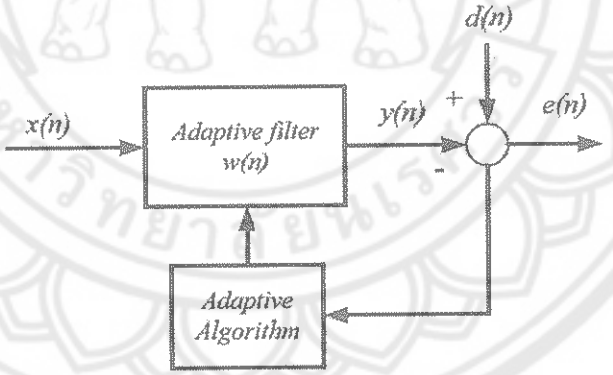
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตัวกรองสัญญาณแบบปรับตัวเอง (Adaptive Filter, AF)

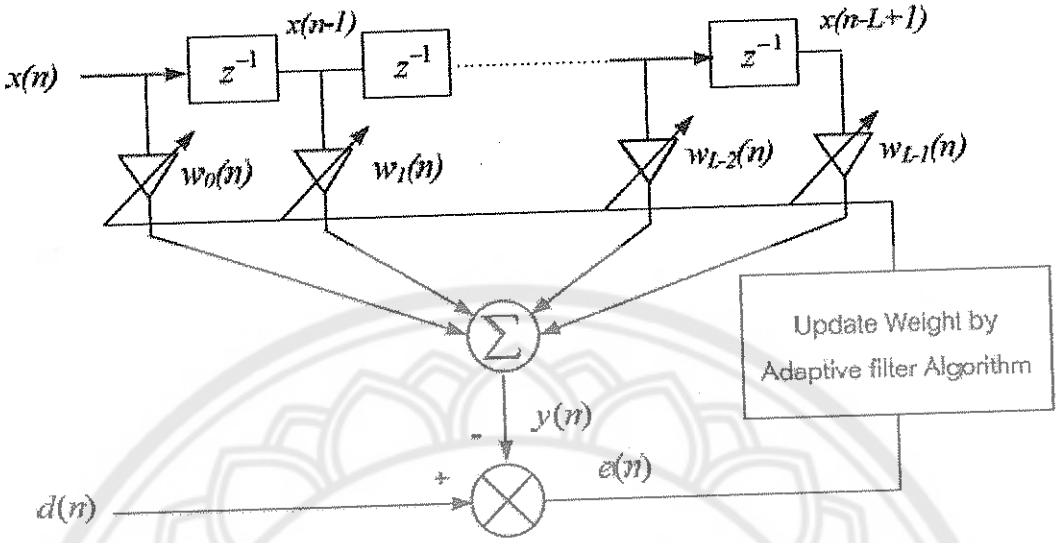
จาก Simon [2] พฤติกรรมของเสียงโดยทั่วไปนั้นพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นสัญญาณรบกวนจากสิ่งแวดล้อมน่าจะเป็นเสียงที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องด้วย ซึ่งการใช้ตัวกรองสัญญาณแบบคงที่จะไม่สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนประเภทนี้ได้ ซึ่งตัวกรองแบบปรับค่าจะแตกต่างจากตัวกรองสัญญาณแบบคงที่ตรงที่มีค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งสามารถปรับตัวได้อย่างอิสระตามสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป

รูปแบบโดยทั่วไปของตัวกรองแบบปรับตัวถูกแสดงให้เห็นดังภาพ 1 ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ ตัวกรองแบบปรับตัวและอัลกอริธึมแบบปรับตัว โดยตัวกรองแบบปรับตัวทำหน้าที่เป็นตัวควบคุม และอัลกอริธึมแบบปรับตัวเป็นส่วนของกระบวนการปรับค่า ทำหน้าที่ปรับค่าน้ำหนัก (Weights) ที่ถูกใช้ในส่วนควบคุม



ภาพ 1 แสดงแบบโดยทั่วไปของตัวกรองแบบปรับค่า [2]

โดยทั่วไปตัวกรองแบบปรับตัวสามารถประยุกต์ใช้ได้หลายรูปแบบ เช่น ระบบแยกแยะ (System Identification) ระบบผกผัน (Inverse System) ระบบพยากรณ์ (Prediction) หรือการกำจัดสัญญาณรบกวน (Noise Cancellation) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่ตัวกรองแบบปรับตัวฟังค์ชันผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัด (FIR) เนื่องจากต้องการให้ระบบมีเสถียรภาพตลอดเวลา ดังนั้นสามารถแสดงระบบของกระบวนการปรับค่าได้ดังแสดงในภาพ 2



ภาพ 2 แสดงระบบของกระบวนการปรับค่าผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัด [2]

จากภาพ 2 สามารถอธิบายหลักการทำงานของระบบได้ว่า เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการจะปรับปรุงหรือถือว่า $d(n)$ คือสัญญาณเสียงที่สนใจรวมกับสัญญาณเสียงรบกวน $x(n)$ คือสัญญาณเสียงรบกวน และ $y(n)$ คือสัญญาณที่ออกจากตัวควบคุมแล้ว ซึ่งจะมีรูปแบบการปรับตัวให้คล้ายกับสัญญาณรบกวน ในการทำงานของระบบจะพยายามปรับค่า $e(n)$ คือสัญญาณเสียงขาออกที่ต้องการหรือผลต่างระหว่าง $d(n)$ และ $y(n)$ ให้มีค่าน้อยที่สุด โดยใช้กระบวนการปรับค่าน้ำหนัก $w(n)$ ของตัวควบคุมเพื่อหักล้างสัญญาณเสียงรบกวน ณ ตำแหน่งที่สนใจให้หมดไป

จากภาพ 2 สัญญาณขาออกของวงจรกรอง (Filter Output) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1)

$$y(n) = \sum_{l=0}^{L-1} w_l(n)x(n-l) \tag{1}$$

โดยที่ n คือค่าเวลา

L คือค่าลำดับของสัมประสิทธิ์ตัวกรอง

$w(n)$ คือค่าน้ำหนักตัวที่ l ณ เวลาที่ n

ซึ่ง $w(n)$ จะถูกปรับใหม่โดยอัลกอริธึมแบบปรับตัว ส่วน $x(n)$ และ $y(n)$ คือสัญญาณเข้าและสัญญาณออกจากวงจรกรองตามลำดับ ดังนั้นสามารถแสดงค่าสัญญาณขาเข้า $x(n)$ ค่าน้ำหนัก $w(n)$ และสัญญาณขาออก $y(n)$ ได้ดังสมการ

$$X(n) = [x(n)x(n-1)...x(n-L+1)]^T \quad (2)$$

$$W(n) = [w_0(n) \quad w_1(n) \quad ... \quad w_{L-1}(n)]^T \quad (3)$$

$$\begin{aligned} y(n) &= W^T(n)X(n) \\ &= X^T(n)W(n) \end{aligned} \quad (4)$$

โดยทั่วไปสัญญาณขาออกของระบบกรองเสียงแบบปรับตัว จะถูกคำนวณเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ต้องการ (Desired Signal : $d(n)$) ซึ่งจะได้ผลต่างของสัญญาณเป็นค่าความผิดพลาด(Error : $e(n)$)ดังแสดงในสมการที่ (5)

$$\begin{aligned} e(n) &= d(n) - y(n) \\ &= d(n) - W^T(n)X(n) \end{aligned} \quad (5)$$

ในการปรับค่าน้ำหนักของ $w(n)$ หรือกระบวนการปรับค่า โดยทั่วไปจะมีวิธีการปรับค่าสัมประสิทธิ์อยู่หลากหลายวิธี วิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายวิธีหนึ่งคืออัลกอริธึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด ซึ่งเป็นวิธีที่มีความซับซ้อนในการคำนวณต่ำอีกทั้งยังมีความเร็วในการลู่เข้าหาคำตอบสุดท้ายที่ถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ดีจึงเป็นอัลกอริธึมที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ยังมีการปรับค่าแบบอัลกอริธึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดนอลมอลไลซ์ (Normalized Least-Mean-Square Algorithm) ซึ่งถือเป็นวิธีการที่ถูกพัฒนามาจากอัลกอริธึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพขึ้น

อัลกอริธึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด (Least- Mean-Square Algorithm, LMS Algorithm)

จาก Bernard [3] ในการปรับค่าน้ำหนักของ $w(n)$ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ค่าความผิดพลาด $e(n)$ มีค่าน้อยสุด ซึ่งวิธีพื้นฐานที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายสำหรับการหาค่าคือ ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (Mean-Square Error, MSE) ซึ่งเมื่อนำมาใช้กับการหาค่าในอัลกอริธึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด สามารถแสดงได้เป็น

$$J(n) \equiv E[e^2(n)] \quad (6)$$

เมื่อ $E[.]$ คือค่าความคาดหวัง (Expected Value) [3] ซึ่งการปรับค่าของน้ำหนักของ $w(n)$ ในการปรับตัวแบบอัลกอริธึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด จะอ้างอิงถึงการใช้วิธีสตีพเพสท์ดีเซนท์ (Steepest Descent Method) คือ

$$W(n+1) \equiv W(n) - \frac{\mu}{2}\nabla J(n) \tag{7}$$

เมื่อค่า μ คือ อัตราการปรับตัวสัมประสิทธิ์การลู่เข้า (Step Size) มีผลในการควบคุมเสถียรภาพของระบบและความเร็วในการปรับค่า โดยค่า μ ที่มากจะส่งผลให้ระบบมีการปรับตัวได้เร็วกว่า μ ที่น้อย แต่ก็พบว่าถึงแม้ระบบจะปรับตัวจนลู่เข้าสู่ค่าที่เหมาะสม (Optimal Value)แล้ว แต่การปรับค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองจะยังคงดำเนินต่อไป หมายความว่าจะยังคงมีการเปลี่ยนแปลงไปรอบ ๆ ค่าที่เหมาะสมยิ่งพารามิเตอร์ μ มีค่ามาก การเปลี่ยนแปลงรอบ ๆ ค่าที่เหมาะสมก็จะมีค่าสูง และหาก μ มีค่ามากเกินไปก็จะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ ส่วน $\nabla J(n)$ หมายถึงค่าเกรเดียนต์ของฟังก์ชั่นค่าความผิดพลาด (Error Function) แต่เนื่องจากในความเป็นจริงค่า $d(n)$ และ $x(n)$ ถือเป็นที่ไม่ทราบ ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้วิธีสตีพเพสท์ดีเซนท์ได้โดยตรง จึงต้องใช้วิธีหาเกรเดียนต์ของค่าความผิดพลาดกำลังสอง $e^2(n)$ เข้าช่วย โดยสามารถหาค่าประมาณของค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (Mean-Square Error) หรือ $\hat{J}(n)$ ที่เวลา n จะได้เป็น

$$\hat{J}(n) = e^2(n) \tag{8}$$

ดังนั้นค่าเกรเดียนต์คือ

$$\nabla \hat{J}(n) = 2[\nabla e(n)]e(n) \tag{9}$$

เมื่อแทนค่า $e(n)$ ด้วยสมการ (5) จะได้ [3]

$$\nabla e(n) = -X(n) \tag{10}$$

ดังนั้น

$$\nabla \hat{J}(n) = 2X(n)e(n) \tag{11}$$

เมื่อแทนค่าเกรเดียนต์ลงในอัลกอริธึมสตีพเพสท์ดีเซนท์ (Steepest Descent Algorithm) ก็ได้สมการการปรับค่าน้ำหนักของ $w(n)$ ดังแสดงในสมการที่ 12

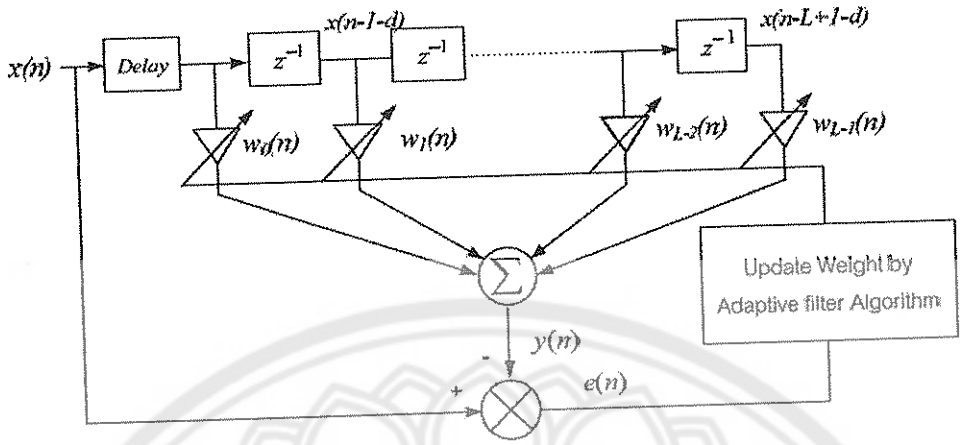
$$W(n+1) = w(n) + \mu X(n)e(n) \tag{12}$$

โดยการปรับค่าแบบอัลกอริธึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด ข้อจำกัดของเสถียรภาพ (The Stability Constraint) จะขึ้นอยู่กับค่าของอัตราการปรับตัว μ ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในตอนต้น ซึ่งค่า μ ที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง

$$0 < \mu < \frac{1}{L(signal\ \ power)}$$

ตัวปรับความคมชัดของเส้นสัญญาณแบบปรับตัวเอง (Adaptive Line Enhancer, ALE)

จาก [4] ตัวปรับความคมชัดของเส้นสัญญาณแบบปรับตัวเอง เป็นวิธีการที่คล้ายคลึงกับตัวกรองเสียงแบบปรับตัวซึ่งจะมีสัมประสิทธ์ (Coefficients) ซึ่งสามารถปรับตัวได้อย่างอิสระตามสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป โดยตัวปรับความคมชัดของเส้นสัญญาณแบบปรับตัวเองมีวัตถุประสงค์เพื่อการกำจัดส่วนประกอบของสัญญาณรบกวน (Wide-Band Noise) ของสัญญาณขาเข้า ซึ่งจะให้ส่วนของส่วนของเสียง (Narrowband Components) ผ่านออกมาได้ โดยการทำงานจะอาศัยความสัมพันธ์ของสัญญาณในการลดสัญญาณรบกวน และอีกส่วนที่แตกต่างจากตัวกรองแบบปรับค่าคือ เป็นการทำงานในลักษณะ 1 ช่องสัญญาณดังภาพ 3



ภาพ 3 แสดงแผนภาพของกระบวนการปรับค่าแบบตัวปรับความคมชัดของเส้นสัญญาณแบบปรับตัวเอง [4]

รูปแบบโดยทั่วไปของตัวปรับความคมชัดของเส้นสัญญาณแบบปรับตัวเอง ประกอบไปด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วนคือ ตัวกรองแบบปรับตัวเองและอัลกอริธึมแบบปรับตัวเช่นเดียวกับตัวกรองแบบปรับตัวเอง โดยจากรูปจะเห็นว่าสัญญาณขาออกของตัวปรับความคมชัดของเส้นสัญญาณแบบปรับตัวเองสามารถแสดงได้โดยสมการ

$$y(n) = \sum_{l=0}^{L-1} w_l(n)x(n-l-d) \tag{13}$$

โดยที่ n คือ ค่าเวลา

L คือ ค่าลำดับของสัมประสิทธิ์ตัวกรอง (Filter Coefficients)

d คือ ค่าหน่วงเวลาของสัญญาณ

$w(n)$ คือค่าน้ำหนัก (Weight) ตัวที่ l ณ เวลาที่ n ซึ่งจะถูกปรับโดยอัลกอริธึมแบบปรับตัวเอง ส่วน $x(n)$ และ $y(n)$ คือสัญญาณเข้าและสัญญาณออกจากวงจรกรองตามลำดับ ดังนั้นสามารถแสดงค่าสัญญาณขาเข้าไม่ผ่านค่าหน่วงเวลา $x(n)$ สัญญาณขาเข้าผ่านค่าหน่วงเวลา $x(n-d)$ ค่าน้ำหนัก $w(n)$ และสัญญาณขาออก $y(n)$ ได้ดังสมการ

$$X(n) \equiv [x(n)x(n-1)...x(n-l-d)]^T \quad (14)$$

$$X(n-d) \equiv [x(n-d)x(n-1-d)...x(n-l+1-d)]^T \quad (15)$$

$$W(n) \equiv [w_0(n)w_1(n)...w_{L-1}(n)]^T \quad (16)$$

$$y(n) \equiv [w^T(n)X(n-d)] = X^T(n-d)W(n) \quad (17)$$

โดยทั่วไปสัญญาณขาออกของระบบตัวกรองแบบปรับตัวจะถูกคำนวณเปรียบเทียบกับสัญญาณขาเข้าก่อนรวมค่าหน่วงเวลา $x(n)$ ซึ่งจะได้ผลต่างของสัญญาณเป็นค่าความผิดพลาด (Error, e(n)) ดังแสดงในสมการที่ 18

$$e(n) = x(n) - y(n) \quad (18)$$

ซึ่งการปรับค่าน้ำหนักของ $w(n)$ หรือกระบวนการปรับค่ามีอยู่หลายวิธี แต่ในงานวิจัยนี้จะนำวิธีอัลกอริธึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดมาใช้

โดยพบว่าสัญญาณที่ถูกหน่วงเวลาจะเกิดการไม่สัมพันธ์กันกับสัญญาณขาเข้าที่ไม่ผ่านค่าหน่วงเวลา แต่ส่วนของสัญญาณที่เป็นเสียงพูดจะยังคงสัมพันธ์กันอยู่เพราะคาบของสัญญาณโดยธรรมชาติของตัวสัญญาณเสียง และส่วนใหญ่เวลาที่หน่วงจะขึ้นอยู่กับค่าที่ทำให้สัญญาณที่ไม่ต้องการไม่เกิดความสัมพันธ์กัน

ค่าระดับความพึงพอใจ (Mean opinion score, MOS)

ค่าระดับความพึงพอใจ เป็นการสร้างขึ้นโดยใช้ค่าเฉลี่ยของกลุ่มมาตรฐาน เพื่อทดสอบความพึงพอใจของแต่ละบุคคล โดยที่จำนวนของผู้ทดสอบยิ่งมากจะมีผลต่อคุณภาพในการทดสอบ ซึ่งค่าระดับความพึงพอใจโดยทั่วไปจะใช้ดังตาราง 1 [5]

ตาราง 1 แสดงระดับความพึงพอใจ

MOS	คุณภาพ
5	ดีเยี่ยม
4	ดี
3	พอใช้
2	ไม่ดีพอ
1	แย่

การประเมินคุณภาพโดยใช้ค่าอัตราสัญญาณดั้งเดิมต่อเสียงรบกวน

ขั้นตอนสุดท้ายคือการวัดประสิทธิภาพของเสียงที่ผ่านการกรองสัญญาณรบกวนโดยเครื่องช่วยฟัง ระบบนี้นำเสนอการประเมินคุณภาพ โดยใช้การวัดอัตราสัญญาณดั้งเดิมต่อเสียงรบกวน (signal-to-noise Ratio) โดยการแบ่งเฟรม [6] ซึ่งโดยทั่วไปแล้วนั้น การวัดอัตราส่วนสัญญาณดั้งเดิมต่อสัญญาณรบกวน สามารถประเมินค่าในทั้งทางเวลาและในทางความถี่ ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้การประเมินในทางความถี่ดังสมการ (19)

$$fwSNRseg = \frac{10}{M}\sum_{m=0}^{M-1}\frac{\sum_{j=1}^{K} W(m,j)\log_{10}[X^2(m,j)/(X(m,j)-\hat{X}(m,j))^2]}{\sum_{j=1}^{K} W(m,j)} \qquad (19)$$

โดยที่

$W(m,j)$ คือ ค่าน้ำหนักที่อยู่บนตำแหน่ง j ของแบนด์ความถี่

K คือ จำนวนของแบนด์ความถี่

M คือ จำนวนมากสุดของเฟรมในสัญญาณ

$X(m,j)$ คือ แอมปลิจูดแถบพลังงานของสัญญาณดั้งเดิมในตำแหน่ง j ของแบนด์ทางความถี่ และตำแหน่ง m เฟรม

$\hat{X}(m,j)$ คือ แอมปลิจูดแถบพลังงานของสัญญาณที่ปรับปรุงในแบนด์เดียวกัน

ซึ่งข้อดีของการวัดค่าอัตราส่วนสัญญาณดั้งเดิมต่อสัญญาณรบกวนในทางความถี่ [6] คือ มีความละเอียดในการปรับค่าน้ำหนักในแต่ละแถบความถี่ซึ่งจะมีระดับพลังงานแตกต่างกันตามสัญญาณเสียงที่นำมาทดสอบ

ฟังค์ชัน $W(m, j)$ จะสามารถหาค่าได้ 2 วิธีด้วยกัน

วิธีแรก เป็นการหาค่าจากแถบพลังงานของสัญญาณดั้งเดิม

$$w(j,m) = |X(j,m)|^{\gamma} \tag{20}$$

โดยที่

$X(j,m)$ คือ ขนาดของแถบตัวกรองสัญญาณดั้งเดิมในตำแหน่งที่ j ของแถบเฟรมข้อมูลที่ m

γ คือ องค์ประกอบของกำลัง โดยจากผลการทดสอบ [6] พบว่าที่ γ= 0.2 จะได้ความสัมพันธ์มากสุด

วิธีที่สอง เป็นการหาค่าจากการเปิดตารางของค่าน้ำหนัก (Articulation index weight)

$$W(j,m) = A(j) \tag{21}$$

โดยที่

$A(j)$ คือ ตารางของค่าน้ำหนักในอ้างอิง [6]

แต่ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการแรกในการคำนวณหาค่าน้ำหนัก