của MTB.

Bước 1. Khởi tạo.

Bước 2. Từ (5) tính các giá trị của ma trận

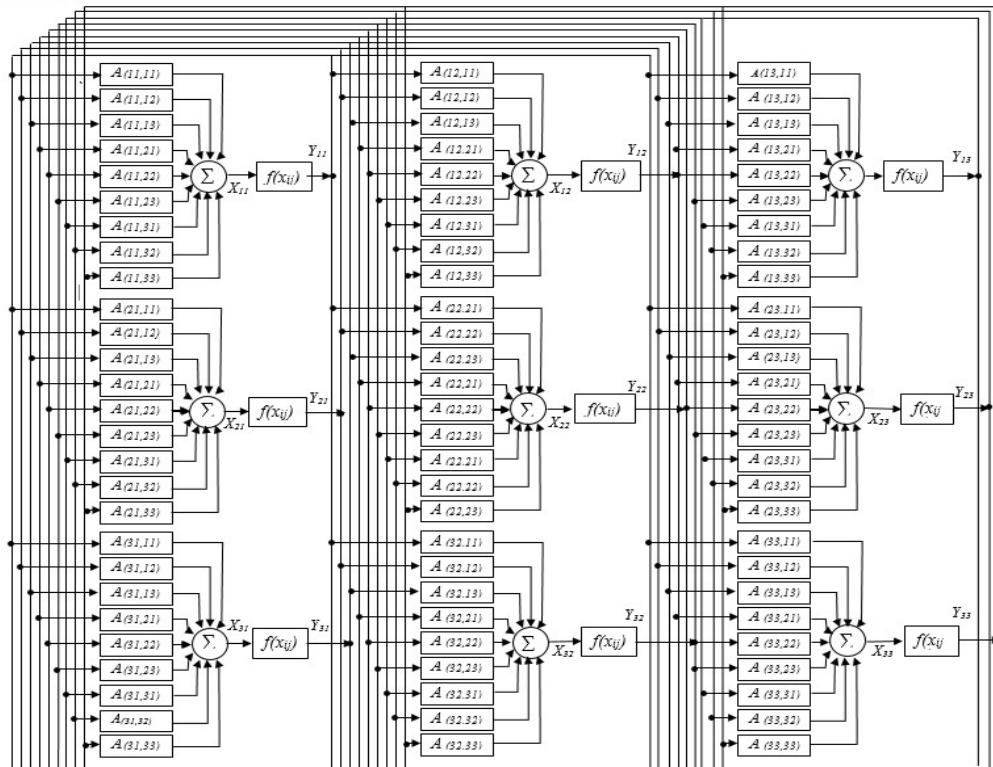
$$A(j, i; k, l) = Y_{kl}^1 (Y_{ij}^1)^T + Y_{kl}^2 (Y_{ij}^2)^T + Y_{kl}^3 (Y_{ij}^3)^T.$$

Kết quả bằng số được cho ở Bảng 1.

Bước 3. Dựa theo Hình 4 và công thức (3), tính giá trị các trạng thái:  $X_{kl}^1 = A \cdot Y_{kl}^1$  ứng với mẫu 1 là  $Y_{kl}^1$ .

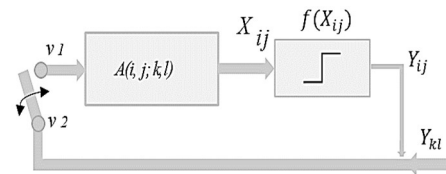
Bước 4. Tính đầu ra  $Y_{kl}^1$  theo hàm dấu (4).

Từ kết quả trên cho thấy (Hình 5), các giá trị  $x_{ij}(t)$  dương; do đó, các giá trị của  $y_{ij}(t) = \text{sgn}(x_{ij}(t))$  thu được sẽ là 1, tương ứng với:  $Y^1 = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$  đúng với mẫu vào 1. Điều này chứng tỏ,  $A(j, i; k, l)$  đã nhớ mẫu  $Y^1$ , khi đưa vào chính nó ( $Y^1$ ). Do đó, nó có khả năng gọi lại (Recall). Tương tự, có thể thử với các mẫu còn lại  $Y^2, Y^3$  và tính được các trạng thái  $X^2, X^3$ .



Hình 3. Sơ đồ MTB chuẩn làm bộ nhớ liên kết với mảng 3x3 chuyển thành véc tơ 9 đầu vào

Bảng 1. Ma trận trọng số  $A(i, j; k, l)$  kích thước 9x9

$$\sum_{j=1}^3 A(j, j; k, l) = \begin{bmatrix} 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 3 & 3 & 3 & 3 \end{bmatrix}$$


Hình 4. MTB chuẩn làm bộ nhớ liên kết

$A(j, j; k, l)$									x	=	$X^l$	=	$Y^l(kq)$
3	3	3	3	3	1	1	1	1					
3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	19	1		
3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	19	1		
3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	19	1		
3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	19	1		
1	1	1	1	1	3	3	3	3	1	17	1		
1	1	1	1	1	3	3	3	3	1	17	1		
1	1	1	1	1	3	3	3	3	1	17	1		
1	1	1	1	1	3	3	3	3	1	17	1		

Hình 5. Ví dụ tính một trạng thái  $X^l$  và đầu ra  $Y^l$  của MTB chuẩn làm bộ nhớ liên kết

### 4.3. Khả năng chịu lỗi và khả năng nhớ của MTB

Để thấy rõ khả năng chịu lỗi của MTB, ta lần lượt cho chạy thuật toán với mẫu vào có sai số một, hai, ba bit.

Bước 1. Khởi tạo với mẫu vào có các sai số:

a) Mẫu 1 có sai số 1 bit (bit đầu tiên), ví dụ:  $Y^1 = [-1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$

b) Mẫu 2 có sai số 2 bit, ví dụ:

$$Y^2 = [-1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1]^T;$$

c) Mẫu 3 có sai số 3, ví dụ:

$$Y^3 = [-1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1]^T;$$

Bước 2. Tính  $A(j,j;k,l) = Y_{kl}^1$

Bước 3. Các trạng thái của mẫu 1, mẫu 2 và mẫu 3 tương ứng:

$$X^1 = [13 \ 13 \ 13 \ 13 \ 13 \ 15 \ 15 \ 15 \ 7]^T$$

$$X^2 = [11 \ 11 \ 11 \ 11 \ 11 \ 9 \ 9 \ 9 \ 5]^T$$

$$X^3 = [5 \ 5 \ 5 \ 5 \ 5 \ 7 \ 7 \ 7 \ 3]^T$$

Bước 4. Tính các đầu ra  $Y_{kl}^1, Y_{kl}^2, Y_{kl}^3$ . Với mẫu thử  $Y^1 = [-1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$ , đầu ra tính được  $Y^1 = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$  cho kết quả nhận dạng đúng với mẫu ban đầu đã được học, chứng tỏ mạng có khả năng chịu lỗi.

Thử với các mẫu sai số 2 và 3 bit. Kết quả nhận được như mẫu đã học. Chúng tôi đã thử nhiều bit sai khác ở các vị trí khác nhau và cho thấy: với các mẫu đầu vào sai số 1 đến 3 bit, MTB vẫn nhận ra kết quả đúng, suy ra MTB có khả năng chịu lỗi tốt.

### 5. KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

Bài báo định hướng theo các chủ đề thời sự hiện nay là học sâu, trong đó mạng MTB là một dạng học sâu với kết quả là phát triển MTB dùng làm bộ nhớ liên kết với khả năng xử lý lỗi (chịu lỗi tốt). Kết quả thử nghiệm được tiến hành cho thấy, khả năng nhận mẫu của MTB cao hơn nhiều so với các mô hình bộ nhớ liên kết của mạng nơ ron phản hồi Hopfield. Theo (Negnevitsky, 2002, trang 194) dung lượng nhớ liên kết tối đa của mạng Hopfield là:

$$M_{\max}^{\text{Hopfiel}} = \frac{n}{4 \ln n},$$

trong đó,  $n$  là số nơ ron. Với bộ nhớ liên kết của MTB do sử dụng đầu vào 2 chiều nên dung lượng nhớ là hàm bậc hai so với bộ nhớ của mạng Hopfield, tức là:

$$M_{\max}^{\text{CNNChua}} = \left(\frac{n}{4 \ln n}\right)^2.$$

Hướng nghiên cứu tiếp theo của bài báo là thử nghiệm thêm trên các mẫu có kích thước lớn hơn. Mặt khác, tiếp theo sẽ phát triển bộ nhớ liên kết dựa trên mạng MTB bậc cao đa tương tác dạng đa thức đã và đang được tiến hành (Nguyen Quang Hoan và nnk., 2020); kết quả sẽ được báo cáo ở tạp chí hoặc hội nghị khoa học ở địa chỉ sẽ công bố sau. Vấn đề nghiên cứu khác là nghiên cứu học để tìm các tham số  $B(\cdot)$  và  $I$  cũng đang được tác giả cùng các nghiên cứu sinh xúc tiến nghiên cứu.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Chua, L. O., & Yang, L. (1998, October). Cellular Neural Networks: Theory. *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, 35(10).
- Negnevitsky, M. (2002). *Artificial Intelligence*. Peason Education Limmited.
- Nguyen Quang Hoan, Nguyen Tai Tuyen, & Duong Duc Anh. (2020, 9). Architecture and stability of the second-order cellular neural networks. *Tạp chí Khoa học, Công nghệ, Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên*, 27, 91–97.
- Nguyen Tai Tuyen, & Nguyen Quang Hoan. (2018, January). An application of multi-interaction cellular neural network on the basis of STM32 and FPGA. *International journal for research in applied science & engineering technology*, 6(1).
- Nguyen Tai Tuyen, Nguyen Quang Hoan, & Ngo Văn Sy. (2016). Stability of multi-interactive cellular neural networks using Lyapunov function. *Hội thảo toàn quốc về Điện tử, Truyền thông và Công nghệ Thông tin REV-2016*.
- Roska, T. (2005). Cellular Wave Computers for Brain-Like Spatial-Temporal Sensory Computing. *IEEE Circuits and Systems Magazine*.
- Slavova, A. (2003). *Cellular Neural Networks: Dynamics and Modeling*. Kluwer Academic Publishers.