67

การประยุกต์ใช้ฮอบฟิลด์เนตสำหรับการกำหนดเส้นทางในโครงข่ายสื่อสารโทรคมนาคม

นาย สุรัตน์ ตันเทอดทิตย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2539

ISBN 974-633-223-6

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16796676.

APPLICATION OF HOPFIELD NET FOR ROUTING IN TELECOMMUNICATION NETWORKS

MR. SURAT TANTERDTID

A Thesis Submitted in Partial Fullfillment of the Requirements

For the Degree of Master of Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1996

ISBN 974-633-223-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประยุกต์ใช้ฮอบฟีลด์เนตสำหรับการกำหนดเส้นทางในโครงข่ายสื่อสารโทรคมนาคม

โดย นาย สุรัตน์ ตันเทอดทิตย์

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. วาทิต เบญจพลกุล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ถุงสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธาน

(รองศาสตราจารย์ ดร. ณรงค์ อยู่ถนอม)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร. วาทิต เบญจพลกุล)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ประสิทธิ์ ประพิณมงคลการ)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สมชาย จิตะพันธ์กุล)

C715908: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD: ROUTING / COMMUNICATION NETWORKS / HOPFIELD NET
SURAT TANTERDTID : APPLICATION OF HOPFIELD NET FOR ROUTING IN TELECOMMUNICATION NETWORKS. THESIS ADVISOR : WATIT BENJAPOLAKUL. D.Eng.72 PP. ISBN 974-633-223-6

This research proposes the application of Hopfield net, a type of neural network, in communication networks routing.

The routing constraints are minimum number of links between any pair of nodes, minimum delay time in the route and minimum congestion state of the nodes in the route which is chosen to be the path of the route.

A new method of initialization, which is adaptive with the state of communication networks traffic, is proposed. It can also be applied to the dynamic routing problem. The effect of constant parameters in the equation of motion of neural network and the effect of the constant parameter in the transfer function of neuron, to the speed and characteristics of the energy variation are tested and analyzed.

Computer simulation shows that this application gives a more accurate solution than the conventional method solution, which was presented by Lee and Chang in 1993 and also helps alleviate the suboptimum problem.

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2538 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม —

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

สุรัตน์ ตันเทอดทิตย์ : การประยุกต์ใช้ฮอบฟิลด์เนตสำหรับการกำหนดเส้นทางในโครงข่ายสื่อสารโทรคมนาคม (APPLICATION OF HOPFIELD NET FOR ROUTING IN TELECOMMUNICATION NETWORKS) อ. ที่ปรึกษา : อ. ดร. วาทิต เบญจพลกุล, 72 หน้า , ISBN 974-633-223-6

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

งานวิจัยนี้เสนอการนำเอาฮอบฟิลด์เนต ซึ่งเป็นนิวรอลเน็ตเวอร์กชนิดหนึ่งมาประยุกต์ใช้ในการกำหนดเส้นทางในโครงข่ายสื่อสาร ตามเงื่อนไขที่ได้สร้างขึ้น

เงื่อนไขในการกำหนดเส้นทางคือ ต้องการให้จำนวนช่ายสื่อสารเชื่อมโยงระหว่างคู่โหนดที่ต้องการติดต่อสื่อสารน้อยที่สุด มีความล่าช้าทางเวลาที่เกิดขึ้นในเส้นทางน้อยที่สุด และโหนดที่ถูกเลือกเป็นเส้นทางผ่านมีสภาวะความคับคั่งที่น้อยที่สุด

การกำหนดค่าเริ่มต้นวิธีใหม่ซึ่งแปรเปลี่ยนไปตามสภาวะของปริมาณการสื่อสารในโครงข่ายที่เสนอขึ้นมาสามารถใช้ในการกำหนดเส้นทางในแบบไดนามิกส์ได้ นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์และแสดงผลการทดสอบผลของค่าคงที่ต่างๆในสมการการเคลื่อนที่ของนิวรอลเน็ตเวอร์ก และผลของค่าคงที่ในทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของแต่ละนิวรอลที่มีผลต่อความเร็วในการคำนวณและลักษณะสมบัติการเปลี่ยนแปลงพลังงานของนิวรอลเน็ตเวอร์ก

ผลการทดสอบโดยการจำลองตัวอย่างโครงข่ายสื่อสารด้วยการเขียนโปรแกรมการคำนวณสามารถแสดงให้เห็นว่า การกำหนดเส้นทางในวิธีการที่ได้เสนอขึ้นมานี้สามารถให้ผลที่ถูกต้องมากกว่าวิธีการเดิมที่ได้ถูกเสนอโดยลีและชางในปี ค.ศ 1993 และสามารถลดการเกิดปัญหาในเรื่องซับออปติมัมลงได้

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2538 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม —

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

สุรัตน์ ตันเทอดทิตย์ : การประยุกต์ใช้ฮอบฟีลด์เนตสำหรับการกำหนดเส้นทางในโครงข่ายสื่อสารโทรคมนาคม (APPLICATION OF HOPFIELD NET FOR ROUTING IN TELECOMMUNICATION NETWORKS) อ. ที่ปรึกษา : อ. ดร. วาทิต เบญจพลกุล, 72 หน้า , ISBN 974-633-223-6

งานวิจัยนี้เสนอการนำเอาฮอบฟีลด์เนต ซึ่งเป็นนิวรอลเน็ตเวอร์กชนิดหนึ่งมาประยุกต์ใช้ในการกำหนดเส้นทางในโครงข่ายสื่อสาร ตามเงื่อนไขที่ได้สร้างขึ้น

เงื่อนไขในการกำหนดเส้นทางคือ ต้องการให้จำนวนช่ายสื่อสารเชื่อมโยงระหว่างคู่โหนดที่ต้องการติดต่อสื่อสารน้อยที่สุด มีความล่าช้าทางเวลาที่เกิดขึ้นในเส้นทางน้อยที่สุด และโหนดที่ถูกเลือกเป็นเส้นทางผ่านมีสภาวะความคับคั่งที่น้อยที่สุด

การกำหนดค่าเริ่มต้นวิธีใหม่ซึ่งแปรเปลี่ยนไปตามสภาวะของปริมาณการสื่อสารในโครงข่ายที่เสนอขึ้นมาสามารถใช้ในการกำหนดเส้นทางในแบบไดนามิกส์ได้ นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์และแสดงผลการทดสอบผลของค่าคงที่ต่างๆในสมการการเคลื่อนที่ของนิวรอลเน็ตเวอร์ก และผลของค่าคงที่ในทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของแต่ละนิวรอลที่มีผลต่อความเร็วในการคำนวณและลักษณะสมบัติการเปลี่ยนแปลงพลังงานของนิวรอลเน็ตเวอร์ก

ผลการทดสอบโดยการจำลองตัวอย่างโครงข่ายสื่อสารด้วยการเขียนโปรแกรมการคำนวณสามารถแสดงให้เห็นว่า การกำหนดเส้นทางในวิธีการที่ได้เสนอขึ้นมานี้สามารถให้ผลที่ถูกต้องมากกว่าวิธีการเดิมที่ได้ถูกเสนอโดยลีและชางในปี ค.ศ 1993 และสามารถลดการเกิดปัญหาในเรื่องซับออปติมัมลงได้

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2538 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

C715908 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD: ROUTING / COMMUNICATION NETWORKS / HOPFIELD NET
SURAT TANTERDTID : APPLICATION OF HOPFIELD NET FOR ROUTING IN TELECOMMUNICATION NETWORKS. THESIS ADVISOR : WATIT BENJAPOLAKUL. D.Eng.72 PP. ISBN 974-633-223-6

This research proposes the application of Hopfield net, a type of neural network, in communication networks routing.

The routing constraints are minimum number of links between any pair of nodes, minimum delay time in the route and minimum congestion state of the nodes in the route which is chosen to be the path of the route.

A new method of initialization, which is adaptive with the state of communication networks traffic, is proposed. It can also be applied to the dynamic routing problem. The effect of constant parameters in the equation of motion of neural network and the effect of the constant parameter in the transfer function of neuron, to the speed and characteristics of the energy variation are tested and analyzed.

Computer simulation shows that this application gives a more accurate solution than the conventional method solution, which was presented by Lee and Chang in 1993 and also helps alleviate the suboptimum problem.

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2538 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม —

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. วาทิต เบญจพลกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ในการวิจัย จนสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์

ขอกราบขอบพระคุณ คุณ อุบล โลหะปาน มารดา ที่เสียสละเวลาในการทำอาหารทุกๆมื้อ และขับรถรับส่งผู้ทำวิจัยตั้งแต่เริ่มต้นมาศึกษาจนกระทั่งศึกษาสำเร็จ

ขอขอบคุณ การไฟฟ้าผ่ายผลิตแห่งประเทศไทย หน่วยงานต้นสังกัดที่ให้การสนับสนุนในเรื่องทุนการศึกษาแก่ผู้ทำวิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

นอกจากนี้แล้วขอขอบคุณเพื่อนๆนิสิตร่วมสาขาวิศวกรรมระบบโทรคมนาคม สาขาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และสาขากรรมวิธีประมวลผลสัญญาณทางดิจิตอลทุกๆท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการเขียนซอฟท์แวร์มาโดยตลอด

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญตาราง ..... ฌ
สารบัญรูป ..... ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์ ..... ฒ
บทที่1. บทนำ 1
ความนำ 1
วัตถุประสงค์ 4
ขอบเขตวิทยานิพนธ์ 5
ประโยชน์ที่ได้รับ 5
บทที่2. ทฤษฎีในการกำหนดเส้นทางโดยใช้นิวรอลเน็ตเวอร์ก 6
ความนำ 6
ทฤษฎีคิวอิง 6
ทฤษฎีนิวรอลเน็ตเวอร์ก 10
บทที่3. การจำลองปัญหา 21
ความนำ 21
สภาวะความคับคั่งของโหนดในโครงข่ายสื่อสาร 21
การหาค่าความล่าช้าทางเวลาโดยเฉลี่ย 22
สมการพลังงานของนิวรอลเน็ตเวอร์ก 23
การกำหนดค่าเริ่มต้นของนิวรอล 27
การเลือกค่าคงที่ในสมการการเคลื่อนที่ของนิวรอลเน็ตเวอร์ก 29
พิสูจน์การลู่เข้าของสมการพลังงาน 31
ขั้นตอนในการคำนวณ 33
บทที่4. ผลการทดสอบการคำนวณและการวิเคราะห์ผลการทดสอบการคำนวณ 35
ความนำ 35
การทดสอบความถูกต้องและความรวดเร็วในการคำนวณ 35
การวิเคราะห์ความถูกต้องและความรวดเร็วในการคำนวณ 45
การทดสอบผลของสมการเงื่อนไขที่เป็นปัจจัยรองในการกำหนดเส้นทาง 47

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

การวิเคราะห์ผลการทดสอบผลของสมการเงื่อนไขที่เป็นปัจจัยรองในการกำหนดเส้นทาง 49
การทดสอบผลของค่าคงที่ในสมการการเคลื่อนที่ของนิวรอลเน็ตเวอร์ก 51
การวิเคราะห์ผลกระทบของค่าคงที่ในสมการการเคลื่อนที่ต่อการเปลี่ยนแปลงของพลังงาน 52
การทดสอบผลของค่าคงที่ซิกมอยต่อการเปลี่ยนแปลงของพลังงาน 53
การทดสอบผลของค่าคงที่โมเมนตัมต่อผลการเปลี่ยนแปลงพลังงานของนิวรอลเน็ตเวอร์ก 54
การวิเคราะห์ผลกระทบของค่าคงที่โมเมนตัมต่อการเปลี่ยนแปลงพลังงาน 57
บทที่5. สรุปและข้อเสนอแนะ 59
สรุป 59
ข้อเสนอแนะ 60
รายการอ้างอิง 62
ภาคผนวก 64
ประวัติผู้เขียน 72

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 4.1 ค่าคงที่ในสมการการเคลื่อนที่ของนิวรอลเน็ตเวอร์ก เมื่อค่าคงที่ μ และ θ มีค่าเป็น 0.75 และ 0.85 40

ตาราง 4.2 การเปรียบเทียบระหว่างการใช้วิธีการกำหนดค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันต่อจำนวนรอบในการคำนวณและค่าพลังงานของนิวรอลเน็ตเวอร์ก ที่สภาวะสมดุลย์ 41

ตาราง 4.3 ค่าคงที่ในสมการการเคลื่อนที่ของนิวรอลเน็ตเวอร์ก 43

ตาราง 4.4 การเปรียบเทียบระหว่างการใช้วิธีการกำหนดค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันต่อจำนวนรอบในการคำนวณและค่าพลังงานของนิวรอลเน็ตเวอร์ก ที่สภาวะสมดุลย์ 44

ตาราง 4.5 ค่าคงที่ในสมการการเคลื่อนที่ของนิวรอลเน็ตเวอร์ก 47

ตาราง 4.6 การเปรียบเทียบระหว่างสภาวะปกติของข่ายสื่อสารกับสภาวะที่ข่ายสื่อสารอยู่ในสภาวะที่ไม่สามารถให้บริการได้ 49

ตาราง 4.7 การเปรียบเทียบผลการคำนวณเมื่อใช้ค่าคงที่ β ที่ต่างกัน 51

ตาราง 4.8 ค่าคงที่ที่ใช้ในการทดสอบผลของค่าคงที่โมเมนตัม 55

ตาราง 4.9 ผลการทดสอบผลกระทบของค่าคงที่โมเมนตัม(*M*) 56

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แบบจำลองการให้บริการแก่ข่าวสารในระบบโทรคมนาคม....6
รูปที่ 2.2 แผนภูมิเวลาตามทฤษฎีคิวอิง....7
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความล่าช้าทางเวลาโดยเฉลี่ย
กับค่าความหนาแน่นของปริมาณการสื่อสาร....9
รูปที่ 2.4 แบบจำลอง Hopfield Net ที่ใช้ในการหาคำตอบที่ดีที่สุด....11
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง อินพุทกับเอาท์พุทของแต่ละนิวรอล....11
รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมการคำนวณการกำหนดเส้นทางในโครงข่ายสื่อสาร....34
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างโครงข่ายสื่อสารที่นำมาทดสอบ
การคำนวณการกำหนดเส้นทางในโครงข่ายสื่อสาร....36
รูปที่ 4.2 เมตริกซ์ความจุของข่ายสื่อสารเชื่อมโยงในโครงข่ายสื่อสารรูปที่ 4.1....37
รูปที่ 4.3 เมตริกซ์ความล่าช้าทางเวลาโดยเฉลี่ยในโครงข่ายสื่อสาร....38
รูปที่ 4.4 เมตริกซ์สภาวะความคับคั่งของโหนดในโครงข่ายสื่อสารรูปที่ 4.1....39
รูปที่ 4.5 ค่าเริ่มต้นของนิวรอล
ก. ตามวิธีการกำหนดค่าเริ่มต้นวิธีการใหม่
ข. ตามวิธีการกำหนดค่าเริ่มต้นวิธีการเดิม....40
รูปที่ 4.6 พลังงานของนิวรอลเน็ตเวอร์กเมื่อจำนวนรอบ
ในการคำนวณเพิ่มมากขึ้น
เส้นกราฟ 1. ใช้วิธีการกำหนดค่าเริ่มต้นแบบใหม่
เส้นกราฟ 2. ใช้วิธีการกำหนดค่าเริ่มต้นวิธีการเดิม....41
รูปที่ 4.7 เอาท์พุทของนิวรอลเน็ตเวอร์กภายหลังการคำนวณ
ก. ใช้วิธีการกำหนดค่าเริ่มต้นแบบใหม่
ข. ใช้วิธีการกำหนดค่าเริ่มต้นแบบเดิม....42
รูปที่ 4.8 พลังงานของนิวรอลเน็ตเวอร์กเมื่อจำนวนรอบในการคำนวณ
เพิ่มมากขึ้น เส้นกราฟ 1. ใช้การกำหนดค่าเริ่มต้นแบบใหม่
เส้นกราฟที่ 2. ใช้วิธีการกำหนดค่าเริ่มต้นแบบเดิม....43
รูปที่ 4.9 เอาท์พุทของนิวรอลเน็ตเวอร์กภายหลังการคำนวณ
ก. ใช้วิธีการกำหนดค่าเริ่มต้นแบบใหม่ ข. ใช้วิธีการกำหนดค่าเริ่มต้นแบบเดิม....44
รูปที่ 4.10 เอาท์พุทของนิวรอลเน็ตเวอร์กเมื่อโหนดที่ 1 คือโหนดต้นทาง
และโหนดที่ 4 คือโหนดปลายทาง....48

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.11 เอาท์พุทของนิวรอลเน็ตเวอร์กเมื่อโหนดที่ 1 คือโหนดต้นทาง
และโหนดที่ 4 คือโหนดปลายทาง เมื่อกำหนดให้ ช่ายสื่อสารเชื่อมโยง
ระหว่างโหนดที่ 2 และโหนดที่ 3 ไม่สามารถให้บริการได้.....48
รูปที่ 4.12 เอาท์พุทของนิวรอลเน็ตเวอร์กเมื่อใช้ค่าคงที่ β เป็น 1.5.....50
รูปที่ 4.13 พลังงานของนิวรอลเน็ตเวอร์กที่ค่า μ ต่างๆ เมื่อกำหนดให้ θ มีค่าเป็น 0.85.....52
รูปที่4.14 การเปลี่ยนแปลงพลังงานของนิวรอลเน็ตเวอร์สำหรับค่าคงที่ซิกมอย(λ)ต่างๆกัน.....54
รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงพลังงานของนิวรอลเน็ตเวอร์กที่ค่าคงที่โมเมนตัม(*M*)ต่างๆกัน.....56

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์

C เมตริกซ์ความจุของข่ายสื่อสารเชื่อมโยง (capacity matrix)

ρ ความหนาแน่นของปริมาณการสื่อสาร (traffic intensity)

$T_{i,j}$ ความล่าช้าทางเวลาที่เกิดขึ้นในเส้นทางระหว่างโหนดที่ i ไปยังโหนดที่ j (delay time between node i and node j)

P เมตริกซ์แสดงค่าเฉลี่ยของจำนวนแพคเกจที่อยู่ในข่ายสื่อสารเชื่อมโยง

s เมตริกซ์สภาวะความคับคั่งของโหนด(congestion state matrix)

S เมตริกซ์สภาวะความคับคั่งของโหนดหลังการนอร์มัลไลซ์(normalized congestion state matrix)

u อินพุทของนิวรอลเน็ตเวอร์ก (neural network input)

V เอาท์พุทของนิวรอลเน็ตเวอร์ก (neural network output)

K จำนวนข่ายสื่อสารเชื่อมโยงที่น้อยที่สุด (minimum number of links)

$T_{ij,mn}$ น้ำหนักของการเชื่อมต่อระหว่างแต่ละนิวรอลในแบบอาร์เรย์ 2 มิติ (connection weigth of each neuron in two dimensional array)

I_{ij} กระแสกระตุ้นจากภายนอกของแต่ละนิวรอล (external bias current of each neuron)

δ โครเนกเกอร์เดลต้าฟังก์ชัน (Kronecker's delta function)

E สมการพลังงาน (energy function)

α ค่าพารามิเตอร์กำหนดน้ำหนักในการคำนวณแต่ละรอบ (stepsize parameter)

β ค่าพารามิเตอร์กำหนดน้ำหนักแก่ปัจจัยรองในการคำนวณ

γ ค่าพารามิเตอร์กำหนดน้ำหนักแก่เงื่อนไขคำตอบของนิวรอลเน็ตเวอร์ก

λ ค่าคงที่ซิกมอย (sigmoid constant)

θ ผลรวมของเอาท์พุทนิวรอลในแต่ละคอลัมน์ (summation of neuron output in each column)

μ ขอบเขตบนของผลคูณระหว่าง α, γ

M ค่าพารามิเตอร์กกำหนดน้ำหนักค่าโมเมนตัม (momentum constant)

ϑ อินพุทอิมพีแดนซ์ของแต่ละนิวรอล

$R_{i,j}$ ความต้านทานไฟฟ้าระหว่างนิวรอลตัวที่ i กับตัวที่ j

τ ค่าคงที่เวลา (time constant)

g ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของแต่ละนิวรอล (transfer function of each neuron)

F เมตริกซ์แสดงผลต่างของอัตราความสามารถในการให้บริการของข่ายสื่อสารเชื่อมโยงกับอัตราการเข้ามาของแพคเกจในข่ายสื่อสารเชื่อมโยง

D เมตริกซ์แสดงผลรวมในแต่ละแถวของเมตริกซ์ F

$Link_i$ จำนวนข่ายสื่อสารเชื่อมโยงที่เชื่อมต่อมายังโหนดที่ i

Int_i ผลหารระหว่างเมตริกซ์ D กับจำนวนข่ายสื่อสารเชื่อมโยงที่เชื่อมต่อมายังโหนดในเทอมที่ i

คำอธิบายสัญลักษณ์(ต่อ)

N	จำนวนโหนดในโครงข่ายสื่อสารโทรคมนาคม
e_n	เมตริกซ์ขนาด 1XN ที่ทุกๆเทอมมีค่าเป็น 1
ξ	ความเร็วในการให้บริการของระบบสื่อสาร
σ	ความเร็วของแพคเกจที่เข้าสู่ระบบสื่อสาร
ψ	เวลาที่แพคเกจต้องรอคอยในการได้รับบริการ