

การปรับอัตราการเรียนรู้แบบพลวัตในข่ายงานระบบประสาท



นาย ธีรัฐ ธิ สุขเจริญกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2540
ISBN 974-638-982-3
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

10 เม.ย. 2546

7 17975 467

DYNAMIC ADJUSTMENTS OF LEARNING RATES OF NEURAL NETWORKS

MR. NUTTHAWUT SUKCHAROENNUKOOL

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School


Chulalongkorn University

Academic Year 1997

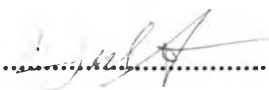
ISBN 974-638-982-3


หัวข้อวิทยานิพนธ์ การปรับอัตราการเรียนรู้แบบพลวัตในข่ายงานระบบประสาท
โดย นายณัฐภูมิ สุขเจริญกุล
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร. เจษฎา ชินรุ่งเรือง

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร.บุญมี อย่างธารา)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.เจษฎา ชินรุ่งเรือง)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.สุชิน อรุณสวัสดิ์วงศ์)

ณัฐวุฒิ สุขเจริญกุล : การปรับอัตราการเรียนรู้แบบพลวัตในข่ายงานระบบประสาท (DYNAMIC ADJUSTMENTS OF LEARNING RATES OF NEURAL NETWORKS) อ. ที่ปรึกษา : อ. ดร. เจษฎา ชินรุ่งเรือง, 98 หน้า. ISBN 974-638-982-3.

การปรับพารามิเตอร์ของข่ายงานระบบประสาทโดยทั่วไป อาศัยหลักการของการลดระดับตามแนวเกรเดียนต์ (steepest descent) ความเร็วและความถูกต้องในการปรับพารามิเตอร์จะขึ้นกับค่าพารามิเตอร์ที่เรียกว่า อัตราการเรียนรู้ ซึ่งปกติถูกกำหนดให้เป็นค่าคงตัว อัตราการเรียนรู้แบบค่าคงตัวมีผลเสียในแง่ที่ว่า การหาค่าเหมาะสมทำได้ยาก นอกจากนี้ ในกรณีการประยุกต์ใช้งานแบบเชื่อมตรง การปรับพารามิเตอร์ของข่ายงานระบบประสาทด้วยอัตราการเรียนรู้คงตัวไม่สามารถให้ความเร็วและความถูกต้องของค่าเหมาะสมที่สุดได้พร้อมกัน เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว ได้มีผู้เสนอวิธีการปรับอัตราการเรียนรู้โดยให้ค่าเปลี่ยนไปตามเวลาและสภาพของปัญหาในขณะนั้นๆ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อรวบรวมวิธีการปรับอัตราการเรียนรู้แบบต่างๆ พร้อมทั้งทดสอบการใช้งานในแบบเชื่อมตรง การทดสอบปัญหาแรกเป็นปัญหาการประมาณฟังก์ชันเชิงเส้นที่เปลี่ยนและไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ปัญหาการทดสอบที่สองเป็นการชดเชยช่องสัญญาณในงานสื่อสารเชิงเลข ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า การปรับอัตราการเรียนรู้แบบพลวัตช่วยให้ข่ายงานระบบประสาทปรับตัวได้เร็วและให้ความถูกต้องของจุดเหมาะสมที่สุดได้ดีกว่าการใช้อัตราการเรียนรู้แบบค่าคงตัว ข้อมูลจากการทดสอบสามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับการปรับปรุงวิธีเพื่อการประยุกต์ใช้งานเฉพาะด้าน หรือค้นหาหลักเกณฑ์ในการคัดเลือกวิธีที่เหมาะสม

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2540

ลายมือชื่อนิสิต ณัฐวุฒิ สุขเจริญกุล
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร. เจษฎา ชินรุ่งเรือง
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

C715593 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: NEURAL NETWORKS / LEARNING RATES / DYNAMIC ADJUSTMENTS

NUTTHAWUT SUKCHAROENNUKOOL : DYNAMIC ADJUSTMENTS OF LEARNING RATES OF NEURAL NETWORKS. THESIS ADVISOR : CHEDSADA CHINRUNGRUENG, Ph.D. 98 pp. ISBN 974-638-982-3

Most learning algorithms of neural networks are implemented based on the method of steepest descent. The performance of these algorithms depend strongly on a parameter called the learning rate. For a constant learning rate, there is a trade-off between convergence speed and adaptation accuracy. When the learning rate is large, the algorithm converges rapidly but with low accuracy. Conversely, when the learning rate is small, the algorithm converges with high accuracy but low speed. In order to avoid this trade-off, several reseachers had proposed adaptation techniques where their learning rates vary dynamically with time. The objective of this thesis is to summarize methods for dynamically adapting the learning rates and compare their performances on two standard problem sets. The first is the problem of approximating both stationary and nonstationary linear functions. The second is a channel equalization in a digital communication system. The results obtained indicate that the dynamic adjustments of learning rates improve the rate of convergence and adaptation accuracy compared with those of constant learning rates. The insight gained from this thesis can be used as the guideline for selecting and improving an algorithm for a given application.

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา..... 2540

ลายมือชื่อนิสิต..... นิตวิทย์ สุขเจริญกุล
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... น.ว.น. เดวิด
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... -

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำงานวิจัยครั้งนี้ บุคคลที่ต้องขอกราบขอบพระคุณเป็นอันดับแรก คือ อาจารย์ ดร. เจษฎา ชินรุ่งเรือง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้เป็นผู้แนะนำงานวิจัยนี้ ตลอดจนให้คำแนะนำ และคอยสอนสิ่งต่างๆ ที่มีประโยชน์ต่อขั้นตอน ความคิด ที่จะทำงานวิจัยนี้ รวมทั้งเอื้อเพื่อเครื่องคอมพิวเตอร์ งานสำเร็จลุล่วง และขอกราบขอบพระคุณอาจารย์คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ได้แก่ อาจารย์ ดร. บุญมี อย่างธรา และอาจารย์ ดร. สุชิน อรุณสวัสดิ์วงศ์ ที่ท่านได้สละเวลาอันมีค่ามาให้คำแนะนำและตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ คุณณิศร สำเนาอินทร์ ที่ได้ให้ความเอื้อเพื่อเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับการทำงานวิทยานิพนธ์เป็นเวลานาน

ขอขอบคุณเพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคน ที่คอยเป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือด้วยความ เป็นห่วงเป็นใยอยู่ตลอดเวลา

ท้ายนี้ผู้วิจัยต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา รวมทั้งพี่น้องที่อยู่บ้านทุกคน ที่เข้าใจ และให้กำลังใจเพื่อให้ทำงานได้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
คำอธิบายศัพท์และสัญลักษณ์.....	ด
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความเบื้องต้น	1
1.2 โครงสร้างวิทยานิพนธ์	4
2. ขอบเขตของอัตราการเรียนรู้ในการลดระดับเชิงชั้นที่สุด.....	6
2.1 จุดเหมาะสมที่สุดของการลดระดับเชิงชั้นที่สุด	6
2.2 หลักการเชิงตั้งฉาก	9
2.3 การหาจุดเหมาะสมที่สุดในการลดระดับเชิงชั้นที่สุด.....	9
2.4 การหาจุดเหมาะสมที่สุดโดยขั้นตอนวิธีเกรเดียนต์เฟ้นสุ่ม.....	17
2.5 การลู่เข้าโดยวิธีเกรเดียนต์เฟ้นสุ่ม.....	21
2.5.1 ค่าเฉลี่ยของเวกเตอร์พารามิเตอร์.....	21
2.5.2 ความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย	24
2.5.3 ค่าลู่เข้าของความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยและความแปรปรวนของพารามิเตอร์	30
2.6 สรุป.....	31
3 ขั้นตอนวิธีการปรับอัตราการเรียนรู้.....	33
3.1 โครงสร้างข่ายงานระบบประสาท.....	33
3.2 การแผ่ย้อนกลับโดยค่าผิดพลาด (Error Backpropagation)	35

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 จำนวนอัตราการเรียนรู้ที่ใช้ในขั้นตอนวิธี.....	37
3.4 การปรับอัตราการเรียนรู้แบบ Delta-bar-delta (Dbd)	37
3.5 การปรับอัตราการเรียนรู้แบบ Incremental delta-bar-delta (Idbd)	39
3.6 การปรับอัตราการเรียนรู้แบบ Entropy-based Learning rate	42
3.7 การปรับอัตราการเรียนรู้แบบ direction cosine และ modified direction cosine ..	45
3.7.1 การปรับอัตราการเรียนรู้แบบ direction cosine	44
3.7.2 การปรับอัตราการเรียนรู้แบบ modified direction cosine.....	46
3.8 การคำนวณและความซับซ้อนของขั้นตอนวิธี.....	47
3.9 สรุป.....	47
4. การปรับอัตราการเรียนรู้บนข่ายงานระบบประสาทแบบชั้นเดียว.....	49
4.1 การวัดประสิทธิภาพของข่ายงานระบบประสาทแบบชั้นเดียว	49
4.2 ฟังก์ชันอ้างอิงของการทดสอบ.....	49
4.3 การทดสอบกับฟังก์ชันอ้างอิงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (stationary)	50
4.4 การทดสอบโดยใช้ฟังก์ชันอ้างอิงที่มีเทอมค่าคงตัวเปลี่ยนแปลงตามเวลา.....	57
4.5 การทดสอบโดยใช้ฟังก์ชันอ้างอิงที่มีสัมประสิทธิ์เปลี่ยนแปลงตามเวลา.....	62
4.6 การทดสอบกับฟังก์ชันอ้างอิงที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด.....	67
4.7 สรุป.....	68
5. การปรับอัตราการเรียนรู้บนข่ายงานระบบประสาทแบบหลายชั้น	70
5.1 การชดเชยในช่องสัญญาณเชิงเลข	70
5.2 การออกแบบตัวชดเชยโดยการปรับพารามิเตอร์ของตัวกรอง [8]	75
5.3 ตัวชดเชยที่ใช้อัตราการเรียนรู้เป็นค่าคงตัว	79
5.4 ตัวชดเชยที่ใช้การปรับอัตราการเรียนรู้ตามเวลา.....	82
5.5 สรุป.....	91
6. บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	92
6.1 สรุปงานวิทยานิพนธ์.....	92

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.2 ข้อเสนอแนะ	95
รายการอ้างอิง	96
ประวัติผู้วิจัย	98

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 จำนวนอัตราการเรียนรู้ที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนวิธี	37
ตารางที่ 3.2 ความซับซ้อนและการคำนวณของขั้นตอนวิธี	47
ตารางที่ 5.1 สรุปค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ เมื่อกำหนดค่า ψ สำหรับการทดสอบเป็น 2.9, 3.1, 3.3 และ 3.5	79

สารบัญภาพ

		หน้า
รูปที่ 1.1	บล็อกไดอะแกรมแสดงการใช้ข่างานระบบประสาท	1
รูปที่ 2.1	การหาจุดเหมาะสมที่สุดโดยวิธีการลดระดับเชิงชั้นที่สุด	10
รูปที่ 2.2	กราฟแสดงค่า $ 1 - \beta\lambda $ เทียบกับค่า β	14
รูปที่ 2.3	กราฟแสดงค่า $\left(\left(\frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} - 1\right) / \left(\frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} + 1\right)\right)$ เทียบกับอัตราส่วน $\frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}}$	15
รูปที่ 2.4	ลักษณะของคอนทัวร์ที่มีผลต่อการเข้าสู่จุดเหมาะสมที่สุด	16
รูปที่ 3.1	โครงสร้างข่างานระบบประสาทแบบชั้นเดียว และมีปม 1 ปม.....	33
รูปที่ 3.2	การรวมค่าไบเอนส์ไว้กับเวกเตอร์พารามิเตอร์โดยพิจารณาให้เป็นค่าน้ำหนักของ สัญญาณขาเข้าที่เป็น 1	34
รูปที่ 4.1	ผลเฉลี่ยจากการทดสอบกับฟังก์ชันเชิงเส้นที่มีตัวแปรอิสระ 3 ตัว โดยไม่มี เปลี่ยนแปลงตามเวลา (ก) 1 ครั้ง (ข) 5 ครั้ง (ค) 10 ครั้ง (ง) 20 ครั้ง.....	53
รูปที่ 4.2	อัตราการเรียนรู้ในกรณีที่ใช้ฟังก์ชันอ้างอิงมีตัวแปรอิสระ 3 ตัว.....	53
รูปที่ 4.3	ผลเฉลี่ยจากการทดสอบกับฟังก์ชันเชิงเส้นที่มีตัวแปรอิสระ 5 ตัว โดยไม่มี เปลี่ยนแปลงตามเวลา (ก) 1 ครั้ง (ข) 5 ครั้ง (ค) 10 ครั้ง (ง) 20 ครั้ง.....	54
รูปที่ 4.4	อัตราการเรียนรู้ในกรณีที่ใช้ฟังก์ชันอ้างอิงมีตัวแปรอิสระ 5 ตัว.....	54
รูปที่ 4.5	ผลเฉลี่ยจากการทดสอบกับฟังก์ชันเชิงเส้นที่มีตัวแปรอิสระ 10 ตัว โดยไม่มี เปลี่ยนแปลงตามเวลา (ก) 1 ครั้ง (ข) 5 ครั้ง (ค) 10 ครั้ง (ง) 20 ครั้ง.....	55
รูปที่ 4.6	อัตราการเรียนรู้ในกรณีที่ใช้ฟังก์ชันอ้างอิงมีตัวแปรอิสระ 10 ตัว.....	55
รูปที่ 4.7	ผลเฉลี่ยจากการทดสอบเมื่อเทอมค่าคงตัวเปลี่ยนแปลงตามเวลาในอัตรา 100,000 ข้อมูลต่อหน่วย (ก) 1 ครั้ง (ข) 5 ครั้ง (ค) 10 ครั้ง (ง) 20 ครั้ง.....	59
รูปที่ 4.8	อัตราการเรียนรู้เมื่อทดสอบโดยเทอมค่าคงตัวเปลี่ยนแปลงตามเวลาในอัตรา 100,000 ข้อมูลต่อหน่วย.....	59
รูปที่ 4.9	ผลเฉลี่ยจากการทดสอบเมื่อเทอมค่าคงตัวเปลี่ยนแปลงตามเวลาในอัตรา 50,000 ข้อมูลต่อหน่วย (ก) 1 ครั้ง (ข) 5 ครั้ง (ค) 10 ครั้ง (ง) 20 ครั้ง ...	60
รูปที่ 4.10	อัตราการเรียนรู้เมื่อทดสอบโดยเทอมค่าคงตัวเปลี่ยนแปลงตามเวลาในอัตรา 50,000 ข้อมูลต่อหน่วย.....	60
รูปที่ 4.11	ผลเฉลี่ยจากการทดสอบเมื่อเทอมค่าคงตัวเปลี่ยนแปลงตามเวลาในอัตรา 10,000 ข้อมูลต่อหน่วย (ก) 1 ครั้ง (ข) 5 ครั้ง (ค) 10 ครั้ง (ง) 20 ครั้ง ...	61

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.1 อัตราการเรียนรู้เมื่อทดสอบโดยเทอมค่าคงตัวเปลี่ยนแปลงตามเวลาในอัตรา 10,000 ข้อมูลต่อหน่วย.....	61
รูปที่ 4.15 ผลเฉลี่ยจากการทดสอบเมื่อค่าสัมประสิทธิ์เปลี่ยนแปลงตามเวลาในอัตรา 100,000 ข้อมูลต่อหน่วย (ก)1 ครั้ง (ข) 5 ครั้ง (ค) 10 ครั้ง (ง) 20 ครั้ง.....	64
รูปที่ 4.16 อัตราการเรียนรู้เมื่อทดสอบโดยค่าสัมประสิทธิ์เปลี่ยนแปลงตามเวลาในอัตรา 100,000 ข้อมูลต่อหน่วย.....	64
รูปที่ 4.17 ผลเฉลี่ยจากการทดสอบเมื่อค่าสัมประสิทธิ์เปลี่ยนแปลงตามเวลาในอัตรา 50,000 ข้อมูลต่อหน่วย (ก)1 ครั้ง (ข) 5 ครั้ง (ค) 10 ครั้ง (ง) 20 ครั้ง.....	65
รูปที่ 4.18 อัตราการเรียนรู้เมื่อทดสอบโดยค่าสัมประสิทธิ์เปลี่ยนแปลงตามเวลาในอัตรา 50,000 ข้อมูลต่อหน่วย.....	65
รูปที่ 4.19 ผลเฉลี่ยจากการทดสอบเมื่อค่าสัมประสิทธิ์เปลี่ยนแปลงตามเวลาในอัตรา 10,000 ข้อมูลต่อหน่วย (ก)1 ครั้ง (ข) 5 ครั้ง (ค) 10 ครั้ง (ง) 20 ครั้ง.....	66
รูปที่ 4.20 อัตราการเรียนรู้เมื่อทดสอบโดยค่าสัมประสิทธิ์เปลี่ยนแปลงตามเวลาในอัตรา 10,000 ข้อมูลต่อหน่วย.....	66
รูปที่ 4.21 ผลเฉลี่ยจากการทดสอบกับฟังก์ชันอ้างอิงที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด (ก) 1 ครั้ง (ข) 5 ครั้ง (ค) 10 ครั้ง (ง) 20 ครั้ง.....	67
รูปที่ 4.22 อัตราการเรียนรู้เมื่อทดสอบกับฟังก์ชันอ้างอิงที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบ ทันทีทันใด	68
รูปที่ 5.1 การต่อตัวชดเชยกับช่องสัญญาณ	71
รูปที่ 5.2 ตัวกรองแบบปรับตัวได้ที่มีโครงสร้างแบบต่อสัญญาณหน่วงมารวมกันที่ใช้เป็น ตัวชดเชยในช่องสัญญาณ.....	71
รูปที่ 5.3 บล็อกไดอะแกรมของระบบที่ใช้ทดสอบการออกแบบตัวชดเชย.....	75
รูปที่ 5.4 การหน่วงเวลาที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณและตัวกรองที่ใช้ในการทดสอบ.....	77
รูปที่ 5.5 ผลการทดสอบการชดเชยในช่องสัญญาณโดยใช้ตัวกรองแบบปรับตัวได้กับอัตรา การเรียนรู้ที่เป็นค่าคงตัว ที่ 0.075, 0.025, 0.01 และ 0.0075 ตามลำดับโดย กำหนดค่า $\psi = 2.9$	79

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.6 ผลการทดสอบการชดเชยในช่องสัญญาณโดยใช้ตัวกรองแบบปรับตัวได้กับอัตราการเรียนรู้ที่เป็นค่าคงตัว ที่ 0.075, 0.025, 0.01 และ 0.0075 ตามลำดับ โดยกำหนดค่า $\psi = 3.1$	80
รูปที่ 5.7 ผลการทดสอบการชดเชยในช่องสัญญาณโดยใช้ตัวกรองแบบปรับตัวได้กับอัตราการเรียนรู้ที่เป็นค่าคงตัว ที่ 0.075, 0.025, 0.01 และ 0.0075 ตามลำดับ โดยกำหนดค่า $\psi = 3.3$	80
รูปที่ 5.8 ผลการทดสอบการชดเชยในช่องสัญญาณโดยใช้ตัวกรองแบบปรับตัวได้กับอัตราการเรียนรู้ที่เป็นค่าคงตัว ที่ 0.025, 0.01 และ 0.0075 ตามลำดับ โดยกำหนดค่า $\psi = 3.5$	81
รูปที่ 5.9 ผลการทดสอบการชดเชยในช่องสัญญาณโดยใช้ตัวกรองแบบปรับตัวได้กับอัตราการเรียนรู้ที่เป็นค่าคงตัว ที่ 0.075 ที่ ψ ค่าต่าง ๆ	81
รูปที่ 5.10 ความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยเมื่อใช้การปรับอัตราการเรียนรู้แบบต่าง ๆ กับตัวชดเชยในช่องสัญญาณ โดยกำหนดค่า $\psi = 2.9$	84
รูปที่ 5.11 อัตราการเรียนรู้ของการปรับแบบต่าง ๆ เมื่อใช้กับตัวชดเชยในช่องสัญญาณ โดยกำหนดค่า $\psi = 2.9$	84
รูปที่ 5.12 ความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยเมื่อใช้การปรับอัตราการเรียนรู้แบบต่าง ๆ กับตัวชดเชยในช่องสัญญาณ โดยกำหนดค่า $\psi = 3.1$	85
รูปที่ 5.13 อัตราการเรียนรู้ของการปรับแบบต่าง ๆ เมื่อใช้กับตัวชดเชยในช่องสัญญาณ โดยกำหนดค่า $\psi = 3.1$	85
รูปที่ 5.14 ความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยเมื่อใช้การปรับอัตราการเรียนรู้แบบต่าง ๆ กับตัวชดเชยในช่องสัญญาณ โดยกำหนดค่า $\psi = 3.3$	86
รูปที่ 5.15 อัตราการเรียนรู้ของการปรับแบบต่าง ๆ เมื่อใช้กับตัวชดเชยในช่องสัญญาณ โดยกำหนดค่า $\psi = 3.3$	86
รูปที่ 5.16 ความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยเมื่อใช้การปรับอัตราการเรียนรู้แบบต่าง ๆ กับตัวชดเชยในช่องสัญญาณ โดยกำหนดค่า $\psi = 3.5$	87
รูปที่ 5.17 อัตราการเรียนรู้ของการปรับแบบต่าง ๆ เมื่อใช้กับตัวชดเชยในช่องสัญญาณ โดยกำหนดค่า $\psi = 3.5$	87

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.18 ความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยเมื่อใช้วิธีการปรับแบบ modified direction cosine ที่ ψ ค่าต่างๆ.....	88
รูปที่ 5.19 ความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยเมื่อใช้วิธีการปรับแบบ direction cosine ที่ ψ ค่าต่างๆ.....	88
รูปที่ 5.20 อัตราการเรียนรู้ของวิธี direction cosine (ก) $\psi = 2.9$ (ข) $\psi = 3.1$ (ค) $\psi = 3.3$ (ง) $\psi = 3.5$	89

คำอธิบายศัพท์และสัญลักษณ์

i	ดัชนีขององค์ประกอบในเวกเตอร์
j	ดัชนีของรอบในการปรับพารามิเตอร์
t	สัญลักษณ์แทนเวลาหรือจำนวนครั้งที่ปรับพารามิเตอร์แบบเชื่อมต่อตรง (on-line)
ε	ฟังก์ชันเป้าหมายในการหาจุดเหมาะสมที่สุด
\underline{x}	เวกเตอร์สัญญาณขาเข้าของระบบ
x_i	สัญญาณขาเข้าที่ i ของระบบ, ส่วนประกอบที่ i ของเวกเตอร์สัญญาณขาเข้า
\underline{w}	เวกเตอร์พารามิเตอร์ของระบบ
w_i	พารามิเตอร์ที่ i ของระบบ, ส่วนประกอบที่ i ของเวกเตอร์พารามิเตอร์
Δw	การเปลี่ยนแปลงของเวกเตอร์พารามิเตอร์
\underline{w}_{opt}	เวกเตอร์พารามิเตอร์ที่จุดเหมาะสมที่สุด
d	สัญญาณอ้างอิงของระบบ
o	สัญญาณขาออกของระบบ
e	ความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณขาออกของระบบ
β	อัตราการเรียนรู้, ความยาวก้าวในการลดระดับตามแนวเกรเดียนต์
$f(.)$	ฟังก์ชันแสดงระบบ
$E[.]$	สัญลักษณ์แสดงการหาค่าคาดหวัง (expectation value)
$\frac{\partial \varepsilon}{\partial w}$	อนุพันธ์ของฟังก์ชันเป้าหมายเทียบกับพารามิเตอร์ของระบบ
$\nabla_w \varepsilon$	เกรเดียนต์ของฟังก์ชันเป้าหมายเทียบกับพารามิเตอร์ของระบบ
Φ	เมตริกซ์อัตโนมัติสหสัมพันธ์ (autocorrelation) ของสัญญาณขาเข้าของระบบ
ϕ	องค์ประกอบ (element) ของเมตริกซ์อัตโนมัติสหสัมพันธ์ Φ

คำอธิบายศัพท์และสัญลักษณ์ (ต่อ)

\underline{p}	เวกเตอร์สหสัมพันธ์ข้าม (cross-correlation) ของสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณขาเข้าของระบบ
λ	ค่าเฉพาะของเมตริกซ์อัตโนมัติสหสัมพันธ์
\underline{v}	เวกเตอร์เฉพาะของเมตริกซ์อัตโนมัติสหสัมพันธ์
\underline{q}	เวกเตอร์ผลต่างระหว่างเวกเตอร์พารามิเตอร์และเวกเตอร์พารามิเตอร์ที่จุดเหมาะสมที่สุด
I	เมตริกซ์เอกลักษณ์ (Identity matrix)
N	จำนวนสัญญาณขาเข้าของระบบ, จำนวนพารามิเตอร์ในระบบ
λ_{\max}	ค่าเฉพาะมากที่สุดของเมตริกซ์อัตโนมัติสหสัมพันธ์ Φ
λ_{\min}	ค่าเฉพาะน้อยที่สุดของเมตริกซ์อัตโนมัติสหสัมพันธ์ Φ
β_{opt}	ความยาวก้าวที่ทำให้ลู่เข้าเร็วที่สุด
V	เมตริกซ์ขนาด $N \times N$ ที่แต่ละคอลัมน์เป็นเวกเตอร์เฉพาะของเมตริกซ์อัตโนมัติสหสัมพันธ์ Φ
Λ	เมตริกซ์แนวทแยง (diagonal matrix) ขนาด $N \times N$ ที่องค์ประกอบในแนวทแยงเป็นค่าเฉพาะของเมตริกซ์อัตโนมัติสหสัมพันธ์ Φ และค่านอกแนวทแยงเป็นศูนย์
$\tilde{\underline{x}}$	เวกเตอร์สัญญาณขาเข้าที่ถูกแปลงให้อยู่ในแนวของเวกเตอร์เฉพาะ
$\tilde{\underline{q}}$	เวกเตอร์ผลต่างที่ถูกแปลงให้อยู่ในแนวของเวกเตอร์เฉพาะ
τ	ค่าคงตัวทางเวลาสำหรับการลดลงของเวกเตอร์ผลต่าง
e_{opt}	ความผิดพลาดที่เกิดจากค่าพารามิเตอร์ที่จุดเหมาะสมที่สุด
Q	เมตริกซ์ความแปรปรวนของเวกเตอร์ผลต่าง
\mathcal{E}_{\min}	ค่าฟังก์ชันเป้าหมายที่ต่ำที่สุด
\mathcal{E}_{ex}	ค่าฟังก์ชันเป้าหมายที่เกินจากค่าต่ำที่สุด

คำอธิบายศัพท์และสัญลักษณ์ (ต่อ)

\underline{s}	เวกเตอร์ความแปรปรวนของพารามิเตอร์
A	เมตริกซ์แสดงลักษณะการลู่เข้าของเวกเตอร์ความแปรปรวน \underline{s}
M	เมตริกซ์ที่แต่ละคอลัมน์เป็นเวกเตอร์เฉพาะของ A
U	เมตริกซ์แนวทแยงของค่าเฉพาะของเมตริกซ์ A
μ	ค่าเฉพาะของเมตริกซ์ A
\underline{u}	เวกเตอร์เฉพาะของเมตริกซ์ A
\bar{s}	เวกเตอร์ความแปรปรวนที่ถูกแปลงไปอยู่ในแนวเวกเตอร์เฉพาะของเมตริกซ์ A
λ_{av}, ϕ_0	ค่าเฉลี่ยของค่าเฉพาะของเมตริกซ์อัตราสัมพันธ์ Φ
b	ค่าไบแอสประจำปมของข่ายงานระบบประสาท
δ	ส่วนประกอบของเวกเตอร์เกรเดียนต์ในวิธีการปรับอัตราการเรียนรู้แบบ Delta-bar-delta
$\bar{\delta}$	ค่าเฉลี่ยตามเวลาของส่วนประกอบเวกเตอร์เกรเดียนต์ในวิธีการปรับอัตราการเรียนรู้แบบ Delta-bar-delta
θ	ค่าถ่วงน้ำหนักของค่าอดีตสำหรับการหาค่าเฉลี่ยตามเวลา
κ	ค่าคงตัวสำหรับการเพิ่มอัตราการเรียนรู้ในวิธี Delta-bar-delta
φ	ค่าคงตัวสำหรับการลดอัตราการเรียนรู้ในวิธี Delta-bar-delta
η	ค่า meta step size ของวิธีการปรับอัตราการเรียนรู้แบบ Incremental delta-bar-delta
α	พารามิเตอร์เสริมสำหรับการปรับอัตราการเรียนรู้ในวิธี Incremental delta-bar-delta
h	พารามิเตอร์เสริมสำหรับการปรับพารามิเตอร์ในวิธี Incremental delta-bar-delta
H	ฟังก์ชันเอนโทรปี

คำอธิบายศัพท์และสัญลักษณ์ (ต่อ)

ν	ความแปรปรวนของพารามิเตอร์ตามวิธีปรับอัตราการเรียนรู้แบบ Entropy-based learning rate (Entropy)
$(\nu)_n$	ค่าปกติของความแปรปรวนของพารามิเตอร์ในวิธี Entropy
\bar{w}	ค่าเฉลี่ยตามเวลาของพารามิเตอร์ในวิธี Entropy
ρ	ค่าโคไซน์ของทิศทาง (direction cosine) สำหรับการปรับอัตราการเรียนรู้
$P(.)$	ฟังก์ชันสำหรับการวัดประสิทธิภาพในการทดสอบการปรับตัวของระบบ
a	ความชันฟังก์ชันเชิงเส้น
K	เทอมค่าคงตัวของฟังก์ชันเชิงเส้น
y	ค่าฟังก์ชันเชิงเส้นที่ใช้ทดสอบการปรับพารามิเตอร์
ζ	อัตราการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันเชิงเส้นที่เป็นฟังก์ชันอ้างอิงในการทดสอบ
r	สัญญาณขาเข้าของตัวกรองแบบปรับตัวได้ (adaptive filter) ที่ใช้เป็นตัวชดเชย (Equalizer)
χ	ผลตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์ (Impulse response) ของระบบรวมของช่องสัญญาณและตัวชดเชย
ω	ผลตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์ของตัวชดเชย
c	ผลตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์ของช่องสัญญาณ
ψ	พารามิเตอร์สำหรับควบคุมความเปลี่ยนแปลงของสัญญาณของช่องสัญญาณในการทดสอบการชดเชยในช่องสัญญาณ