การประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นวงจรกรองโครงข่ายประสาทเชิงเส้นแบบปรับตัว
Application of a Microcontroller for Adaptive Linear Neural Network Filter

โสภาพรรณ สุวรรณสว่าง[1] สุรศักดิ์ ปานคำราม[2] หฤทัย ดิ้นสกุล[1] และ ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์[2]

[1]โปรแกรมวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
sopapun@gmail.com
[2]โปรแกรมวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
piya@npru.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC30F2010 เป็นวงจรกรองโครงข่ายประสาทเชิงเส้นแบบปรับตัว (adaptive linear neural network filter) หรือวงจรกรอง ADALINE ที่ใช้อัลกอริทึมแบบค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด (least mean square algorithm: LMS) เพื่อศึกษาความสามารถของวงจรกรอง ADALINE ที่ถูกสังเคราะห์ลงบน dsPIC30F2010 ในการคัดแยกระหว่างสัญญาณที่ต้องการใช้งานและสัญญาณรบกวนอื่นๆ โดยทำการทดสอบด้วยสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 50 – 500 Hz จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ (function generator) และกำหนดพารามิเตอร์ของวงจรกรองด้วยค่าอัตราการเรียนรู้เท่ากับ 0.005, ค่าหน่วงเวลาเท่ากับ 10, จำนวน Tapped delay line เท่ากับ 9 และได้ใช้อัตราการสุ่มสัญญาณในการประมวลผลเท่ากับ 1000 ข้อมูลต่อวินาที ความละเอียดขนาด 10 บิต ผลการทดสอบพบว่าวงจรกรองดังกล่าวสามารถทำงานได้ดีในช่วงความถี่ 50 – 100 Hz ทั้งนี้ประสิทธิภาพของวงจรกรองขึ้นอยู่กับการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งเป็นข้อจำกัดด้านทรัพยากรของ dsPIC30F2010 ที่ไม่สามารถกำหนดให้มีความสามารถสูงตามต้องการได้ หากนำไปประยุกต์ใช้งานจริงก็ควรคำนึงถึงประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดสัญญาณรบกวนที่สอดคล้องกับทรัพยากรของไมโครคอนโทรลเลอร์ เช่น ความเร็วในการประมวลผล หรือหน่วยความจำ เป็นต้น

คำสำคัญ: ไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรกรองแบบปรับตัว

Abstract

This article presents an application of dsPIC30F2010 microcontroller for adaptive linear neural network (ADALINE) filter based on a least mean-squared (LMS) algorithm. This research aims at investigating the capability of ADALINE filter built on dsPIC30F2010 microcontroller to remove interference signal from the desired signal. We use a sine wave signal at 50 – 500 Hz generated from a function generator as an input signal in this experiment. The parameters used for testing the performance of the ADALINE adaptive filter are as follows: the number of tapped delay lines is 9, a delay is 10, and a learning rate is 0.005. The sampling rate at 1000 samples/second was used in data acquisition. Each sample was collected with 10-bit resolution. Results from the real-time implementation on dsPIC30F2010 demonstrate that it can successfully work in the frequency range of 50 – 100 Hz. However, the performance of the filter depends on many parameters. Therefore, in order to implement the algorithm on microcontroller with resource constraint at the most efficient level, the parameters must be carefully selected to suit the specific application.

Keywords: Microcontroller, Adaptive filter

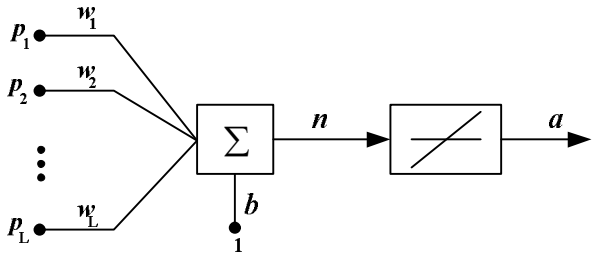
1. บทนำ

วงจรกรองความถี่ (filter) เป็นวงจรที่มีความสำคัญวงจรหนึ่งในงานด้านวิศวกรรม ไม่ว่าจะเป็นระบบสื่อสาร ระบบควบคุม หรืองานทางด้านเครื่องมือแพทย์ โดยวงจรกรองความถี่แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบคือ วงจรกรองความถี่แบบแอนะล็อก และวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล ซึ่งทั้งสองรูปแบบมีข้อดี-ข้อเสียต่างกัน แต่ในปัจจุบันมีการใช้วงจรกรองความถี่แบบดิจิทัลมากขึ้น เนื่องจากมีเสถียรภาพดีกว่า และมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า เป็นต้น งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัลบนไมโครคอนโทรเลอร์ตระกูล dsPIC30F2010 โดยเลือกใช้วงจรกรองปรับตัวได้ (adaptive filter) ที่มีโครงสร้างแบบการทำนาย (prediction) [1] ร่วมกับโครงข่ายประสาท ADALINE (adaptive linear neuron network) [2-3] และมีกฎการเรียนรู้แบบค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด (least mean square : LMS) [4] เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของวงจรกรอง ADALINE และ dsPIC30F2010 ในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง เช่น การลดสัญญาณรบกวนในแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำรอง (*uninterruptible power supply :* UPS) ซึ่งต้องการกรองสัญญาณฮาร์มอนิก (harmonic) ออกจากสัญญาณความถี่พื้นฐาน 50 Hz [5] หรือการลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการวัดสัญญาณทางชีวภาพ เช่น คลื่นไฟฟ้าหัวใจ คลื่นสมอง สัญญาณไฟฟ้าของกล้ามเนื้อ ที่มีสัญญาณรบกวนจากระบบไฟฟ้า 50 Hz (AC-line power source) และสัญญาณรบกวนฮาร์มอนิค (harmonic) รวมมากับสัญญาณที่ต้องการเสมอ [6 – 8]

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงข่ายประสาท ADALINE (adaptive linear neural network)

โครงข่ายประสาท ADALINE เป็นโครงข่ายที่ใช้ฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) แบบเชิงเส้น ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบโครงข่ายประสาทเซลล์เดียวที่มีหลายอินพุต ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 โครงสร้างของโครงข่ายประสาท ADALINE

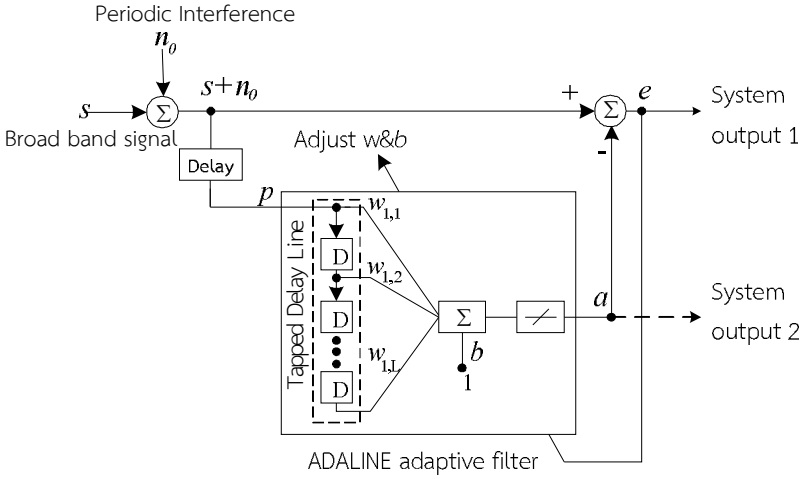
จากภาพที่ 1 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทประกอบด้วยอินพุตจำนวน L อินพุต คือ $p_1, p_2,..., p_L$ แต่ละอินพุตจะมีค่าน้ำหนักที่สอดคล้องกันคือ $w_1, w_2, ..., w_L$ โครงข่ายประสาทมีไบอัส b และมีฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเชิงเส้น ($a = n$) โดยที่สัญญาณเอาต์พุตของโครงข่ายประสาท a สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$a = \mathbf{w}^T\mathbf{p} + b \qquad (1)$$

เมื่อ $\mathbf{w} = [w_1\ w_2\ ...\ w_L]^T$ และ $\mathbf{p} = [p_1\ \ p_2\ ...\ p_L]^T$

2.2 วงจรกรองปรับตัวได้

วงจรกรองปรับตัวได้เป็นวงจรกรองแบบดิจิทัลที่มีสัมประสิทธิ์ปรับเปลี่ยนตลอดเวลา โดยอาศัยเงื่อนไขทางสถิติของสัญญาณและรูปแบบของสิ่งแวดล้อมในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งโครงสร้างของวงจรกรองปรับตัวได้มีหลายรูปแบบ แต่ในที่นี้ขอกล่าวถึงการนำโครงข่ายประสาท ADALINE มาประยุกต์ใช้เป็นวงจรกรองปรับตัว ADALINE ที่มีโครงสร้างแบบการทำนาย ซึ่งมีคุณลักษณะเด่นที่สำคัญ ได้แก่ โครงสร้างของวงจรกรองมีความซับซ้อนของการคำนวณค่าน้ำหนักและไบอัสไม่สูงมาก เนื่องจากโครงข่ายประสาท ADALINE มีเพียงชั้นอินพุตและชั้นเอาต์พุต และการคำนวณเป็นแบบป้อนไปข้างหน้าอย่างเดียว ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 วงจรกรองปรับตัว ADALINE ที่มีโครงสร้างแบบการทำนาย

จากภาพที่ 2 สัญญาณที่วัดได้คือสัญญาณ s ที่มีสัญญาณรบกวนปนมาด้วย ซึ่งในที่นี้คือ $s+n_0$ ส่วนสัญญาณอ้างอิงที่จะป้อนให้แก่วงจรกรองปรับตัว ADALINE คือสัญญาณ p ซึ่งเกิดจากการหน่วงเวลาของสัญญาณที่วัดได้ จากนั้นวงจรกรองสร้างสัญญาณเอาต์พุต เพื่อประมาณค่าของสัญญาณรบกวน n_0 และนำไปหักล้างกับสัญญาณที่วัดได้ ผลลัพธ์ที่ได้คือค่าสัญญาณความผิดพลาด e โดยสัญญาณความผิดพลาดนี้เป็นเกณฑ์ในการปรับค่าน้ำหนัก (w) และไบอัส (b) ของวงจรกรอง ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ

$$e(k) = (s+n_0)(k) - a(k) \tag{2}$$

$$a(k) = \mathbf{w}^T\mathbf{p}(k) + b = \sum_{i=1}^{R} w_i p(k-i+1) + b \tag{3}$$

ดังนั้นเงื่อนไขที่ดีที่สุดคือ $a \cong n_0$ จะได้ $e \cong s$ นั่นคือสามารถแยก n_0 ออกจาก s หรือวงจรกรองแบบปรับตัวสามารถแยกสัญญาณแหล่งกำเนิดออกจากสัญญาณรบกวนและสำเร็จถึงเป้าหมายของการกำจัดสัญญาณรบกวนนั่นเอง

2.3 อัลกอริทึมแบบค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด (least mean-squared algorithm)

การปรับค่าน้ำหนักและไบอัสของวงจรกรองปรับตัว Widrow-Hoff ได้เสนอกฎการเรียนรู้ที่เรียกว่ากฎการเรียนรู้ Widrow–Hoff หรืออัลกอริทึมแบบ LMS โดยใช้เงื่อนไขการลดค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดกำลังสองให้ได้ค่าน้อยที่สุด ซึ่งอัลกอริทึมแบบ LMS มีสมการเพื่อคำนวณค่าน้ำหนักและไบอัส ดังสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) + 2\alpha e(k)\mathbf{p}(k) \tag{4}$$

$$b(k+1) = b(k) + 2\alpha e(k) \tag{5}$$

ค่าเริ่มต้นที่ใช้สำหรับกำหนดเป็นค่าน้ำหนักและค่าไบอัสเริ่มต้นให้แก่โครงข่าย สามารถกำหนดเป็นค่าใดๆ ก็ได้ แต่ค่าที่ต้องกำหนดให้เหมาะสมคือค่าอัตราการเรียนรู้ (α : learning rate) เนื่องจากมีผลต่อเสถียรภาพและความเร็วในการลู่เข้า ซึ่งจะส่งผลต่อความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวนของวงจรกรอง

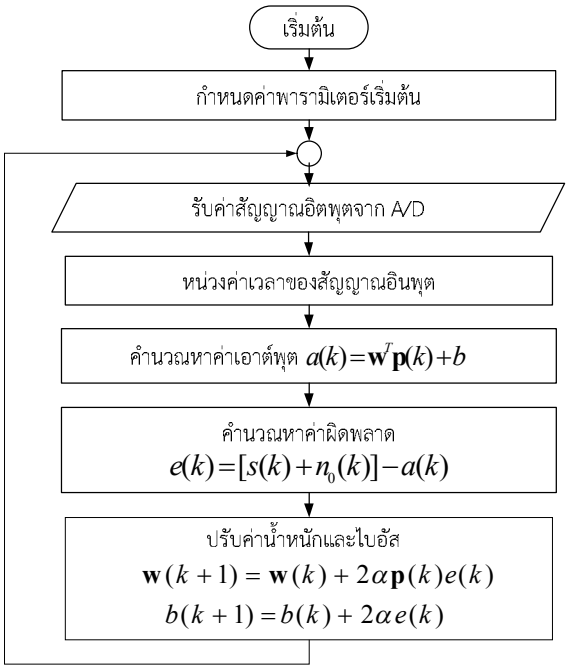
2.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์

อัลกอริทึมที่ใช้ในวงจรกรองปรับตัว ADALINE ที่มีโครงสร้างแบบการทำนาย ถูกออกแบบและเขียนโปรแกรมบนไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC30F2010 ของบริษัทไมโครชิป ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ราคาถูกที่ออกแบบให้มีความสามารถในการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลสำหรับสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติ โดยเรียกว่า digital signal controller มีหน่วยประมวลผลกลางขนาด 16 บิต มีความเร็วในการประมวลผล 30 ล้านคำสั่งต่อวินาที หน่วยการคูณและแอคคิวมูเลต (multiply and accumulate: MAC) ขนาด 17 บิต x 17 บิต จำนวน 2 ตัว, ตัวเลื่อนข้อมูลบาร์เรลขนาด 40 บิต (barrel shifter), ALU (arithmetic logic unit) แอคคิวมูเลเตอร์ขนาด 40 บิต จำนวน 2 ตัว, หน่วยความจำ RAM ขนาด 512 KB

และมีวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ความละเอียด 10 บิต จำนวน 6 ช่อง โดยมีอัตราการสุ่มและแปลงสัญญาณ 500 กิโลแซมเปิลต่อวินาที (kilo sample/second)

3. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดสอบ

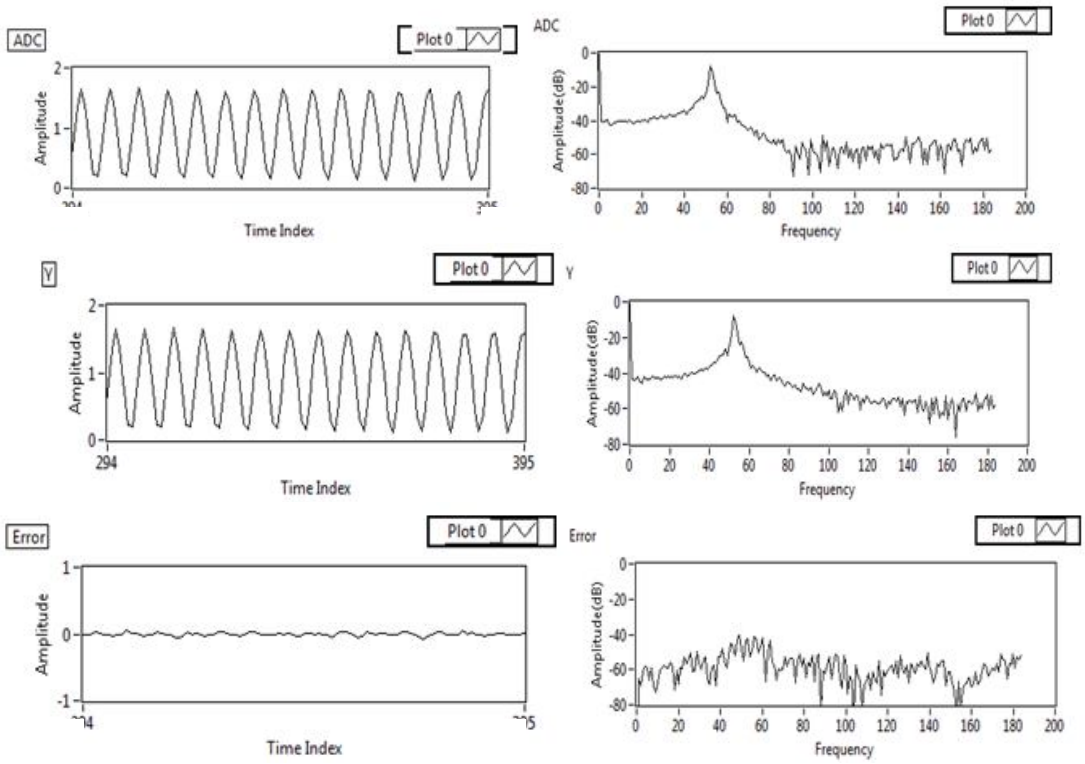
การทดสอบการทำงานของวงจรกรอง ADALINE ที่ใช้อัลกอริทึม LMS บนไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC30F2010 ที่กำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรกรองด้วยอัตราการเรียนรู้ (α) เท่ากับ 0.005 ความยาวของวงจรกรอง (tapped delay line) เท่ากับ **9** ค่าหน่วงเวลาเท่ากับ 10 [8-9] ใช้อัตราการสุ่มสัญญาณในการประมวลผลเท่ากับ 1000 ข้อมูล/วินาที ความละเอียดขนาด 10 บิต (10-bit resolution) โดยการทดสอบในเบื้องต้นนี้เป็นการทดสอบประมวลผลสัญญาณรูปคลื่นไซน์ความถี่ 50–500 Hz จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ ยี่ห้อ Agilent รุ่น 33220A ด้วยแรงดันอินพุตเท่ากับ 755 mV_{p-p} และยกระดับสัญญาณด้วยแรงดันออฟเซ็ตเท่ากับ +**450 mV** จากนั้นส่งสัญญาณที่ได้ผ่าน RS232 เพื่อแสดงผลสัญญาณบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ทั้งนี้เราสามารถสรุปกระบวนวิธีการทำงานของวงจรกรองปรับตัว ADALINE ที่ใช้อัลกอริทึมแบบ LMS บนไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC30F2010 ได้ดังแสดงภาพที่ 3 โดยจะแสดงผลการทดสอบความสามารถของวงจรกรองปรับตัว ADALINE ในรูปแบบของสัญญาณและสเปกตรัมกำลัง (power spectrum) ของสัญญาณด้วยการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณอินพุต สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกรอง (a) และสัญญาณความผิดพลาด (e) ซึ่งหากการทำงานเป็นไปตามเป้าหมาย สัญญาณความผิดพลาดต้องเป็นศูนย์หรือใกล้เคียงศูนย์ นั่นคือสัญญาณอินพุตมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกรอง



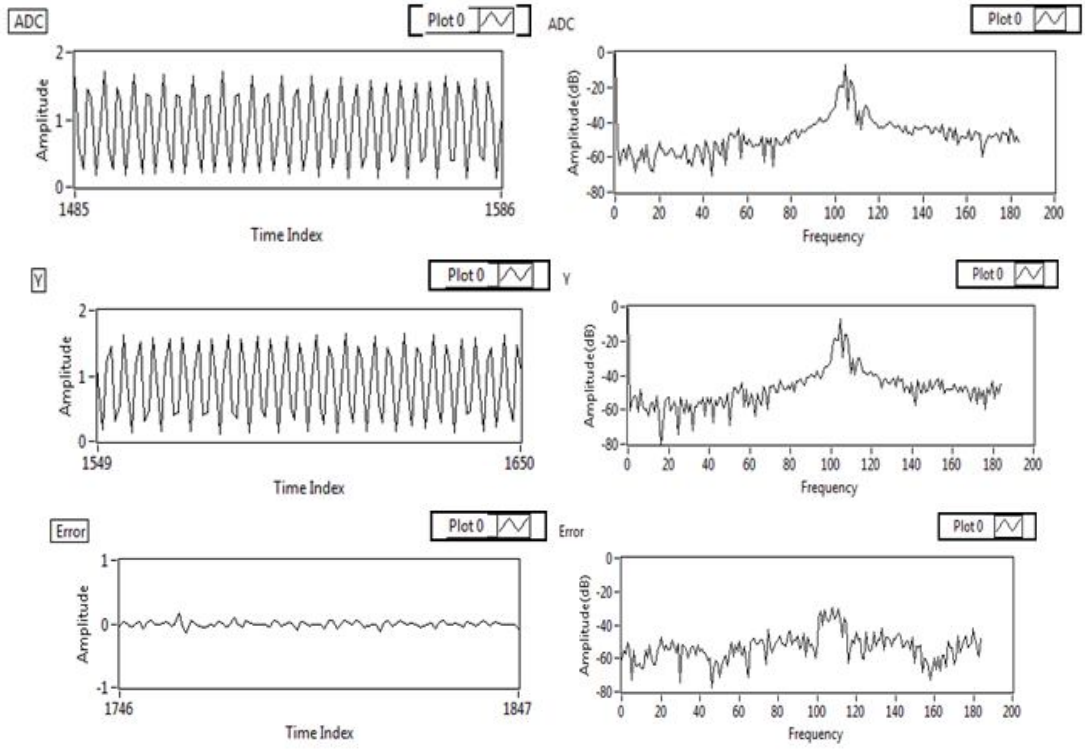
ภาพที่ 3 กระบวนการทำงานของวงจรกรองปรับตัว ADALINE ที่ใช้อัลกอริทึมแบบ LMS บนไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC30F2010

4. ผลการทดสอบ

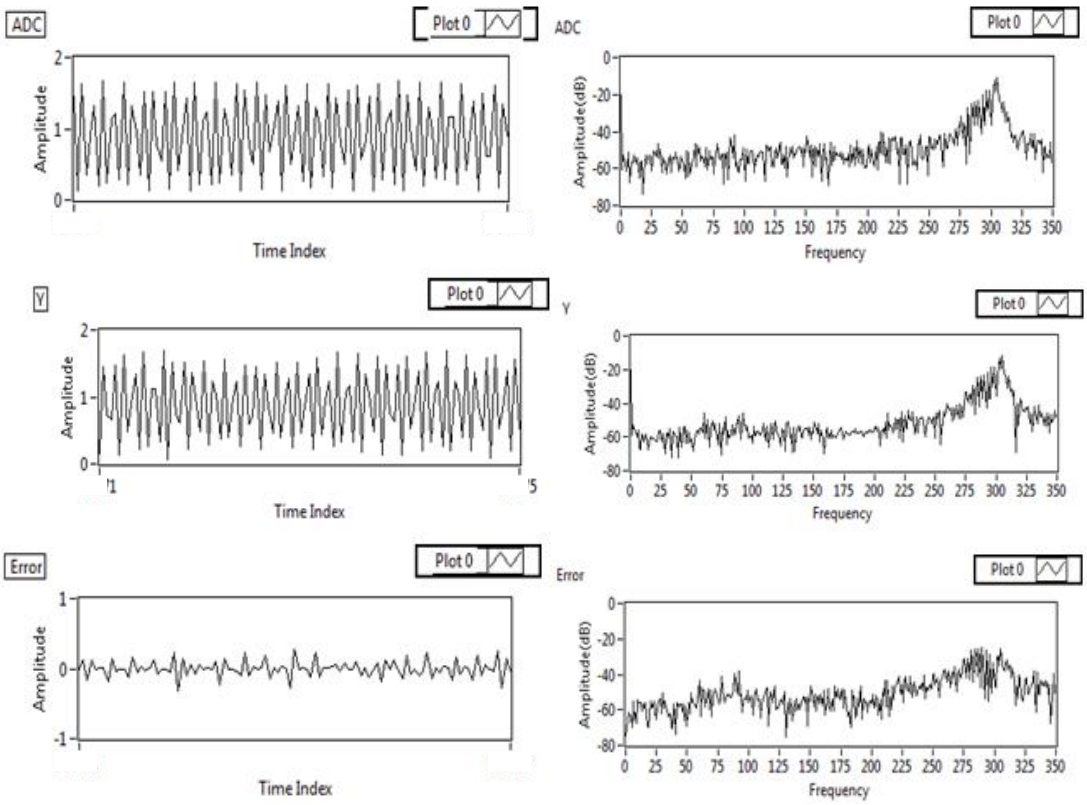
ผลที่ได้จากการทำงานของวงจรกรอง ADALINE ที่ใช้อัลกอริทึม LMS บนไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC30F2010 แสดงดังภาพที่ 4 – 9 ตามลำดับ



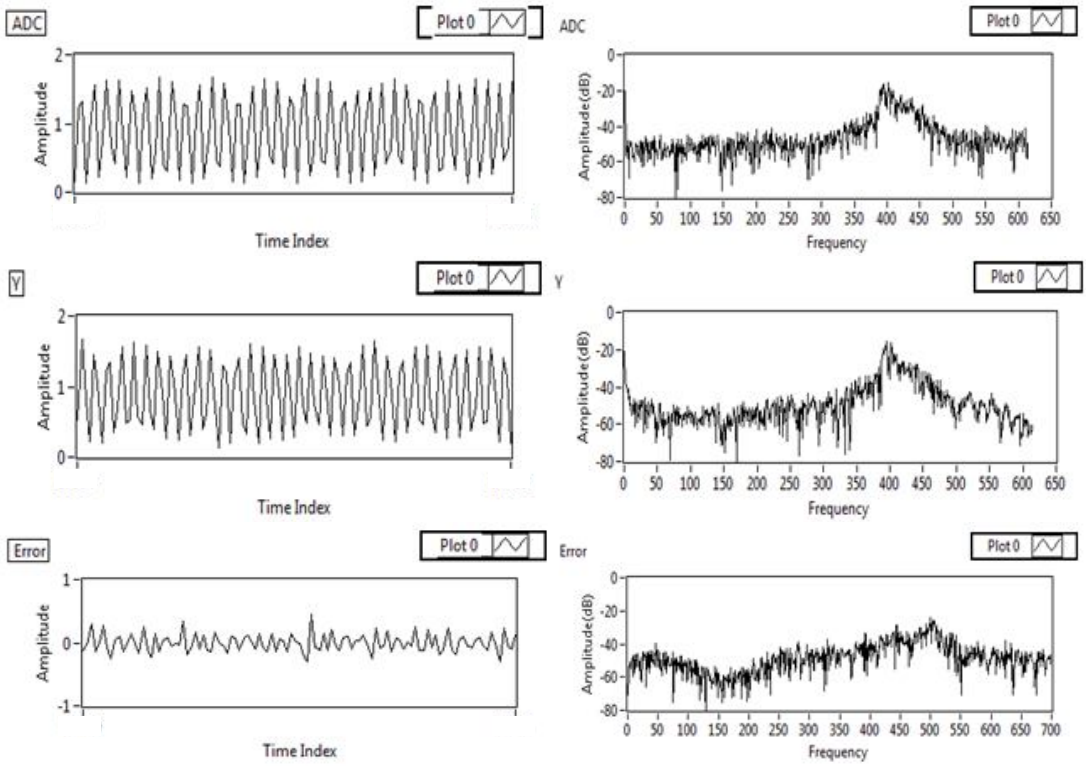
ภาพที่ 4 สัญญาณ (ซ้าย) และสเปกตรัมกำลัง (ขวา)
สัญญาณอินพุตความถี่ 50 Hz (บน) สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกรอง (กลาง) และสัญญาณความผิดพลาด (ล่าง)



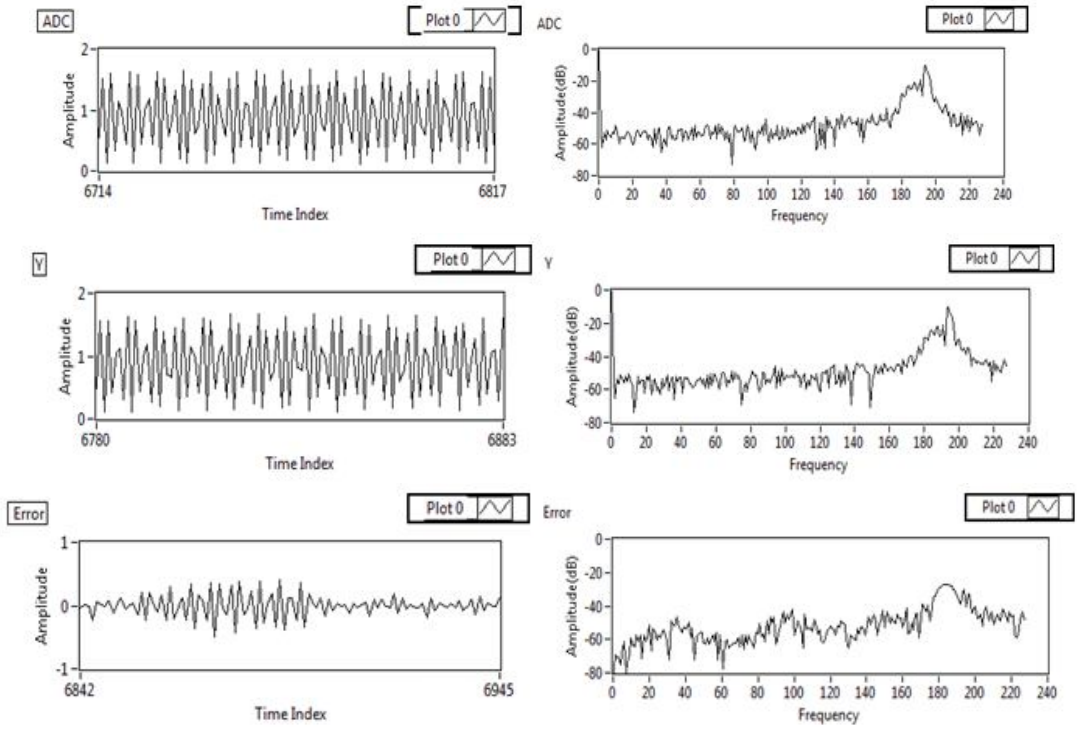
ภาพที่ 5 สัญญาณ (ซ้าย) และสเปกตรัมกำลัง (ขวา)
สัญญาณอินพุตความถี่ 100 Hz (บน) สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกรอง (กลาง) และสัญญาณความผิดพลาด (ล่าง)



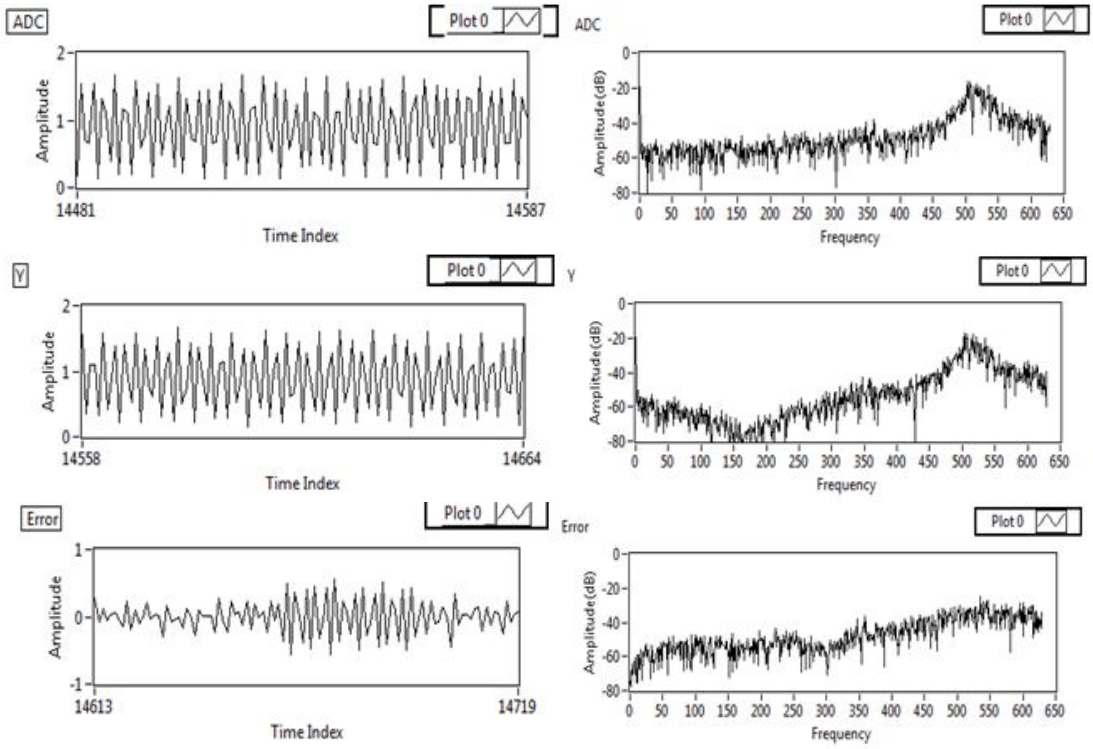
ภาพที่ 6 สัญญาณ (ซ้าย) และสเปกตรัมกำลัง (ขวา)
สัญญาณอินพุตความถี่ 200 Hz (บน) สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกรอง (กลาง) และสัญญาณความผิดพลาด (ล่าง)



ภาพที่ 7 สัญญาณ (ซ้าย) และสเปกตรัมกำลัง (ขวา)
สัญญาณอินพุตความถี่ 300 Hz (บน) สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกรอง (กลาง) และสัญญาณความผิดพลาด (ล่าง)



ภาพที่ 8 สัญญาณ (ซ้าย) และสเปกตรัมกำลัง (ขวา)
สัญญาณอินพุตความถี่ 400 Hz (บน) สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกรอง (กลาง) และสัญญาณความผิดพลาด (ล่าง)



ภาพที่ 9 สัญญาณ (ซ้าย) และสเปกตรัมกำลัง (ขวา)
สัญญาณอินพุตความถี่ 500 Hz (บน) สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกรอง (กลาง) และสัญญาณความผิดพลาด (ล่าง)

จากภาพที่ 4-9 จะเห็นได้ว่าวงจรกรอง ADALINE ที่ใช้อัลกอริทึม LMS บนไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC30F2010 ทำงานได้ตามเป้าหมายคือ รับสัญญาณอินพุตจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ และทำการสร้างสัญญาณประมาณ

ของสัญญาณอินพุต ซึ่งในที่นี้เรียกว่าสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกรอง จากนั้นนำสัญญาณดังกล่าวไปหักล้างกับสัญญาณอินพุต ก็จะได้เป็นสัญญาณความผิดพลาด โดยในช่วงความถี่ต่ำ (50 – 100 Hz) วงจรกรองทำงานได้ค่อนข้างสมบูรณ์ กล่าวคือ ไมโครคอนโทรลเลอร์รับสัญญาณอินพุตรูปคลื่นไซน์ที่มีความผิดเพี้ยนน้อย ทำให้วงจรกรองสามารถสร้างสัญญาณประมาณได้ใกล้เคียงกับสัญญาณอินพุตมากส่งผลให้ความผิดพลาดมีค่าน้อย สำหรับในช่วงความถี่ 200 – 500 Hz พบว่า สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกรองมีรูปร่างผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์และค่าความผิดพลาดมีค่ามากขึ้นตามลำดับ เมื่อพิจารณาสเปกตรัมกำลัง จะเห็นได้ว่าสามารถแสดงองค์ประกอบทางความถี่ได้อย่างถูกต้องและมีแนวโน้มในการลดทอนได้ในทุกความถี่ที่ทดสอบ ซึ่งสังเกตได้จากค่าสเปกตรัมกำลังของสัญญาณความผิดพลาดนั่นเอง หากนำไปประยุกต์ใช้งานจริง เช่น การลดสัญญาณรบกวนในแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการกรองสัญญาณฮาร์มอนิก ออกจากสัญญาณความถี่พื้นฐาน 50 Hz หรือการลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการวัดสัญญาณกล้ามเนื้อออกจากสัญญาณรบกวน 50 Hz พบว่ามีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้งานดังกล่าว ทั้งนี้ประสิทธิภาพของวงจรกรองปรับตัว ADALINE ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งเป็นข้อจำกัดด้านทรัพยากรบนไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F2010 ที่ไม่สามารถกำหนดให้มีความสามารถสูงมากได้

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นวงจรกรอง ADALINE ที่ใช้อัลกอริทึม LMS จากผลการทดสอบพบว่าวงจรกรองสามารถปรับตัวเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในย่านความถี่ที่ 50 – 500 Hz ได้จริง ซึ่งแสดงด้วยค่าสเปกตรัมกำลังของสัญญาณ ทั้งนี้หากมีการพัฒนาเทคนิคการเขียนโปรแกรมหรือเลือกใช้พารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับงานและไมโครคอนโทรลเลอร์ เช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์บางตัวที่มีหน่วยความจำน้อย หรือมีความเร็วของการประมวลผลสัญญาณต่ำ อาจจะลดจำนวน tapped delay line ของวงจรกรองปรับตัว ADALINE ลง แม้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดสัญญาณรบกวนของวงจรกรองจะลดลง แต่อาจจะยังอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ หรือในการประยุกต์ใช้งานบางอย่างอาจจะลดค่าอัตราการเรียนรู้ลงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสัญญาณรบกวนของวงจรกรอง โดยที่อัตราการลู่เข้าที่ช้าลงจะไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการใช้งานโดยรวม

6. เอกสารอ้างอิง

[1] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, 4th Edition, Prentice-Hall, 2002.

[2] M. T. Hagan, H. B. Demuth, and M. Beale, *Neural Network Design*. 1st Edition, Boston PWS Publishing Company, 1996.

[3] S. Sharma, V. Kumar, R. Kumar, “Supervised Online Adaptive Control of Inverted Pendulum System Using ADALINE Artificial Neural Network with Varying System Parameters and External Disturbance,” *International Journal of Modern Education and Computer Science (IJMECS), I.J. Intelligent Systems and Applications*, 2012, pp. 53-61

[4] B. Widrow and S. D. Stearns, *Adaptive Signal Processing*. New Jersey: Prentice-Hall, 1985.

[5] Y. Qin and S. Du, “A DSP based active power filter for line interactive UPS,” Proceedings of the 1995 IEEE IECON 21st, 1995, vol. 2, pp. 884-888.

[6] N. V. Thakor and Y. S. Zhu, “Applications of Adaptive Filter to ECG Analysis: Noise Cancellation and Arrhythmia Detection,” *IEEE Trans. Biomed.*, vol. 38, pp.785-793, 1991.

[7] M. B. Ibne Reaz and L. S. Wei, “Adaptive Linear Neural Network Filter for Fetal ECG Extraction,” *Proceedings of International Conference on Intelligent Sensing and Information Processing,* 2004, pp.321-324.

[8] รักกฤตว์ ดวงสร้อยทอง, “การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเพื่อลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการวัดสัญญาณ Somatosensory Evoked Potential,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2544.

[9] โสภาพรรณ สุวรรณสว่าง, พรชัย พฤกษ์ภัทรานนต์, ณัฏฐา จินดาเพ็ชร์, คณดิถ เจษฎ์พัฒนานนท์ และ ชูศักดิ์ ลิ่มสกุล, “การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของระบบลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการวัดสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อลายโดยการใช้วงจรกรองโครงข่ายประสาทเชิงเส้นแบบปรับตัว,” *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29*, ชลบุรี, ประเทศไทย, 9 -10 พฤศจิกายน 2549, pp. 985–988.