



รายงานการวิจัย

การสร้างเครื่องควบคุมเสียงรบกวนแบบไวงาน (Implementation of an Active Acoustic Noise Control)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

อาจารย์ สมศักดิ์ วาณิชนันต์ชัย

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2545

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

พฤษภาคม 2546

บทคัดย่อ

รายงานวิจัยฉบับนี้อธิบายถึงการสร้างเครื่องกำจัดเสียงรบกวนแบบไวงานซึ่งใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ TMS320VC5402 ที่มีความเร็ว 100 MHz ซีพียูที่มีสมรรถนะสูงนี้ทำให้เราสามารถสร้างเครื่องกำจัดเสียงรบกวนแบบไวงานโดยใช้สัมประสิทธิ์วงจรรองที่มีขนาด 32 บิต ใช้จำนวนสัมประสิทธิ์ที่มากขึ้น รวมทั้งสามารถใช้อัตราการสุ่มตัวอย่างที่เร็วขึ้น จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าโดยการใช้โครงสร้าง Filtered-X LMS ชนิดป้อนกลับแบบง่าย ๆ สามารถลดทอนเสียงรบกวนช่วงความถี่ 100-400 Hz ลงได้ถึง 20-30 dB ซึ่งจัดว่าดีกว่าอุปกรณ์ป้องกันที่ใช้งานกันโดยทั่วไป นอกจากนี้จากการทดลองเรายังพบว่าปัจจัยในการออกแบบที่สำคัญ 2 ประการได้แก่จำนวนบิตที่มีจำกัดในหนึ่งคำ และผลตอบสนองของลำโพงและไมโครโฟน ผลตอบสนองที่ไม่ดี (ไม่เป็นเชิงเส้น) จะทำให้เวลาที่ใช้ในการลู่เข้าลดลง ในขณะที่จำนวนบิตที่มีจำกัดในหนึ่งคำจะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการลดทอนสัญญาณรบกวนโดยรวม

Abstract

This report describes the implementation of an active noise control using 100 MHz TMS320VC5402. This high performance CPU allows us to use 32-bit filter coefficients, longer filter lengths and higher sampling rate. This experiment shows that by applying simple feedback Fx-LMS structure, the active noise canceller can provide a further 20-30 dB of attenuation over a band of 100-400 Hz which is better than the typical noise protection headsets. Moreover, the experiment shows that two important design factors are finite word length effects and responses of loudspeakers and microphones. The poor response (non-linearity) of loudspeakers and microphones including amplifiers obviously deteriorate the convergence time of ANC. Meanwhile the finite word length has affected on total noise reduction ratio.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	
ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย	1
วัตถุประสงค์และเป้าหมายของงานวิจัย.....	3
ขอบเขตของการวิจัย	3
วิธีการดำเนินการโดยย่อ.....	3
ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	4
การจัดรูปแบบของรายงานวิจัย	4
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์	
แนวความคิดเริ่มต้น.....	5
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง... ..	7
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวงจรกรองแบบปรับตัวชนิด Filtered-X LMS	
เครื่องควบคุมเสียงรบกวนแบบไวงานชนิดป้อนไปหน้า.....	14
หลักการพื้นฐาน.....	14
การเลือกใช้ระหว่างขั้นตอนวิธี LMS NN และ GA.....	15
ผลของวิฤติดยภูมิ.....	16
ขั้นตอนวิธี Filtered-X LMS.....	17
ผลของการป้อนกลับและวิธีแก้ปัญหา.....	20
Normalized Least Mean Square (NLMS).....	23
เครื่องควบคุมเสียงรบกวนแบบไวงานชนิดป้อนกลับ.....	24
บทที่ 4 วิธีการดำเนินการวิจัย	
ฮาร์ดแวร์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	26

	หน้า
ซอฟต์แวร์.....	27
วิธีการวัด.....	30
การทดสอบสมรรถนะเบื้องต้น.....	31
การทดสอบการกำจัดเสียงรบกวนชนิดแบนด์กว้าง.....	31
บทที่ 5 ผลการทดสอบ	
ความสามารถในการกำจัดเสียงรบกวนวัดโดย Sound level meter.....	32
ลักษณะของสัญญาณเศษเหลือ (Residual signal) $e[n]$	32
ผลของ step size.....	33
ความสามารถในการกำจัดเสียงรบกวนชนิดความถี่เดียว ณ ความถี่ต่างๆ.....	34
ผลของจำนวนสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง.....	35
การทดสอบการกำจัดเสียงรบกวนชนิดแบนด์กว้าง.....	35
บทที่ 6 บทสรุป	
สรุปผลการวิจัย	37
ข้อเสนอแนะ	37
บรรณานุกรม.....	38
ภาคผนวก	
ภาคผนวก โปรแกรม ANC.C.....	40
ประวัติผู้วิจัย	50

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แสดงความดังของเสียงชนิดต่างๆ.....	2
ตารางที่ 2.1 แสดงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
ตารางที่ 5.1 ผลการวัด Noise reduction ratio.....	33

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงสิทธิบัตรของ Lueg (1936).....	5
รูปที่ 2.2 การปรับด้วยมือเพื่อควบคุมเสียงรบกวนของหม้อแปลงไฟฟ้า เสนอโดย Conover (1956).....	6
รูปที่ 3.1 หลักการทำงานของ ANC แบบป้อนไปหน้า	12
รูปที่ 3.2 ANC ชนิดป้อนกลับ.....	13
รูปที่ 3.3 การระบุเอกลักษณ์แบบปรับตัว.....	14
รูปที่ 3.4 แผนภาพบล็อกอย่างง่ายของระบบ ANC.....	16
รูปที่ 3.5 แผนภาพบล็อกของระบบ ANC ที่ใช้ขั้นตอนวิธี Filtered-e LMS.....	17
รูปที่ 3.6 แผนภาพบล็อกของระบบ ANC ที่ใช้ขั้นตอนวิธี Filtered-X LMS.....	18
รูปที่ 3.7 แผนภาพบล็อกของระบบ ANC ที่มีการป้อนกลับ.....	21
รูปที่ 3.8 การแก้ปัญหาโดยทำวิธีป้อนกลับให้เป็นกลาง.....	22
รูปที่ 3.9 แผนภาพของระบบ ANC ที่ใช้ขั้นตอนวิธี Filtered-U LMS.....	23
รูปที่ 3.10 แผนภาพของระบบ ANC ที่ใช้ขั้นตอนวิธี Feedback Filtered-X LMS.....	24
รูปที่ 4.1 ฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	26
รูปที่ 4.2 แผนภาพบล็อกการทำงานในเฟสหาแบบจำลองของวิทยุสัญญาณแบบไม่เชื่อมตรง	28
รูปที่ 4.3 แผนภาพบล็อกการทำงานในเฟสกำจัดเสียงรบกวนของ Filtered X-LMS แบบป้อนกลับ.....	29
รูปที่ 5.1 สัญญาณเศษเหลือ $e[n]$ ความถี่ 200Hz ความถี่ในการสุ่มตัวอย่าง 2 KHz จำนวนสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง 256 ตัว step size = 8.....	33
รูปที่ 5.2 Noise reduction ratio เมื่อใช้ความถี่ทดสอบ 200 Hz เปลี่ยน step size จำนวนสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง 128 ตัว ความถี่ในการสุ่มตัวอย่าง 2 KHz.....	33
รูปที่ 5.3 แสดง Noise reduction ratio เมื่อใช้ความถี่ทดสอบ 150-400 Hz ความถี่ในการสุ่ม 2 KHz จำนวนสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง 128 ตัว และ step size =16.....	34
รูปที่ 5.4 แสดง Noise reduction ratio เมื่อใช้ความถี่ทดสอบ 100 Hz ความถี่ในการสุ่ม 2 KHz จำนวนสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง 128 ตัว และ step size =16.....	34

	หน้า
รูปที่ 5.5 Noise reduction ratios เปรียบเทียบระหว่างจำนวนสัมประสิทธิ์เท่ากับ 128 ตัวและ 254 ตัว ใช้ความถี่ทดสอบ 200 Hz ความถี่ในการสุ่ม 4 KHz และ step size = 16.....	35
รูปที่ 5.6 Noise reduction ratio เมื่อสัญญาณรบกวนเป็นชนิดแบนด์กว้าง (เสียงพัลลัม) ใช้ความถี่ในการสุ่ม 4 KHz จำนวนสัมประสิทธิ์ 256 ตัว และ step size = 16.....	36
รูปที่ 5.7 ขนาดสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนจากพัลลัมก่อนและหลังทำการกำจัด.....	36

บทที่ 1

บทนำ

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

มลพิษทางเสียง (Noise pollution) คือเสียงที่ไม่อยากได้ยิน แต่ก็ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ เป็นปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี และความเจริญของสังคมเมือง โดยเฉพาะในเมืองใหญ่ๆ และในโรงงานอุตสาหกรรม ยกตัวอย่างเช่น เสียงเครื่องตัดหญ้าที่บ้าน เสียงรถยนต์ รถมอเตอร์ไซด์ในย่านการจราจรหนาแน่น เสียงเครื่องยนต์กลไกในที่ทำงาน เป็นต้น ถึงแม้ว่ามลพิษทางเสียงนี้จะไม่ได้เป็นอันตรายต่อชีวิตโดยตรง แต่ก็มีผลกระทบต่อจิตใจ ก่อให้เกิดความรำคาญ ความเครียด ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานลดลง โดยเฉพาะในงานที่ต้องการสมาธิค่อนข้างสูง นอกจากนี้ยังเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลอย่างมากต่อความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน ในโรงงานอุตสาหกรรม

อายุเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดความบกพร่องหรือสูญเสียการได้ยินโดยธรรมชาติ แต่สาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดความบกพร่องทางการได้ยินก่อนวัยอันควรก็คือ การได้ยินได้ฟังเสียงที่ดังมากเกินไป จนทำให้เกิดการเสื่อมของระบบประสาทการได้ยิน ความดังของเสียงชนิดต่างๆ ในชีวิตประจำวัน แสดงในตารางที่ 1.1 เราสามารถแบ่งการเสื่อมของระบบประสาทการได้ยินออกได้เป็น 2 จำพวกคือ อาการหูตึงในระยะหนึ่งแล้วหายเป็นปกติได้เอง (Temporary Threshold Shift) และการสูญเสียการได้ยินแบบถาวร (Permanent Hearing Loss) ในประเทศสหรัฐอเมริกา ได้มีการศึกษาวิจัย (อ้างจาก กรมควบคุมมลพิษ, 2544) พบว่า หากคนได้รับเสียงในสิ่งแวดล้อมดังมากกว่า 70 dBA เป็นระยะเวลามากกว่า 40 ปี จะทำให้สูญเสียการได้ยินเร็วกว่าที่ควรจะเป็นตามอายุที่เพิ่มขึ้น

วิธีทั่วไปในการลดทอนความดังของเสียงรบกวน ก็คือ การใช้วัสดุดูดซับเสียงหรือการกำจัดเสียงรบกวนแบบเฉื่อยงาน (Passive noise control) สำหรับอุปกรณ์ป้องกันหูที่ใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมที่เรารู้จักกันดีได้แก่ จุกอุดหู (Ear Plug) จุกอุดหูแบบมีสาย และครอบหู (Ear Muff) จากการวิจัย (อ้างจาก ศิริพร , 2545) พบว่าหากใช้จุกอุดหูร่วมกับครอบหูจะสามารถลดความดังของเสียงรบกวนได้ถึง 10-15 dB อย่างไรก็ตามในกรณีเสียงรบกวนที่มีความถี่ต่ำการใช้วัสดุซับเสียงจะไม่มีประสิทธิภาพนัก เพราะจะต้องใช้วัสดุที่มีความหนาแปรตามขนาดความยาวคลื่นของเสียง จึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ดูดซับเสียงที่มีขนาดใหญ่ ทำให้มีน้ำหนักมาก ไม่สะดวกต่อการใช้งาน อาทิเช่น เสียงความถี่ 100 Hz จะมีความยาวคลื่นถึง 3.4 เมตร ซึ่งจะเป็นปัญหาอย่างยิ่งหากต้องการใช้ดูดซับเสียงบนเครื่องบิน ที่มีความต้องการใช้วัสดุเฉพาะที่มีน้ำหนักเบา

เทคนิคการกำจัดเสียงรบกวนแบบไวงานหรือ Active noise control (ANC) มีหลักการสำคัญคือ สร้างเสียงจากแหล่งกำเนิดทุติยภูมิ (Secondary source) ขึ้นมาต้านหรือหักล้างกับเสียงรบกวนปฐมภูมิ (Primary noise) เทคนิคนี้เป็นที่รู้จักกันมามากกว่า 60 ปี แต่เพิ่งได้รับความสนใจ

อย่างมาก และเริ่มมีการนำมาประยุกต์ใช้งานจริง ในช่วงสิบปีที่ผ่านมา สาเหตุเพราะว่าเครื่องกำจัดเสียงรบกวนชนิดนี้ต้องอาศัยไมโครโปรเซสเซอร์สำหรับการประมวลผลสัญญาณที่ได้รับการพัฒนาให้มีสมรรถนะสูง จึงสามารถสร้างเครื่องกำจัดเสียงรบกวนแบบไวงานที่ใช้งานได้จริง

ตารางที่ 1.1 แสดงความดังของเสียงชนิดต่างๆ

ความดังของเสียง (เดซิเบล)	ชนิดของเสียง
0	เสียงที่แผ่วเบาที่สุดที่มนุษย์ได้ยิน
30	เสียงกระซิบ หรือเสียงในห้องสมุดที่เงียบสงบ
60	เสียงพูดคุยตามปกติ เสียงจักรเย็บผ้า หรือเสียงเครื่องพิมพ์ดีด
85	เสียงตะโกนข้ามเขา หรือพื้นที่โล่งกว้าง เพื่อให้ได้ยินเสียงสะท้อนของตนเองกลับมา
90	
100	เสียงเครื่องตัดหญ้า เสียงเครื่องจักรในโรงงาน หรือเสียงรถบรรทุก (ไม่ควรได้ยินเกินวันละ 8 ชม.)
115	เสียงเลื่อยไฟฟ้า หรือเครื่องเจาะที่ใช้ลม : Pneumatic Drill (ไม่ควรได้ยินเกินวันละ 2 ชม.)
140	เสียงระเบิดหิน เสียงในรื้อคอนกรีต หรือเสียงแตรรถยนต์ (ไม่ควรได้ยินเกินวันละ 15 นาที)
	เสียงยิงปืน เสียงเครื่องบินเจ็ท ซึ่งเป็นเสียงที่ทำให้ปวดหู และอาจทำให้หูเสื่อมได้ แม้จะได้ยินเพียงครั้งเดียวก็ตาม ดังนั้นผู้ที่จำเป็นต้องอยู่กับเสียงในระดับนี้ จะต้องสวมอุปกรณ์ป้องกันหูเสมอ

ที่มา: ศิริพร (2545)

ตามหลักการแทรกสอดของเสียง Pure tone ที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดเสียง 2 แหล่ง หากสามารถปรับขนาดและเฟสของสัญญาณจากแหล่งกำเนิดหนึ่งให้เหมาะสมเมื่อเทียบกับอีกสัญญาณหนึ่งแล้ว เราสามารถควบคุมให้จุดใดจุดหนึ่งมีความดังของสัญญาณเสียงเป็นศูนย์ได้ โดยทั่วไปจุดนี้จะเป็นตำแหน่งของไมโครโฟนที่ใช้วัดสัญญาณเศษเหลือ (Residual signal) แต่ใน

ขณะเดียวกันจุดอื่นๆ อาจเกิดการหักล้างแบบไม่สมบูรณ์ และบางจุดอาจจะมีการเสริมกันของสัญญาณเสียง จุดที่สัญญาณเสียงหักล้างกันเราเรียกว่า Quiet zone ซึ่งจะเกิดขึ้นรอบๆ ไมโครโฟนที่ใช้วัดสัญญาณเสียงเหลือ Quiet zone นี้มีขนาดเพียงประมาณหนึ่งในสิบของความยาวคลื่น (Elliot et al., 1993) ถ้าหากเสียงรบกวนมีความถี่ 100 Hz แล้ว Quiet zone ก็จะมีขนาด 34 เซนติเมตร ในขณะที่ถ้าเสียงรบกวนความถี่ 1 KHz แล้ว Quiet zone ก็จะมีขนาดเพียง 3.4 เซนติเมตร ด้วยสาเหตุจากข้อจำกัดในเรื่องขนาดของ Quiet zone นี้ทำให้การกำจัดเสียงรบกวนแบบไวงานเหมาะสมกับเสียงความถี่ไม่เกิน 600 Hz ดังนั้นในการออกแบบระบบป้องกันเสียงรบกวนที่ดีควรจะใช้เทคนิคการกำจัดเสียงรบกวนแบบเฉื่อยงานและไวงานผสมกัน โดยที่เทคนิคแบบเฉื่อยงานจะป้องกันเสียงความถี่สูงในขณะที่เทคนิคแบบไวงานจะป้องกันเสียงความถี่ต่ำ Salloway และ Millar (1996) ได้ศึกษาที่ครอบหูป้องกันเสียงรบกวนที่ใช้งานกันอยู่ทั่วไปพบว่าวัสดุที่ใช้สามารถป้องกันเสียงรบกวนได้ 20 dBA ในขณะที่เทคนิคกำจัดเสียงรบกวนแบบไวงานจะสามารถกำจัดเสียงรบกวนลงได้อีก 10 dBA

2. วัตถุประสงค์และเป้าหมายของงานวิจัย

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์อันดับแรกก็คือ เพื่อพัฒนาสร้างต้นแบบเครื่องกำจัดเสียงรบกวนแบบไวงาน ที่สามารถทำงานได้จริง เพื่อใช้เป็นหลักอ้างอิง (Benchmark) ในการวิจัยและพัฒนาเครื่องรุ่นต่อไป โดยที่ผู้ใช้งานสามารถรับฟังเสียงอื่นๆ เช่นเสียงพูดคุย หรือเสียงวิทยุ ได้ตามปกติ ซึ่งสมรรถนะของเครื่องต้นแบบนี้ไม่ควรด้อยกว่างานในอดีตหรืออุปกรณ์ที่ขายอยู่ในท้องตลาด

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ข้างต้น ทักษะในการพัฒนาโปรแกรมประมวลผลสัญญาณเวลาจริง โดยใช้บอร์ด DSK TMS320VC5402 ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ เป็นสิ่งจำเป็น ซึ่งทักษะดังกล่าวจัดเป็นเป้าหมายที่สำคัญอีกประการหนึ่ง

3. ขอบเขตของการวิจัย

3.1 พัฒนาและสร้างหูฟังที่สามารถกำจัดเสียงรบกวนแบบไวงาน (ANC Headsets) โดยใช้บอร์ด TMS 320VC5402 และไมโครโฟน กับหูฟังที่มีขายอยู่ทั่วไปในท้องตลาด

3.2 หลังจากได้ศึกษาเปรียบเทียบขั้นตอนวิธีแบบต่างๆ แล้วสรุปได้ว่า ควรทดลองสร้าง ANC ชนิด 1x1 Feedback Filtered-X LMS (1 error microphone – 1 loudspeaker) ซึ่งเป็นระบบ ANC ที่ง่ายที่สุด

3.3 ทดสอบความสามารถในการลดทอนสัญญาณเสียงรบกวนความถี่เดียว ณ ความถี่ต่างๆ และเวลาที่ใช้ในการลู่เข้า

¹ บทที่ 3 หัวข้อ 1.2

4. วิธีการดำเนินการโดยย่อ

4.1 ศึกษาและเปรียบเทียบขั้นตอนวิธี ในการสร้างเครื่องควบคุมเสียงรบกวน แบบ ใวงานชนิดต่างๆ

4.2 ทำการเลียนแบบขั้นตอนวิธีด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อให้เกิดความเข้าใจในขั้นตอนวิธีและเก็บข้อมูลไว้ใช้ตรวจเทียบกับอุปกรณ์จริง

4.3 ศึกษาและฝึกฝนการพัฒนาโปรแกรม Code Composer Studio และ DSP/BIOS

4.4 ทำการออกแบบและสร้างโปรแกรม 1x1 channel / Feedback Filtered-X LMS

4.5 ทดสอบสมรรถนะและทดลองปรับจูนพารามิเตอร์ต่างๆ

5. ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

การวิจัยมีลักษณะเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อให้เกิดการพึ่งพาตนเองที่ยั่งยืน อันจักเป็นประโยชน์ต่อผู้ปฏิบัติงานในสภาพแวดล้อมที่มีมลพิษทางเสียง ให้มีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น เพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน และเครื่องต้นแบบของเครื่องควบคุมเสียงแบบใวงาน ที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำไปใช้เป็นพื้นฐานในการวิจัย ปรับปรุงและพัฒนาต่อ ให้เหมาะสมแก่ลักษณะงานเฉพาะที่จะนำไปใช้ต่อไป

6. การจัดรูปแบบของรายงานวิจัย

รายงานวิจัยนี้มีเนื้อหาแบ่งออกเป็น 6 บท ได้แก่

บทที่ 1 บทนำ

บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์

บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวงจรกรองแบบปรับตัวชนิด Filtered X-LMS

บทที่ 4 วิธีดำเนินการวิจัย

บทที่ 5 ผลการทดสอบ

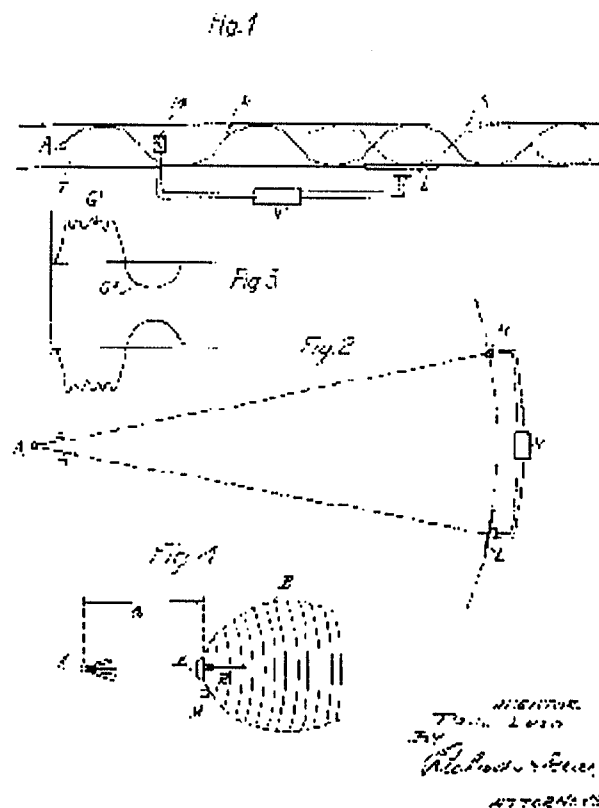
บทที่ 6 บทสรุป

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

1. แนวความคิดเริ่มต้น

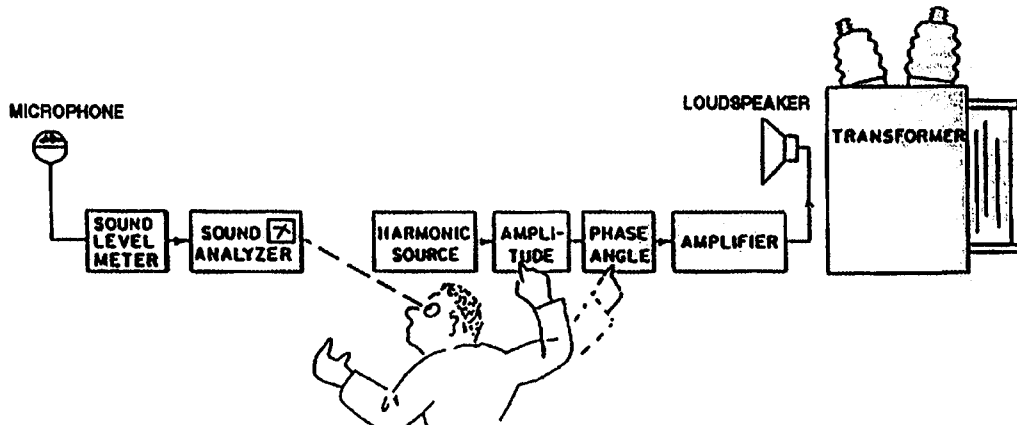
แนวคิดเรื่องการสร้างสัญญาณเสียงเพื่อหักล้างเสียงรบกวนได้รับการเสนอและจดสิทธิบัตรเป็นครั้งแรกโดย Lueg (1936) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 จาก Fig 1 ในสิทธิบัตรแสดงถึงไมโครโฟน M ตรวจวัดสัญญาณเสียงในท่อส่งเข้าวงจรควบคุม เพื่อสร้างสัญญาณเสียงออกที่ลำโพง L ให้มีเฟสตรงข้ามเพื่อหักล้างกับสัญญาณเดิม Fig 3 แสดงให้เห็นว่าสัญญาณเสียงไม่จำเป็นต้องเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ สำหรับ Fig 2 และ Fig 4 แสดงให้เห็นถึงแนวคิดในการหักล้างเสียงรบกวนในอากาศ 3 มิติ



รูปที่ 2.1 แสดงสิทธิบัตรของ Lueg (1936) (ที่มา Elliott, 1993)

ต่อมาในปี 1953 Harry Olson และ Everet May ได้ตีพิมพ์บทความเรื่อง “Electronic sound absorber” ซึ่งได้เสนอความคิดให้ติดตั้งไมโครโฟนใกล้ๆกับลำโพงที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณทุกขุม และติดตั้งอุปกรณ์ทั้งสองนี้ที่ด้านหลังของที่นั่งบริเวณศีรษะ วงจรขยายจะรับสัญญาณจากไมโครโฟนและส่งสัญญาณออกไปยังลำโพงเพื่อหักล้างกับสัญญาณรบกวน และ

สร้าง “zone of quiet” ณ บริเวณศีรษะ ความสำคัญของผลงานชิ้นนี้คือ วัสดุที่นำแนวคิดนี้ไปประยุกต์ใช้กับที่นั่งของผู้โดยสารในเครื่องบินหรือรถยนต์



รูปที่ 2.2 การปรับด้วยมือเพื่อควบคุมเสียงรบกวนของหม้อแปลงไฟฟ้าเสนอโดย Conover (1956)
(ที่มา Elliott, 1993)

ในเวลาใกล้เคียงกัน William Conover (1956) ได้พยายามกำจัดเสียงรบกวนที่เกิดจากหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดใหญ่ซึ่งจะมีความถี่ของสัญญาณรบกวนเท่ากับความถี่พื้นฐาน และฮาร์โมนิกของความถี่พื้นฐาน ในงานวิจัยของ Conover นี้ไม่ต้องใช้สัญญาณอ้างอิงที่มาจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนปฐมภูมิ เนื่องจากสัญญาณรบกวนมีความถี่ที่แน่นอนและมีลักษณะเป็นสัญญาณรายคาบ ในรูปที่ 2.2 เครื่องวัดขนาด (Sound level meter) จะวัดขนาดของสัญญาณ และเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (Sound analyzer) จะวัดเฟสของสัญญาณรบกวนจากหม้อแปลงไฟฟ้า ณ ความถี่ต่างๆ แหล่งกำเนิดสัญญาณฮาร์โมนิก (Harmonic source) จะสร้างสัญญาณ Full wave rectified ผ่านวงจรกรองผ่านแถบ ซึ่งสามารถปรับขนาดและเฟสด้วยมือได้เป็นครั้งคราว เพื่อแก้ไขผลของลมและอุณหภูมิที่มีต่อการเดินทางของสัญญาณเสียง ความสำคัญของผลงานของ Conover คือแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการนำระบบควบคุมอัตโนมัติมาประยุกต์ใช้ และความเป็นไปได้ในการใช้ลำโพงและไมโครโฟนหลายๆชุด

ผลงานทั้งสามชิ้นที่กล่าวมานี้ แม้ว่าจะมีความพยายามทำการทดลอง แต่ก็ยังไม่ประสบความสำเร็จ และยังไม่สามารถใช้งานได้จริง หลังจากช่วงทศวรรษที่ 50 งานวิจัยทางด้าน ANC ก็เงียบหายไป จนกระทั่งปี 1975 (Kido , 1975) เมื่อเริ่มมีการพัฒนาและใช้งานเทคนิคการประมวลผลสัญญาณเชิงเลขหรือ Digital Signal Processing อย่างรวดเร็ว สาเหตุที่การค้นคว้าเรื่อง ANC เงียบหายไปกว่า 20 ปี ไม่ใช่เป็นเพราะขาดความรู้หรือความมานะพยายาม แต่สิ่งที่ขาดไปก็คือเทคโนโลยี ในการสร้าง ANC ชนิดป้อนไปข้างหน้า เพื่อให้ความถี่สัญญาณรบกวนชนิด Pure tone เบาถึง 20 dB วงจรควบคุมอิเล็กทรอนิกส์จำเป็นต้องปรับตามสภาพแวดล้อม และสร้างสัญญาณ

Pure tone ด้วยความละเอียดของขนาด ± 0.6 dB และของเฟส ± 5 องศา ซึ่งความละเอียดขนาดนี้ไม่สามารถสร้างได้โดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแอนะล็อก ด้วยเทคโนโลยีในช่วงปี 1936-1970

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถแบ่งออกเป็น 2 จำพวกคือ วิเคราะห์เรื่องขั้นตอนวิธี (Algorithm) และการสร้างเครื่องต้นแบบทดลองใช้งานจริง ซึ่งงานวิจัยนี้จัดอยู่ในจำพวกที่สอง

มีงานศึกษาและวิจัย ANC เกี่ยวกับเรื่องขั้นตอนวิธีนั้นมากมาย ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นการเลียนแบบเสมือนจริงด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อทดสอบขั้นตอนวิธีใหม่ๆ อย่างไรก็ตามเราสามารถแบ่งขั้นตอนวิธีที่มีผู้สนใจศึกษาออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

2.1.1 กลุ่มแรกเป็นกลุ่มที่ใหญ่ที่สุด (Kuo and Morgan, 1999) (S.J.Elliott and P.A. Nelson, 1993) คือกลุ่มที่ใช้ขั้นตอนวิธี Filtered-X Least Mean Square (FX-LMS) หรือขั้นตอนวิธีที่เกี่ยวข้องเนื่องกับ LMS อาทิเช่น Filtered-U LMS, Filtered-X RLS, Online Secondary-path modeling, etc. ขั้นตอนวิธีประเภทนี้เป็นที่นิยมเนื่องจากความง่ายและความซับซ้อนในการคำนวณน้อย

2.1.2 กลุ่มที่สองใช้ Neural Network (NN) มาประยุกต์ใช้ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็น NN ชนิด Back propagation สาเหตุที่ต้องใช้ NN เพราะว่าปัญหาที่พบระบบมีลักษณะไม่เชิงเส้น ซึ่งอาจจะเป็นเพราะอุปกรณ์ทำงานในช่วงไม่เชิงเส้น เช่นลำโพงหรือ Actuator ทำงานในช่วงไม่เชิงเส้น หรือวิถีทางเดินของเสียงมีลักษณะไม่เชิงเส้น งานวิจัยที่ตรวจพบมีทั้งเป็นการเลียนแบบเสมือนจริง โดยใช้เสียงรบกวนที่บันทึกจากหน้างานมาใช้ในการศึกษาทดลอง ดังเช่นงานของ C.K.Chen และ T.Chiueh (1999) สำหรับงานของ M. Bouchard (1999) แม้ว่าจะนำ NN แบบ Back propagation มาทดลองใช้ แต่การ Training NN ยังคงต้องทำงานแบบ off-line ด้วยคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล เมื่อได้คำตอบจึงส่งให้ TMS320C31 ทำงานต่อในลักษณะ Fix filter ในเวลาจริงต่อไป ซึ่งพบว่ามีสมรรถนะดีกว่าวงจรกรอง FIR แบบเชิงเส้นประมาณ 13 dB อย่างไรก็ตามระบบนี้มีข้อเสียคือไม่สามารถปรับตัวตามการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมแบบเวลาจริง

Uchida et al. (2002) ได้ทดลองสร้างเครื่องกำจัดเสียงรบกวนไวนิค Filtered-X Radial basis function (RBF) Neural Network เพื่อแก้ไขปัญหาเรื่องความไม่เชิงเส้นในอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้เช่นวงจรรขยาย ไมโครโฟน และลำโพง โดยใช้ TMS320C6701EVM ซึ่งเป็นโปรเซสเซอร์ชนิด Floating point สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนลงได้ถึง 10-30 dB เนื่องจาก NN ใช้จำนวนการคำนวณมาก จึงจำเป็นต้องสุ่มตัวอย่างสัญญาณด้วยความถี่ต่ำเพียง 1,000 Hz

2.1.3 กลุ่มสุดท้ายได้พยายามนำเสนอ Genetic Algorithm (GA) มาประยุกต์ใช้ ซึ่งงานวิจัยที่นำ GA มาประยุกต์ใช้ในเวลาจริงได้แก่งาน Active Vibration Control (AVC) เช่นงานของ C.T. Wangler และ C.H. Hansen (1994) ซึ่งพบข้อเสียคือว่าเวลาที่ใช้ในการรู้เข้าค่อนข้างช้า 40-50 วินาที อย่างไรก็ตามในเรื่องเกี่ยวกับ ANC งานศึกษาที่น่าสนใจคือใช้ GA ทำงานในลักษณะ off-line

มาช่วยในการออกแบบ เช่น หาคำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งลำโพงและไมโครโฟนจำนวนมาก ชุด ปัญหาคือเกิดวิถีเชื่อมต่อ (Coupling path) ที่เป็นไปได้ จำนวนมาก การวิเคราะห์แบบจำลองและระบุเอกลักษณ์ของระบบนี้จำพวกนี้ซับซ้อนมาก และมีลักษณะไม่เชิงเส้น และคำตอบที่ใช้งานอาจจะไม่ได้มีเพียงคำตอบเดียว ตัวอย่างเช่นงานของ K.H. Back (1993) และ K.S.Tang et al. (1995)

ตารางที่ 2.1 แสดงการสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต การประยุกต์ใช้งานระบบ ANC และความพยายามสร้างเครื่องต้นแบบทดลอง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจริง อาทิเช่นการลดเสียงรบกวนในห้องผู้โดยสารเครื่องบิน ในเฮลิคอปเตอร์ การลดเสียงรบกวนจากเครื่องยนต์ เป็นต้น สังเกตว่าในช่วงทศวรรษที่ 90 มีงานวิจัยออกมาค่อนข้างมาก สาเหตุเป็นเพราะว่าในช่วงทศวรรษที่ 90 มีการพัฒนาไมโครโปรเซสเซอร์สำหรับงานประมวลผลสัญญาณที่มีสมรรถนะสูงขึ้นและราคาถูกลงอย่างมาก

ผู้สนใจสามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมได้จากบทความทบทวนเอกสารของ S.J. Elliot และ P.A. Nelson (1993) S.M. Kuo และ D.R. Morgan (1999)

ตารางที่ 2.1 แสดงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต

ปี	ชื่อนักวิจัย	การประยุกต์	จำนวน ลำโพง	จำนวน ไมโครโฟน	โครงสร้าง	อุปกรณ์ และ ขั้นตอนวิธี	ช่วงความถี่ ใช้งาน	การลดทอน (dB)
1936	P. Lueg	ในท่อ	1	2	ป้อนไป หน้า			
1953	H.Olson and E.May	ที่นั่ง	1	1	ป้อนกลับ	อิเล็กทรอนิกส์		
1956	W. Conover	หม้อแปลงขนาดใหญ่	1	2	ป้อนไป หน้า	อิเล็กทรอนิกส์ Manual	ไฟฟ้ากำลัง และ ฮาร์โมนิค	
1987	P.D. Wheeler	Headset in cockpit	2	2	ป้อนกลับ		ถึง 500 Hz	10-15 dB
1988	Perry et al.	ห้องผู้โดยสาร ในรถ 1.1 ลิตร 4 กระบอกสูบ	4	8	ป้อน ไปหน้า		50-200 Hz	10 -15 dB 4-5dB(Overall)
1990	Elliott et al.	Passenger cabin in B.Ac.748 aircraft	16	32	ป้อน ไปหน้า		88 Hz 176 Hz 274 Hz	10-14dB@88Hz 6-7dB@176Hz 4-5dB@274Hz 7 dBA overall

ปี	ชื่อนักวิจัย	การประยุกต์	จำนวน ลำโพง	จำนวน ไมโครโฟน	โครงสร้าง	อุปกรณ์ และ ขั้นตอนวิธี	ช่วงความถี่ ใช้งาน	การลดทอน (dB)
1992	D.A.Quinlan	Fan noise	1	Infrared detector : 1 error: 1	ป้อน ไปหน้า			12 dB @ Blade tone
1993	A.Omoto and K.Fujiwara	Free-Field Radiation	4	reference: 1 error: 4	ป้อน ไปหน้า	Narrow Band FXLMS		6-30 dB
1993	J.Luan	Earth-Moving Machine	2	reference: 1 error: 2	ป้อน ไปหน้า	TMS320C30 FXLMS-FN FULMS		20 dB
1993	S.E.Craig and O.L.Angervine	หม้อแปลงไฟฟ้า	4	reference: 1 error: 6	ป้อน ไปหน้า	Narrow Band FXLMS	60 Hz and Harmonics	15-20 dB @120 Hz 12-15 dB@240Hz
1993	Elliott et al.	เสียงเครื่องดนตรี	6	reference: 1 error :8	ป้อน ไปหน้า	FX-LMS		10-15 dB
1994	Elliott et al.	Road noise	2	reference: 6 error :2	ป้อน ไปหน้า	FX-LMS		7dBA overall
1994	D.Vijayun	ท่อ	1	1	ป้อนกลับ	TMS320C30		30 dB @ harmonic components

ปี	ผู้ค้นคว้าวิจัย	การประยุกต์	จำนวน ลำโพง	จำนวน ไมโครโฟน	โครงสร้าง	อุปกรณ์ และ ขั้นตอนวิธี	ช่วงความถี่ ใช้งาน	การลดทอน (dB)
1994	S.M.Kuo and D.Vijayun	Open-rollover- protection tractor	2	1	ป้อนกลับ			20 dB @ most significant harmonic
1995	D.R. Morgan and J.Thi	Reverberant room	1	reference : 1 error : 1	ป้อน ไปหน้า	Delayless Subband	100-500 Hz	> 15 dB
1997	A.K. Wang and B.Tse	Headphones	1	1	ป้อนกลับ	TMS320C30EVM	200-700 Hz	5-11 dB
1999	C.K.Chen et al.	Magnetic Resonance Imaging	1	1	ป้อนกลับ	TDNN +FXLMS	ถึง 4000 Hz	18.75 dB average
1999	M.Bouchard	ท่อ	1	reference : 1 error : 1	ป้อน ไปหน้า	Back Propagation NN	ถึง 200 Hz	30dB @50 Hz 21dB overall
2002	S.J.Elliott et al.	ตู้ฟัง	1	1	ป้อนกลับ	TMS320C31 Frequency Selective Feedback	ถึง 350 Hz	15dB overall 30 dB @disturbance frequency
2002	K. Uchida	Enclosure	2	reference : 1 error : 3	ป้อน ไปหน้า	TMS3206701 FX-RBF (NN)	Sampling rate 1KHz	23 dB overall 30-45dB@170Hz
2003	S.M.Kuo et al.	Vibratory bowl	1	error : 3	ป้อนกลับ	TMS320C32	upto 500 Hz	8.7 dB overall 26 dB @ 76 Hz

บทที่ 3

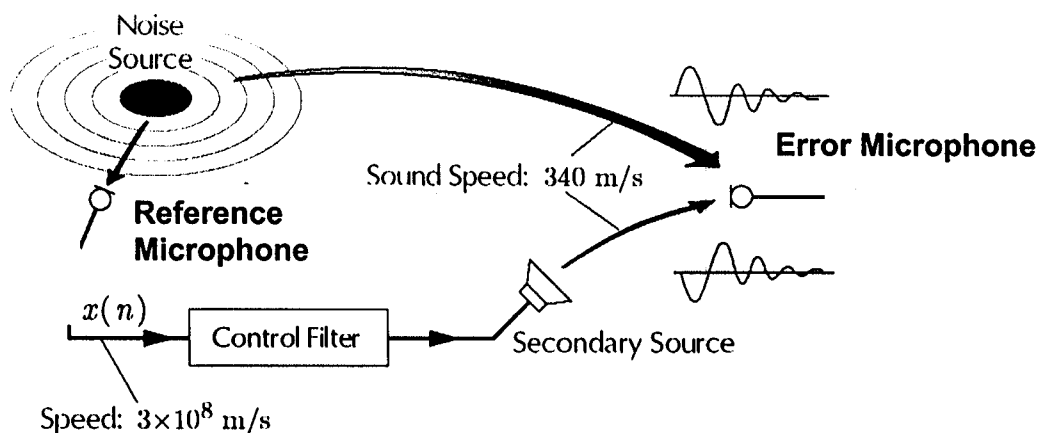
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวงจรกรองแบบปรับตัวชนิด Filtered X-LMS

เราสามารถแบ่งชนิดของเครื่องควบคุมเสียงรบกวนแบบไวงาน (ANC) ตามลักษณะการใช้งานออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ ANC ชนิดแบนด์กว้าง (Broadband ANC) และ ANC ชนิดแบนด์แคบ (Narrowband ANC)

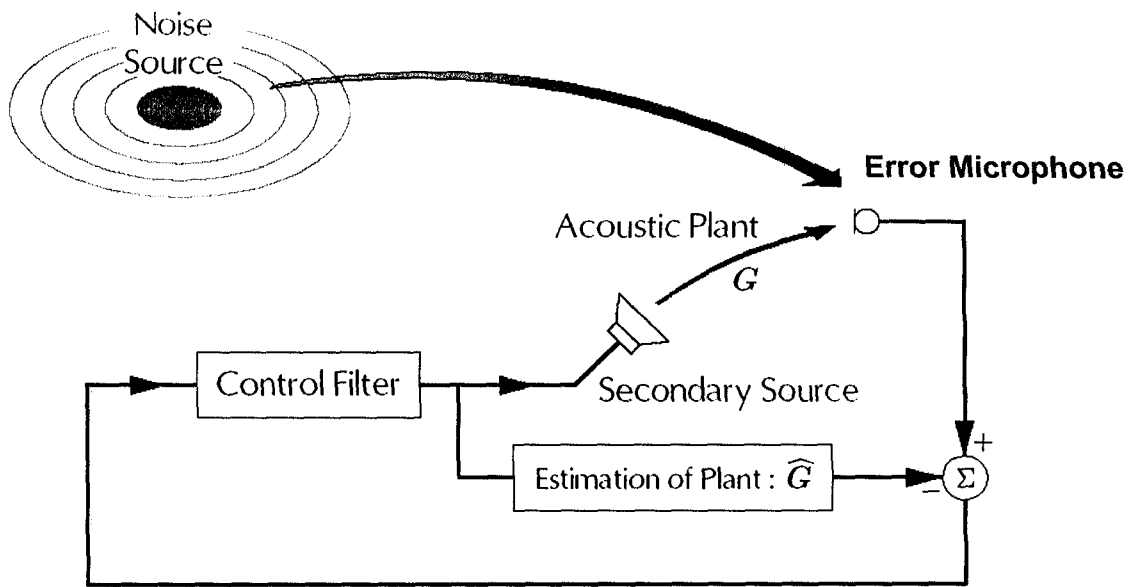
ANC ชนิดแบนด์กว้างนั้น ต้องการความรู้เกี่ยวกับสัญญาณรบกวนปฐมภูมิ (Primary noise) เพื่อนำไปใช้ในการสร้างสัญญาณด้านเสียงรบกวน โดยการใช้ไมโครโฟนอ้างอิง (Reference microphone) มาวัดสัญญาณรบกวนปฐมภูมิ เราจึงสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนปฐมภูมิที่มีความสัมพันธ์กับสัญญาณอ้างอิงทิ้งไป ด้วยการใช้วงจรกรองควบคุมมา ปรับขนาด และเฟส ให้เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 3.1

ในขณะที่ ANC ชนิดแบนด์แคบนั้น สัญญาณรบกวนที่ต้องการกำจัดทิ้งจะเป็นสัญญาณรายคาบ ที่เกิดจากการหมุนของเครื่องจักร ดังนั้น ANC ชนิดนี้จึงไม่ต้องมีความรู้ล่วงหน้าเกี่ยวกับสัญญาณรบกวนนั้น นั่นคือ ANC ไม่จำเป็นต้องมีลักษณะ Causality และเราสามารถใช้อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ (Tachometer) แทนการใช้ไมโครโฟนอ้างอิง เพื่อวัดความถี่พื้นฐาน (Fundamental) ของแหล่งกำเนิดเสียงรบกวน แล้วจึงป้อนสัญญาณจากเครื่องวัดความเร็วรอบให้ ANC สัญญาณรบกวน ความถี่อื่นๆ จะเป็นจำนวนเท่าของความถี่พื้นฐาน หรือที่เราเรียกว่า ความถี่ Harmonics เมื่อ ANC รู้ความถี่พื้นฐานของสัญญาณรบกวน ก็จะสามารถสร้างสัญญาณด้านเสียงรบกวนออกมาด้วยการควบคุมขนาด และเฟสของสัญญาณด้านเสียงรบกวน

เครื่องเสียงในรถบางคันจะพบว่าเสียงรบกวนแปรตามความเร็วรอบเครื่องยนต์ดังออกมาทางวิทยุ ANC ชนิดนี้จะสามารถกำจัดเสียงรบกวนแบบนี้ได้โดยไม่มีผลกระทบต่อเสียงวิทยุหรือเสียงพูด



รูปที่ 3.1 หลักการทำงานของ ANC แบบ ป้อนไปหน้า (ที่มา Omoto, 2002)



รูปที่ 3.2 ANC ชนิดป้อนกลับ (ที่มา Omoto, 2002)

นอกจากเราจะสามารถแบ่งชนิดของเครื่องควบคุมเสียงรบกวนแบบไวงาน (ANC) ตามลักษณะการใช้งานแล้ว ยังสามารถแบ่ง ANC ออกตามลักษณะโครงสร้าง (Structure) ก็คือชนิดป้อนไปหน้า (Feedforward) และชนิดป้อนกลับ (Feedback) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ และยังมี ANC ชนิดผสม กล่าวคือมีโครงสร้างทั้งป้อนไปหน้าและป้อนกลับผสมกัน หรือถ้าหากแบ่งตามจำนวนไมโครโฟนและลำโพงสามารถแบ่งได้เป็นแบบช่องสัญญาณเดี่ยว (Single channel) และแบบหลายช่องสัญญาณ (Multi-channel) ได้อีก

หากแบ่งตามขั้นตอนวิธี (Algorithm) ที่ใช้ เรายังสามารถแบ่ง ANC ได้อีกหลายชนิด ดังเช่น

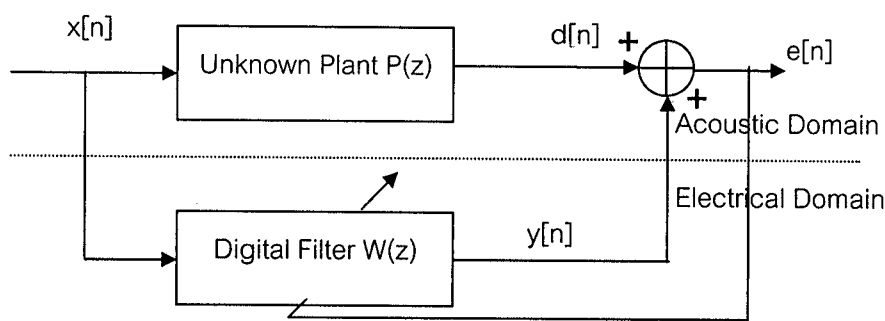
- | | |
|------------------|----------------------------------|
| - Filtered-X LMS | - Transform Domain Filter |
| - Filtered-E LMS | - Overall modeling |
| - Filtered-U LMS | - Online Secondary-path modeling |
| - Filtered-X RLS | - Neural Network ANC |
| - Filter-X NLMS | - Genetic Algorithm ANC |
| - Lattice Filter | |

ในบทนี้เราจะอธิบายแนวคิดและที่มาของ ANC ชนิด Filtered-X LMS รวมทั้ง ANC ชนิดต่างๆ ที่เกี่ยวเนื่องกับ Filtered-X LMS

1. เครื่องควบคุมเสียงรบกวนแบบไวงาน(ANC) ชนิดป้อนไปหน้า(Feedforward ANC)

1.1 หลักการทำงานพื้นฐาน

การควบคุมเสียงรบกวนแบบไวงานชนิดแบนด์กว้างดังเช่นรูปที่ 3.1 มีหลักการทำงานพื้นฐาน คือวิธีการระบุเอกลักษณ์แบบปรับตัว (Adaptive system identification) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งจะทำให้การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองแบบปรับตัว $W(z)$ ให้มีค่าใกล้เคียงกับพลาเน็ตหรือวิถีปฐมภูมิ (Primary path) $P(z)$ และในกระบวนการการปรับตัวนี้จะต้องใช้สัญญาณ $x[n]$ และ $e[n]$ เป็นข่าวสารสำคัญ



รูปที่ 3.3 การระบุเอกลักษณ์แบบปรับตัว

ข้อแตกต่างที่สำคัญระหว่างเครื่องควบคุมเสียงรบกวนแบบไวงานกับการระบุเอกลักษณ์โดยทั่วไปคือ เครื่องควบคุมเสียงรบกวนแบบไวงานใช้การรวมกันของสัญญาณเสียงแทนที่จะเป็นการลบกันของสัญญาณไฟฟ้า วัตถุประสงค์ในการทำงานของวงจรกรองแบบปรับตัว $W(z)$ คือ หลังจากที่ยังวงจรกรองแบบปรับตัว $W(z)$ อยู่เข้าสู่สถานะอยู่ตัว เราต้องการทำให้สัญญาณผิดพลาด $e[n]$ ที่เหลืออยู่น้อยมีค่าที่สุด จากรูปที่ 3.3 เราต้องการให้ $E(z) = 0$ ดังนั้นจะได้ว่า $W(z) = -P(z)$ เมื่อ $X(z) \neq 0$ และ $e[n] = d[n] + y[n] = 0$ ซึ่งจะเป็นการหักล้างอย่างสมบูรณ์

วิถีปฐมภูมิคือผลตอบสนองทางเสียงจากไมโครโฟนอ้างอิง (Reference microphone) จนถึง ไมโครโฟนที่ใช้วัดค่าผิดพลาด (Error microphone) ยิ่งระยะห่างของวิถีปฐมภูมิมากขึ้นกำลังงานของเสียง $x[n]$ ก็จะลดทอนลง รวมทั้งจะมีการหน่วงเวลามากขึ้นด้วย ถ้าหากวิถีปฐมภูมิแปรเปลี่ยนตามเวลา กระบวนการปรับตัวของวงจรกรองก็มีหน้าที่ติดตามการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอย่างต่อเนื่อง กระบวนการปรับตัวนี้สามารถใช้ขั้นตอนวิธี (Algorithm) ได้หลายชนิด อาทิเช่น Genetic Algorithm (GA) Neural Network (NN) และ Least Mean Square (LMS) แต่กระบวนการปรับตัวที่นิยมใช้มากที่สุด ในการควบคุมเสียงรบกวนแบบไวงานคือ ขั้นตอนวิธี LMS หรือขั้นตอนวิธีที่เกี่ยวข้องกับ LMS

1.2 การเลือกใช้ระหว่างขั้นตอนวิธี Least Mean Square Neural Network และ Genetic Algorithm

จากการทบทวนเอกสาร ศึกษา เปรียบเทียบขั้นตอนวิธีในการสร้างเครื่องควบคุมเสียงรบกวนแบบไวงานชนิดต่างๆ พบว่า แม้ว่าเทคนิคการปรับตัวแบบ Genetic Algorithm (GA) และ Neural Network (NN) จะเป็นแนวคิดที่น่าสนใจ เพราะสามารถแก้ปัญหาเรื่องความไม่เชิงเส้นของระบบได้ และมีผู้นำมาประยุกต์ใช้กับ ANC อยู่บ้าง แต่ก็ไม่มากนัก รวมทั้งผู้วิจัยเองได้ทดลองเขียนโปรแกรมเลียนแบบการทำงาน (Simulation) โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งก็พบว่าสามารถใช้กำจัดเสียงรบกวนได้ แต่ผู้วิจัยพิจารณาแล้วมีความเห็นว่า GA และ NN ยังไม่สมควรนำมาทดลองสร้างในงานวิจัยนี้ เนื่องจากเหตุผลดังต่อไปนี้

1.2.1 GA เป็นขั้นตอนวิธีปรับตัวแบบ Random Search ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการลู่เข้าจึงไม่แน่นอน

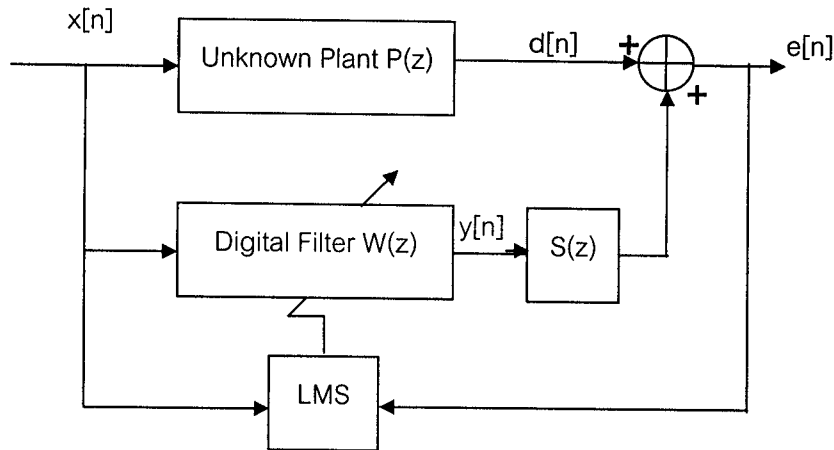
1.2.2 GA เป็นขั้นตอนวิธีปรับตัวที่เกี่ยวข้องกับการจัดเรียงข้อมูล ทำให้สิ้นเปลืองเวลาในการเคลื่อนย้ายข้อมูล มาก จึงไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้งานด้วยซอฟต์แวร์ที่ได้รับการออกแบบมาให้ทำงานในด้านประมวลผลสัญญาณเชิงเลข

1.2.3 NN เป็นขั้นตอนวิธีปรับตัวแบบไม่เชิงเส้น อาจจะมีปัญหาเรื่องติดกับดัก Local minima และมีความซับซ้อนในการคำนวณสูงกว่าขั้นตอนวิธี Least Mean Square (LMS) มาก

1.2.4 มีงานวิจัยจำนวนมากที่ใช้ขั้นตอนวิธี LMS ทั้งในด้านเลียนแบบด้วยคอมพิวเตอร์ และทดลองสร้างใช้งานจริง ข้อดีของขั้นตอนวิธี LMS อีกประการหนึ่งก็คือได้มีการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของขั้นตอนวิธีปรับตัวแบบ LMS ทั้งเรื่องเสถียรภาพ (Stability) และความคงทน (Robust)

อย่างไรก็ตาม NN มีประโยชน์ในกรณีที่พบปัญหาที่มีลักษณะไม่เชิงเส้น ซึ่งอาจจะเป็นเพราะอุปกรณ์ทำงานอยู่ในช่วงไม่เชิงเส้นหรือวิถีทางเดินของเสียงมีลักษณะไม่เชิงเส้น ในขณะที่ GA เหมาะสมกับงานที่ซับซ้อนมากจนไม่สามารถหาแบบจำลองที่เหมาะสมมาใช้งานได้ ตัวอย่างเช่น การกำหนดตำแหน่งของอุปกรณ์ในกรณีที่ใช้ลำโพงและไมโครโฟนหลายชุด เนื่องจากจะเกิดวิถีเชื่อมต่อ (Coupling path) ที่เป็นไปได้ จำนวนมาก และคำตอบที่ใช้งานได้อาจจะไม่ได้มีเพียงคำตอบเดียว

1.3 ผลของวิถีทุติยภูมิ (Secondary-Path Effect)



รูปที่ 3.4 แผนภาพบล็อกอย่างง่ายของระบบ ANC

สัญญาณเสียง $y[n]$ ที่ออกจากวงจรกรอง แล้วส่งไปหักล้างกับสัญญาณรบกวน $d[n]$ ในอากาศนั้น ต้องผ่านวงจรแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อก → Reconstruction filter → Power amplifier → ลำโพง → และระยะระหว่างลำโพงถึงไมโครโฟนที่ใช้วัดสัญญาณผิดพลาด สัญญาณผิดพลาด $e[n]$ ที่วัดได้ ก็ต้องผ่าน Preamplifier → Anti-aliasing filter → และวงจรแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ซึ่งทั้งหมดนี้จะทำให้มีการหน่วงเวลามากขึ้น ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ จึงเป็นดังรูปที่ 3.4 ระบบ $S(z)$ นี้เรียกว่าวิถีทุติยภูมิ หรือ Secondary-Path

จากรูปที่ 3.4 ตัวแปลงเซตของสัญญาณผิดพลาด $e[n]$ จะเท่ากับ

$$E(z) = [P(z) + S(z)W(z)]X(z) \quad (3-1)$$

ดังนั้นหลังจากการลู่เข้าแล้ว วงจรกรองในอุดมคติที่ให้ค่า $E(z) = 0$ ก็คือ

$$W_{opt}(z) = -\frac{P(z)}{S(z)} \quad (3-2)$$

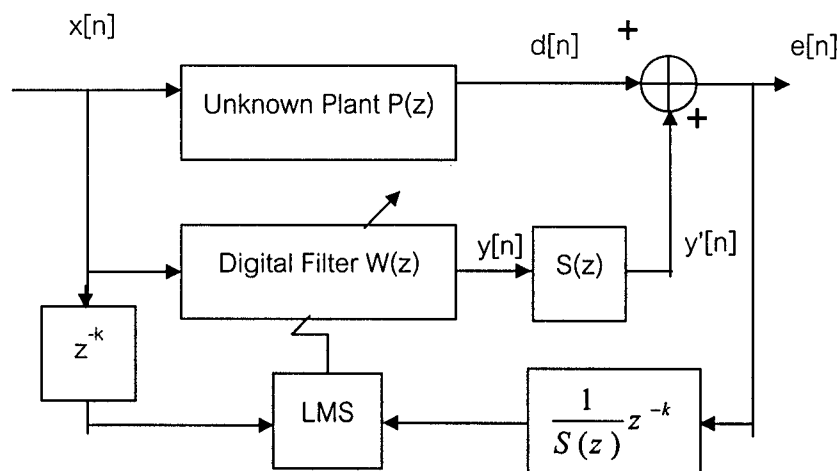
หมายความว่า $W_{opt}(z)$ จะจำลองแบบระบบ $-P(z)$ และแปรผกผันกับแบบจำลอง $S(z)$ จะเห็นได้ว่าค่าหน่วงเวลาของวิถีทุติยภูมิ จะต้องน้อยกว่าค่าหน่วงเวลาในวิถีปฐมภูมิ เมื่อไมโครโฟนอ้างอิงรับสัญญาณอ้างอิง (Reference signal) เข้ามา เครื่องควบคุมต้องใช้เวลาในการคำนวณ ก่อนจะส่งค่าที่ถูกต้องไปยังลำโพง ถ้าค่าหน่วงเวลาทางไฟฟ้ารวมกับค่าหน่วงเวลาในวิถีทุติยภูมิ มีค่ามากกว่า ค่าหน่วงเวลาในวิถีปฐมภูมิแล้ว สมรรถนะของระบบจะเลวลง เพราะว่าผลตอบสนองของเครื่องควบคุมจะมีลักษณะเป็น Non-causal อย่างไรก็ตามในกรณี Non-causal แบบนี้ ระบบจะสามารถใช้งานได้หากสัญญาณรบกวนเป็นสัญญาณรายคาบหรือแบนด์แคบ แต่จะไม่สามารถใช้งานกับสัญญาณรบกวนที่เป็นสัญญาณสุ่มและมีแบนด์กว้างได้

1.4 ขั้นตอนวิธี Filtered-X LMS

การเพิ่มวิถิตฤษฎีในเครื่องควบคุมที่ใช้ขั้นตอนวิธีแบบ LMS ธรรมดา ดังรูปที่ 3.4 จะทำให้สัญญาณผิดพลาด $e[n]$ ถูกหน่วงเวลาออกไป ดังนั้นในขั้นตอนวิธี LMS แบบธรรมดา ค่า $e[n]x[n]$ จึงไม่ใช่ตัวประมาณค่าที่ถูกต้อง หากต้องการให้ LMS ทำงานอย่างถูกต้อง สัญญาณอ้างอิง $x[n]$ ที่ใช้ในการคำนวณในขั้นตอนวิธี LMS ต้องถูกหน่วงเวลาออกไปเท่ากับที่สัญญาณผิดพลาด $e[n]$ ถูกหน่วงเวลาออกไปด้วย และเพื่อให้การประมาณค่า $e[n]x[n]$ ถูกต้อง Morgan (1980) ได้เสนอวิธีแก้ไขปัญหานี้ 2 วิธี ได้แก่

1.4.1 Filtered-e LMS

วิธีแรกใช้ $1/S(z)$ มา กรองสัญญาณผิดพลาด $e[n]$ เพื่อชดเชยผลของวิถิตฤษฎี และหน่วงเวลาสัญญาณทั้งสองให้เวลาตรงกันเป็นเวลา k ตัวอย่าง เพื่อแก้ปัญหาเรื่อง Causality ดังแสดงในรูปที่ 3.5 เราเรียกขั้นตอนวิธีนี้ว่า Filtered-e LMS วิธีนี้มีปัญหาคือว่า ระบบผกผัน $1/S(z)$ ในบางครั้งเราไม่สามารถหาค่าได้ ทำให้วิธีนี้ไม่เป็นที่นิยมเท่าใดนัก



รูปที่ 3.5 แผนภาพบล็อกของระบบ ANC ที่ใช้ขั้นตอนวิธี Filtered-e LMS

1.4.2 Filtered-X LMS

วิธีที่สองคือ กรองสัญญาณอ้างอิงด้วยฟังก์ชันระบบที่ประมาณค่าได้ของวิถิตฤษฎี $\hat{S}(z)$ ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งจะทำให้ สัญญาณอ้างอิง $x[n]$ ถูกหน่วงเวลาออกไปเท่ากับสัญญาณผิดพลาด $e[n]$ การเพิ่มวิถิตฤษฎี $S(z)$ ตามหลังวงจรกรอง $W(z)$ ที่ปรับตัวได้โดยใช้ขั้นตอนวิธี LMS นั้นทำให้สัญญาณเศษเหลือมีค่าเท่ากับ

$$e[n] = d[n] + s[n] \otimes (\mathbf{w}^T[n] \mathbf{x}[n]) \quad (3-3)$$

โดยที่ n เป็นดัชนีเวลา (Time index)

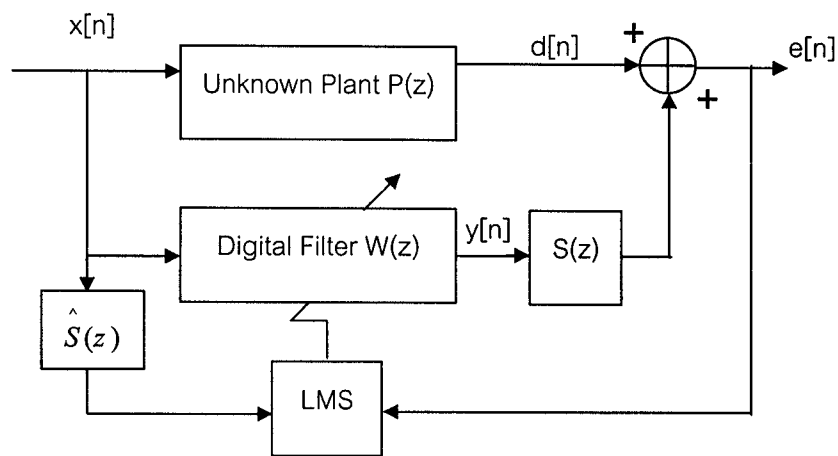
$\otimes$ หมายถึงการคอนโวลูชัน

$s[n]$ คือผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ของวิถีพหุนาม $S(z)$

$$\mathbf{w}[n] = [w_0[n] \ w_1[n] \ \dots \ w_{L-1}[n]]^T$$

$$\mathbf{x}[n] = [x[n] \ x[n-1] \ \dots \ x[n-L+1]]^T$$

L เป็นความยาวของวงจรกรอง $W(z)$



รูปที่ 3.6 แผนภาพบล็อกของระบบ ANC ที่ใช้ขั้นตอนวิธี Filtered-X LMS

วงจรกรองต้องพยายามปรับตัวให้ค่าสัญญาณผิดพลาดชั่วขณะยกกำลังสองมีค่าน้อย

ที่สุด

$$\hat{\xi}[n] = e^2[n] \quad (3-4)$$

โดยใช้ขั้นตอนวิธี Steepest descent ซึ่งทำการปรับสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองให้ทันกาลด้วยทิศทางที่ตรงข้ามกับเกรเดียนต์ของสัญญาณผิดพลาดชั่วขณะ ณ เวลา n

$$\mathbf{w}[n+1] = \mathbf{w}[n] - \frac{\mu}{2} \nabla \hat{\xi}[n] \quad (3-5)$$

โดยที่ μ คือ step size

เนื่องจาก

$$\begin{aligned} \nabla \hat{\xi}[n] &= \nabla e^2[n] = 2e[n](\nabla e[n]) \\ \because \nabla e[n] &= s[n] \otimes \mathbf{x}[n] = \mathbf{x}'[n] \\ \therefore \nabla \hat{\xi}[n] &= 2e[n]\mathbf{x}'[n] \end{aligned} \quad (3-6)$$

โดยที่ $\mathbf{x}'[n] = [\mathbf{x}'[n] \quad \mathbf{x}'[n-1] \quad \dots \quad \mathbf{x}'[n-L+1]]^T$
 ดังนั้น

$$\mathbf{w}[n+1] = \mathbf{w}[n] - \mu e[n] \mathbf{x}'[n] \quad (3-7)$$

การใช้งานระบบ ANC ในทางปฏิบัติ เราจะไม่รู้ค่า $S(z)$ จึงต้องประมาณค่าหา $\hat{S}(z)$ ดังนั้น สัญญาณอ้างอิงที่ใช้ในการคำนวณตามขั้นตอนวิธี LMS ในสมการที่ 3-7 จึงต้องนำ $\mathbf{x}[n]$ มาผ่านวิฤติคุณที่มีประมาณค่าได้เสียก่อน

$$\mathbf{x}'[n] = \hat{s}[n] \otimes \mathbf{x}[n] \quad (3-8)$$

โดยที่ $\hat{s}[n]$ คือผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ที่มีประมาณค่าได้ของวิฤติคุณ $S(z)$

1.4.3 การวิเคราะห์ขั้นตอนวิธี Filtered-X LMS

จากสมการที่ 3-7 จะสังเกตเห็นว่าการลู่เข้าในการปรับตัวของ $W(z)$ จะขึ้นอยู่กับขนาดของ step size ถ้าหาก step size มีขนาดเล็ก เวลาที่ใช้ในการปรับตัวก็จะช้า และค่าสัญญาณผิดพลาดที่คงเหลือจะมีขนาดเล็ก นั่นคือ $W(z)$ จะใกล้เคียงกับ $-\frac{P(z)}{S(z)}$

Elliott (1993) ได้ทดลองหาขนาดของ Step size ขนาดใหญ่ที่สุด ที่สามารถใช้งานในขั้นตอนวิธี Filtered-X LMS พบว่า

$$\mu_{\max} = \frac{1}{P_{x'}(L + \Delta)} \quad (3-9)$$

โดยที่ $P_{x'} = E[x'^2[n]]$ คือกำลังงานของสัญญาณอ้างอิงที่ถูกกรองด้วย $\hat{S}(z)$

Δ = ค่าหน่วยเวลาทั้งหมดในวิฤติคุณ มีหน่วยเป็นจำนวนตัวอย่าง

จะเห็นว่าค่าหน่วยเวลาในวิฤติคุณมีผลต่อผลตอบสนองพลวัตของระบบ ANC ด้วยการลดขนาด Step size ขนาดใหญ่ที่สุด ในขั้นตอนวิธี Filtered-X LMS

Boucher and et al. (1991) ศึกษาผลของความผิดพลาดเชิงเฟส (Phase error) ของวิฤติคุณ ที่มีต่อเวลาที่ใช้ในการลู่เข้าและขนาดของ step size ที่ดีที่สุด การวิเคราะห์ในกรณีเฉพาะเมื่อให้สัญญาณอ้างอิงเป็นสัญญาณแบนด์แคบ และให้สัญญาณรบกวนเป็นสัญญาณแบนด์กว้าง การศึกษาพบว่าแม้ว่าเฟสต่างกัน 40 องศา ก็แทบไม่มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการลู่เข้า และเมื่อเฟสต่างกัน เข้าใกล้ 90 องศา ระบบก็ยังลู่เข้า แต่จะใช้เวลามากขึ้น

ความยุ่งยากอีกประการหนึ่งที่มักจะเกิดขึ้นในกรณีแบนด์กว้าง ก็คือสัญญาณรบกวน $u[n]$ และ $v[n]$ ซึ่งเกิดจากความผิดพลาดในการวัดที่ปรากฏในสัญญาณอ้างอิง $\mathbf{x}[n]$ และ สัญญาณผิดพลาด $e[n]$ ตามลำดับ ฟังก์ชันระบบ $W(z)$ ที่ดีที่สุดแบบไม่มีเงื่อนไขคือ (อ้างจาก Kuo and Morgan, 1996)

$$W_{opt}(z) = -\frac{P(z)S_{xx}(z)}{[S_{xx}(z) + S_{uu}(z)]S(z)} \quad (3-10)$$

จากสมการแสดงให้เห็นว่า $W_{opt}(z)$ ไม่ขึ้นอยู่กับค่าผิดพลาดในการวัด $v[n]$ ที่เกิดจากตัวตรวจจับสัญญาณผิดพลาด $e[n]$ แต่ค่าที่มีผลคือค่าผิดพลาดในการวัด $u[n]$ ที่เกิดจากตัวตรวจจับสัญญาณอ้างอิง $x[n]$ ซึ่งจะมีผลต่อ $W_{opt}(z)$ และสมรรถนะของระบบ

ในรูปที่ 3.6 หากฟังก์ชันถ่ายโอนของของวิฤติติภูมิ $S(z)$ เป็นการหน่วงเวลาเพียงอย่างเดียว (Δ) แล้วขั้นตอนวิธี Filtered-X LMS ก็จะลดรูปเป็นขั้นตอนวิธี ที่รู้จักในชื่อของ Delayed LMS

1.4.4 ขั้นตอนวิธี Leaky Filtered-X LMS

ในระบบ ANC บางครั้งหากสัญญาณรบกวนที่ต้องการกำจัดมีกำลังงานสูง สัญญาณที่สร้างจากแหล่งกำเนิดวิฤติติภูมิก็ต้องมีกำลังงานสูงด้วย ทำให้แหล่งกำเนิดวิฤติติภูมิทำงานเกินกำลัง และเกิดความเพี้ยนไม่เชิงเส้น วิธีการแก้ไขปัญหานี้ก็คือจำกัดกำลังงานของสัญญาณ $y[n]$ ด้วยการแก้ไขสมการ cost function ให้เท่ากับ

$$\hat{\xi}[n] = e^2[n] + \gamma \mathbf{w}^T[n] \mathbf{w}[n] \quad (3-11)$$

เมื่อทำการพิสูจน์เช่นเดียวขั้นตอนวิธี Filtered-X LMS จะได้สมการปรับปรุงสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองแบบปรับตัวดังนี้

$$\mathbf{w}[n+1] = \nu \mathbf{w}[n] - \mu \mathbf{x}'[n]e[n] \quad (3-12)$$

$$\nu = 1 - \mu\gamma; \quad 0 < \nu < 1$$

ในการสร้างเครื่องควบคุมที่มีความละเอียดจำกัด (Finite-precision implementation) ขั้นตอนวิธี Leaky Filtered-X LMS นี้ยังสามารถช่วยลดปัญหาความผิดพลาดจากการปัดเศษตัวเลข นอกจากนั้น ผลของการรั่วจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพดี แต่ก็มีข้อเสียคือ สิ้นเปลืองการคำนวณมากขึ้น และคำตอบที่ได้จะมีไบแอส

1.5 ผลของการป้อนกลับและวิธีการแก้ปัญหา

จากรูปที่ 3.1 นอกจากไมโครโฟนอ้างอิงจะรับสัญญาณจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแล้ว หากไมโครโฟนอ้างอิง อยู่ใกล้ แหล่งกำเนิดวิฤติติภูมิหรือลำโพง สัญญาณ $y[n]$ จากลำโพงที่สร้างขึ้นเพื่อใช้กำจัดเสียงรบกวน ก็สามารถย้อนกลับเข้าไมโครโฟนอ้างอิงได้ ทำให้สัญญาณอ้างอิง ผิดเพี้ยนไป

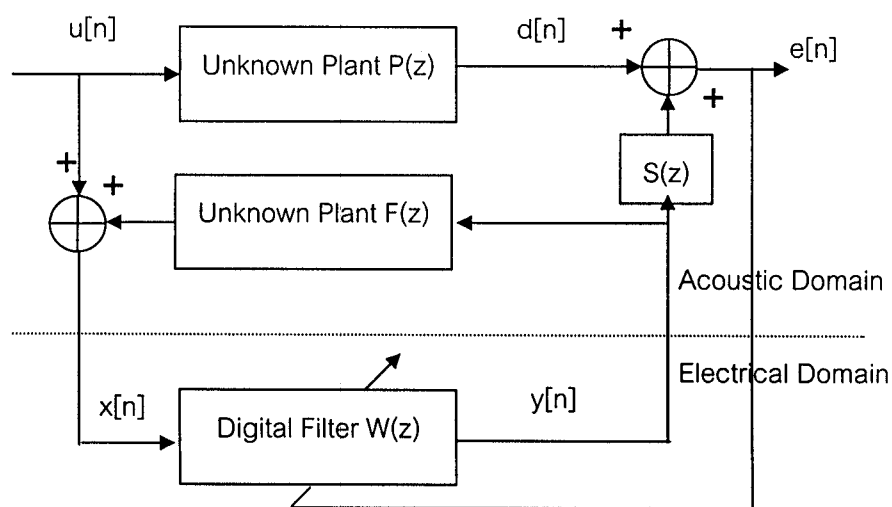
จากรูปที่ 3.7 สัญญาณรบกวนปฐมภูมิ (Primary noise) คือ $u[n]$ และ สัญญาณที่วัดได้ ที่ตัวรับรู้อ้างอิง คือ $x[n]$ และ $F(z)$ เป็นวิธีป้อนกลับจากสัญญาณออกจากวงจรกรอง $W(z)$ กลับไปยัง ตัวรับรู้อ้างอิง ฟังก์ชันถ่ายโอน $W(z)$ ในสถานะอยู่ตัว จะเท่ากับ

$$W_{opt}(z) = -\frac{P(z)}{S(z) + P(z)F(z)} \quad (3-13)$$

จากรูปที่ 3.7 ฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบเปิด $H_{OL}(z) = W(z)F(z)$ ในกรณีที่วงจร กรองปรับตัว $W_{opt}(z)$ เข้าสู่ค่าตอบที่ดีที่สุดนั้น จะได้ว่า

$$H_{OL}(z) = -\frac{P(z)F(z)}{S(z) + P(z)F(z)} \quad (3-14)$$

เราสามารถใช้อัตราส่วนของฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบเปิดนี้มาทดสอบเสถียรภาพของระบบ โดยจะที่ ระบบจะไม่มีเสถียรภาพ ถ้าหากเฟสล้าหลังของของฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบเปิดมีค่ามากกว่า 180 องศา ในขณะที่อัตราขยายของฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบเปิดมีค่ามากกว่าหนึ่ง



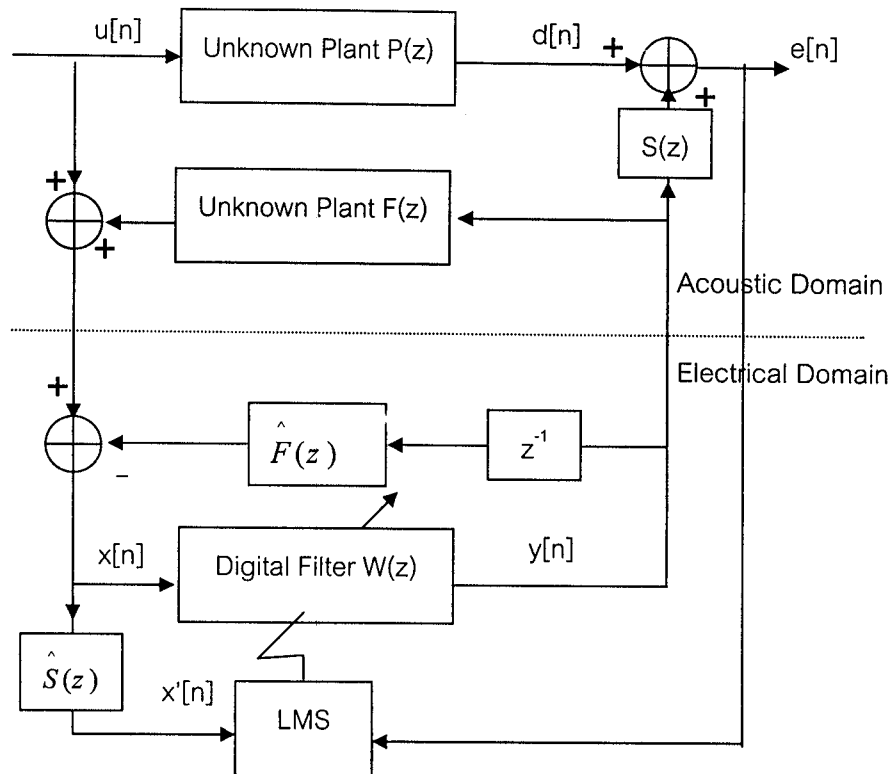
รูปที่ 3.7 แผนภาพบล็อกของระบบ ANC ที่มีการป้อนกลับ

วิธีการแก้ปัญหาวិธีป้อนกลับ

1.5.1 การทำวิธีป้อนกลับให้เป็นกลาง (Feedback Neutralization)

วิธีที่ง่ายที่สุดคือประมาณค่า $F(z)$ เพื่อใช้กำจัดเสียงสัญญาณป้อนกลับภายในตัวเครื่องควบคุมโดยใช้เทคนิคเกี่ยวกับการกำจัดเสียงสะท้อน (Echo cancellation) เราสามารถประมาณค่าแบบจำลองทางไฟฟ้าของวิธีป้อนกลับอย่าง off-line ด้วยวิธี LMS เมื่อได้คำตอบที่รู้แล้ว ก็ให้หยุด

การปรับตัว สัญญาณที่ออกจากวงจรกรอง $\hat{F}(z)$ จะหักล้างกับสัญญาณป้อนกลับที่ป้อนมาที่สัญญาณอ้างอิง ซึ่งเป็นการหักล้างทางไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.8



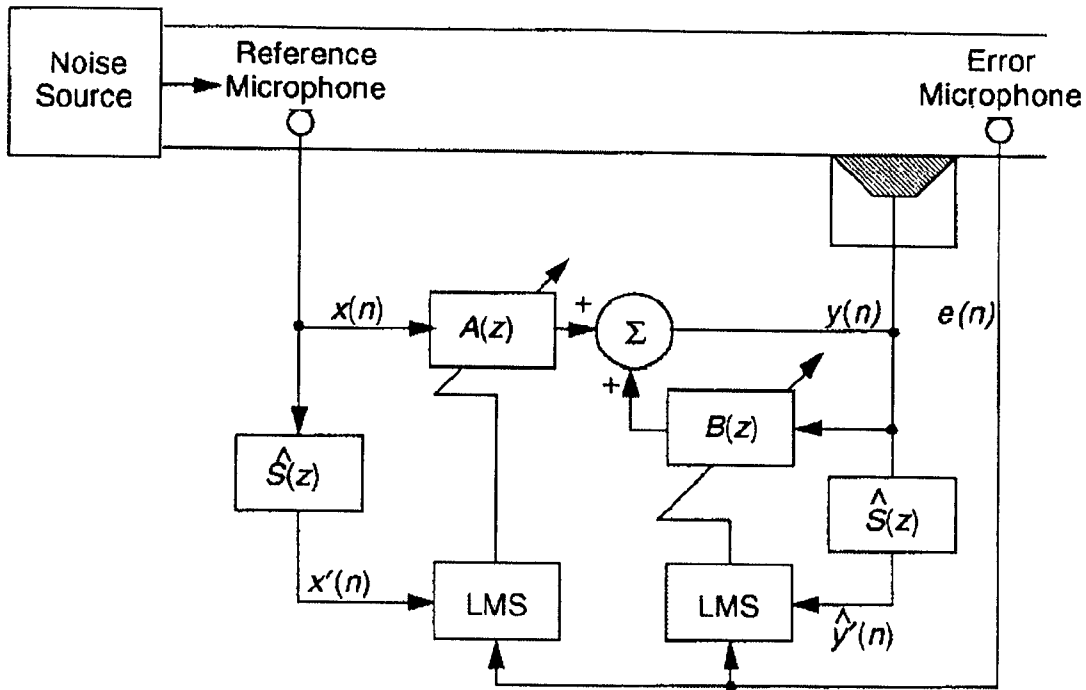
รูปที่ 3.8 การแก้ปัญหาโดยทำวิธีป้อนกลับให้เป็นกลาง

1.5.2 วงจรกรอง IIR แบบปรับตัว

จากสมการที่ 3-13 แสดงให้เห็นว่าในกรณีที่มีการป้อนกลับ ค่าตอบของวงจรกรองแบบปรับตัวที่ดีที่สุด $W_{opt}(z)$ จะมีลักษณะแบบ IIR ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งจะมีทั้ง poles และ zeros เราเรียกว่า ขั้นตอนวิธีแบบนี้ว่า Filtered-U LMS อย่างไรก็ตามวงจรกรองแบบปรับตัวลักษณะนี้มีข้อเสียคือ

- วงจรกรองชนิดปรับตัว แบบ IIR มีโอกาสที่จะไม่เสถียรภาพ ในขณะที่ปรับตัวเป็นได้ว่า poles บางตัวหลุดออกนอกวงกลมหนึ่งหน่วย
- การปรับตัวอาจติดกับดัก local minimum เนื่องจากฟังก์ชัน MSE โดยทั่วไปจะไม่เป็นสมการกำลังสอง
- เวลาที่ใช้รู้เข้าของวงจรกรองชนิดปรับตัว แบบ IIR นี้จะช้ากว่าเวลาที่ใช้ในกรณี

FIR



รูปที่ 3.9 แผนภาพของระบบ ANC ที่ใช้ขั้นตอนวิธี Filtered-U LMS (ที่มา Kuo , 1999)

สมการ Difference Equation เขียนในเทอมของเวกเตอร์

$$y[n] = \mathbf{a}^T[n] \mathbf{x}[n] + \mathbf{b}^T[n] y[n-1] \quad (3-15)$$

โดยที่ $\mathbf{a}[n] = [a_0[n] \ a_1[n] \ ... a_{L-1}[n]]^T$ เป็นสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง $A(z)$

$\mathbf{b}[n] = [b_1[n] \ b_2[n] \ ... b_M[n]]^T$ เป็นสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง $B(z)$

และมีสมการปรับปรุงสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองดังนี้

$$\mathbf{a}[n+1] = \mathbf{a}[n] - \mu \mathbf{x}'[n] e[n] \quad (3-16)$$

$$\mathbf{b}[n+1] = \mathbf{b}[n] - \mu \mathbf{y}'[n-1] e[n] \quad (3-17)$$

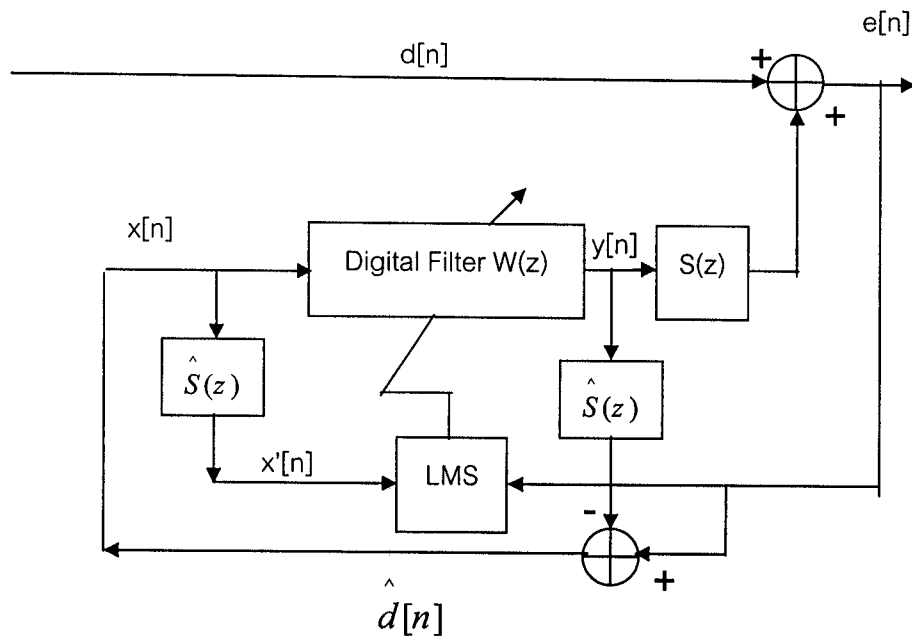
1.6 Normalized Least Mean Square (NLMS)

เป็นที่ทราบกันดีว่า NLMS มีข้อดีกว่า LMS ธรรมดาเพราะว่ามีการปรับ step size ของการปรับตัวให้แปรผกผันกับกำลังงานของสัญญาณ จึงทำให้มีการเข้าสู่ที่เร็วกว่า และมีค่าผิดพลาดคงเหลือต่ำกว่า อย่างไรก็ตามในระหว่างการปรับตัวในช่วงเริ่มต้นนั้น step size จะมีค่าเข้าใกล้ ค่าขอบเขตทางทฤษฎีข้างบน (Theoretical upper bound) ทำให้มีปัญหาเรื่องเสถียรภาพ

โดยเฉพาะหากนำมาใช้กับการประมวลสัญญาณแบบ Fix point ค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองในช่วงเริ่มต้นมีแนวโน้มที่จะ Overflow ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงใช้ขั้นตอนวิธี LMS ธรรมดา

2. เครื่องควบคุมเสียงรบกวนแบบไวงานชนิดป้อนกลับ (Feedback ANC)

จากรูปที่ 3.10 เนื่องจากไม่มีข่าวสารสัญญาณอ้างอิงจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนปฐมภูมิ ดังนั้นแนวคิดพื้นฐานที่สำคัญของระบบ ANC แบบป้อนกลับนี้คือ ANC ต้องพยายามหาค่าประมาณหรือสังเคราะห์สัญญาณรบกวนปฐมภูมิขึ้นเพื่อมาใช้อ้างอิง โดยคำนวณจากสัญญาณค่าผิดพลาด $e[n]$ ที่วัดได้ และสัญญาณ $y[n]$ ที่ส่งออกไปยังแหล่งกำเนิดทุติยภูมิ



รูปที่ 3.10 แผนภาพของระบบ ANC ที่ใช้ขั้นตอนวิธี Feedback Filtered-X LMS

$$X(z) = \hat{D}(z) = E(z) - \hat{S}(z)Y(z) \quad (3-18)$$

$$x[n] = \hat{d}[n] = e[n] - \sum_{m=0}^{M-1} \hat{s}_m y[n-m] \quad (3-19)$$

โดยที่ $\hat{S}(z)$ คือ ค่าประมาณของวิถีทุติยภูมิที่ประมาณได้

โดยทั่วไปแล้วโครงสร้าง ANC แบบป้อนไปหน้าจะมีสมรรถนะที่ดีกว่าแบบป้อนกลับ สาเหตุเนื่องจากมีข่าวสารของสัญญาณ ณ เวลาที่ทำการหักล้าง จากแหล่งกำเนิดปฐมภูมิ ค่าผิดพลาดคงเหลือเกิดจากความผิดพลาดของแบบจำลองของวิถีปฐมภูมิ (Primary path) และวิถีทุติยภูมิ (Secondary path) ในขณะที่โครงสร้างชนิดป้อนกลับจะไม่มีข่าวสารปัจจุบัน การพยายาม

พยากรณ์ค่าสัญญาณรบกวนปัจจุบันจากข้อมูลในอดีต จะมีค่าผิดพลาดการพยากรณ์เกิดขึ้นเสมอ (Prediction error) ข่าวดสารที่ไม่สามารถรู้ได้จากข้อมูลในอดีต จะมีอยู่ในข้อมูลปัจจุบันเท่านั้น เรียกว่า นวัตกรรม (Innovation) ดังนั้นสมรรถนะของ ANC ชนิดป้อนกลับจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการ พยากรณ์ค่าของสัญญาณรบกวนปฐมภูมิ $d[n]$

อย่างไรก็ตามความสนใจในการสร้างเครื่องกำจัดเสียงรบกวนแบบไวงาน (ANC) ได้ เปลี่ยนจากโครงสร้างแบบป้อนไปหน้า เป็นโครงสร้างแบบป้อนกลับ ตัวอย่างเช่น Omoto (2002), Elliot (2002), Kuo et al. (2003) เนื่องจาก

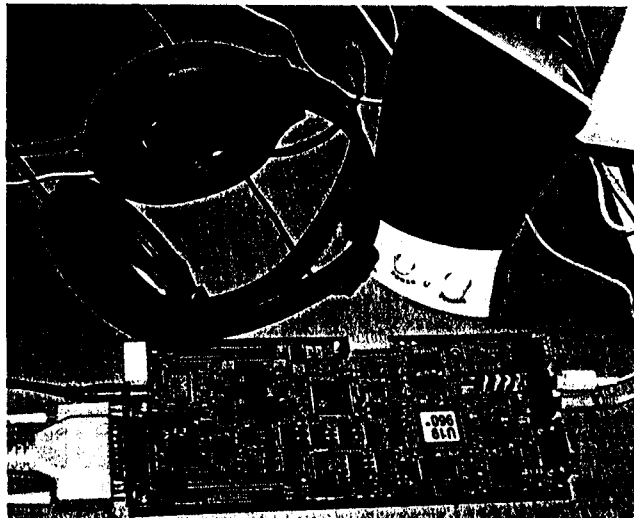
- ก) มีหลายๆสถานการณ์ที่เราไม่สามารถนำสัญญาณจากแหล่งกำเนิดสัญญาณปฐมภูมิ มาใช้ได้
- ข) มีการป้อนกลับหรือ Coupling ที่เราไม่ต้องการจากลำโพงทุติยภูมิไปยังไมโครโฟน อ่างอิง
- ค) การพัฒนาทฤษฎีระบบควบคุมแบบป้อนกลับ การวิเคราะห์เสถียรภาพ (Stability) และความคงทน (Robust) เป็นที่เข้าใจและรู้จักกันดี

บทที่ 4

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ฮาร์ดแวร์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ฮาร์ดแวร์ที่เป็นหัวใจหลักของงานวิจัยนี้ ก็คือ บอร์ด DSK TMS320VC5402 ซึ่งใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ที่ได้รับการออกแบบให้ใช้งานประมวลผลสัญญาณเสียงโดยเฉพาะ ซึ่งพียูมีโครงสร้างสถาปัตยกรรมแบบ Harvard คือมีบัสสำหรับโปรแกรม และบัสสำหรับข้อมูลแยกออกจากกัน มีไปป์ไลน์ 6 ระดับ ใช้ประมวลผลข้อมูลขนาด 16/32 บิต สามารถทำงานหนึ่งคำสั่งแล้วเสร็จในเวลา 10 นาโนวินาที บางชุดคำสั่งสามารถทำงาน 2 คำสั่งได้พร้อมๆ กัน ซึ่งเร็วกว่าไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่ใช้งานทั่วไปประมาณ 100 เท่า บอร์ด DSK มี CODEC TLC320AD50C สองตัว ซึ่งมี Anti-aliasing filter และ Reconstruction filter อยู่ในไอซี CODEC โปรเซสเซอร์สามารถรับส่งสัญญาณได้ 2 ช่องสัญญาณ ด้วยอัตราการสุ่มสัญญาณสูงสุด 22.05 KHz ในการพัฒนาโปรแกรมบอร์ด DSK จะติดต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านทาง Parallel port สำหรับรายละเอียดที่เกี่ยวกับบอร์ด DSK ไอซี และ Development tools ต่างๆ ที่ใช้ สามารถศึกษาได้จากคู่มือของ Texas Instrument²



รูปที่ 4.1 ฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดลอง

นอกจากบอร์ด DSK แล้ว อุปกรณ์ในการทดลองได้แก่ไมโครโฟนชนิด Piezoelectric และลำโพงที่ปรับความดังได้ 2 ชุด ซึ่งเป็นอุปกรณ์มีลติมีเดียที่หาซื้อได้ตามร้านคอมพิวเตอร์ทั่วไป

² คู่มือการใช้งาน

ไมโครโฟนใช้เป็น error microphone ลำโพงชุดหนึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดเสียงรบกวนปรุณภูมิ ซึ่งสัญญาณจะถูกสร้างจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ Tektronix CFG250 สำหรับลำโพงอีกชุดหนึ่งใช้เป็นวงจร pre-amplifier เพื่อใช้ปรับจูนความดังของเสียงทุติยภูมิ ในช่วงเริ่มต้นของการหาแบบจำลองของวิธีทุติยภูมิ หลังจากได้แบบจำลองดังกล่าวแล้วก็ไม่ต้องปรับจูนอีก

หูฟังเป็นหูฟังที่ขายในร้านขายเครื่องเสียงทั่วไป ในการทดลองนี้ใช้หูฟังยี่ห้อ Philip รุ่น PH 505 ซึ่งถูกดัดแปลงให้ติดไมโครโฟนในหูฟังข้างซ้าย สำหรับ Sound level meter ใช้ยี่ห้อ LASON-DAVIS รุ่น SPARK706

2. ซอร์ฟแวร์

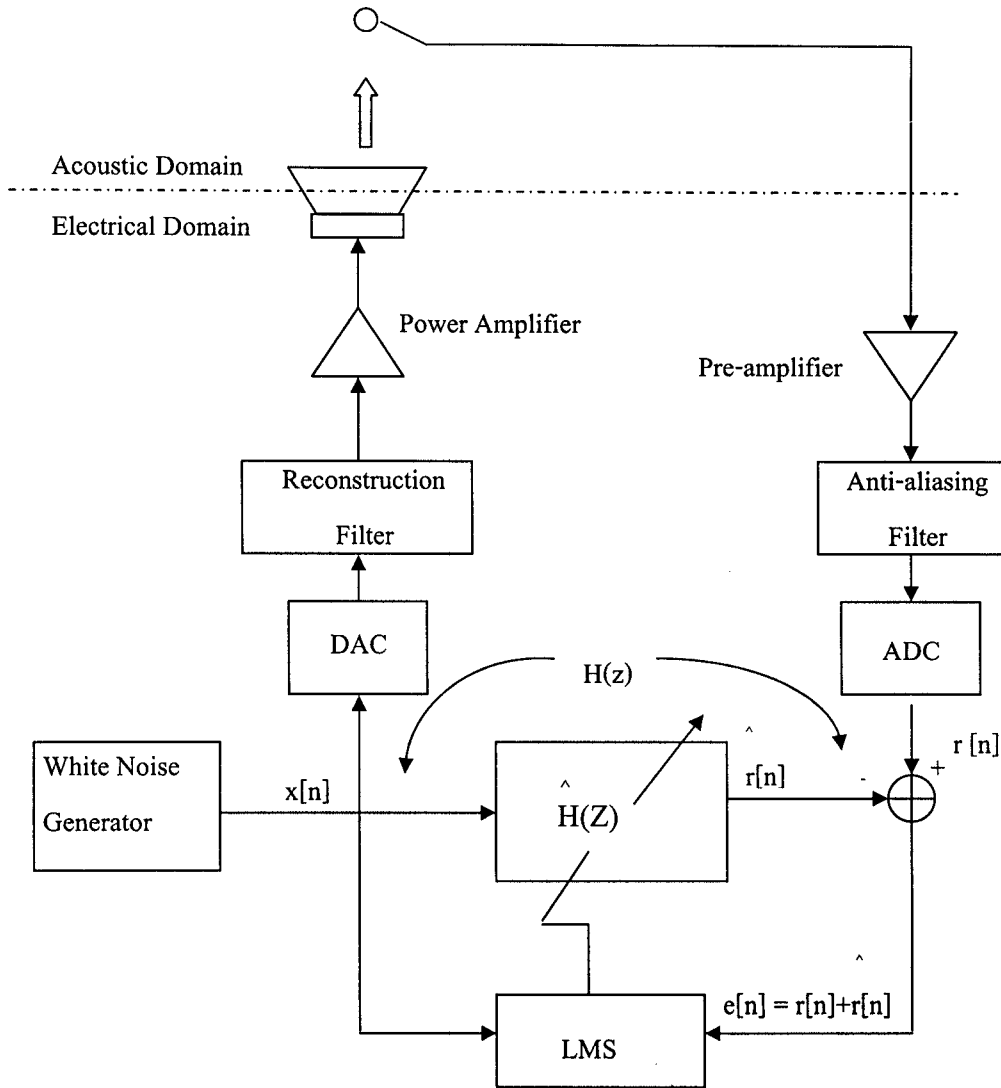
เพื่อให้การพัฒนาโปรแกรมเป็นไปด้วยความรวดเร็ว การจัดหน่วยความจำ และการจัดการอินเตอร์รัพท์ เราจะใช้ DSP/BIOS มาช่วย โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจะเป็นภาษา C ผสมกับ Assembly ซึ่งจะเป็นการใช้จุดเด่นของแต่ละเครื่องมือให้เป็นประโยชน์ เช่นสำหรับการประกาศตัวแปร การจัดหน่วยความจำ และการเรียกใช้ฟังก์ชันบางอย่างเช่น Random noise generator เราจะใช้ภาษา C และ DSP Library แต่ในโปรแกรมส่วนที่ต้องการความรวดเร็วในการทำงานจะเขียนด้วยภาษา Assembly TMS320C54X ในการทำงานวิจัยนี้เมื่อรับข้อมูลเสียงเข้ามาหนึ่งตัวอย่างด้วยการอินเตอร์รัพท์ โปรแกรมจะต้องทำงานให้แล้วเสร็จก่อนที่จะรับข้อมูลเสียงตัวอย่างถัดไป ดังนั้นเพื่อความรวดเร็วจึงความจำเป็นต้องใช้โปรแกรมภาษา Assembly

โดยทั่วไปตัวแปรที่ใช้จะมีขนาด 16 บิต แต่เนื่องจากในช่วงช่วงขณะเริ่มต้นของเฟสกำจัดเสียงรบกวนมีปัญหาเรื่องการล้น (Overflow) ของค่าสัมประสิทธิ์ $w_k[n]$ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้สัมประสิทธิ์ของวงจรกรองขนาด 32 บิต และเพื่อให้มีผลลัพธ์มีความละเอียดแม่นยำ ในการคำนวณคอนโวลูชัน จะใช้การคูณเลข 32×16 บิต ซึ่งต่างจากงานทั่วไป ที่จะใช้การคูณเพียง 16×16 บิต นอกจากนี้ยังใช้การปัดเศษแบบ Rounding เพื่อลดผลกระทบของการปัดเศษ

โปรแกรมการทำงาน Filtered-X LMS ชนิดป้อนกลับแบ่งการทำงานออกเป็น 2 เฟสคือเฟสประมาณค่าหาแบบจำลองของวิธีทุติยภูมิแบบไม่เชื่อมต่อตรง (Off-line secondary path modeling) ดังแสดงในรูป 4.2 และ หลังจากการหาแบบจำลองของวิธีทุติยภูมิได้แล้ว โปรแกรมก็จะทำงานในเฟสกำจัดเสียงรบกวน (Noise cancellation phase) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 รายละเอียดของขั้นตอนวิธีในแต่ละเฟสมีดังต่อไปนี้

2.1 เฟสประมาณค่าเพื่อ หาแบบจำลองของ วิธีทุติยภูมิแบบไม่เชื่อมต่อตรง (Off-line secondary path modeling phase) มีขั้นตอนดังนี้

2.1.1 ใช้ฟังก์ชัน $\text{rand}()$ ใน DSP C Library เพื่อสร้างสัญญาณ White Noise $x[n]$ ไปจับลำโพงในหูฟัง



รูปที่ 4.2 แผนภาพบล็อกการทำงานในเฟสหาแบบจำลองของวิถีทุติยภูมิแบบไม่เชื่อมต่อ

2.1.2 ใช้ไมโครโฟนที่ติดตั้งในหูฟังเพื่อวัดผลตอบสนองของวิถีทุติยภูมิ $r[n]$

2.1.3 คำนวณผลตอบสนองของวงจรกรอง FIR $H(z)$

$$\hat{r}[n] = \sum_{k=0}^{N-1} \hat{h}_k[n] x[n-k] \quad (4-1)$$

โดยที่ $\hat{h}_k[n]$ คือสัมประสิทธิ์ตัวที่ k ของวงจรกรอง FIR $H(z)$

2.1.4 คำนวณสัญญาณผิดพลาด $e[n]$

$$e[n] = r[n] - \hat{r}[n] \quad (4-2)$$

2.1.5 ใช้ขั้นตอนวิธี LMS ปรับสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง $\hat{h}_k[n]$:

$$\hat{h}_k[n+1] = \hat{h}_k[n] + \mu e[n] x[n-k] \quad ; k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4-3)$$

โดยที่ $0 < \mu < \frac{1}{NP_x}$

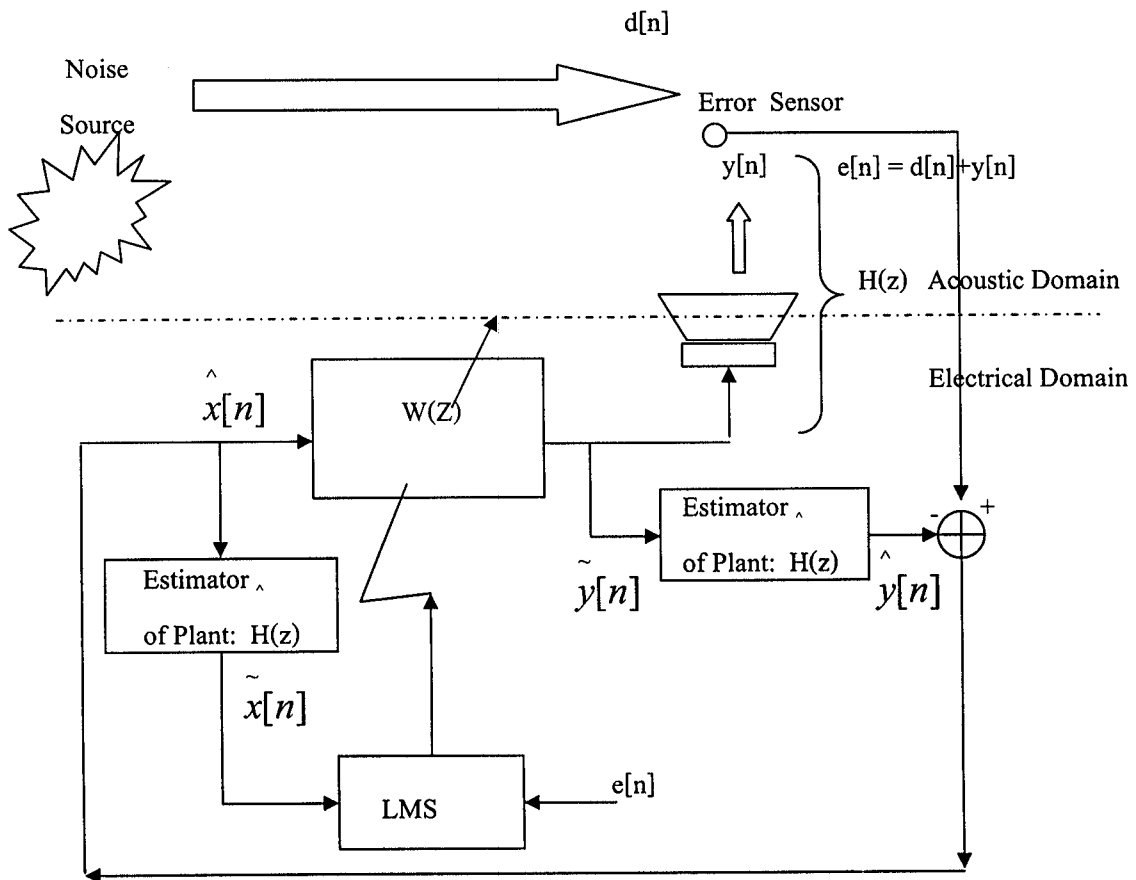
μ คือ step size ของการปรับตัว

P_x คือกำลังงานของสัญญาณเข้า $x[n]$

N คือ ความยาวของสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง $H(z)$

2.1.6 ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2.1.1-2.1.5 เป็นเวลา 15 วินาที แล้วจึงใช้สัมประสิทธิ์

$\hat{h}_k[n]$ เป็นค่าประมาณของผลตอบสนองอิมพัลส์ของวิฤติขยภูมิ ในเฟสการกำจัดเสียงรบกวน



รูปที่ 4.3 แผนภาพบล็อกการทำงานในเฟสกำจัดเสียงรบกวนของ Filtered X-LMS แบบป้อนกลับ

2.2 เฟสกำจัดเสียงรบกวน (Noise cancellation phase) ของ Filtered X-LMS แบบป้อนกลับ มีขั้นตอนดังนี้

2.2.1. ไมโครโฟนที่ติดตั้งในหูฟังวัดสัญญาณค่าผิดพลาด $e[n]$

2.2.2 คำนวณผลตอบสนองของวงจรกรองวิฤติขยภูมิที่จำลองขึ้น

$$\hat{y}[n] = \sum_{k=0}^{N-1} \hat{h}_k[n] \tilde{y}[n-k] \quad (4-4)$$

โดยที่ $\hat{h}_k[n]$ คือสัมประสิทธิ์ตัวที่ k ของวงจรกรอง FIR $\hat{H}(z)$

2.2.3 คำนวณค่าประมาณของสัญญาณรบกวนที่เข้ามา

$$\hat{x}[n] = e[n] - \hat{y}[n] \quad (4-5)$$

2.2.4 คำนวณสัญญาณด้านเสียงรบกวน

$$\tilde{y}[n] = \sum_{k=0}^{M-1} w_k[n] \hat{x}[n-k] \quad (4-6)$$

โดยที่ $w_k[n]$ คือสัมประสิทธิ์ตัวที่ k ของวงจรกรอง FIR $W(z)$

2.2.5 คำนวณค่า filtered-x version ของ $\hat{x}[n]$

$$\tilde{x}[n] = \sum_{k=0}^{N-1} \hat{h}_k[n] \hat{x}[n-k] \quad (4-7)$$

2.2.6 ใช้ขั้นตอนวิธี LMS ปรับค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง $w_k[n]$

$$w_k[n+1] = w_k[n] - \mu e[n] \tilde{x}[n-k] \quad ; k = 0, 1, \dots, M-1 \quad (4-8)$$

$$\text{โดยที่ } 0 < \mu < \frac{1}{MP_x'}$$

μ คือ step size ของการปรับตัว

P_x' คือกำลังงานของสัญญาณเข้า $\tilde{x}[n]$

M คือ ความยาวของสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง $W(z)$

2.2.7 ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2.2.1-2.2.6

หมายเหตุ ในงานวิจัยนี้จะใช้จำนวนสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง $H(z)$ และ $W(z)$ เท่ากัน

3. วิธีการวัด (Measuring method)

ด้วยงบประมาณที่จำกัด โครงการวิจัยนี้จึงไม่มีเครื่องมือเฉพาะทางที่ใช้ในงานวิจัยทางด้านนี้ แม้ว่าจะมี Sound level meter รุ่น SPARK706 แต่ก็ยังเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความดังของเสียงในที่เปิดโล่ง เมื่อนำมาใช้วัดความดังของเสียงในหูฟังขณะที่ครอบศีรษะอยู่ จึงกระทำไม่ได้ยาก เพราะมีปัญหาจากขนาดของ Probe ที่ใช้วัด ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงเสนอให้ใช้วิธีการวัดความดังเสียงอีกวิธีหนึ่ง กล่าวคือ ใช้ชิพของบอร์ด DSK คำนวณกำลังงานของสัญญาณโดยตรงจากสัญญาณเศษเหลือ $e[n]$ และสัญญาณรบกวนที่ชิพสามารถพยากรณ์ได้ $\hat{x}[n]$ ข้อมูลกำลังงานในรูปแบบ Q15 ณ เวลาต่างๆ ที่คำนวณได้จะถูกบันทึกค่าใน log file ของ DSP/BIOS หลังจากนั้นจะใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณค่า Noise reduction ratio และวาดกราฟเพื่อพิจารณาลักษณะการรบกวนของสัญญาณเศษเหลือ $e[n]$ วิธีการนี้แม้ว่าจะใช้งานได้ดีและทำให้เราสามารถประเมิน ตรวจสอบสมรรถนะของ ANC ที่พัฒนาขึ้นได้ แต่มีข้อเสียดังต่อไปนี้คือ

3.1 การคำนวณไม่ได้พิจารณาเรื่องการถ่วงน้ำหนัก ซึ่งเครื่องมือตามมาตรฐานสากล จะใช้การถ่วงน้ำหนักแบบ A

3.2 การคำนวณค่ากำลังงาน จะทำให้ให้สิ้นเปลืองเวลาในการทำงานของซีพียู

3.3 เนื่องจากซีพียูจะเห็นสัญญาณเฉพาะช่วงที่มีความถี่ต่ำครึ่งหนึ่งของความถี่ในการ สุ่มตัวอย่าง สัญญาณที่มีความถี่สูงกว่านี้จะถูกกรองทิ้งไปโดยวงจรกรองผ่านต่ำที่มีชื่อเรียกว่า Anti-aliasing filter ดังนั้นในกรณีของสัญญาณรบกวนที่มีแบนด์กว้าง กำลังงานที่คำนวณได้ย่อมต่ำกว่า กำลังงานในความเป็นจริง แต่ในกรณีของสัญญาณรบกวนที่มีความถี่เดียว จะไม่เกิดปัญหาดังกล่าว

4. การทดสอบสมรรถนะเบื้องต้น

การทดสอบสมรรถนะเบื้องต้นของ ANC ที่สร้างขึ้นจะใช้สัญญาณรบกวนความถี่ เดียวได้แก่ 100 Hz 150 Hz 200 Hz 300 Hz และ 400 Hz แล้วทดลองปรับจูนพารามิเตอร์ต่างๆเช่น step size จำนวนสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง และความถี่ในการสุ่มตัวอย่าง สัญญาณรบกวนปฐมภูมิ ที่มีความถี่ต่ำกว่า 100 Hz ไม่สามารถทดสอบได้ เนื่องจากข้อจำกัดเรื่องผลตอบสนองของลำโพงและ วงจรขยาย เมื่อใช้งานที่ความถี่ต่ำ ๆ จากการตรวจสอบพบว่าผลตอบสนองของอุปกรณ์จะมีลักษณะ ไม่เชิงเส้น

5. การทดสอบการกำจัดเสียงรบกวนชนิดแบนด์กว้าง

นอกจากเสียงรบกวนปฐมภูมิที่มีความถี่เดียว ผู้วิจัยได้ทดลองใช้เสียงรบกวนชนิด แบนด์กว้าง โดยใช้โปรแกรม MATLAB บันทึกเสียงรบกวนของพัดลม ด้วยความถี่ในการสุ่ม ตัวอย่าง 10 KHz เพื่อนำมาใช้ทดสอบการกำจัดเสียงรบกวนชนิดแบนด์กว้างของ ANC ที่สร้างขึ้น

บทที่ 5

ผลการทดสอบ

ในบทนี้จะเสนอผลการทดสอบความสามารถในการกำจัดเสียงรบกวนโดยใช้ Sound level meter และผลการทดสอบสมรรถนะของ ANC เมื่อปรับพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น step size และ จำนวนสัมประสิทธิ์

1. ความสามารถในการกำจัดเสียงรบกวนวัดโดย Sound level meter

ถึงแม้ว่าจะมีปัญหาในเรื่องขนาดของ Probe ที่ใช้วัดว่า ไม่เหมาะสมที่จะใช้วัดความดังของเสียงในหูฟัง แต่ผู้วิจัยก็ได้พยายามวัดได้ผลดังตารางที่ 5.1 โดยมีรายละเอียดในการวัดดังนี้

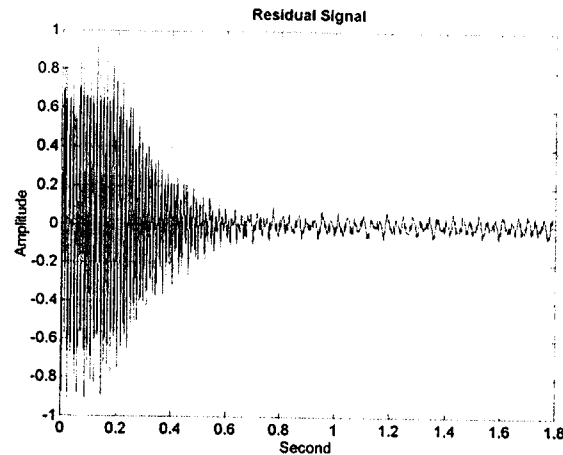
- 1.1 ก่อนทำการทดลองในห้องมีเสียงดัง 52.4 dBA
- 1.2 ใช้ค่า step size เท่ากับ 8 และใช้จำนวนสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง 128 ตัว
- 1.3 ความถี่ในการสุ่มตัวอย่าง 2 KHz

ตารางที่ 5.1 ผลการวัด Noise reduction ratio

ความถี่ของ สัญญาณรบกวน (Hz)	ความดังของเสียง ก่อนการกำจัด (dBA)	ความดังของเสียง หลังการกำจัด (dBA)	Noise reduction ratio (dBA)
150	79.5	65.2	14.3
200	83.3	63.6	19.7
300	84.2	67.3	16.9
400	86.4	62.8	23.6

2. ลักษณะของสัญญาณเศษเหลือ (Residual signal) $e[n]$

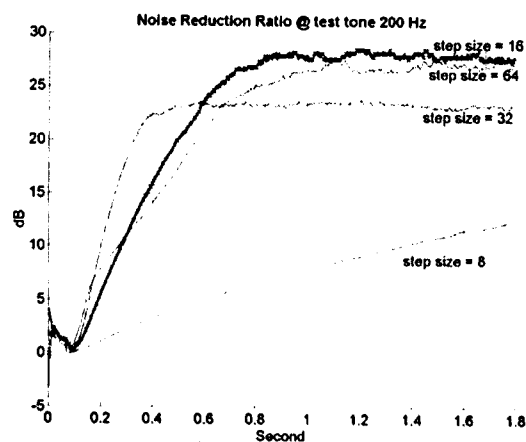
ในการทดลองนี้ใช้สัญญาณรบกวนที่มีความถี่ 200 Hz ความถี่ในการสุ่มตัวอย่าง 2 KHz จำนวนสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง 256 ตัว และ step size = 8 ด้วยการใช้ความสามารถของ DSP/BIOS บอร์ด DSK จะเก็บข้อมูล $e[n]$ ในรูปแบบ Q15 และส่งให้คอมพิวเตอร์ PC บันทึกเป็น log file หลังจากนั้นจึงใช้โปรแกรม MATLAB นำข้อมูลมาวาดรูป ดังรูปที่ 5.1 จะสังเกตเห็นว่าสัญญาณเศษเหลือค่อยๆลู่เข้า ภายในเวลา 0.6 วินาที



รูปที่ 5.1 สัญญาณเศษเหลือ $e[n]$ ความถี่ 200Hz ความถี่ในการสุ่มตัวอย่าง 2 KHz
จำนวนสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง 256 ตัว และ step size = 8

3. ผลของ step size

รูปที่ 5.2 แสดงผลของ step size ที่มีต่อ Noise reduction ratio และความเร็วในการลู่เข้า จะเห็นว่า step size ที่ให้ค่า Noise reduction ratio ดีที่สุดคือ step size = 16 ตามทฤษฎีเรื่องวงจรกรองแบบปรับตัว (Adaptive filter) หาก step size มีขนาดใหญ่ขึ้น การลู่เข้าจะเร็วมากขึ้น แต่สัญญาณเศษเหลือจะมีขนาดใหญ่ แต่จากรูปที่ 5.2 จะเห็นว่าในบางครั้งไม่ไปเป็นตามทฤษฎี สังเกตว่า step size = 32 จะให้เศษเหลือมากกว่า step size = 64



รูปที่ 5.2 Noise reduction ratio เมื่อใช้ความถี่ทดสอบ 200 Hz เปลี่ยน step size

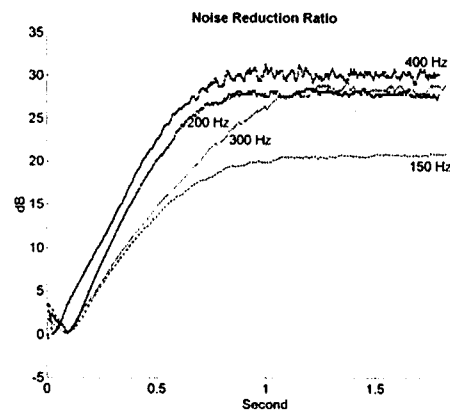
จำนวนสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง 128 ตัว ความถี่ในการสุ่มตัวอย่าง 2 KHz

ผู้วิจัยมีความเห็นว่าสาเหตุของเกิดปัญหาจากเรื่องผลของจำนวนบิตที่มีจำกัดในหนึ่งคำ (Finite word length effect) ซึ่งเป็นปัญหาปกติของโปรเซสเซอร์ชนิด Fix point หากพิจารณาเทอม

$\mu e[n]x[n-k]$ ในสมการ Update ของขั้นตอนวิธี LMS ค่า step size (μ) ที่มีขนาดเล็ก อาจทำให้เทอม $\mu e[n]x[n-k]$ มีค่าเท่ากับศูนย์หลังจากการปิดเศษได้ ทั้งๆที่ $e[n]$ ยังมีขนาดใหญ่อยู่

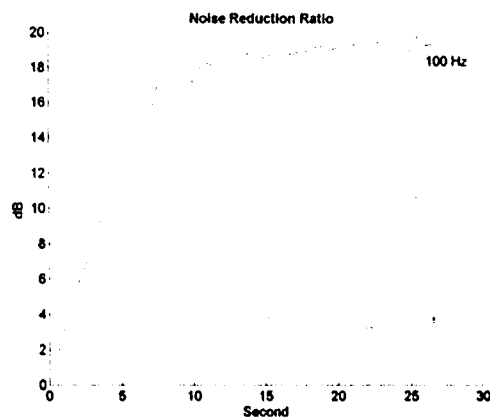
4. ความสามารถในการกำจัดเสียงรบกวนชนิดความถี่เดียว ณ ความถี่ต่างๆ

ในการทดลองเราตั้งขนาดของสัญญาณรบกวนให้คงที่ และเปลี่ยนความถี่ตั้งแต่ 100 – 400 Hz รูปที่ 5.3 แสดงให้เห็นว่า ANC ทำงานสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนลงได้ 20-30 dB ในช่วง 150-400 Hz ภายในเวลาหนึ่งวินาที สังเกตว่าความถี่ทดสอบ 150 Hz และ 300 Hz มีเวลาที่ใช้ในการลู่เข้าช้ากว่า ซึ่งเป็นปัญหาที่ควรจะมีการตรวจสอบหาสาเหตุในโอกาสต่อไป



รูปที่ 5.3 แสดง Noise reduction ratio เมื่อใช้ความถี่ทดสอบ 150-400 Hz

ความถี่ในการสุ่ม 2 KHz จำนวนสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง 128 ตัว และ step size = 16.



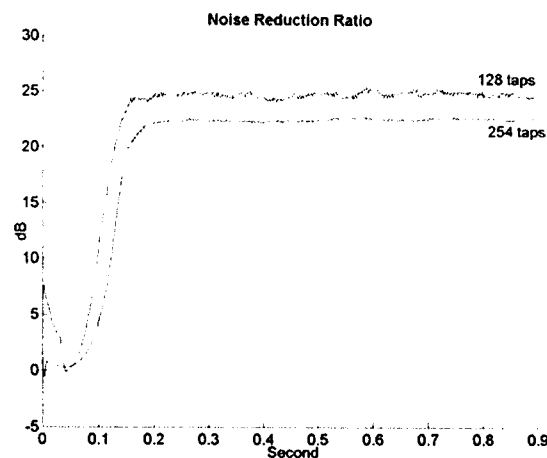
รูปที่ 5.4 แสดง Noise reduction ratio เมื่อใช้ความถี่ทดสอบ 100 Hz

ความถี่ในการสุ่ม 2 KHz จำนวนสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง 128 ตัว และ step size = 16.

รูปที่ 5.4 แสดงผลการทดสอบเมื่อใช้ความถี่ทดสอบ 100 Hz จะเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการลู่เข้ากินเวลามากกว่า 10 วินาที ผู้วิจัยสันนิษฐานว่าเกิดผลตอบสนองของลำโพงและวงจรขยายที่ทำงานไม่ดีในช่วงความถี่ต่ำๆ

5. ผลของจำนวนสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง

รูปที่ 5.5 แสดงให้เห็นว่าจำนวนสัมประสิทธิ์ๆ น้อยจะให้ผลที่ต่ำกว่า สาเหตุเข้าใจว่าเป็นปัญหาเรื่องจำนวนบิตที่มีจำกัดในหนึ่งคำ (Finite word length effect) เช่นกัน ในการคำนวณค่าผลลัพธ์ของวงจรกรอง FIR ถ้าสัมประสิทธิ์มีจำนวนมาก ผลลัพธ์ที่ได้จะมีการสะสมค่าผิดพลาดจากการปัดเศษมากกว่า อย่างไรก็ตามดูเหมือนว่า จำนวนสัมประสิทธิ์ๆ จะไม่มีผลต่อความเร็วในการลู่เข้า



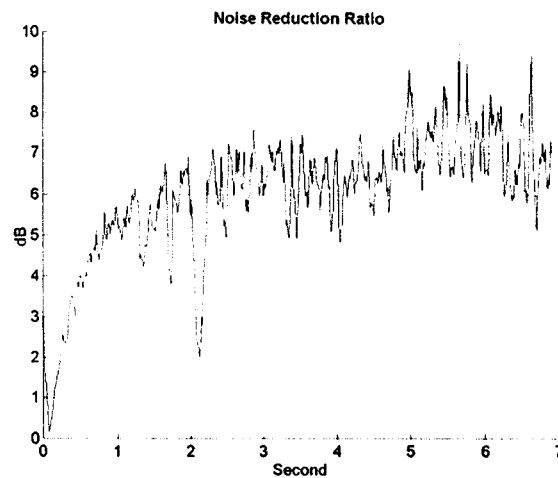
รูปที่ 5.5 Noise reduction ratios เปรียบเทียบระหว่างจำนวนสัมประสิทธิ์ๆเท่ากับ 128 ตัวและ 254 ตัว ใช้ความถี่ทดสอบ 200 Hz ความถี่ในการสุ่ม 4 KHz และ step size = 16.

6. การทดสอบการกำจัดเสียงรบกวนชนิดแบนด์กว้าง (สัญญาณรบกวนจากพัดลม)

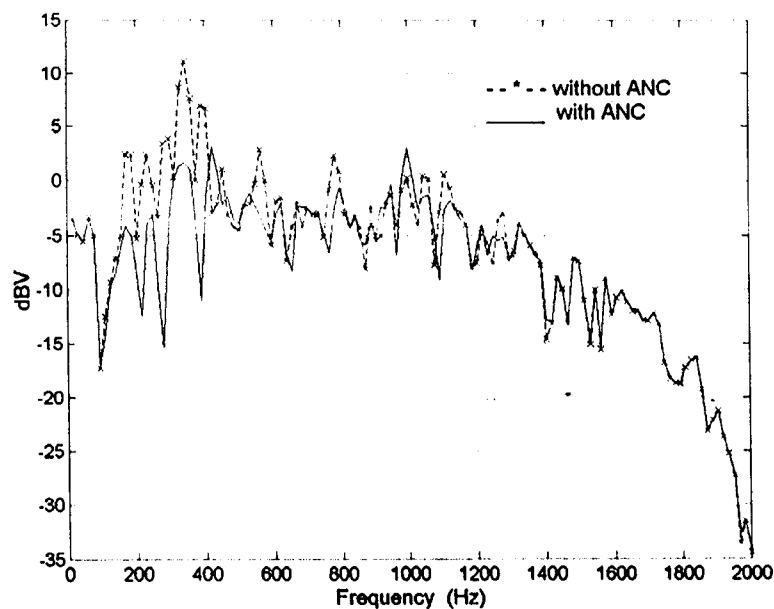
ผู้วิจัยได้ทดลองใช้เสียงรบกวนชนิดแบนด์กว้าง โดยใช้โปรแกรม MATLAB บันทึกเสียงรบกวนของพัดลม ด้วยความถี่ในการสุ่มตัวอย่าง 10 KHz แล้วใช้โปรแกรม MATLAB สร้างเสียงรบกวนดังกล่าว

ผลการทดลองจากรูปที่ 5.6 พบว่าความเร็วในการลู่เข้าประมาณ 2 วินาที และสามารถลดทอนเสียงรบกวนได้ประมาณ 7 dB ในขณะที่ทำการวัดใช้ Sound level meter SPARK706 พบว่าเสียงรบกวนลดลงประมาณ 9 dBA สันนิษฐานว่าในรูปที่ 5.6 หาก ANC ใช้เวลาทำงานนานกว่า 7 วินาทีจะสามารถลดทอนเสียงรบกวนได้มากกว่าที่เห็นในรูป แต่เนื่องหน่วยความจำบนบอร์ด DSK มีจำกัด ไม่สามารถเก็บข้อมูลได้นานกว่า 7 วินาที จึงไม่สามารถทำการเก็บข้อมูลมากกว่านี้ได้

เพื่อให้เข้าใจความสามารถในการกำจัดเสียงรบกวนของ ANC ที่สร้างขึ้นได้ดียิ่งขึ้น ผู้วิจัยจึงนำข้อมูลสัญญาณเศษเหลือ $e[n]$ และสัญญาณรบกวนที่ ANC ประมาณค่าได้ $x[n]$ ในรูปแบบ Q15 จากหน่วยความจำบนบอร์ด DSK มาคำนวณหา FFT ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยใช้ Hanning window เพื่อลดผลของการรั่วไหลของสเปกตรัม (Spectrum leak effect) ได้ผลลัพธ์แสดงในรูปที่ 5.7 จะเห็นได้ว่าในกรณีสัญญาณรบกวนจากพัดลมนี้ ANC ทำงานได้ดีในช่วง 150-400 Hz



รูปที่ 5.6 Noise reduction ratio เมื่อสัญญาณรบกวนเป็นชนิดแบนด์กว้าง (เสียงพัดลม) ใช้ความถี่ในการสุ่ม 4 KHz จำนวนสัปดาห์ 256 ตัว และ step size = 16.



รูปที่ 5.7 ขนาดสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนจากพัดลมก่อนและหลังทำการกำจัด

บทที่ 6

บทสรุป

1. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้แสดงการประยุกต์นำความรู้ด้านการประมวลผลสัญญาณเชิงเลข มาใช้ในทางปฏิบัติ โดยทดลองสร้างเครื่องกำจัดเสียงรบกวนแบบไวงาน (ANC) ต้นแบบ ชนิด 1x1 Feedback Filtered-X LMS (1 error microphone – 1 loudspeaker) ได้เป็นผลสำเร็จ ANC ที่สร้างขึ้นนี้สามารถลดทอนเสียงรบกวนในช่วงความถี่ 100-400 Hz ลงได้ประมาณ 20-30 dB อย่างไรก็ตามเนื่องจากงบประมาณที่จำกัด และขาดแคลนเครื่องมือวัด วิธีการวัดจึงไม่ได้ใช้เครื่องมือมาตรฐานที่มีการถ่วงน้ำหนักแบบ A สำหรับการวัดความดังเสียงโดยใช้ Sound level meter ที่มีการถ่วงน้ำหนักแบบ A นั้น ชุดทดลองไม่อยู่ในสถานะปิด (Closed enclosure) อย่างแท้จริง รวมทั้งทิศทางการวาง Probe ก็ส่งผลต่อค่าที่วัดได้ ดังนั้นตัวเลขที่ได้จากการวัดด้วย Sound level meter จึงอาจผิดพลาดได้

จากงานวิจัยนี้สังเกตจากการใช้จำนวนสัมประสิทธิ์ที่มากขึ้น พบว่าจำนวนบิตที่มีจำกัดในหนึ่งคำ (Finite word length effect) จะมีผลต่อความสามารถในการกำจัดเสียงรบกวนโดยรวม ในขณะที่ผลตอบสนองที่ไม่เป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ จะทำให้เวลาที่ใช้ในการลู่เข้ามากขึ้น

2. ข้อเสนอแนะ

2.1 จากงานวิจัยนี้สังเกตพบว่า ปัจจัยสำคัญที่ผลต่อสมรรถนะของ ANC ก็คือคุณภาพของไมโครโฟน หูฟัง (ลำโพง) และวงจรขยายเสียง ในงานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์ที่ขายกันอยู่ทั่วไป ในร้านค้าคอมพิวเตอร์ และเครื่องเสียง ซึ่งก็พบว่าผลตอบสนองในย่านความถี่ต่ำไม่ค่อยดีนัก ในงานวิจัยต่อไป ควรใช้อุปกรณ์ที่มีคุณภาพดีกว่านี้

2.2 ในทางทฤษฎี Filtered-X LMS ชนิดป้อนไปหน้า ไม่ได้คำนึงถึงผลการหน่วงเวลาที่เกิดจากวงจรแปลงแอนาลอกเป็นดิจิตอลของสัญญาณอ้างอิง ทำให้สัญญาณอ้างอิง $x[n]$ ซ้ำกว่าที่ควรจะเป็นเล็กน้อย ซึ่งควรจะทำการศึกษาและปรับปรุงในเรื่องนี้ต่อไป

2.3 เครื่องมือมาตรฐานที่ใช้ในงานวิจัยทางด้านนี้ได้แก่ Dynamic Signal Analyzer (HP 35670A) หากต้องการทำวิจัยในด้านนี้อย่างจริงจังก็จำเป็นต้องใช้เครื่องมือประเภทดังกล่าว

2.4 โปรแกรมที่สร้างขึ้นนี้สามารถนำไปดัดแปลง แก้ไข เพื่อประยุกต์ใช้แก้ปัญหาเฉพาะกรณีๆ ได้

บรรณานุกรม

ศิริพร วิวรรณโณภาส.2545.พฤษภาคม. มลภาวะทางเสียง...อันตรายใกล้ตัวที่ไม่ควรมองข้าม.

Available URL http://industrial.se-ed.com/itr96/itr96_114.asp

Bambang, R.T., Anggono, L., and Uchida, K. (2002).DSP Based RBF Neural Modeling and Control for Active Noise Cancellation. Proceeding of the 2002 IEEE International Symposium on Intelligent Control. pp460-466.Vancouver.27-30 October 2002.

Baek, K.H., and Elliott, S.J. (1993).Natural Algorithms for Choosing Source Locations in Active Control System. Workshop on Natural Algorithm in Signal Processing. pp.25/1-25/10. Chelmsford. Essex. 14-16 Nov 1993.

Bouchard, M., Paillard, B., and Dinh, C.T.L. (1999). Improved Training of Neural Networks for the Nonlinear Active Control of Sound and Vibration. IEEE Trans Neural Networks. pp391-401. vol.10. no.2. March 1999.

Boucher, C.C., Elliott,S.J., and Nelson, P.A. (1991). The effects of modeling errors on the performance and stability of active noise control systems.Proc.Recent Advances in Active Control of Sound Vibration.pp.290-301.

Chen, C. K., Chiueh, T. and Chen, J. H. (1999). Active Cancellation System of Acoustic Noise in MR Imaging. IEEE Trans. Biomedical Engineering. vol 46. no. 2.pp186-191.

Elliott, S.J. and Nelson, P.A. (1993).Active noise control. IEEE Signal Processing Mag.vol.10.pp 12-35.

Hasen, C.H. and Snyder, S.D. (1997).Active Control of Noise and Vibration. E&FN Spon: London.

Kido,K.(1975). Reduction of Noise by Use of Additional Sound Source. Proc. Inter-noise.pp647-650.

Kuo, S. M. and Morgan, D. R. (1996). Active Noise Control of Systems-Algorithms and DSP Implementations. Wiley. New York.

Kuo, S. M. and Morgan, D. R. (1999). Active Noise Control: A Tutorial Review. Proceeding of IEEE.vol.87. pp943-972.

Lueg, P. (1936). Process of silencing sound oscillation. U.S. Patent 2043416.

Meurers, T., Veres, S.M. and Elliott, S.J.(2002) Frequency selective feedback for active noise control. IEEE Control Systems Magazine. vol. 22.issue4.pp32 -41.

Morgan, D. R. (1980). An analysis of multiple correlation cancellation loopswith a filter in the auxiliary path. IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing.vol.28.pp454-467.

- Omoto, A. (2002). Active Noise Control: Adaptive Signal Processing and Algorithm. IEICE Trans., Fundamentals. vol.85-A. no.3. March 2002.
- Simshauser, E.D. and Hawley, M.E. (1955). The noise canceling headset – an active ear defender. Journal of the Acoustical Society of America. vol. 27.
- Salloway, A.J. and Millar, C.E. (1996). Active vibration and noise control. GEC Review. vol.11. no. 3.pp138-145.
- Tang, K.S., Man, K.F., Kwong, S., and Fleming, P.J. (1995). GA Approach to Multiple Objective Optimization for Active Noise Control. Algorithms and Architectures for Real-Time Control 95. pp. 13-19. Belgium 31 May-2 Jun 1995.
- Texas Instrument (1996). Design of Active Noise Control Systems With the TMS320 Family: SPRA042.
- Texas Instrument (2001). TMS320C54x DSP Reference Set, Volume 1: CPU and peripherals : SPRU131F.
- Texas Instrument (2001). TMS320C54x DSP Reference Set, Volume 2 Mnemonic Instruction Set : SPRU172B.
- Texas Instrument (2002). TMS320C54x DSP Library Programmer Reference : SPRU518C.
- Texas Instrument (2002). TMS320 DSP/BIOS User's Guide : SPRU423.
- Wan, E. A. (1996). Adjoint LMS: an efficient alternative to the filtered-X LMS and multiple error LMS algorithm. Proc. ICASSP96, Atlanta. vol3.pp1843-1846.
- Wangler, C. T. and Hansen. C. H. (1994). Genetic Algorithm Adaptation of Non-linear Filter Structures for Active Sound and Vibration Control. ICASSP-94. 19-22 April 1994. vol.3.ppIII/505 -III/508. Adelaide, South Australia.
- Yim, K. H. (1999). Genetic Adaptive IIR Filtering Algorithm for Active Noise Control. IEEE International Fuzzy Systems Conference Proceedings. August 22-25, 1999. Seoul. Korea.

ภาคผนวก
โปรแกรม ANC.C

```

/*****
/*      File      :      ANC.C      */
/*      Date      :      02/19/2003      */
/*      Author     :      Somsak Vanit-Anunchai      */
/*      Module     :      */
/*      Purpose    :      1x1 Feedback Filtered-X LMS active noise controller      */
/*      Copyright  :      © 2002,2003 Suranaree University of Technology      */
/*      Nakhon Rathasima      */
*****/
#include <std.h>
#include <log.h>
#include "ANCcfg.h"
#include <c:\ti\c5400\dsk5402\include\type.h>
#include <c:\ti\c5400\dsk5402\include\board.h>
#include <c:\ti\c5400\dsk5402\include\codec.h>
#include <c:\ti\c5400\dsk5402\include\mcbasp54.h>
#include <swi.h>
#include <c:\ti\c5400\dsplib\include\math.h>          /* DSP LIBRARY*/
#include <c:\ti\c5400\dsplib\include\tms320.h>        /* DSP LIBRARY*/
#include <c:\ti\c5400\dsplib\include\dsplib.h>        /* DSP LIBRARY*/
/*****
/*      Define Constants      */
*****/
#define Fs 2000          /* Sampling Rate      */
#define LogLength 511    /* Log File Length used by DSP/BIOS      */
#define Ns 2             /* Record Time      */
#define NX 1
#define NW 512
#define NH 512
#define MAXNH 1024
#define McBSP1_RX_MASK 0x0400
DATA aaa;
DATA enn;
DATA i;
#pragma DATA_SECTION (dbuffer,".dbuffer")
DATA dbuffer[NW];
DATA *dbptr = dbuffer;

#pragma DATA_SECTION (h,".coeffs")
DATA h[MAXNH];
DATA *hptr = h;

#pragma DATA_SECTION (W,".coeffs_W")
DATA W[MAXNH];
DATA *wptr = W;
//
#pragma DATA_SECTION (yn,".ybuffer")
DATA yn[NH];
DATA *yptr = yn;

#pragma DATA_SECTION (xHATn, ".xbuffer")
DATA xHATn[NW];

```



```

/*****
/* Global Variables
*****/

extern SWI_Obj CODEC_swi;          /* Handset Codec SWI - externally defined */
SWI_Handle codecSwiHandle = &CODEC_swi; /* Handset Codec SWI Handle */
HANDLE hHandset;                  /* Handset Codec Handle */

/*****
/* void main(void) - MAIN
/*
/*
/* This functions initializes the the handset codec.
*****/

void main()

{
    rand16init();

    /* Open Handset Codec */

    hHandset = codec_open(HANDSET_CODEC); /* Acquire handle to handset codec */

    /* Set codec parameters */

    codec_sample_rate(hHandset,SR_2000); /* 2KHz sampling rate*/
    codec_dac_mode(hHandset, CODEC_DAC_15BIT); /* DAC in 15-bit mode */
    codec_adc_mode(hHandset, CODEC_ADC_15BIT); /* ADC in 15-bit mode */

    codec_ain_gain(hHandset, CODEC_AIN_12dB); /* 12dB gain on analog input to ADC */
    codec_aout_gain(hHandset, CODEC_AOUT_MINUS_0dB); /* -6dB gain on analog output from DAC */

    C54_enableIMR(McBSP1_RX_MASK);

/*****
/*
/* Initialize all vectors and buffers
/*
*****/
    for (i=0; i<512; i++) dbuffer[i] = 0;
    for (i=0; i<512; i++) W[i] = 0;
    for (i=0; i<512; i++) h[i] = 0;
    for (i=0; i<512; i++) xHATn[i] = 0;
    for (i=0; i<512; i++) yn[i] = 0;
    for (i=0; i<512; i++) en[i] = 0;

}

/*****End Main*****/

```

```

/*****
/* void handsetCodecService(void) - Handset Codec (McBSP 1) RX service */
/*
/* This function posts a SWI which in turn performs the Phase1 */
/*****
void handsetCodecService(void)
{
    SWI_post(codecSwiHandle);
}
/*****

/*****
/* void Phase1(void) - Handset Codec SWI Function */
/*
/* This function reads a data sample from the handset codec receive channel */
/* and Perform Phase1 of secondary path modeling */
/*****

void Phase1 (void)
{

// Set math and overflow modes
//-----
asm("      RSBX      OVA                      ");
asm("      RSBX      OVB                      ");
asm("      SSBX      OVM                      ");
asm("      SSBX      SXM                      ");

if (on_line ==0)
{

        off_line = off_line+3;
        /* Read sample from and write back to handset codec */

        *yptr = *(volatile u16*)DRR1_ADDR(HANDSET_CODEC);
        rand16(&aaa,NX);
        *(volatile u16*)DXR1_ADDR(HANDSET_CODEC) = aaa;

//-----
asm(" STM      hbuf_len, BK                      ");
asm(" STM      #1,AR0                      ");
asm(" MVDM      _dbptr, db_ptr          ; need to collect *AR4-> *dbptr ");
asm(" MVDM      _hptr, h_ptr            ;AR3                      ");
asm(" MVDM      _yptr, y_ptr            ;AR5 --> y(n-M)             ");
asm(" MVKD      _xn, *db_ptr+0%         ");
asm(" MVDM      _eptr, e_ptr            ;AR2                      ");
asm(" SSBX      FRCT                    ;*****                      ");
/*-----*/
asm(" STM      cofh_len_3+2,brc          ");
asm(" SUB      b,b                      ; Clear ACC-B              ");
asm(" MVMD      db_ptr, _dbptr          ");
asm(" RPTB      dp_end1-1              ");
asm(" MAC      *db_ptr+0%, *h_ptr, B, B      ; t = d(n)             ");
asm(" DLD      *h_ptr+, A                ");
asm(" BCD      post, AGT                  ");
asm(" AND      #0FFFFh,A,A              ");

```

```

asm(" NOP                                                                    ");
asm(" OR          #0FFFFh,16,A,A                                            ");
asm("post                                                                    ");
asm(" SFTA          A, 15                                                    ");
asm(" MPYA          A                                                        ");
asm(" ADD          #1,14,A                                                  ");
asm(" ADD          A,-15,B                                                    ; shall be 15
asm("dp_end1                                                                    ");
asm(" SUB          *y_ptr+0%,16,b,A                                           ; AR5 point to y(n-M+1)
asm(" NEG          A                                                        ");
asm(" ADD          *(_K8000), A                                              ");
asm(" STH          A,*e_ptr                                                  ");
asm(" NOP                                                                    ");
asm(" NOP                                                                    ; Solving Pipeline conflict
asm(" MVMD  y_ptr, _yptr                                                    ; Update Y_Pointer
//-----
// Initialize registers
asm(" STM          hbuf_len, BK                                              ");
asm(" STM          #1,AR0                                                    ");
asm(" STM          coh_len_3,brc                                             ");
asm(" MVDM         _hptr, h_ptr                                              ; AR3 is used
asm(" SSBX         FRCT                                                      ;*****
// -----
// ; Loop through (nh-2) taps: compute filter and adapt at = time
// -----
asm(" LD          #-9,ASM                                                    ; clear ASM (used by st||mpy)
asm(" MPY         *db_ptr+0%, *e_ptr,B                                         ; b = mu_error * x(n-NH)
asm(" ADD         #1, 11, B                                                  ");
asm(" SFTA         B, shift_mu                                                ; point to x(n-NH+1)

asm(" RPTBD         lms_end1 -1                                              ");
asm(" DLD          *h_ptr,A           ; B = mu_error * x(n-NH) + h(NH)
asm(" ADD          B, ASM, A                                                  ");
asm("lms_beg1                                                                    ");
asm(" DST          A, *h_ptr+         ; update h(NH) point to h(NH-1)
asm(" MPY         *db_ptr+0%, *e_ptr,B ; b = mu_error * x(n-NH+1)
asm(" ADD         #1,11,B                                                  ");
asm(" SFTA         B, shift_mu                                                ");
asm(" DLD          *h_ptr,A                                                  ");
asm(" ADD         B, ASM, A                                                  ");
asm("lms_end1                                                                    ");
//
// ; Perform 1st tap outside to avoid that the oldest
// ; sample is over written before updating the h(0) coef
// -----
asm(" DST          A, *h_ptr+         ; update last coef h(1) point to h(0)
asm(" MPY         *db_ptr+0%, *e_ptr+0%, B ; update last coef h(1)
asm(" ADD         #1, 11, B                                                  ");
asm(" SFTA         B, shift_mu                                                ");
asm(" DLD          *h_ptr,A           ; point to x(n-NH+1)
asm(" ADD         B,ASM,A                                                  ");
asm(" DST          A, *h_ptr+         ;point to h(M)
asm(" MVMD  e_ptr,_eprtr                                                    ; need to collect
xn = aaa;
if (off_line > 627660)
{

```

```

        on_line = 1;
        for (i=0; i<512; i++) dbuffer[i] = 0;
        for (i=0; i<512; i++) en[i] = 0;
    };

};

if (on_line == 1)
{
asm("        RSBX        OVA        ");
asm("        RSBX        OVB        ");
asm("        SSBX        OVM        ");
asm("        SSBX        SXM        ");

    *eptr = *(volatile u16*)DRR1_ADDR(HANDSET_CODEC);
/*
bit_cnt++;
if (bit_cnt == Fs*Ns/511)
{
    bit_cnt = 0;
    LOG_printf(&trace, "%d %d", PS, PE);
};
*/
asm(" STM          hbuf_len, BK          ");
asm(" STM          #1,AR0          ");
asm(" MVDM          _dbptr, db_ptr          ; AR4-> *dbptr          ");
asm(" MVDM          _hptr, h_ptr          ; AR3          ");
asm(" MVDM          _yptr, y_ptr          ; AR5 --> y(n-M)          ");
asm(" MVDM          _eptr, e_ptr          ; AR2          ");
asm(" SSBX          FRCT          ;*****          ");
/*-----*/
asm(" STM          cofh_len_3+2,brc          ");
asm(" SUB          B,B          ");
asm(" RPTB          dp_end2-1          ");
asm(" MAC          *y_ptr+0%, *h_ptr, B, B          ; t = d(n)          ");
asm(" DLD          *h_ptr+, A          ");
asm(" BCD          post2, AGT          ");
asm(" AND          #0FFFFh,A,A          ");
asm(" NOP          ");
asm(" OR          #0FFFFh,16,A,A          ");
asm(" post2          ");
asm(" SFTA          A, 15          ");
asm(" MPYA          A          ");
asm(" ADD          #1,14,A          ");
asm(" ADD          A,-15,B          ; shall be 15          ");
asm(" dp_end2          ");
asm(" sub          *e_ptr ,16, b, A          ; AR5 point to y(n-M+1)          ");
asm(" NEG          A          ");
asm(" ADD          *(_K8000), A          ");
asm(" STH          A,*db_ptr          ");
//-----
asm(" NOP          ");
asm(" NOP          ");
asm(" STM          cofh_len_3+2,brc          ");
asm(" SQR          *db_ptr+0%, B          ");
asm(" SFTA          B,shift_PS          ");
asm(" DADD          *(_powerS), B          ");
asm(" SQR          *db_ptr, A          ");

```

```

asm(" SUB          A,shift_PS, B                               ");
asm(" DST          B,*(_powerS)                               ");
asm(" ADD          *(_K8000), B                               ");
asm(" STH          B,*(_PS)                                   ");
asm(" SUB          B,B                                         ");
//-----
//      dn      |      |
//      ---->   | W(z) |-----> yn output
//      |        |      |
// OUTPUT from W(Z) into Ybuffer   y_ptr point to y(n-M) ..W(M)
// d(n) as input to W(Z)
//
//
// Store length of coefficient vector/ delay buffer in BK
// register
//-----
asm(" STM          wbuf_len, BK                               ");
asm(" MVMD         db_ptr,_dbptr                               ; need to collect *AR4-> *dbptr ");
asm(" STM          #1,AR0                                     ");
asm(" MVDM         _wptr,w_ptr                               ;AR3                               ");
asm(" MVDM         _yptr,y_ptr                               ;AR5 --> y(n-M)                               ");
//-----
// Sum w * d^ for next y value
/*-----*/
//      *db_ptr is _dbptr
asm(" RPTB         dp_end_w-1                                 ");
asm(" MAC          *db_ptr+0%, *w_ptr, B, B                   ; t = d(n)                               ");
asm(" DLD          *w_ptr+,A                                   ");
asm(" BCD          positive_w, AGT                             ");
asm(" AND          #0FFFFh,A,A                               ");
asm(" NOP                                                  ");
asm(" OR           #0FFFFh,16,A,A                             ");
asm("positive_w                                         ");
asm(" SFTA         A, 15                                       ");
asm(" MPYA         A                                           ");
asm(" ADD          #1,14,A                                     ");
asm(" ADD          A,-15,B                                     ; shall be 15                               ");
asm("dp_end_w                                         ");
/*-----*/
asm(" ADD          *(_K8000), B                               ");
asm(" STH          B,*y_ptr+0%                               ; AR5 point to y(n-M+1)                               ");
asm(" NOP                                                  ");
asm(" NOP                                                  ");
*(volatile u16*)DXR1_ADDR(HANDSET_CODEC) = *yptr;
asm(" MVMD         y_ptr, _yptr                               ");
// AR4: db_ptr -> d(n-M); AR3: w_ptr -> w(M);
// AR5: _yptr --> y(n-M+1)
//Circle complete

```

```

//-----
//      dn      |      |
//      ---->   | S(z) | ----> x^n output
//      |        |      |
// AR4 point to dbuffer pointer d(n-M) smooth AR4
// OUTPUT from S(Z) into dbuffer db_ptr point to d(n-M) ..h(M)
// d(n) as input to S(Z)
//      Store length of coefficient vector/ delay buffer in BK
//      register
//-----
asm(" STM          hbuf_len, BK                                ");
asm(" STM          #1,AR0                                    ");
asm(" MVDM         _dbptr,db_ptr          ; need to collect *AR4-> *dbptr ");
asm(" MVDM         _hptr,h_ptr           ;AR3                          ");
asm(" MVDM         _xHATnptr,xHATn_ptr   ;AR5                          ");
//-----
// Sum w * d^ for next y value
/*-----*/
//      *db_ptr is _dbptr
/*-----*/
asm(" STM          cofh_len_3+2,brc                                ");
asm(" SUB          B,B                                           ");
asm(" RPTB         dp_end_xhat-1                                ");
asm(" MAC          *db_ptr+0%, *h_ptr, B, B          ; t = d(n) ");
asm(" DLD          *h_ptr+,A                                     ");
asm(" BCD          post_xhat, AGT                                ");
asm(" AND          #0FFFFh,A,A                                   ");
asm(" NOP                                                  ");
asm(" OR           #0FFFFh,16,A,A                                ");
asm(" post_xhat                                         ");
asm(" SFTA         A, 15                                         ");
asm(" MPYA         A                                           ");
asm(" ADD          #1,14,A                                       ");
asm(" ADD          A,-15,B                                     ; shall be 15 ");
asm(" dp_end_xhat                                         ");
/*-----*/
asm(" ADD          *(_K8000), B                                ");
asm(" STH          B,*xHATn_ptr+0%          ; AR5 point to y(n-M+1) ");
asm(" NOP                                                  ");
asm(" NOP                                                  ");
asm(" MVMD         xHATn_ptr, _xHATnptr                                ");
/*-----*/
//UPDATE W(n)
/*-----*/
asm(" RSBX         C16                                           ");
asm(" MVDM         _eptr,e_ptr          ; AR2 I/P point to ebuffer ");
asm(" MVDM         _xHATnptr, db_ptr          ;AR4 start xHAT(n-M) ");
asm(" MVDM         _wptr, h_ptr           ;AR3                          ");
//-----
asm(" SQUR         *e_ptr+0%, B                                ");
asm(" SFTA         B,shift_PE                                   ");
asm(" DADD         *(_powerE), B                                ");
asm(" SQUR         *e_ptr-0%, A                                ");
asm(" SUB          A,shift_PE, B                                ");
asm(" DST          B,*(_powerE)                                ");
asm(" ADD          *(_K8000), B                                ");

```

```

asm(" STH          B,*( _PE)                                ");
asm(" NOP")                                                ");
asm(" NOP")                                                ");
asm(" STM          cofw_len_3,brc                          ");
asm(" STM          wbuf_len, BK                            ");
asm(" STM          #1,AR0                                  ");
//-----
asm(" MPY          *db_ptr+0%, *e_ptr,A                    ; A = error * x(n-NH) ");
asm(" MPYA         *(_mu)                                ; AH*mu-->B, mu -> T ");
asm(" BCD          post20, AGT                             ");
asm(" AND          #0FFFFh,A,A                            ");
asm(" NOP")                                                ");
asm(" OR           #0FFFFh,16,A,A                          ");
asm("post20")                                              ");
asm(" SFTA         A, 15                                   ");
asm(" MPYA         A                                     ");
asm(" ADD          #1,14,A                                 ");
asm(" ADD          A,-15,B                                ; shall be 15 ");
asm(" RPTBD        lms_end2 -1                             ");
asm(" DLD          *h_ptr, A                              ; B = mu_error * x(n-NH) + h(NH) ");
asm(" SUB          B, A                                    ");
asm("lms_beg2")                                           ");
asm(" DST          A, *h_ptr+                             ; update h(NH) point to h(NH-1) ");
asm(" MPY          *db_ptr+0%, *e_ptr,A                    ; A = error * x(n-NH) ");
asm(" MPYA         *(_mu)                                ; AH*mu-->B, mu -> T ");
asm(" BCD          post21, AGT                             ");
asm(" AND          #0FFFFh,A,A                            ");
asm(" NOP")                                                ");
asm(" OR           #0FFFFh,16,A,A                          ");
asm("post21")                                              ");
asm(" SFTA         A, 15                                   ");
asm(" MPYA         A                                     ");
asm(" ADD          #1,14,A                                 ");
asm(" ADD          A,-15,B                                ; shall be 15 ");
asm(" DLD          *h_ptr,A                               ; point to x(n-NH+1) ");
asm(" SUB          B,A                                    ");
asm("lms_end2")                                           ");
//-----
//";
//"; ; Perform 1st tap outside to avoid that the oldest
//"; ; sample is over written before updating the h(0) coef
//"; ;
//-----
asm(" DST          A, *h_ptr+                             ; update last coef h(1) point to h(0) ");
asm(" MPY          *db_ptr+0%, *e_ptr+0%,A                ; A = error * x(n-NH) ");
asm(" MPYA         *(_mu)                                ; AH*mu-->B, mu -> T ");
asm(" BCD          post11, AGT                             ");
asm(" AND          #0FFFFh,A,A                            ");
asm(" NOP")                                                ");
asm(" OR           #0FFFFh,16,A,A                          ");
asm("post11")                                              ");
asm(" SFTA         A, 15                                   ");
asm(" MPYA         A                                     ");
asm(" ADD          #1,14,A                                 ");
asm(" ADD          A,-15,B                                ; shall be 15 ");
asm(" DLD          *h_ptr,A                               ; point to x(n-NH+1) ");
asm(" SUB          B,A                                    ");
asm(" DST          A, *h_ptr+                             ;point to h(M) ");

```



```
asm(" MVMD      e_ptr,_e_ptr      ; need to collect      ");  
//LOG_enable(&trace);  
}  
}
```

ประวัติผู้วิจัย

สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย เกิดเมื่อ 20 เมษายน 2508 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี 2528 ได้ศึกษาระดับปริญญาโทต่อด้วยทุนการรถไฟแห่งประเทศไทย สำเร็จการศึกษา Master of Science in Electrical Engineering ทางด้าน Communications & Signal Processing จาก University of South Florida ประเทศสหรัฐอเมริกา เมื่อปี 2536 และต่อมา ในปี 2545 ได้สำเร็จการศึกษาเศรษฐศาสตรมหาบัณฑิต จากมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ด้วยงานวิจัยวิทยานิพนธ์ทางด้านเศรษฐมิติ ที่นำมาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างตลาดโทรคมนาคม นอกจากประสบการณ์ในการออกแบบระบบควบคุมสัญญาณไฟจราจรและออกแบบระบบโทรคมนาคม แล้ว งานที่เชี่ยวชาญอีกส่วนหนึ่งเป็นการประยุกต์นำความรู้ด้านการประมวลผลสัญญาณเชิงเลข มาใช้งานในด้านโทรคมนาคม อาทิเช่นเขียนโปรแกรมเวลาจริงที่ใช้สร้างเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ของระบบ AMPS ระบบ IS-54 Modem V.34 และ เครื่องกำจัดเสียงสะท้อนในโทรศัพท์เคลื่อนที่