บทที่ 4

ผลจากการจำลอง

เนื้อหาของบทนี้จะกล่าวถึงผลการจำลองของระบบลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการวัดสัญญาณไฟฟ้าของกล้ามเนื้อลาย และระบบตรวจจับจุดกลืนสำหรับผู้ป่วยที่มีปัญหาการกลืน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 การจำลองระบบลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการวัดสัญญาณไฟฟ้าของกล้ามเนื้อลายด้วยโปรแกรม MATLAB

จากหลักการลดสัญญาณรบกวนโดยการใช้วงจรกรองปรับตัว ADALINE และอัลกอริทึม LMS ที่ได้กล่าวในบทที่ 3 หัวข้อ 3.1 พบว่าพารามิเตอร์ที่จะถูกพิจารณาหาค่าที่เหมาะสมสำหรับระบบลดสัญญาณรบกวนที่ไม่ใช้สัญญาณอ้างอิงจากภายนอกมี 3 ค่าได้แก่

1. ค่าหน่วงเวลา (Delay) เป็นค่าที่ต้องใช้ในการระบุจุดเริ่มต้นของข้อมูลที่จะนำมาใช้เป็นอินพุทของวงจรกรองปรับตัว ADALINE หากใช้ค่าหน่วงเวลาที่สูงเกินไปจะทำให้ต้องใช้หน่วยความจำของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลมาก ซึ่งอาจจะไม่เพียงพอต่อการโปรแกรมอัลกอริทึมได้

2. จำนวน Tapped delay line (L) ของวงจรกรองปรับตัว ADALINE เป็นค่าที่ระบุถึงความยาวของข้อมูลที่ต้องใช้ในการคำนวณ มีผลต่อความซับซ้อนของการคำนวณในตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล หากจำนวน Tapped delay line มีค่าสูง จะทำให้จำนวนครั้งของการคูณระหว่างจำนวนค่าน้ำหนักของวงจรกรองปรับตัว ADALINE และอินพุทมีค่าสูงตามไปด้วย อาจจะทำให้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลไม่สามารถคำนวณอัลกอริทึมให้เสร็จสิ้นได้ภายในระยะเวลาที่เหมาะสม

3. ค่าอัตราการเรียนรู้(α) เป็นพารามิเตอร์ที่เป็นองค์ประกอบของอัลกอริทึม LMS ภายในวงจรกรองปรับตัว ADALINE ควรเลือกค่าประมาณให้น้อยกว่าหรือเท่ากับ $\frac{1}{\lambda_{\max}}$ ซึ่ง $\frac{1}{\lambda_{\max}}$ มีค่าโดยประมาณเท่ากับ $\frac{1}{LP_x}$ เพื่อเสถียรภาพของอัลกอริทึม [22] โดยที่ L คือ จำนวน Tapped delay line และ P_x คือ ค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณที่ต้องการจะกำจัดสัญญาณรบกวน

การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจะถูกชี้วัดจากตัวบ่งชี้ต่อไปนี้

- อัตราการลู่เข้า (Convergent rate)
- ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficients [23])
- ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยแบบนอมอลไลซ์ (Normalized mean square error, NMSE)

โดยอัตราการลู่เข้าแสดงถึงความเร็วในการเข้าสู่คำตอบของวงจรกรองปรับตัว ADALINE ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยแบบนอมอลไลซ์เป็นค่าที่ชี้คุณภาพการกำจัดสัญญาณรบกวนของวงจรกรองปรับตัว ADALINE ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ดีควรมีค่าเข้าใกล้หนึ่ง และค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยแบบนอมอลไลซ์ควรมีค่าเข้าใกล้ศูนย์

ทั้งนี้การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับระบบลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการวัดสัญญาณไฟฟ้าของกล้ามเนื้อลายโดยการใช้วงจรกรองปรับตัว ADALINE ในงานวิจัยนี้ทำได้โดยการเขียนโปรแกรมจำลองอัลกอริทึมในการลดสัญญาณรบกวนบนโปรแกรม MATLAB ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1.1 วิธีการและอุปกรณ์

การจำลองระบบลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการวัดสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อลาย เริ่มต้นโดยทำการจำลองสัญญาณรบกวนของระบบไฟฟ้า 50 Hz ด้วยสัญญาณคลื่นรูปไซน์ความถี่ 50 Hz แอมพลิจูด 0.8 ซึ่งจะทำให้ได้ค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณ คือ $P_x = \frac{A^2}{2} = \frac{0.8^2}{2} =$ 0.32 และจำลองสัญญาณไฟฟ้าของกล้ามเนื้อลายด้วยการนำสัญญาณสุ่มแบบเกาส์เซียนไปผ่านวงจรกรองผ่านแถบความถี่ซึ่งมีคุณสมบัติสอดคล้องกับคุณสมบัติทางความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าของกล้ามเนื้อลาย โดยวงจรกรองที่ใช้เป็นวงจรกรองผ่านแถบความถี่เฟสเชิงเส้นออกแบบด้วยวิธีค่าการกระเพื่อมคงที่ (Equiripple) ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบดังต่อไปนี้

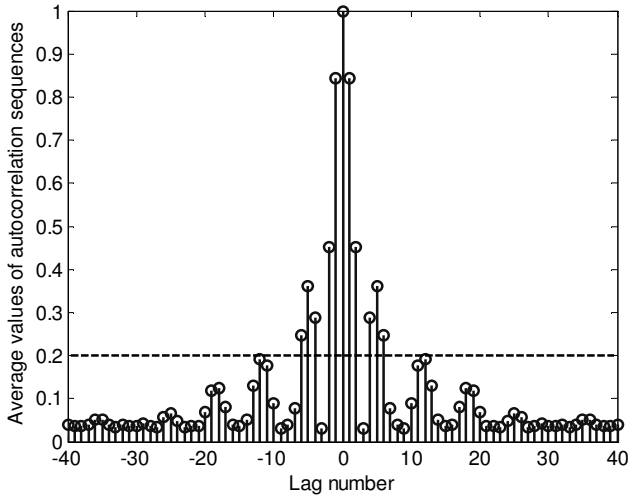
จุดสิ้นสุดของแถบความถี่หยุดที่ 1 คือ	10	Hz
จุดเริ่มต้นของแถบความถี่ผ่าน คือ	20	Hz
จุดสิ้นสุดของแถบความถี่ผ่าน คือ	145	Hz
จุดเริ่มต้นของแถบความถี่หยุดที่ 2 คือ	155	Hz
ค่าการกระเพื่อมของแถบความถี่ผ่าน คือ	1	dB
ค่าการลดทอนของแถบความถี่หยุดทั้งสอง คือ	30	dB

สัญญาณที่ใช้ในการจำลองจะเป็นสัญญาณไฟฟ้าของกล้ามเนื้อลายรวมกับสัญญาณรบกวนของระบบไฟฟ้า 50 Hz ที่สร้างขึ้น จำนวน 200 สัญญาณ จำนวน Tapped delay line ที่จะถูกทดสอบในการจำลอง คือ 10, 20, 40, 60, และ 80 ค่าอัตราการเรียนรู้ที่ใช้ในการจำลองคำนวณจากร้อยละ 5 ของสูตร $\frac{1}{LP_x}$ ได้แก่ 0.0156, 0.0078, 0.0039, 0.0026, และ 0.0019 ตามลำดับ สำหรับผลของตัวบ่งชี้ที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้ได้มาจากการหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณจำนวน 200 สัญญาณ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1.2 ผลการจำลอง

- ค่าหน่วงเวลา

ค่าหน่วงเวลา พิจารณาได้จากการคำนวณค่าอัตสหสัมพันธ์เฉลี่ยของสัญญาณไฟฟ้าของกล้ามเนื้อลาย จำนวน 200 สัญญาณที่ค่าเหลื่อมล้าหลัง (lag) ต่าง ๆ โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงดังภาพประกอบ 4-1 ซึ่งแสดงได้ว่าค่าหน่วงเวลาคิดจากขีดเริ่มเปลี่ยนของค่าอัตสหสัมพันธ์เฉลี่ยที่ต่ำกว่า 0.2 ซึ่งสามารถเห็นได้จากกราฟโดยประมาณตรงกับค่าเหลื่อมล้าหลังเท่ากับ 10 ดังนั้นในการจำลองขั้นตอนถัดไปจะใช้ค่าหน่วงเวลาล้าหลังเป็นจำนวน 10 ตัวอย่าง (samples)



ภาพประกอบ 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตสหสัมพันธ์เฉลี่ยและค่าเหลื่อมล้าหลัง

- จำนวน Tapped delay line และอัตราการเรียนรู้

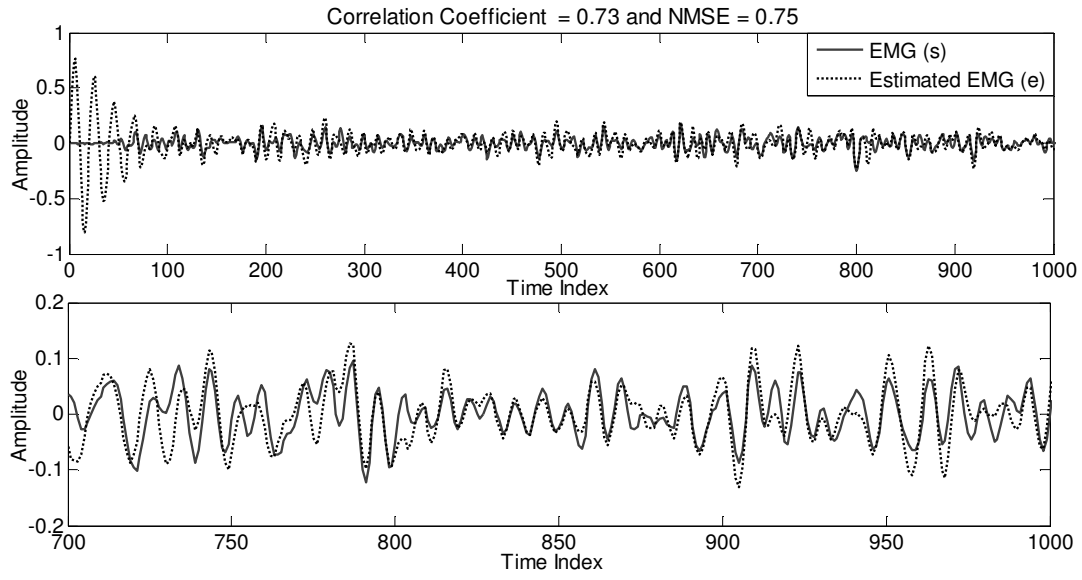
เมื่อใช้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังกล่าวในวิธีการจำลอง และวิเคราะห์ความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวนของวงจรกรองปรับตัว ADALINE ด้วยตัวบ่งชี้ โดย

ค่าสัมประสิทธ์สหสัมพันธ์และค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยแบบนอมอลไลซ์จะถูกแสดงในรูปของค่าเฉลี่ยบวกและลบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งผลของตัวบ่งชี้จากการจำลองแสดงดังตารางที่ 4-1

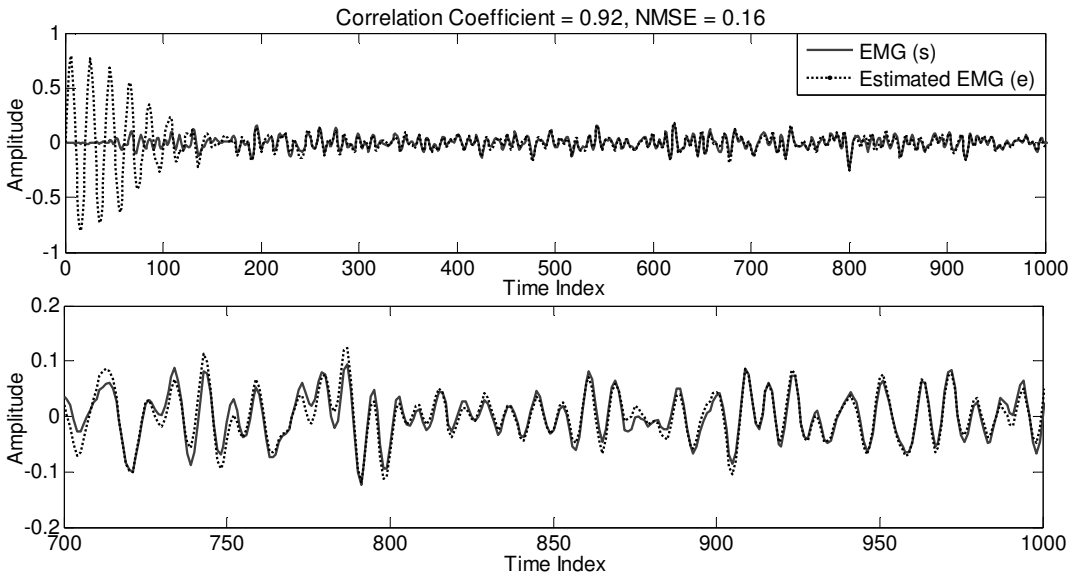
ตารางที่ 4-1 ผลของตัวบ่งชี้จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB

Tapped delay line	Learning rate	Convergent rate (sample)	Correlation coefficient	NMSE
10	0.0156	150	0.73 ± 0.02	0.75 ± 0.04
20	0.0078	170	0.82 ± 0.02	0.44 ± 0.04
40	0.0039	200	0.88 ± 0.02	0.26 ± 0.04
60	0.0026	200	0.91 ± 0.02	0.19 ± 0.03
80	0.0019	200	0.92 ± 0.02	0.16 ± 0.03

จากตารางที่ 4-1 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าอัตราการเรียนรู้มีค่าต่ำลง อัตราการลู่เข้าจะช้าลง แต่วงจรกรองปรับตัว ADALINE สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนได้ดีขึ้น สำหรับจำนวน Tapped delay line เมื่อมีค่าต่ำลง อัตราการลู่เข้าจะเร็วขึ้นแต่ประสิทธิภาพการกำจัดสัญญาณรบกวนของวงจรกรองปรับตัวก็ลดลงตามไปด้วย โดยความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวนของวงจรกรองปรับตัว ADALINE เทียบกับค่าสัมประสิทธ์สหสัมพันธ์และค่า NMSE แสดงดังภาพประกอบ 4-2



(a) ค่าสัมประสิทธ์สหสัมพันธ์ 0.73 และ ค่า NMSE 0.76 ที่ Tapped delay line =10, α = 0.0156



(b) ค่าสัมประสิทธ์สหสัมพันธ์ 0.92 และ ค่า NMSE 0.16 ที่ Tapped delay line =80, $\alpha = 0.0019$

ภาพประกอบ 4-2 ความสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนเทียบกับค่าสัมประสิทธ์สหสัมพันธ์และค่า NMSE ที่ต่างกัน

จากภาพประกอบ 4-2 จะสังเกตได้ว่าเมื่อค่าสัมประสิทธ์สหสัมพันธ์มีค่าเข้าใกล้ 1 และค่า NMSE เข้าใกล้ 0 สัญญาณไฟฟ้าของกล้ามเนื้อลายที่ผ่านการกำจัดสัญญาณรบกวนมีความใกล้เคียงกับสัญญาณไฟฟ้าของกล้ามเนื้อลายดั้งเดิมมากยิ่งขึ้น

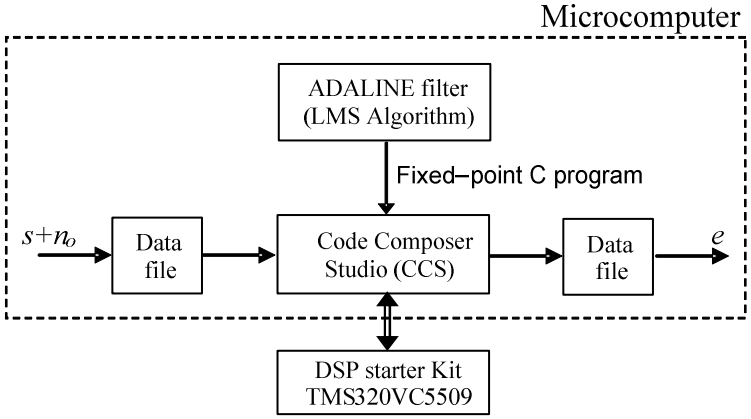
เราสามารถนำเอาความรู้ในหัวข้อนี้ไปใช้ในการเลือกพารามิเตอร์ให้เหมาะสมสำหรับการโปรแกรมอัลกอริทึมบนตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลได้ เช่น ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลที่มีหน่วยความจำต่ำหรือความเร็วของการประมวลผลสัญญาณต่ำ อาจจะต้องลดจำนวน Tapped Delay Line ของวงจรกรองปรับตัว ADALINE ลง แม้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดสัญญาณรบกวนของวงจรกรองจะลดลงแต่อาจจะยังอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ หรือในการประยุกต์ใช้งานบางอย่างอาจจะลดค่าอัตราการเรียนรู้ลงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสัญญาณรบกวนของวงจรกรอง โดยที่อัตราการลู่เข้าที่ช้าลงไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการใช้งานโดยรวม

4.2 การจำลองระบบลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการวัดสัญญาณไฟฟ้าของกล้ามเนื้อลายด้วยโปรแกรม Code Composer Studio (CCS)

จากหัวข้อ 4.1 ได้ทำการออกแบบโปรแกรมเพื่อจำลองการทำงานของระบบลดสัญญาณรบกวนโดยการใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งทำให้เกิดความเข้าใจในส่วนของอัลกอริทึมและค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการลดสัญญาณรบกวน สำหรับการออกแบบโปรแกรมอัลกอริทึมระบบลดสัญญาณรบกวนเพื่อจำลองการทำงานในหัวข้อนี้กระทำบนตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล ด้วยภาษาซีแบบ Fixed – point [24], [25] โดยทำการติดต่อระหว่างไมโครคอมพิวเตอร์และตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลด้วยโปรแกรม CCS บนบอร์ด DSK TMS320VC5509A

4.2.1 วิธีการและอุปกรณ์

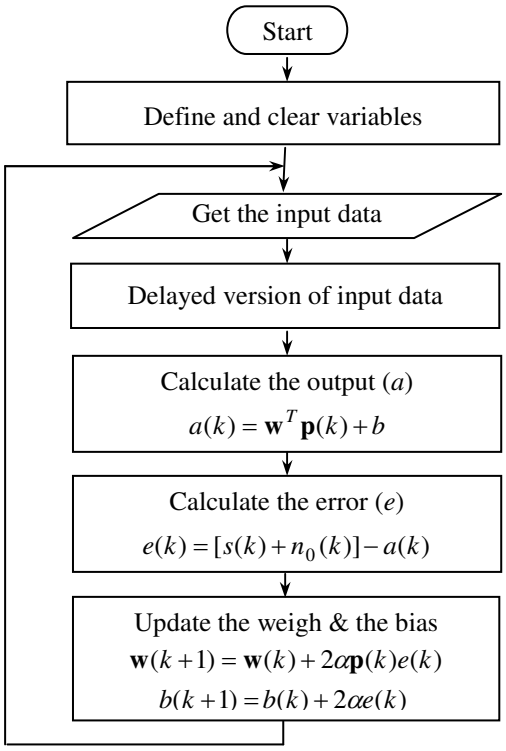
การจำลองระบบลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการวัดสัญญาณไฟฟ้าของกล้ามเนื้อลายโดยการใช้วงจรกรอง ADALINE และอัลกอริทึม LMS บนโปรแกรม CCS สำหรับบอร์ด TMS320VC5509A มีกระบวนการจำลองดังแสดงในภาพประกอบ 4-3



ภาพประกอบ 4-3 ไดอะแกรมการจำลองอัลกอริทึมลดสัญญาณรบกวนโดยการใช้วงจรกรองปรับตัว ADALINE และอัลกอริทึม LMS บนบอร์ด TMS320VC5509A

จากภาพประกอบ 4-3 โปรแกรม CCS อ่านข้อมูลอินพุทจากไฟล์ที่สร้างจากโปรแกรม MATLAB ในรูปแบบเลขจำนวนเต็ม 16 บิตโดยใช้รูปแบบ Q.15 เพื่อใช้เป็นสัญญาณอินพุท ($s+n_0$) ให้กับอัลกอริทึมลดสัญญาณรบกวนที่ออกแบบโปรแกรมด้วยภาษาซีแบบ Fixed – point โดยโปรแกรม CCS จะติดต่อกับบอร์ด DSK TMS320VC5509A เพื่อประมวลผลสัญญาณตามโปรแกรมที่ได้

ออกแบบไว้ ซึ่งมีกระบวนการทำงานของอัลกอริทึมดังภาพประกอบ 4-4 จากนั้นค่าสัญญาณเอาท์พุทของระบบ (e) ที่ได้จะถูกโปรแกรม CCS เก็บบันทึกเป็นไฟล์



ภาพประกอบ 4-4 กระบวนการทำงานของระบบลดสัญญาณรบกวนโดยการใช้วงจรกรองปรับตัว ADALINE ที่ใช้อัลกอริทึมแบบ LMS

สำหรับการจำลองสัญญาณไฟฟ้าของกล้ามเนื้อลาย ค่าพารามิเตอร์และตัวบ่งชี้ความสามารถในการลดสัญญาณรบกวนของระบบลดสัญญาณรบกวนที่ใช้ในการทดสอบเป็นไปตามการจำลองบนโปรแกรม MATLAB ในหัวข้อ 4.1 โดยค่าตัวเลขที่ใช้จะถูกแปลงให้อยู่ใน Q.15 format และผลของตัวบ่งชี้ที่จะกล่าวถึงต่อไปได้มาจากการหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณจำนวน 3 สัญญาณ

4.2.2 ผลการจำลอง

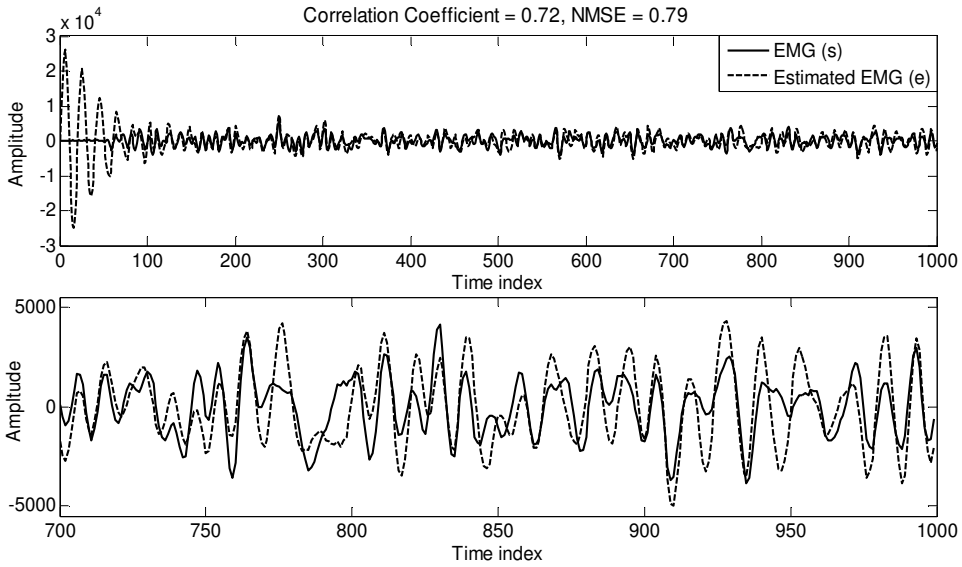
ผลการจำลองโปรแกรมจะแสดงด้วยตัวบ่งชี้ของค่าสัมประสิทธ์สหสัมพันธ์และค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยแบบนอมอลไลซ์ในรูปของค่าเฉลี่ยบวกและลบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังแสดงตามตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ผลของตัวบ่งชี้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Code Composer Studio

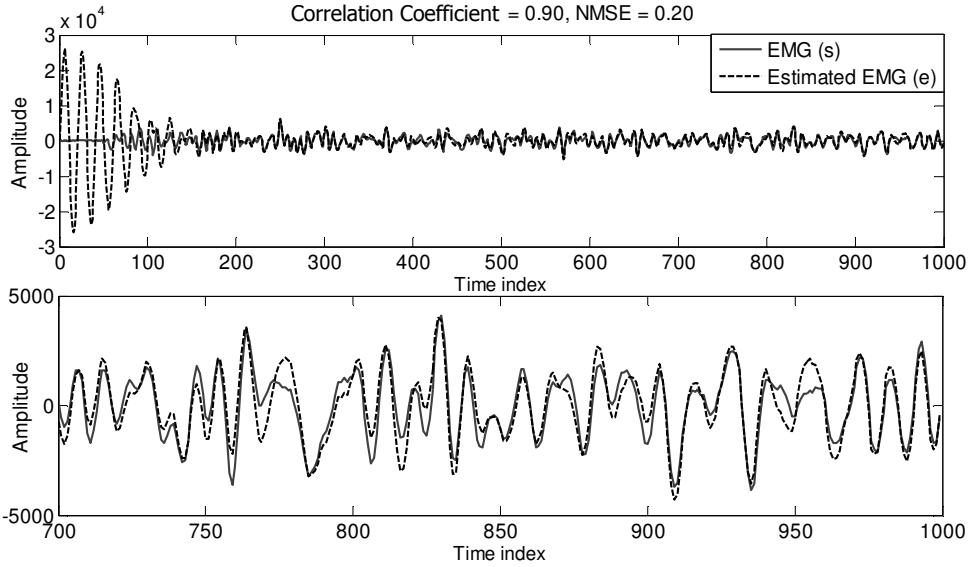
Tapped delay line	Learning rate	Convergent rate (sample)	Correlation coefficient	NMSE
10	511	100	0.72 ± 0.03	0.79 ± 0.03
80	62	150	0.90 ± 0.02	0.20 ± 0.02
The speed of processing				
Tepped delay line	Learning rate	Clock cycle/sample		Time (μs)
10	511	815		4.08
80	62	6,379		31.90

จากตารางที่ 4-2 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าอัตราการเรียนรู้มีค่าต่ำลง อัตราการลู่เข้าจะช้าลง แต่วงจรกรอง ADALINE สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนได้ดีขึ้น สำหรับจำนวน Tapped delay line เมื่อมีค่าต่ำลง อัตราการลู่เข้าจะเร็วขึ้นแต่ประสิทธิภาพการกำจัดสัญญาณรบกวนของวงจรกรองแบบปรับตัวก็ลดลงตามไปด้วย สำหรับเวลาที่ใช้ในการประมวลผลต่อหนึ่งจุดสัญญาณในกรณีที่จำนวน Taped delay line เป็น 10 และ 80 taps คือ 4.08 μs และ 31.90 μs ตามลำดับ

ทั้งนี้ความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวนของระบบลดสัญญาณรบกวนที่ได้จากโปรแกรมภาษาซีแบบ Fixed – point บนบอร์ด DSK TMS320VC5509A แสดงดังภาพประกอบ 4-5



(a) ผลของสัญญาณเอาท์พุทของระบบ (e) กับสัญญาณไฟฟ้าของกล้ามเนื้อลาย (s) เมื่อ Tapped delay line = 10, α = 511



(b) ผลของสัญญาณเอาท์พุทของระบบ (e) กับสัญญาณไฟฟ้าของกล้ามเนื้อลาย (s) เมื่อ Tapped delay line = 80, α = 62

ภาพประกอบ 4-5 ผลการจำลองอัลกอริทึมลดสัญญาณรบกวนจากบอร์ด DSK TMS320VC5509A

จากภาพประกอบ 4-5 จะสังเกตได้ว่าในกรณีที่จำนวน Tapped delay line มาก ค่าอัตราการเรียนรู้น้อย ค่าสัมประสิทธ์สหสัมพันธ์จะมีค่าเข้าใกล้ 1 และค่า NMSE เข้าใกล้ 0 สัญญาณเอาท์พุทของ

ระบบหรือสัญญาณไฟฟ้าของกล้ามเนื้อลายที่ผ่านการกำจัดสัญญาณรบกวนมีความใกล้เคียงกับสัญญาณไฟฟ้าของกล้ามเนื้อลายดั้งเดิมมากยิ่งขึ้น

4.3 การจำลองระบบตรวจจับจุดเริ่มต้นของการกลืนสำหรับผู้ป่วยที่มีปัญหาการกลืนด้วยโปรแกรม Code Composer Studio (CCS)

ในบทที่ 3 หัวข้อ 3.2 ได้กล่าวถึงวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่สามารถวิเคราะห์จุดเริ่มต้นของการกลืนซึ่งทำได้โดยการหากำลังเฉลี่ยของสัญญาณไฟฟ้าจากกล้ามเนื้อลิ้นของผู้ป่วยที่กลืนลำบากทุก ๆ 60 มิลลิวินาที ดังเป็นไปตามสมการที่ (3-21) เมื่อนำหลักการดังกล่าวมาออกแบบระบบด้วยวิธีการเชิงตัวเลข จะได้สมการในการคำนวณกำลังเฉลี่ยของสัญญาณ ดังสมการที่ (4-1)

$$P_{av} = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{1}{N} V_{in}^{2}(n) \tag{4-1}$$

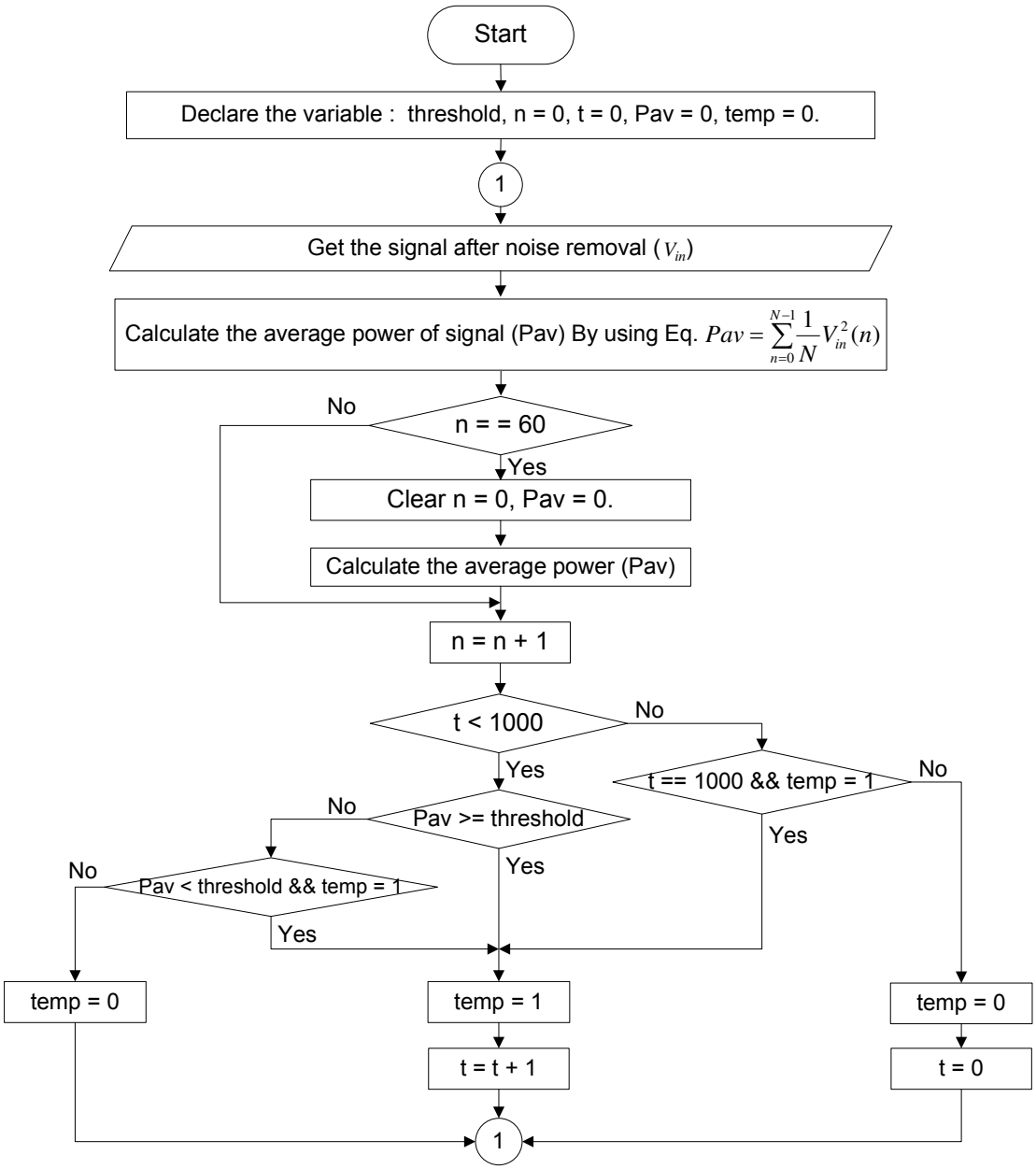
โดยที่ $N = 60$

P_{av} แทนกำลังเฉลี่ยของสัญญาณไฟฟ้าจากกล้ามเนื้อลิ้น

$V_{in}(n)$ แทนสัญญาณไฟฟ้าจากกล้ามเนื้อลิ้น

จากวิธีการทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (4-1) จึงได้มีการออกแบบระบบตรวจจับจุดเริ่มต้นการกลืนโดยมีกระบวนการทำงานของระบบ ดังแสดงในภาพประกอบ 4-6 ซึ่งทำได้โดยการรับสัญญาณไฟฟ้าจากกล้ามเนื้อลิ้นมาทำการหาค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณ (โดยจะทำการรีเซตใหม่ทุก ๆ 60 ตัวอย่าง (Sample)) จากนั้นนำค่ากำลังเฉลี่ยที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง หากค่ากำลังเฉลี่ยมีค่าสูงกว่าค่าอ้างอิง จะถือว่ามีการกลืนเกิดขึ้นและระบบจะส่งสัญญาณ “1” ไปจนครบจำนวน 1000 ตัวอย่าง (โดยไม่คำนึงถึงค่ากำลังเฉลี่ยในเวลานั้น ๆ ว่าสูงหรือต่ำกว่าค่าอ้างอิง)

ทั้งนี้ในการกำหนดค่าอ้างอิงสำหรับระบบตรวจจับจุดกลืน เมื่อนำการหาค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณไฟฟ้าจากกล้ามเนื้อลิ้นทุก ๆ 60 มิลลิวินาทีมาประยุกต์ใช้กับผู้ป่วยจริง จะพบว่าค่าอ้างอิงของผู้ป่วยแต่ละคนจะแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดของอาหารและความรุนแรงของโรค เป็นต้น ในระยะแรกของการประยุกต์ใช้ ผู้ป่วยจะต้องทดลองปรับเปลี่ยนค่าอ้างอิง จนกระทั่งได้ค่าที่เหมาะสมและสามารถทำงานเข้ากับเครื่องได้เป็นอย่างดี



ภาพประกอบ 4-6 กระบวนการทำงานของระบบตรวจจับจุดกลืน

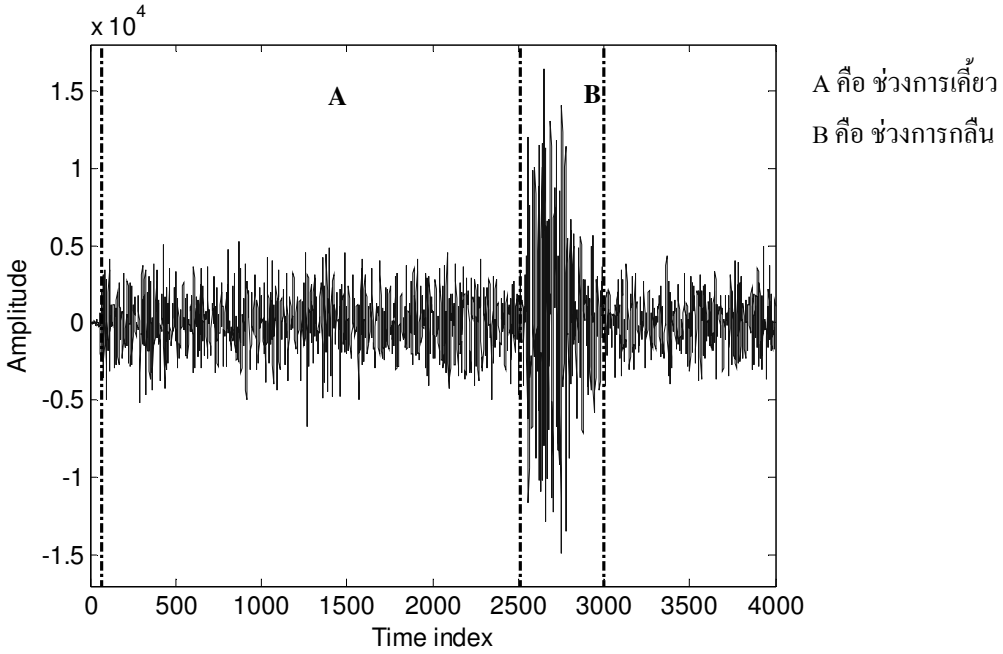
4.3.1 วิธีการจำลอง

วิธีการจำลองระบบตรวจจับจุดกลืน เริ่มต้นด้วยการจำลองสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อลิ้นบนโปรแกรม MATLAB โดยมีคุณสมบัติทางความถี่ของสัญญาณเป็นไปตามการจำลองสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อในหัวข้อ 4.1.1 และทำให้มีลักษณะรูปร่างของสัญญาณในช่วงที่มีการเคี้ยวและการกลืนใกล้เคียงกับสัญญาณจริงตามงานวิจัยที่ [7] ในรูปแบบเลขจำนวนเต็ม 16 บิต

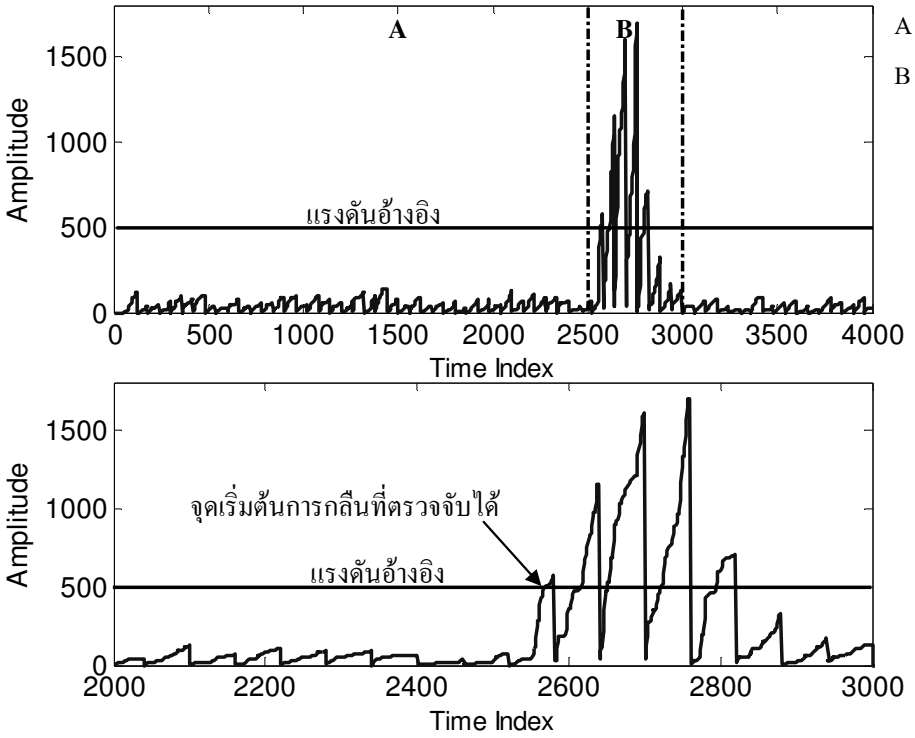
โดยใช้รูปแบบ Q.15 เพื่อใช้เป็นสัญญาณอินพุท (V_{in}) ให้กับอัลกอริทึมตรวจจับจุดกลืนที่ออกแบบโปรแกรมด้วยภาษาซีบนโปรแกรม CCS ที่ติดต่อกับบอร์ด DSK TMS320VC5509A เพื่อประมวลผลสัญญาณตามโปรแกรมที่ได้ออกแบบไว้ จากนั้นค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อและสัญญาณทริกเกอร์ ที่ได้จะถูกโปรแกรม CCS เก็บบันทึกเป็นไฟล์ สำหรับนำไปแสดงผลบนโปรแกรม MATLAB (เนื่องจากเครื่องมือ Graphic display ของโปรแกรม CCS สามารถแสดงผลได้สูงสุดเพียง 2048 ค่าเท่านั้น)

4.3.2 ผลการจำลอง

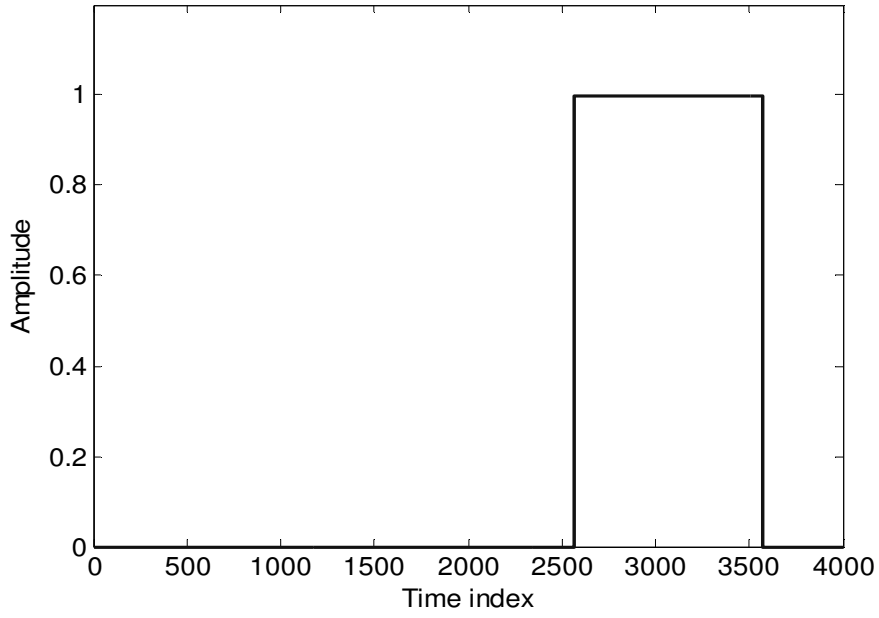
เมื่อนำสัญญาณไฟฟ้าจากกล้ามเนื้อลิ้นดังแสดงในภาพประกอบ 4-7 มาผ่านระบบตรวจจับจุดกลืนที่ได้ออกแบบไว้ จะได้รูปร่างของสัญญาณกำลังเฉลี่ยดังแสดงในภาพประกอบ 4-8 และเมื่อระบบทำการเปรียบเทียบกำลังเฉลี่ยของสัญญาณกับค่าอ้างอิง ซึ่งถ้าหากค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณมีค่าสูงกว่าค่าอ้างอิง ก็จะถือว่ามีการกลืนเกิดขึ้นและจะส่งสัญญาณทริกเกอร์ที่มีความกว้างพัลส์หนึ่งวินาทีออกไป โดยรูปร่างของสัญญาณทริกเกอร์แสดงดังในภาพประกอบ 4-9 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าระบบทำงานได้ถูกต้องตามที่ต้องการ กล่าวคือ สามารถคำนวณกำลังเฉลี่ยของสัญญาณไฟฟ้าจากกล้ามเนื้อลิ้นทุก ๆ 60 มิลลิวินาที และส่งสัญญาณทริกเกอร์เป็นเวลา 1 วินาทีเมื่อตรวจพบจุดเริ่มต้นของการกลืน นอกจากนี้พบว่าเวลาที่ใช้ในการประมวลผลของระบบตรวจจับจุดกลืนใช้เวลาเพียง 520 นาโนวินาทีต่อรอบการคำนวณ



ภาพประกอบ 4-7 สัญญาณไฟฟ้าของการกลืนจากกล้ามเนื้อลิ้น



ภาพประกอบ 4-8 กำลังเฉลี่ยของสัญญาณไฟฟ้าของการกลืนจากกล้ามเนื้อลิ้น



ภาพประกอบ 4-9 รูปร่างของสัญญาณทริกเกอร์ที่ส่งต่อไปยังวงจรสร้างสัญญาณกระตุ้นกล้ามเนื้อ