



เครื่องจัดเสียงรบกวนแบบปรับตัวได้

Adaptive Noise Canceller

สิทธิชัย กุลศรี

Sitthichai Kulsri

วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Master of Engineering Thesis in Electrical Engineering

Prince of Songkla University

2544

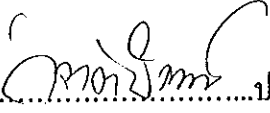
เลขที่..... 17 217 ๙๖๖ ๘๙๐๐ ๙๙ ๒

Bib Key.....

(1)

ชื่อวิทยานิพนธ์ เครื่องจัดเสียบรบกวนแบบปรับตัวได้  
ผู้เขียน นายสิทธิชัย กุลศรี  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะกรรมการที่ปรึกษา

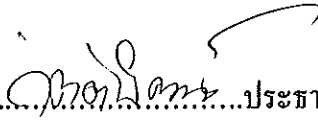
  
.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพัฒน์ ดันตระรุ่งโรจน์)

.....(ลาศึกษาต่อ).....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชัชวาล ขนด่หงส์)

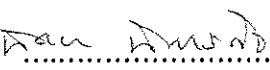
คณะกรรมการสอบ

  
.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพัฒน์ ดันตระรุ่งโรจน์)

.....(ลาศึกษาต่อ).....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชัชวาล ขนด่หงส์)


  
.....กรรมการ

(ดร. นิตยา นินทรกิจ)

  
.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เลียง กุณรัตน์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

  
.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปิติ ทฤษฎีคุณ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	เครื่องขจัดเสียงรบกวนแบบปรับตัวได้
ผู้เขียน	นายสิทธิชัย กุลศรี
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2544

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอการสร้างเครื่องขจัดเสียงรบกวนแบบปรับตัวได้โดยใช้ อัลกอริทึม LMS (Least Mean Square Algorithm) ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรอง แบบ FIR (Finite Impulse Response) ในการขจัดเสียงรบกวนจะใช้หลักการของการสร้างเสียง ที่มีลักษณะเป็นส่วนกลับกับเสียงรบกวนแล้วส่งออกไปหักล้างกับเสียงรบกวนที่เกิดขึ้น เครื่อง ขจัดเสียงรบกวนที่สร้างขึ้นใช้บอร์ด TMS320C5x DSP Starter Kit ซึ่งมีชิพ TMS320C50 เป็น ตัวประมวลผลสัญญาณ ใช้ไมโครโฟนเป็นตัวตรวจจับสัญญาณอินพุต และใช้ลำโพงเป็นตัว ส่งเสียงหักล้าง ในการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ใช้ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ (function generator) เป็นตัวกำเนิดสัญญาณลูกคลื่นไซน์ (sine wave) ป้อนให้กับลำโพงอีกตัวหนึ่งเพื่อ ทำเป็นแหล่งกำเนิดเสียงรบกวนขึ้นมา

ในการทดสอบได้ใช้เสียงรบกวนที่มีความถี่ตั้งแต่ 200 Hz จนถึง 500 Hz มีระดับเสียง รบกวนตั้งแต่ 79 dB ถึง 103 dB และได้ทำการวัดระดับเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นบนพื้นราบขนาด 14 x 14 ตารางนิ้ว บริเวณด้านหน้าของลำโพงกำเนิดเสียงรบกวน จากการทดสอบพบว่า ตำแหน่งในการวางไมโครโฟนซึ่งเป็นตัวตรวจจับที่ทำให้เสียงรบกวนลดลงมากที่สุดคือ ตำแหน่งตรงกลางทางด้านหน้าห่างจากแหล่งกำเนิดเสียงรบกวนประมาณ 1 นิ้ว สามารถทำให้ เสียงรบกวนมีระดับลดลงมาได้ตั้งแต่ 0 dB ถึง 20 dB ขึ้นอยู่กับความถี่ของเสียงรบกวน และ ความถี่ของเสียงรบกวนที่ถูกทำให้ลดลงมาได้ดีที่สุดที่สุดอยู่ในช่วงประมาณ 320 Hz จนถึง 420 Hz

**Thesis Title**            Adaptive Noise Canceller  
**Author**                 Mr. Sitthichai Kulsri  
**Major Program**        Electrical Engineering  
**Academic Year**        2001

### **Abstract**

This thesis presents the construction of an adaptive noise canceller using the LMS (Least Mean Square) algorithm, to adaptively adjust the coefficients of an FIR (Finite Impulse Response) filter. Noise cancellation is based on generating an antisound of equal amplitude and opposite phase to cancel an unwanted sound. The adaptive noise canceller was implemented on a TMS320C5x DSP Starter Kit. The unwanted sound was received by a single microphone and the antisound was sent out by a loudspeaker. The experiment used a function generator and another loudspeaker to create a sinusoidal source of noise.

The testing used the noise of the frequency 200 Hz to 500 Hz at the level 79 dB to 103 dB and measurement the level of noise in the plane of 14 x 14 square inch in front of the noise source. From the testing a distant of 1 inch in front of the noise source is the best place to put the microphone. In this case the noise can be reduced by between 0 dB to 20 dB depending on frequency. The maximum reduction in noise was achieved in the rang from 320 Hz to 420 Hz.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติพัฒน์ ตันตระกูลโรจน์ ประธานกรรมการ  
ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำแนะนำในการทำวิจัยในครั้งนี้เป็นอย่างดี รวมทั้งให้กำลังใจตลอดมา และ  
กรุณาช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ ทำให้งานวิจัยดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชัชวาล ยนต์หงส์ ที่ให้คำปรึกษาและให้ความช่วย  
เหลือเป็นอย่างดีในการทำวิจัย จนทำให้วิทยานิพนธ์ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ เลียง อุบลรัตน์ ที่ช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับ  
นี้จนกระทั่งบรรลุล่วงประสงค์

ขอขอบพระคุณ ดร. นิตยา นินทรกิจ ที่ช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนกระทั่ง  
บรรลุล่วงประสงค์

ขอขอบพระคุณอาจารย์ สุขุม แป้นศรี, อาจารย์บัณฑิต ชินผา และอาจารย์แผนก  
อิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคนิคยะลาทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำวิจัยและเป็น  
กำลังใจในการวิจัยเสมอมาจนทำให้วิทยานิพนธ์ดำเนินไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอโน้มระลึกถึงพระคุณบิดา มารดา ที่ส่งเสริมชี้แนะ เป็นกำลังใจ และ  
อุปถัมภ์ทางด้านการศึกษาโดยตลอดจนประสบความสำเร็จ

สิทธิชัย กุลศรี

## สารบัญ

		หน้า
	บทคัดย่อ.....	(3)
	Abstract.....	(4)
	กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
	สารบัญ.....	(6)
	รายการตาราง.....	(8)
	รายการภาพประกอบ.....	(12)
<b>บทที่</b>		
1	บทนำ.....	1
	1.1 บทนำต้นเรื่อง.....	1
	1.2 การตรวจเอกสาร.....	3
	1.3 วัตถุประสงค์.....	4
2	ทฤษฎีและหลักการในการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล.....	5
	2.1 แนวคิดพื้นฐานในการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล.....	5
	2.2 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C50.....	10
	2.2.1 สถาปัตยกรรมของ TMS320C50.....	12
	2.2.2 การจัดการหน่วยความจำภายใน.....	15
	2.2.3 รีจิสเตอร์ช่วย.....	16
	2.3 บอร์ด TMS320C5x DSP STARTER KIT.....	16
3	ตัวกรองปรับค่าได้.....	19
	3.1 ตัวกรองแบบ FIR Wiener.....	19
	3.2 ตัวกรองปรับค่าได้.....	23
	3.2.1 การออกแบบตัวกรองปรับตัวได้แบบ FIR.....	26
	3.2.2 สถิติเพสท์ เคสเซนส์.....	28
	3.2.3 อัลกอริทึม LMS.....	30
	3.2.4 อัลกอริทึม Recursive least square.....	31
	3.2.5 ระบบการทำนายเชิงเส้นแบบปรับตัวได้.....	38
		(6)

4	การทำงานของเครื่องขจัดเสียงรบกวนแบบปรับตัวได้.....	42
	4.1 ส่วนการรับเสียงรบกวน.....	43
	4.2 ส่วนการประมวลผลสัญญาณ.....	44
	4.3 ส่วนการส่งสัญญาณเอาต์พุต.....	50
5	ผลและการอภิปรายผลการทดลอง.....	51
	5.1 การทดลองเพื่อหาดำแหน่งการวางไมโครโฟนที่ เหมาะสมในการขจัดเสียงรบกวน.....	51
	5.2 การทดลองเพื่อสังเกตดูว่าบริเวณใดที่ระดับเสียง รบกวนถูกทำให้ลดลง.....	77
6	บทวิจารณ์สรุป.....	96
	บรรณานุกรม.....	98
	ภาคผนวก.....	99
	ภาคผนวก ก รูปแบบลักษณะของบอร์ดวงจร TMS320C5x DSP Starter Kit (DSK) และแผ่นผัง .....	98
	ภาคผนวก ข. โปรแกรมการจำลองอัลกอริทึม LMS , อัลกอริทึม RLS และ โปรแกรมการขจัด เสียงรบกวนโดยใช้ภาษาแอสเซมบลีของชิพ TMS320C5x.....	105
	ประวัติผู้เขียน.....	114

## รายการตาราง

ตาราง	หน้า
3.1 อัลกอริทึม LMS สำหรับตัวกรองปรับตัวได้แบบ FIR อันดับของตัวกรองเท่ากับ p	31
3.2 อัลกอริทึมแบบ Recursive Least Squares	37
5.1 ผลการทดลองโดยใช้อันดับของตัวกรองเท่ากับ 100 ค่าสเตปไซ $\mu=0.005$	54
5.2 ผลต่างระหว่างเสียงรบกวนก่อนทำการขจัดกับเสียงรบกวน หลังทำการขจัดเมื่อทำการวางไมโครโฟนในตำแหน่งที่ต่าง ๆ กัน (ใช้ค่าสเตปไซเท่ากับ 0.005 อันดับเท่ากับ 100)	55
5.3 ผลการทดลองโดยใช้อันดับของตัวกรองเท่ากับ 100 ค่าสเตปไซ $\mu=0.008$	56
5.4 ผลต่างระหว่างเสียงรบกวนก่อนทำการขจัดกับเสียงรบกวน หลังทำการขจัด เมื่อทำการวางไมโครโฟนในตำแหน่งที่ต่าง ๆ กัน (ใช้ค่าสเตปไซเท่ากับ 0.008 อันดับเท่ากับ 100)	57
5.5 ผลการทดลองโดยใช้อันดับของตัวกรองเท่ากับ 100 ค่าสเตปไซ $\mu=0.01$	58
5.6 ผลต่างระหว่างเสียงรบกวนก่อนทำการขจัดกับเสียงรบกวน หลังทำการขจัด เมื่อทำการวางไมโครโฟนในตำแหน่งที่ต่าง ๆ กัน (ใช้ค่าสเตปไซเท่ากับ 0.01 อันดับเท่ากับ 100)	58
5.7 ผลการทดลองโดยใช้อันดับของตัวกรองเท่ากับ 100 ค่าสเตปไซ $\mu=0.015$	59
5.8 ผลต่างระหว่างเสียงรบกวนก่อนทำการขจัดกับเสียงรบกวน หลังทำการขจัด เมื่อทำการวางไมโครโฟนในตำแหน่งที่ต่าง ๆ กัน (ใช้ค่าสเตปไซเท่ากับ 0.015 อันดับเท่ากับ 100)	60
5.9 ผลการทดลองโดยใช้อันดับของตัวกรองเท่ากับ 100 ค่าสเตปไซ $\mu=0.02$	61
5.10 ผลต่างระหว่างเสียงรบกวนก่อนทำการขจัดกับเสียงรบกวน หลังทำการขจัด เมื่อทำการวางไมโครโฟนในตำแหน่งที่ต่าง ๆ กัน (ใช้ค่าสเตปไซเท่ากับ 0.02 อันดับเท่ากับ 100)	61
5.11 ผลการทดลองโดยใช้อันดับของตัวกรองเท่ากับ 150 ค่าสเตปไซ $\mu=0.005$	63



5.12	ผลต่างระหว่างเสียงรบกวนก่อนทำการขจัดกับเสียงรบกวน หลังทำการขจัด เมื่อทำการวางไมโครโฟนในตำแหน่งที่ต่างๆกัน (ใช้ค่าสเตปป์ไซเท่ากับ 0.005 อันดับเท่ากับ 150)	63
5.13	ผลการทดลองโดยใช้อันดับของตัวกรองเท่ากับ 150 ค่าสเตปป์ไซ $\mu=0.008$	64
5.14	ผลต่างระหว่างเสียงรบกวนก่อนทำการขจัดกับเสียงรบกวน หลังทำการขจัด เมื่อทำการวางไมโครโฟนในตำแหน่งที่ต่างๆกัน (ใช้ค่าสเตปป์ไซเท่ากับ 0.008 อันดับเท่ากับ 150)	65
5.15	ผลการทดลองโดยใช้อันดับของตัวกรองเท่ากับ 150 ค่าสเตปป์ไซ $\mu=0.01$	66
5.16	ผลต่างระหว่างเสียงรบกวนก่อนทำการขจัดกับเสียงรบกวน หลังทำการขจัด เมื่อทำการวางไมโครโฟนในตำแหน่งที่ต่างๆกัน (ใช้ค่าสเตปป์ไซเท่ากับ 0.01 อันดับเท่ากับ 150)	66
5.17	ผลการทดลองโดยใช้อันดับของตัวกรองเท่ากับ 100 ค่าสเตปป์ไซ $\mu=0.015$	67
5.18	ผลต่างระหว่างเสียงรบกวนก่อนทำการขจัดกับเสียงรบกวน หลังทำการขจัด เมื่อทำการวางไมโครโฟนในตำแหน่งที่ต่างๆกัน (ใช้ค่าสเตปป์ไซเท่ากับ 0.015 อันดับเท่ากับ 150)	66
5.19	ผลการทดลองโดยใช้อันดับของตัวกรองเท่ากับ 150 ค่าสเตปป์ไซ $\mu=0.02$	69
5.20	ผลต่างระหว่างเสียงรบกวนก่อนทำการขจัดกับเสียงรบกวน หลังทำการขจัด เมื่อทำการวางไมโครโฟนในตำแหน่งที่ต่างๆกัน (ใช้ค่าสเตปป์ไซเท่ากับ 0.02 อันดับเท่ากับ 150)	69
5.21	ผลการทดลอง เมื่อใช้อันดับของตัวกรองเท่ากับ 200 และค่าสเตปป์ไซ เท่ากับ 0.005 ( วัดเฉพาะจุดที่ 1 และ 4 )	71
5.22	ผลการทดลอง เมื่อใช้อันดับของตัวกรองเท่ากับ 200 และค่าสเตปป์ไซเท่ากับ 0.008 ( วัดเฉพาะจุดที่ 1 และ 4 )	71
5.23	ผลการทดลอง เมื่อใช้อันดับของตัวกรองเท่ากับ 200 และค่าสเตปป์ไซเท่ากับ 0.01 ( วัดเฉพาะจุดที่ 1 และ 4 )	72
5.24	ผลการทดลองเมื่อทำการกระจายช่วงความถี่ให้ละเอียดขึ้น โดยใช้อันดับของตัวกรองเท่ากับ 100 และค่าสเตปป์ไซเท่ากับ 0.015	73
5.25	ผลการทดลองเมื่อทำการกระจายช่วงความถี่ให้ละเอียดขึ้น โดยใช้อันดับของตัวกรองเท่ากับ 150 และค่าสเตปป์ไซเท่ากับ 0.008	75



5.40	ผลต่างของระดับความดังของเสียงเสียงรบกวนขณะยังไม่ทำการขจัด และทำการขจัดที่ความถี่ 380 Hz	88
5.41	ระดับความดังของเสียงรบกวนในตำแหน่งต่างๆที่กำหนด ขณะยังไม่ทำการขจัดที่ความถี่ 400 Hz	89
5.42	ระดับความดังของเสียงรบกวนในตำแหน่งต่างๆที่กำหนด ขณะทำการขจัดที่ความถี่ 400 Hz	89
5.43	ผลต่างของระดับความดังของเสียงเสียงรบกวนขณะยังไม่ทำการขจัด และทำการขจัดที่ความถี่ 400 Hz	90
5.44	ระดับความดังของเสียงรบกวนในตำแหน่งต่างๆที่กำหนด ขณะยังไม่ทำการขจัดที่ความถี่ 420 Hz	91
5.45	ระดับความดังของเสียงรบกวนในตำแหน่งต่างๆที่กำหนด ขณะทำการขจัดที่ความถี่ 420 Hz	91
5.46	ผลต่างของระดับความดังของเสียงเสียงรบกวนขณะยังไม่ทำการขจัด และทำการขจัดที่ความถี่ 420 Hz	92
5.47	ระดับความดังของเสียงรบกวนในตำแหน่งต่างๆที่กำหนด ขณะยังไม่ทำการขจัดที่ความถี่ 440 Hz	93
5.48	ระดับความดังของเสียงรบกวนในตำแหน่งต่างๆที่กำหนด ขณะทำการขจัดที่ความถี่ 440 Hz	93
5.49	ผลต่างของระดับความดังของเสียงเสียงรบกวนขณะยังไม่ทำการขจัด และทำการขจัดที่ความถี่ 440 Hz	94

## รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1.1 แสดงรูปแบบของสัญญาณเสียงรบกวนที่ไม่ต้องการ, รูปแบบของสัญญาณเสียงที่สร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการหักล้าง กับสัญญาณเสียงรบกวนและสัญญาณซึ่งเป็นผลรวมของ สัญญาณทั้งสอง	2
1.2 แสดงรูปแบบในการกำจัดเสียงรบกวน	3
2.1 การประมวลผลแบบอนาล็อกของสัญญาณอนาล็อก	6
2.2 รูปแบบการประมวลผลแบบดิจิทัลของสัญญาณอนาล็อก	6
2.3 รูปแบบของสัญญาณที่ปรากฏในแต่ละบล็อกที่แสดงในรูปที่ 2.2 (ก) สัญญาณอนาล็อกอินพุต (ข) เอาต์พุตของวงจร S/H circuit (ค) เอาต์พุตของวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกไปเป็น สัญญาณดิจิทัล	8
2.4 รูปแบบของสัญญาณที่ปรากฏในแต่ละบล็อกที่แสดงในรูปที่ 2.2 (ก) เอาต์พุตของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (ข) เอาต์พุตของวงจรกรองสัญญาณดิจิทัลเป็น สัญญาณอนาล็อก (ค) สัญญาณอนาล็อกเอาต์พุต	8
2.5 สัญญาณเวลาไม่ต่อเนื่อง	9
2.6 การแทนลำดับต่อเนื่อง $\{x[n]\}$ ด้วยรูปภาพ	9
2.7 การเกิดลำดับโดยการสุ่มสัญญาณต่อเนื่อง $x_u(t)$	10
2.8 แสดงลักษณะการจัดวางขาสัญญาณทั้ง 132 m ของ TMS320C5x	12
2.9 แสดงแผนภาพบล็อกหลักการและเส้นทางข้อมูลภายในของ TMS320C5x	14
2.10 แสดงการจัดการหน่วยความจำภายในของ TMS320C5x	15
2.11 ตัวอย่างการอ้างตำแหน่งทางอ้อม โดยใช้รีจิสเตอร์ช่วย	16
2.12 เป็นแผนภาพบล็อกพื้นฐานของ TMS320C5x ซึ่งแสดงการเชื่อมต่อ ระหว่างกัน	17

2.13	วงจรภายในของไอซีเบอร์ TLC32040	18
3.1	แสดงรูปแบบปัญหาการกรองแบบ Wiener โดยทั่วไปกำหนดให้ $x(n)$ และ $d(n)$ เป็น jointly wide-sense stationary WSS คือมีความสัมพันธ์ทางสถิติซึ่งกันและกัน $w(z)$ เป็นตัวกรองซึ่งใช้ในการสร้างสัญญาณประมาณ $d(n)$	19
3.2	แผนภาพบล็อกของตัวกรองปรับค่าได้ ประกอบด้วยตัวกรอง $w_n(z)$ และอัลกอริทึม สำหรับปรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรอง $w_n(k)$	25
3.3	รูปแบบของตัวกรองปรับค่าได้ FIR แบบ direct-form	26
3.4	การประมวลผลสัญญาณ $x(n+1)$ โดยอาศัยการรวมแบบเชิงเส้นของค่าของสัญญาณจำนวน $p$ ค่าจาก $x(n)$ จนถึง $x(n-p+1)$	38
3.5	ระบบการทำนายเชิงเส้นแบบปรับตัวได้โดยใช้ อัลกอริทึม LMS ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรอง	39
3.6	ผลการจำลองอัลกอริทึม LMS	40
3.7	ผลการจำลองอัลกอริทึม RLS	41
4.1	แผนการทำงานของเครื่องขจัดเสียงรบกวนแบบปรับตัวได้	42
4.2	วงจรพีเอมพีสำหรับไมโครโฟน	43
4.3	ระบบการทำนายแบบเชิงเส้นปรับตัวได้ โดยใช้ อัลกอริทึม LMS ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรอง	45
4.4	แบบการวางหน่วยความจำของ ค่าเวกเตอร์น้ำหนัก และข้อมูลเวกเตอร์	48
5.1	แสดงตำแหน่งการวางไมโครโฟนและการวางเครื่องวัดระดับความดังเสียง	53
5.2	กราฟแสดงผลการขจัดเสียงรบกวนที่จุดวางไมโครโฟน ที่กำหนดที่ความถี่ 200 Hz – 500 Hz เมื่อใช้ค่าสเตปไซเท่ากับ 0.005 อันดับตัวกรองเท่ากับ 100	55
5.3	กราฟแสดงผลการขจัดเสียงรบกวนที่จุดวางไมโครโฟน ที่กำหนด ที่ความถี่ 200 Hz – 500 Hz เมื่อใช้ค่าสเตปไซเท่ากับ 0.008 อันดับตัวกรองเท่ากับ 100	57

5.4	กราฟแสดงผลการขจัดเสียงรบกวนที่จุดวางไมโครโฟน ที่กำหนด ที่ความถี่ 200 Hz – 500 Hz เมื่อใช้ค่าสเกลไปซ เท่ากับ 0.01 อันดับตัวกรองเท่ากับ 100	59
5.5	กราฟแสดงผลการขจัดเสียงรบกวนที่จุดวางไมโครโฟน ที่กำหนด ที่ความถี่ 200 Hz – 500 Hz เมื่อใช้ค่าสเกลไปซ เท่ากับ 0.015 อันดับตัวกรองเท่ากับ 100	60
5.6	กราฟแสดงผลการขจัดเสียงรบกวนที่จุดวางไมโครโฟน ที่กำหนด ที่ความถี่ 200 Hz – 500 Hz เมื่อใช้ค่าสเกลไปซ เท่ากับ 0.02 อันดับตัวกรองเท่ากับ 100	62
5.7	กราฟแสดงผลการขจัดเสียงรบกวนที่จุดวางไมโครโฟน ที่กำหนด ที่ความถี่ 200 Hz – 500 Hz เมื่อใช้ค่าสเกลไปซ เท่ากับ 0.005 อันดับตัวกรองเท่ากับ 150	64
5.8	กราฟแสดงผลการขจัดเสียงรบกวนที่จุดวางไมโครโฟน ที่กำหนด ที่ความถี่ 200 Hz – 500 Hz เมื่อใช้ค่าสเกลไปซ เท่ากับ 0.008 อันดับตัวกรองเท่ากับ 150	65
5.9	กราฟแสดงผลการขจัดเสียงรบกวนที่จุดวางไมโครโฟน ที่กำหนด ที่ความถี่ 200 Hz – 500 Hz เมื่อใช้ค่าสเกลไปซ เท่ากับ 0.01 อันดับตัวกรองเท่ากับ 150	67
5.10	กราฟแสดงผลการขจัดเสียงรบกวนที่จุดวางไมโครโฟน ที่กำหนด ที่ความถี่ 200 Hz – 500 Hz เมื่อใช้ค่าสเกลไปซ เท่ากับ 0.015 อันดับตัวกรองเท่ากับ 150	68
5.11	กราฟแสดงผลการขจัดเสียงรบกวนที่จุดวางไมโครโฟน ที่กำหนด ที่ความถี่ 200 Hz – 500 Hz เมื่อใช้ค่าสเกลไปซ เท่ากับ 0.02 อันดับตัวกรองเท่ากับ 150	70
5.12	กราฟแสดงผลการขจัดเสียงรบกวนที่จุดวางไมโครโฟนที่กำหนด ที่ความถี่ 200 Hz – 500 Hz เมื่อทำการเพิ่มค่าความถี่ครั้งละ 20 Hz ใช้ค่าสเกลไปซเท่ากับ 0.015 อันดับตัวกรองเท่ากับ 150	74

5.13	กราฟแสดงผลการขจัดเสียงรบกวนที่จุดวางไมโครโฟนที่กำหนด ที่ความถี่ 200 Hz – 500 Hz เมื่อทำการเพิ่มค่าความถี่ครั้งละ 20 Hz ใช้ค่าสเกลไปซเท่ากับ 0.008 อันดับตัวกรองเท่ากับ 150	76
5.14	แสดงผังการวัดระดับเสียงรบกวนที่ตำแหน่งต่างๆ	77
5.15	ภาพพล็อตคอนทัวร์แสดงระดับเสียงรบกวน ในบริเวณที่กำหนด ที่ความถี่ 300 Hz	80
5.16	ภาพพล็อตคอนทัวร์แสดงระดับเสียงรบกวน ในบริเวณที่กำหนด ที่ความถี่ 320 Hz	82
5.17	ภาพพล็อตคอนทัวร์แสดงระดับเสียงรบกวน ในบริเวณที่กำหนด ที่ความถี่ 340 Hz	84
5.18	ภาพพล็อตคอนทัวร์แสดงระดับเสียงรบกวน ในบริเวณที่กำหนด ที่ความถี่ 360 Hz	86
5.19	ภาพพล็อตคอนทัวร์แสดงระดับเสียงรบกวน ในบริเวณที่กำหนด ที่ความถี่ 380 Hz	88
5.20	ภาพพล็อตคอนทัวร์แสดงระดับเสียงรบกวน ในบริเวณที่กำหนด ที่ความถี่ 400 Hz	90
5.21	ภาพพล็อตคอนทัวร์แสดงระดับเสียงรบกวน ในบริเวณที่กำหนด ที่ความถี่ 420 Hz	92
5.21	ภาพพล็อตคอนทัวร์แสดงระดับเสียงรบกวน ในบริเวณที่กำหนด ที่ความถี่ 440 Hz	94

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำต้นเรื่อง

เสียงเป็นพลังงานที่เกิดจากแหล่งกำเนิดหลายรูปแบบ ส่วนมากเกิดจากการสั่นสะเทือนของวัตถุ แล้วเดินทางผ่านตัวกลางจนมาถึงหูของคนเรา ความถี่เสียงที่หูของคนเราสามารถรับฟังได้ เริ่มตั้งแต่ความถี่ 20 Hz ถึง 20,000 Hz แต่ช่วงความถี่ของเสียงที่มีความสำคัญต่อชีวิตประจำวันของคนเรามากที่สุดคือ ความถี่ของเสียงพูด มีความถี่ประมาณ 500 Hz ถึง 4,000 Hz นอกจากนี้หูของคนเรายังมีความสามารถและความอดทนในการรับฟังเสียงในขอบเขตที่จำกัด หากเบาเกินไปก็จะไม่ได้ยิน แต่ถ้าเสียงดังเกินไปและเป็นเสียงที่เราไม่ต้องการ ก็ก่อให้เกิดความรำคาญและเป็นอันตรายต่อหูของเรา และอาจทำให้หูหนวกได้

ปัญหาของเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นในปัจจุบันเริ่มมีคนให้ความสนใจมากขึ้น เสียงรบกวนที่เกิดขึ้นนั้นเนื่องมาจากสาเหตุหลายสาเหตุด้วยกัน อย่างเช่น โรงงานอุตสาหกรรมซึ่งมีการใช้เครื่องมือ เครื่องจักรกลต่างๆ เครื่องเป่าลม (blowers), พัดลม, หม้อแปลงไฟฟ้า (transformers) คอมเพรสเซอร์ (compressors), มอเตอร์ (motor) เป็นต้น เมื่อสิ่งเหล่านี้ถูกนำมาใช้ก็ทำให้เกิดเสียงรบกวนที่เราไม่ต้องการเกิดขึ้น นอกจากสาเหตุจากโรงงานอุตสาหกรรมแล้ว การเพิ่มขึ้นของประชากร หรือการเพิ่มขึ้นของบ้านเรือน ซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะทางเสียงเนื่องจากการสร้างบ้านเรือนติดกัน และการจราจรที่แออัด

สำหรับผู้ที่ต้องอยู่ในสภาพแวดล้อมหรือทำงานในบริเวณที่มีเสียงรบกวนเป็นระยะเวลานานๆ อาจก่อให้เกิดความรำคาญ ไม่มีสมาธิในการทำงาน เป็นผลให้ประสิทธิภาพในการทำงานลดลง และอาจก่อให้เกิดความเครียดก่อให้เกิดโรคจิต โรคประสาทได้ เสียงรบกวนที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากเครื่องจักรกลต่างๆ ในโรงงาน, เสียงที่เกิดจากการทำงานของเครื่องปรับอากาศ ฯลฯ เราถือว่าเสียงอันไม่พึงประสงค์เหล่านี้เป็นเสียงรบกวนในการทำงาน หรือทำกิจกรรมต่างๆ ดังนั้นงานวิจัยนี้ มุ่งที่จะลดเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นให้มีระดับที่ต่ำลงให้เหลือน้อยที่สุด เพื่อที่จะสามารถทำงานหรือทำกิจกรรมต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

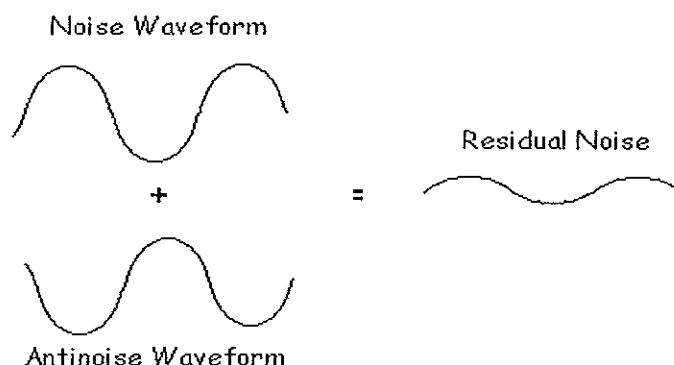
โดยทั่วไปในการกำจัดเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นนั้นจะใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษที่สามารถลดทอนระดับของเสียงรบกวนที่ไม่ต้องการให้ต่ำลงมาอย่างเช่นใยแก้ว กระจกชนิดพิเศษที่ใช้กันเสียงรบกวนโดยเฉพาะ ฯลฯ แต่เนื่องจากวัสดุที่นำมาใช้ในการลดทอนระดับเสียงรบกวน



มีราคาค่อนข้างสูง การติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันเสียงรบกวนเหล่านี้ก็ทำได้ค่อนข้างยุ่งยาก และถ้าเราติดตั้งวัสดุป้องกันเสียงรบกวนภายในห้องแล้ว จะทำให้ห้องรู้สึกอึดอัดเนื่องจากว่าอากาศภายในห้องถ่ายเทได้ลำบาก

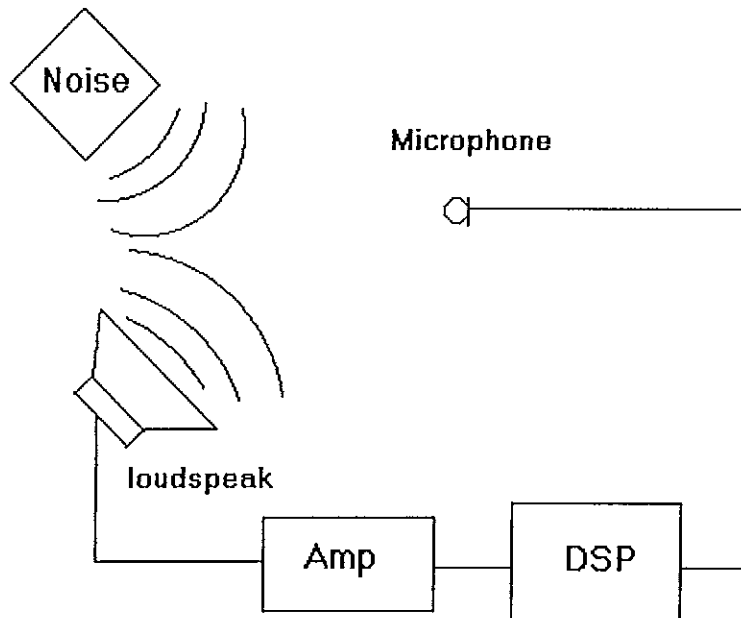
เนื่องจากว่าในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และเทคโนโลยีทางด้าน VLSI (Very Large Scale Integrated) มีความก้าวหน้ามาก ทำให้ระยะเวลาสิบปีที่ผ่านมา ราคาของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์, คอมพิวเตอร์, ชิพไมโครโปรเซสเซอร์ มีราคาลดลงอย่างรวดเร็ว แต่กลับมีคุณภาพขึ้นอย่างมหาศาล โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ชิพ DSP ( DSP ship) เป็นไมโครโปรเซสเซอร์ที่ใช้สำหรับการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processing) โดยเฉพาะมีราคาถูกแต่มีความสามารถในการคำนวณและมีความเร็วในการประมวลผลสูง และด้วยความสามารถในการคำนวณและมีความเร็วในการประมวลผลสูง บวกกับอัลกอริทึมที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลที่มีประสิทธิภาพ จึงทำให้การประมวลผลสัญญาณดิจิทัลที่มีความซับซ้อนกลายมาเป็นเรื่องที่ยง่ายขึ้น และในปัจจุบันได้มีการนำการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลมาใช้กันเป็นที่แพร่หลายในงานด้านต่างๆมากมายอย่างเช่น ทางด้านการสื่อสารโทรคมนาคม (Telecommunications), การควบคุม (Control), ในอุตสาหกรรม เป็นต้น จากสิ่งที่ได้กล่าวมาข้างต้นจึงเป็นแนวคิดที่จะสร้างเครื่องกำจัดเสียงรบกวนขึ้น

แนวคิดเบื้องต้นในการขจัดจัดเสียงรบกวนซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการสร้างสัญญาณเสียงอีกเสียงหนึ่งขึ้นมา มีลักษณะเป็นส่วนกลับกับเสียงรบกวน คือมีแอมพลิจูดเท่ากับแอมพลิจูดของสัญญาณเสียงรบกวน แต่มีเฟสกลับกัน ส่งออกไปเพื่อทำการหักล้างกับเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นให้มีระดับลดลงมา แสดงดังภาพประกอบ 1.1



ภาพประกอบ 1.1 แสดงรูปแบบ (waveform) ของสัญญาณเสียงรบกวนที่ไม่ต้องการ, รูปแบบของสัญญาณเสียงที่สร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการหักล้างกับสัญญาณเสียงรบกวนและสัญญาณซึ่งเป็นผลรวมของสัญญาณทั้งสอง

รูปแบบในการขจัดเสียงรบกวนแบบปรับตัวได้แสดงในภาพประกอบ 1.2 ซึ่งใช้ไมโครโฟนเป็นตัวตรวจจับสัญญาณเสียงรบกวนที่ไม่ต้องการ แล้วส่งต่อไปยังตัวประมวลผลสัญญาณ ตัวประมวลผลสัญญาณทำการประมวลผลสัญญาณเสียงที่เกิดขึ้นว่ามีลักษณะเป็นอย่างไร ต่อจากนั้นก็ทำการสร้างสัญญาณเสียงอีกตัวหนึ่งขึ้นมา ซึ่งเป็นสัญญาณส่วนกลับ (inverse signal) กับสัญญาณเสียงรบกวนที่รับเข้ามา แล้วส่งสัญญาณเสียงที่เป็นส่วนกลับดังกล่าวออกผ่านทางลำโพงกลายเป็นเสียงออกไปหักล้างกับเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นทำให้บริเวณที่มีเสียงรบกวนดังกล่าวมีเสียงรบกวนลดลงและในการประมวลผลสัญญาณและการสร้างสัญญาณเสียงอีกเสียงหนึ่งขึ้นมา ใช้ TMS320C5x DSP Starter Kit ซึ่งเป็นบอร์ดที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลโดยเฉพาะ



ภาพประกอบ 1.2 แสดงรูปแบบในการกำจัดเสียงรบกวน

## 1.2 การตรวจเอกสาร

1.2.1 An Output -Whitening Approach to Adaptive filter Active noise Cancellation (Daniel, 1984 : 1306-1313) งานวิจัยนี้ได้อธิบายการขจัดเสียงรบกวนแบบปรับตัวได้แบบแอกทีฟ (active noise cancellation) โดยอาศัยหลักการควบคุมแบบปรับตัวได้ อัลกอริทึมที่ใช้ในการแสดงเอกลักษณ์ของสัญญาณคือ Sequential Least Square (SLS) Algorithm หลักการในการกำจัดสัญญาณเสียงรบกวน คือ สร้างเสียงที่มีลักษณะเป็นธรรมชาติที่สามารถลดระดับสัญญาณเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นจากเครื่องจักรกล ซึ่งเป็นแบบ stochastic machine noise สำหรับ

การทดลองในงานวิจัยนี้ จะทำการบันทึกสัญญาณเสียงรบกวนไว้ในเทปบันทึกเสียง จากนั้นทำการส่งสัญญาณเสียงรบกวนเข้าไปยังระบบภายนอกที่ได้ทำการจำลองขึ้น (ไมโครโฟน ลำโพง ระยะห่างระหว่างไมโครโฟน ลำโพง ) ซึ่งระบบภายนอกที่ได้จำลองขึ้นจะถูกแทนด้วยค่าพารามิเตอร์(ค่าสัมประสิทธิ์) จากผลการทดลอง สามารถลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากคอมเพรสเซอร์ (Compressor) ของเครื่องปรับอากาศได้ 55 dB

### 1.2.2 การออกแบบระบบควบคุมเสียงรบกวนแบบแอกทีฟ โดยใช้ชิพประมวลผล

สัญญาณดิจิทัลตระกูล TMS320 (Design of Active Noise Control Systems With The TMS320 Family) (Kuo Sen M. ,1996) เป็นรายงานที่แสดงข้อมูลเกี่ยวกับวิธีการของการควบคุมเสียงรบกวนแบบแอกทีฟ ซึ่งแตกต่างจากการควบคุมแบบพาสซีฟ คือระบบควบคุมแบบแอกทีฟอาศัยหลักการของทฤษฎีตัวกรองแบบปรับตัวได้ และในรายงานนี้ได้กล่าวถึงลักษณะของเสียงรบกวน ลักษณะการใช้อัลกอริทึมให้เหมาะสมกับเสียงรบกวน และแนะนำการเขียนโปรแกรมภาษาแอสเซมบลีสำหรับ TMS320C25 เพื่อใช้ในการสร้างระบบควบคุมเสียงรบกวนแบบแอกทีฟ

### 1.2.3 การกำจัดสัญญาณรบกวนแบบปรับตัวได้แบบแอกทีฟเซลแนลเดี่ยวโดยใช้

TMS320C50 DSP Starter Kit ( Implementing A Single Channel Active Adaptive Noise Canceller with the TMS320C50 DSP Starter Kit) (Boucher Stephane, Bouchard Martin and L'esperance Andre : 1997) เป็นรายงานที่กล่าวถึงการนำ TMS320C50 DSP Starter Kit ของบริษัท Texus Instrument มาใช้ในการสร้างเครื่องกำจัดเสียงรบกวนแบบปรับตัวได้แบบแอกทีฟเซลแนลเดี่ยว โดยอาศัยหลักการของการควบคุมแบบป้อนกลับ และออกแบบมาเพื่อใช้ในการกำจัดเสียงรบกวนที่มีลักษณะเป็นคาบ

## 1.3 วัตถุประสงค์

1.3.1 เพื่อศึกษาระบบการประมวลผลสัญญาณแบบปรับตัวได้เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างเครื่องกำจัดสัญญาณเสียงรบกวนแบบปรับตัวได้

1.3.2 เพื่อสร้างเครื่องกำจัดสัญญาณเสียงรบกวนแบบปรับตัวได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการในการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

#### 2.1 แนวคิดพื้นฐานในการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

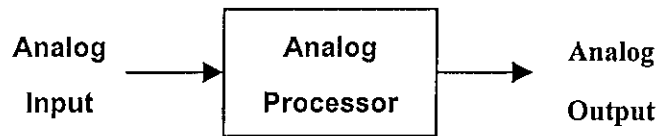
การประมวลผลสัญญาณ (signal processing) เป็นเรื่องเกี่ยวกับการแทน (representation), การชักย้าย ถ่ายโอน (manipulation) และการแปลง (transformation) สัญญาณ และข้อมูลของสัญญาณ ยกตัวอย่างเช่น เราต้องการลดสัญญาณรบกวนหรือเอาสิ่งอื่นๆที่แทรกเข้ามาอยู่ในสัญญาณที่เราต้องการออกไป, ต้องการประมวลผลสัญญาณเพื่อหาข้อมูลที่แท้จริงบางอย่างที่อยู่ในสัญญาณนั้น เช่นคำที่อยู่ในสัญญาณเสียงพูด การพิสูจน์ (identity) บุคคลในรูปภาพ, การแยกเป้าหมาย (classification) ในสัญญาณเรดาร์ (radar signal)

การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processing :DSP) เป็นเรื่องที่เกี่ยวข้องกับการประมวลผลข้อมูลซึ่งถูกแทนในรูปแบบของดิจิทัล มันอาจเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นหลังจากขั้นตอนวิธีทางตัวเลข (numerical algorithm) ซึ่งได้มีการนำเสนอและทำการศึกษาเมื่อศตวรรษที่ผ่านมา และในปี ค.ศ. 1970 ได้มีการผลิตชิพ DSP (DSP chip) ขึ้นเป็นครั้งแรกและได้มีการพัฒนาขึ้นเรื่อยๆทำให้ชิพ DSP มีความสามารถและมีความเร็วในการประมวลผลสัญญาณสูงขึ้น การประมวลผลสัญญาณอนาล็อกแสดงดังภาพประกอบ 2.1 การประมวลผลสัญญาณอนาล็อกจะมีข้อจำกัดในกรณีที่ต้องการงานที่มีความละเอียดสูง วงจรไฟฟ้าที่ใช้จะมีความสลับซับซ้อนมาก ทำให้เกิดความยุ่งยากในการออกแบบ การประมวลผลสัญญาณดิจิทัลมีข้อได้เปรียบ และข้อที่เด่นมากกว่าหลายประการด้วยกัน คือ

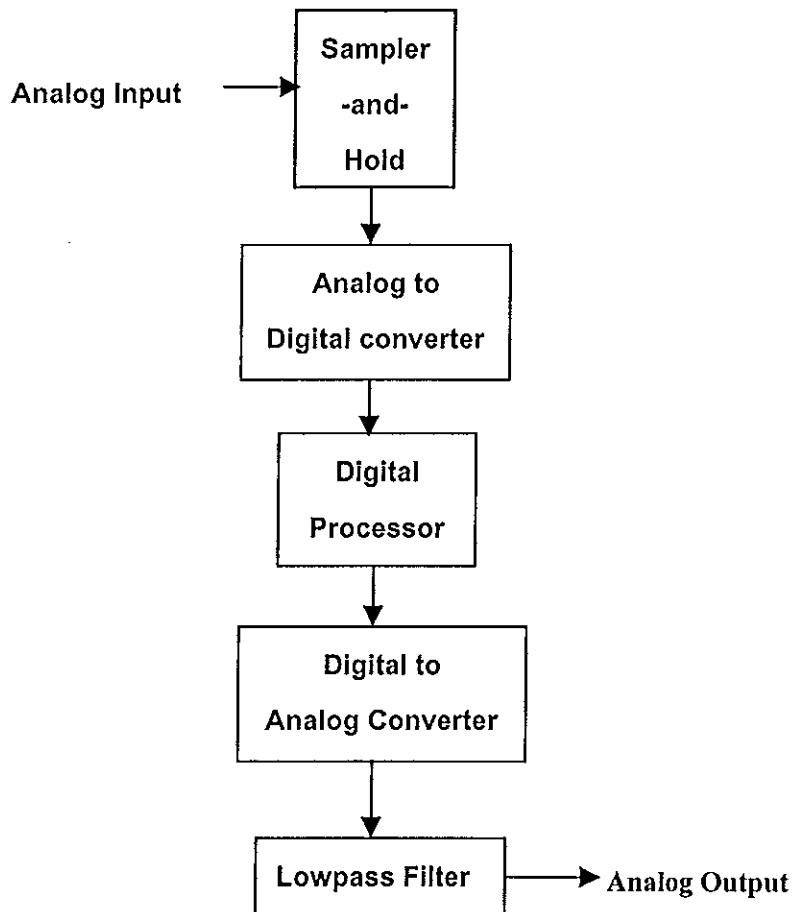
- การทำงานของวงจรดิจิทัลไม่ขึ้นอยู่กับค่าของสัญญาณดิจิทัล คือวงจรดิจิทัลมีความไว้น้อยมากต่อความผิดพลาดที่ยอมรับได้ (tolerance) ของค่าองค์ประกอบ (component), ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและค่าพารามิเตอร์ภายนอกอื่นๆ วงจรดิจิทัลสามารถสร้างใหม่ได้ง่ายและไม่ต้องการปรับแต่งใดๆในขณะสร้าง (construction)
- ในปัจจุบันด้วยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีทางด้านวงจร VLSI (Very Large Scale Integrated) ทำให้รวมระบบการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลไว้ในชิพเพียงตัวเดียว
- ลักษณะสมบัติของตัวประมวลผลสามารถปรับแต่งได้ง่ายในระหว่างทำการประมวลผล อย่างเช่นในกรณีที่ต้องนำตัวกรองแบบปรับตัวได้ไปใช้ในการ

ปรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองสามารถทำได้โดยใช้อัลกอริทึม (algorithm) ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์แทนลักษณะสมบัติของตัวประมวลผล

- ราคาถูก และประหยัดพลังงานกว่า



ภาพประกอบ 2.1 การประมวลผลแบบอนาล็อกของสัญญาณอนาล็อก

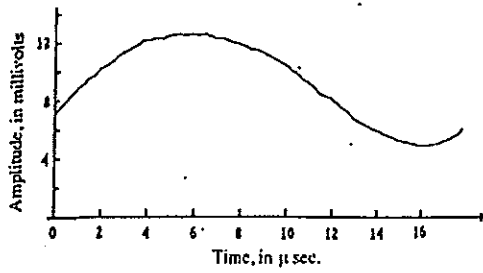


ภาพประกอบ 2.2 รูปแบบการประมวลผลแบบดิจิทัลของสัญญาณอนาล็อก

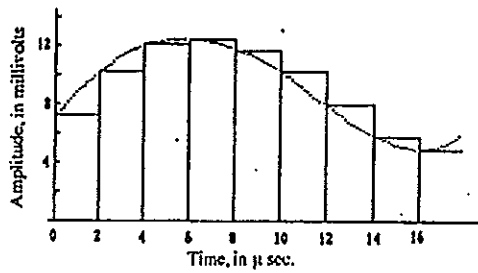
การประมวลผลแบบดิจิทัลของสัญญาณอนาล็อกประกอบด้วยขั้นตอน 3 ขั้นตอนด้วยกัน  
คือ

- การแปลงสัญญาณอนาล็อกให้เป็นแบบดิจิทัล
- การประมวลผลในรูปแบบดิจิทัล
- การแปลงสัญญาณดิจิทัลที่ได้ทำการประมวลผลแล้วกลับสู่รูปแบบสัญญาณอนาล็อกอีกครั้งหนึ่ง เราสามารถเขียนขั้นตอนการประมวลผลแบบดิจิทัลในรูปแบบของบล็อกไดอะแกรมได้ดังภาพประกอบ 2.2

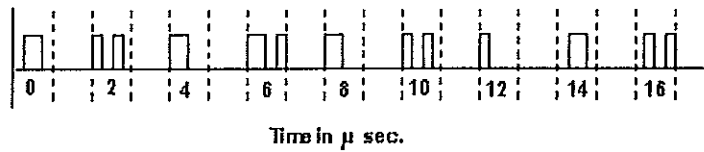
จากภาพประกอบ 2.2 เนื่องจากว่าแอมพลิจูดของสัญญาณอินพุตแบบอนาล็อก มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาดังนั้นเราจึงต้องใช้วงจร สุ่ม-คงค่า (sample-and-hold : S/H) เพื่อทำการสุ่มสัญญาณอินพุตแบบอนาล็อกและคงค่าสัญญาณดังกล่าวไว้ที่ค่าคงที่ค่าหนึ่งเป็นช่วงเวลาคาบหนึ่งตามที่กำหนดไว้ แล้วทำการสุ่มค่าใหม่ต่อไป สัญญาณที่ได้จากวงจร S/H มีลักษณะเป็นแบบขั้นบันได เรียกสัญญาณนี้ว่าสัญญาณอนาล็อกแบบขั้นบันได จากนั้นสัญญาณอนาล็อกแบบขั้นบันไดก็ถูกส่งเข้าวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog-to-Digital (A/D) converter) เอาต์พุตของวงจรแปลงสัญญาณ A/D จะเป็นสัญญาณเลขฐานสอง ต่อจากนั้นก็ส่งต่อเข้าทำการประมวลผลที่ตัวประมวลผลดิจิทัล ได้เอาต์พุตออกมายังคงเป็นเลขฐานสองคือยังคงเป็นสัญญาณดิจิทัลอยู่ และต่อมาถูกแปลงให้เป็นสัญญาณอนาล็อกแบบขั้นบันได โดยใช้วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลไปเป็นสัญญาณอนาล็อก (Analog-to-Digital (A/D) converter) หลังจากนั้นสัญญาณดังกล่าวก็จะถูกส่งเข้าวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Lowpass filter) เพื่อเอาองค์ประกอบความถี่สูงที่ไม่ต้องการออกไปแล้วส่งออกไปยังเอาต์พุต กลายเป็นสัญญาณอนาล็อกที่ได้ทำการประมวลผลเรียบร้อยแล้วและเป็นสัญญาณที่เราต้องการ ภาพประกอบ 2.3 และ 2.4 อธิบายรูปแบบของส่วนของสัญญาณที่ผ่านบล็อกต่างๆแต่ละบล็อกในภาพประกอบ 2.2



(ก)



(ข)

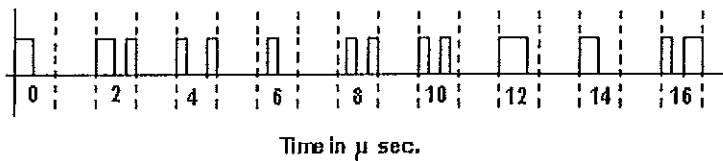


(ค)

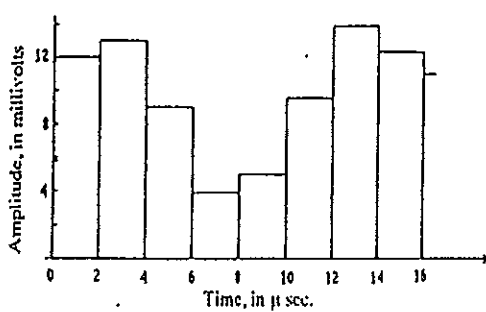
ภาพประกอบ 2.3 รูปแบบของสัญญาณที่ปรากฏในแต่ละบล็อกที่แสดงในภาพประกอบ 2.2

(ก) สัญญาณอนาล็อกอินพุท (ข) เอาต์พุทของวงจร S/H circuit

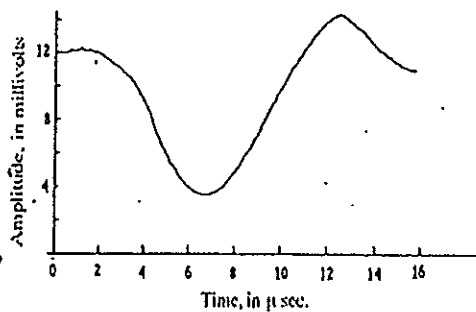
(ค) เอาต์พุทของวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัล



(ก)



(ข)



(ค)

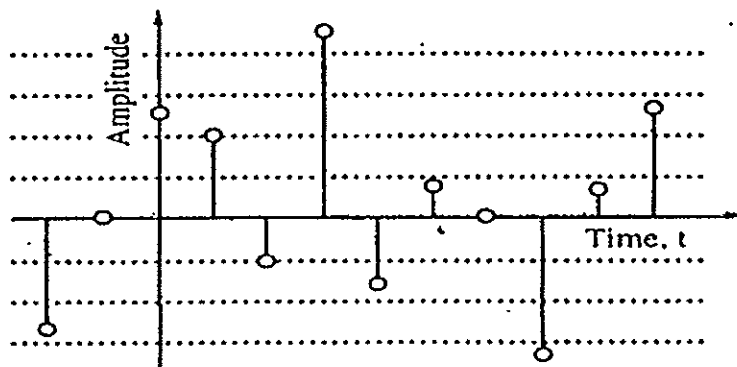
ภาพประกอบ 2.4 รูปแบบของสัญญาณที่ปรากฏในแต่ละบล็อกที่แสดงในภาพประกอบ 2.2

(ก) เอาต์พุทของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

(ข) เอาต์พุทของวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก

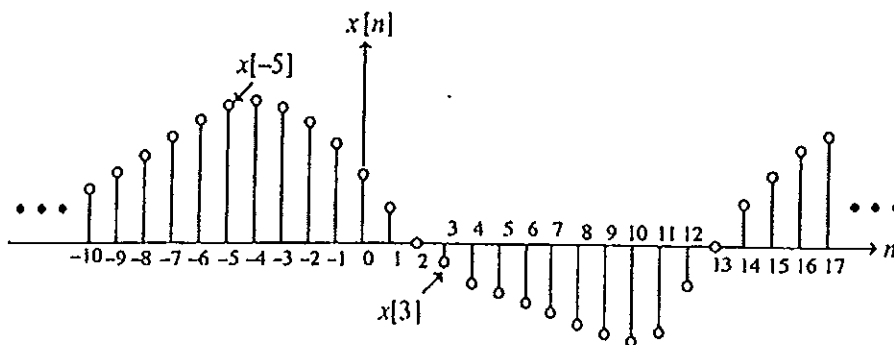
(ค) สัญญาณอนาล็อกเอาต์พุทจากวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

สัญญาณที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล จะเป็นสัญญาณที่เรียกว่าสัญญาณเวลาไม่ต่อเนื่อง (discrete-time signal) แสดงดังภาพประกอบ 2.5 และถ้าดูจากภาพประกอบ 2.2 ก็คือสัญญาณที่ออกจากวงจรแปลงสัญญาณ A/D นั้นเอง และระบบที่ใช้สำหรับประมวลผลสัญญาณนี้คือระบบประมวลผลแบบเวลาไม่ต่อเนื่องด้วยเช่นกัน ในการที่จะศึกษาทำความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีของการประมวลผลสัญญาณเวลาไม่ต่อเนื่องและออกแบบระบบประมวลผลสัญญาณดังกล่าว เราจำเป็นต้องรู้ลักษณะสมบัติของสัญญาณและระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง



ภาพประกอบ 2.5 สัญญาณเวลาไม่ต่อเนื่อง

ในการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล สัญญาณถูกแทนด้วยลำดับของตัวเลข เรียกว่าตัวอย่าง (sample) ค่าตัวอย่างของสัญญาณเวลาไม่ต่อเนื่องเขียนแทนด้วย  $x[n]$  ซึ่ง  $n$  เป็นจำนวนเต็มในย่านตั้งแต่  $-\infty$  ถึง  $\infty$  และสัญญาณเวลาไม่ต่อเนื่องเขียนแทนด้วย  $\{x[n]\}$  รูปแบบของสัญญาณ  $\{x[n]\}$  แสดงดังภาพประกอบ 2.6



ภาพประกอบ 2.6 การแทนลำดับเวลาไม่ต่อเนื่อง  $\{x[n]\}$  ด้วยรูปภาพ



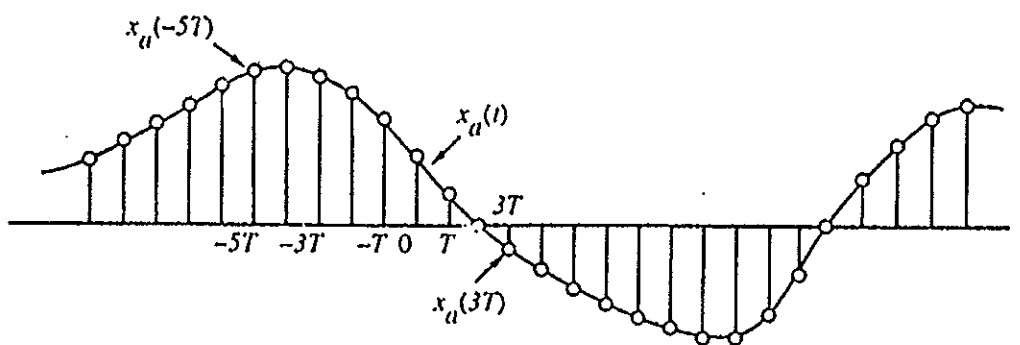
ลำดับไม่ต่อเนื่องเกิดขึ้นจากการสุ่มสัญญาณอนาล็อก  $x_a(t)$  ซึ่งเป็นสัญญาณต่อเนื่อง  
ณ เวลาไม่ต่อเนื่องที่ห่างเท่าๆกัน

$$x[n] = x_a(t)|_{t=nT} = x_a(nT) \quad , \quad n = \dots -2, -1, 0, 1, 2, \dots$$

อธิบายคิงภาพประกอบ 2.7 ช่องว่าง  $T$  ระหว่างค่าตัวอย่างสองตัวที่ตามกัน เรียกว่า ช่วง  
ของการสุ่ม (sampling interval) หรือคาบการสุ่มนั่นเอง และเราสามารถหาคาบในการสุ่ม  $F_T$   
ได้จาก

$$F_T = \frac{1}{T}$$

หน่วยในการสุ่มคือครั้งต่อวินาที (cycle per second) หรือ เฮิรต์ (Hertz : Hz)



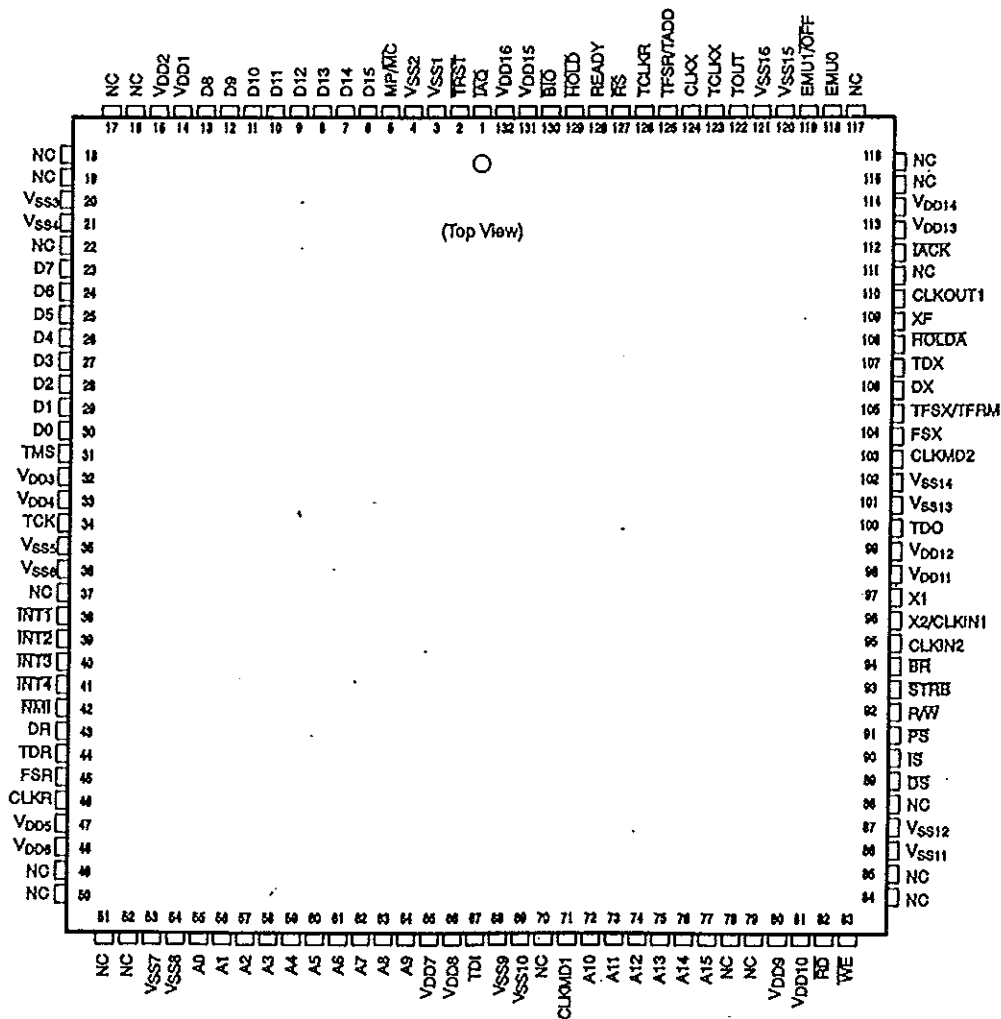
ภาพประกอบ 2.7 การเกิดลำดับโดยการสุ่มสัญญาณเวลาต่อเนื่อง  $x_a(t)$

## 2.2 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C50x

ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C50 ซึ่งถูกประดิษฐ์ขึ้นด้วยเทคโนโลยี  
วงจรรวม CMOS แบบสแตติก (static CMOS integrated technology) โครงสร้างของมันออก  
แบบโดยใช้หลักการของ TMS320C25 คือมีสถาปัตยกรรมแบบฮาร์วาร์ด (harvard architecture)  
ซึ่งจะมีหน่วยความจำโปรแกรม (program memory) และหน่วยความจำข้อมูล (data memory)  
แยกจากกัน ในการถ่ายโอนข้อมูลระหว่างหน่วยความจำข้อมูลและหน่วยความจำโปรแกรม  
จะมีคำสั่งโดยเฉพาะของมัน และคุณลักษณะสมบัติของ TMS320C50 แสดงข้างล่างนี้

- ใช้เวลาในการทำงานในช่วงหนึ่งรอบคำสั่งเท่ากับ 35-50 ns
- มีหน่วยความจำชนิดแรม (RAM) บนตัวชิพขนาด 10 k×16 บิต

- มีหน่วยความจำชนิดรอม (ROM) บนตัวชิพขนาด  $2 \text{ k} \times 16$  บิต
- สามารถอ้างหน่วยความจำภายนอกได้สูงสุด  $224 \text{ k} \times 16$  บิต โดยแบ่งเป็นหน่วยความจำข้อมูลและหน่วยความจำโปรแกรมอย่างละ  $64 \text{ k}$  และใช้ทั่วไปอีก  $32 \text{ k}$
- หน่วยประมวลผลทางคณิตศาสตร์ (Arithmetic Logic Unit : ALU), แอควิวิเลเตอร์ (Accumulator : ACC) และ แอควิวิเลเตอร์บัฟเฟอร์ (Accumulator buffer : ACCB) มีขนาด 32 บิต
- สามารถรองรับการคูณเลขสองจำนวนที่มีขนาด  $16 \times 16$  บิต ได้โดยผลลัพธ์จะเป็นเลขขนาด 32 บิต
- ใช้เวลาในการคูณในหนึ่งรอบคำสั่งของการคูณ
- มีรีจิสเตอร์ช่วย (auxiliary register) ทั้งหมด 8 ตัว สำหรับชี้ตำแหน่งแอดเดรส (address)
- มีฮาร์ดแวร์สแตค (hardware stack) จำนวน 8 ระดับ
- การติดต่อโดยตรงระหว่าง TMS320C5x กับอุปกรณ์อนุกรม (serial device) เป็นแบบสองทิศทางหรือที่เรียกว่า full duplex synchronous
- มีตัวกำเนิดสัญญาณนาฬิกาภายในชิพ
- ต้องการแหล่งจ่ายไฟ 5 V
- มีจำนวนขาทั้งหมด 132 ขา



Note: NC = No connect. (These pins are reserved.)

ภาพประกอบ 2.8 แสดงลักษณะการจัดวางขาสัญญาณทั้ง 132 ขา ของ TMS320C5x

### 2.2.1 สถาปัตยกรรมของ TMS320C50

หน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์และตรรกศาสตร์ (Arithmetic Logic Unit : ALU)

TMS320C50 จะใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์แบบทวูคอมพลีเมนต์ (2s-complement) โดยใช้ ALU และ ACC ขนาด 32 บิต ALU เป็นหน่วยคำนวณที่ใช้สำหรับจุดประสงค์ทั่วไป โดยใช้ข้อมูลขนาด 16 บิตจากหน่วยความจำข้อมูล หรือได้รับจากคำสั่งโดยตรง หรือได้รับผลซึ่งมีขนาด 32 บิตจากตัวคูณ นอกจากนี้แล้ว ALU ยังสามารถแสดงการกระทำแบบบูลีน (boolean operation) ได้ด้วย ผลลัพธ์ที่ได้จากการกระทำของ ALU จะถูก

ส่งไปเก็บที่แอกคูมิวเลเตอร์ นอกจากแอกคูมิวเลเตอร์จะทำหน้าที่เก็บผลลัพธ์ที่ได้ จากการกระทำของ ALU แล้วแอกคูมิวเลเตอร์ยังทำหน้าที่เป็นอินพุทที่ 2 ให้กับ ALU ด้วย แอกคูมิวเลเตอร์มีขนาด 32 บิต แบ่งออกเป็นเวิร์ดสูง (bit31-bit16) เวิร์ดต่ำ (bit15-bit0)

#### หน่วยปฏิบัติการทางตรรกศาสตร์แบบขนาน (Parallel Logic Unit : PLU)

จะทำการปฏิบัติการทางตรรกศาสตร์กับข้อมูลโดยที่ไม่ส่งผลต่อ รายละเอียดของแอกคูมิวเลเตอร์ นอกจากนี้แล้ว PLU ยังมีความสามารถย้ายถ่ายโอน การเซตบิต เคลียร์บิต

#### ตัวคูณ (multiplier)

ทำหน้าที่คูณข้อมูล  $16 \times 16$  บิตแบบทูลคอมพลิเมนต์ได้ผลลัพธ์ขนาด 32 บิต และใช้เวลาในการคำนวณเพียงหนึ่งรอบคำสั่ง ตัวคูณประกอบไปด้วยกัน 3 ส่วนคือ อาร์เรย์ของตัวคูณ (multiplier array), PREG (product register), TREG0 (temporary register)

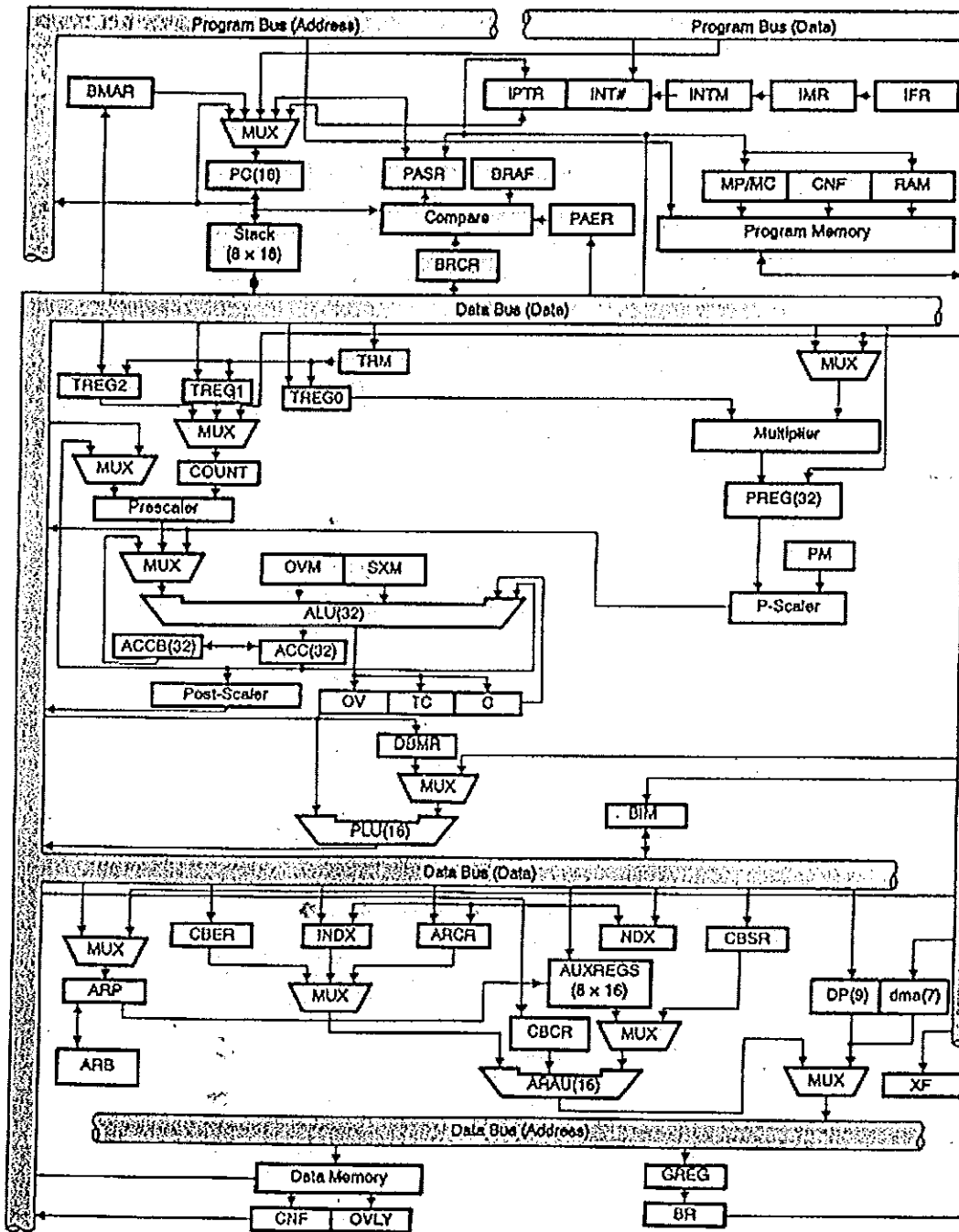
TREG0 เป็นรีจิสเตอร์ขนาด 16 บิต ทำหน้าที่เก็บตัวตั้งที่ใช้ในการคูณ, PREG เป็นรีจิสเตอร์ขนาด 32 บิต ทำหน้าที่เก็บผลลัพธ์ที่ได้จากการคูณ ส่วนค่าของตัวคูณ จะนำมาจากหน่วยความจำข้อมูลหรือนำมาจากหน่วยความจำโปรแกรมเมื่อมีการใช้คำสั่ง MAC/MACD/MADS /MADD

#### ตัวเลื่อนบิต (Scaling shifter)

ตัวเลื่อนบิตมีขนาด 16 บิตอินพุท ต่ออยู่กับเส้นทางข้อมูล และ 32 บิต เอาต์พุท ต่ออยู่กับ ALU จะทำการเลื่อนบิต 0 ถึง บิต 16 ของข้อมูลอินพุทไปทางซ้าย ถ้าถูก โปรแกรมไว้ในคำสั่งหรือถูกกำหนดไว้ใน TREG1 (shift count register) บิต LSBs ของ เอาต์พุทจะถูกกำหนดเป็นศูนย์ ขณะที่ MSBs อาจจะเป็นศูนย์หรือเครื่องหมายก็ได้ขึ้นอยู่กับสถานะของบิต SXM (sign extension mode) ใน ST1 (ststus register)

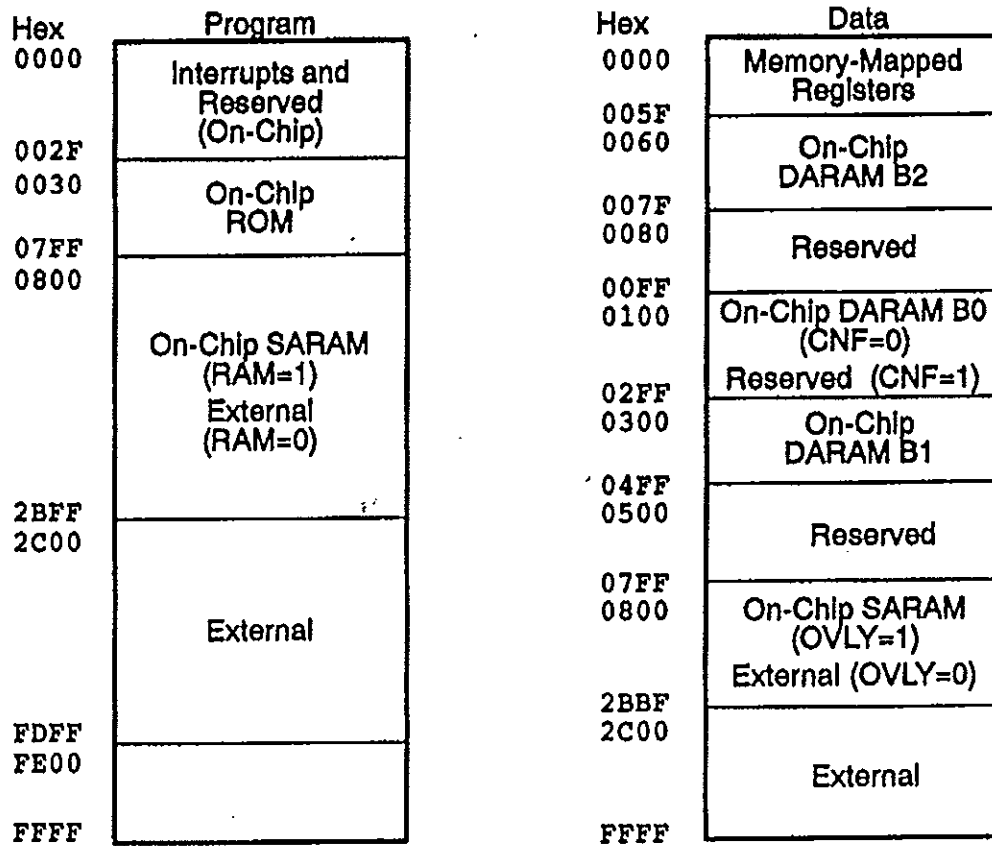
#### สแตก (Stack)

สแตกมี 8 ระดับ ทำหน้าที่เก็บตำแหน่งของโปรแกรมเคาน์เตอร์ (program counter) ในระหว่างเกิดการอินเตอร์รัพท์และเมื่อมีการเรียกซับรูทีน (subroutine) เมื่อเกิดการอินเตอร์รัพท์ ข้อมูลใน ACC, ACCB, ARCR, INDX, PMST, PREG, ST0, ST1, TREGs จะถูกพืซ (push) ไปเก็บไว้ในสแตก และจะถูกพื๊อป (pop) ออกมาเมื่อสิ้นสุด การอินเตอร์รัพท์



ภาพประกอบ 2.9 แสดงแผนภาพบล็อกหลักและเส้นทางข้อมูลภายในของ TMS320C5x

## 2.2.2 การจัดการหน่วยความจำภายใน (Internal Memory Organization)

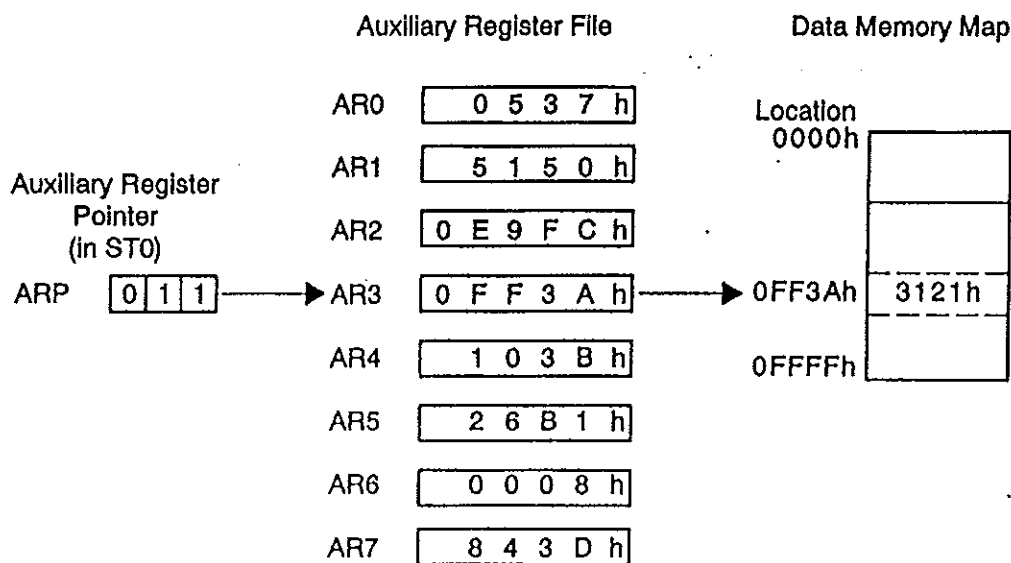


ภาพประกอบ 2.10 แสดงการจัดการหน่วยความจำภายในของ TMS320C5x

หน่วยความจำส่วน B2 เป็นหน่วยความจำประเภท DARAM (Dual access, Random-Access Memory) ซึ่งถูกจองไว้เป็นบัฟเฟอร์ (buffer) สำหรับรีจิสเตอร์แสดงสถานะ (status register) ส่วนหน่วยความจำประเภท SARAM (Single Access, Random Access Memory) ถูกจัดให้เป็นหน่วยความจำข้อมูลและหน่วยความจำโปรแกรม ส่วนของโปรแกรมเคอร์เนล (kernel program) จะถูกเก็บไว้ที่ 0x840h-0x980h ถ้าหน่วยความจำส่วนนี้ถูกเขียนทับจะต้องใช้สัญญาณรีเซ็ต (reset) ในการโหลดโปรแกรมเคอร์เนลใหม่ ส่วนอินเตอร์รัพท์เวกเตอร์จะถูกเก็บไว้ที่ตำแหน่งเริ่มต้น 0x800h

### 2.2.3 รีจิสเตอร์ช่วย (auxiliary register)

TMS320C50 มีรีจิสเตอร์ช่วยด้วยกันทั้งหมด 8 ตัว คือ AR0-AR7 ใช้ในการอ้างตำแหน่งของหน่วยความจำข้อมูลทางอ้อมหรือใช้สำหรับเก็บข้อมูลชั่วคราว การอ้างตำแหน่งทางอ้อมโดยใช้รีจิสเตอร์ช่วยแสดงดังภาพประกอบ 2.11 รีจิสเตอร์เหล่านี้ถูกชี้โดยรีจิสเตอร์ช่วย ARP ซึ่งมีขนาด 3 บิต



ภาพประกอบ 2.11 ตัวอย่างการอ้างตำแหน่งทางอ้อมโดยใช้รีจิสเตอร์ช่วย

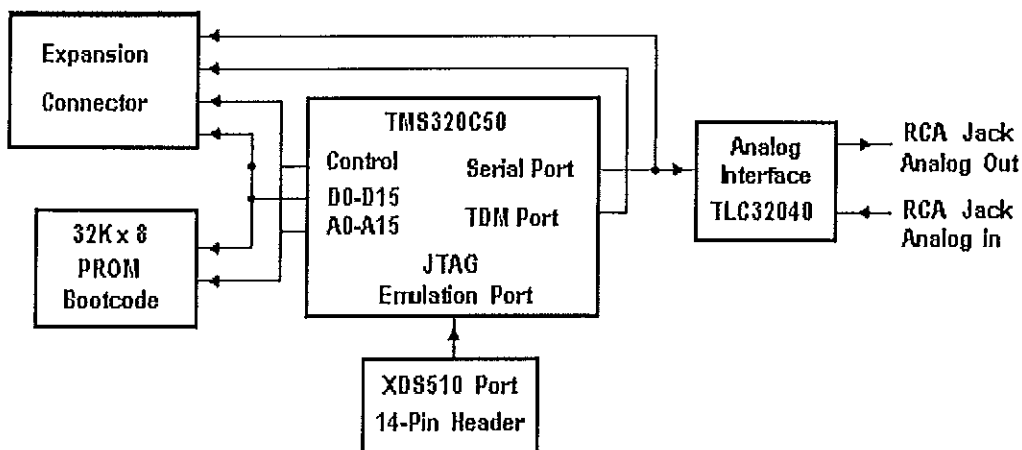
### 2.3 บอร์ด TMS320C5x DSP STARTER KIT

บอร์ด TMS320C5x DSP Starter Kit (DSK) เป็นบอร์ดที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลที่มีราคาถูก ใช้งานง่าย สามารถใช้ในการประมวลผลสัญญาณที่เป็นแบบเวลาจริง (real time) สามารถติดต่อกับคอมพิวเตอร์ได้โดยผ่านทางพอร์ท RS232 ดังนั้นมันจึงทำให้สามารถทำการพัฒนาและแก้ไขโปรแกรมได้ง่าย บนบอร์ดมีชิพเบอร์ TMS320C50 เป็นตัวประมวลผล และบอร์ด DSK นี้ได้ถูกออกแบบมาให้สามารถสร้างโปรแกรมและทำการรัน (run) บนตัวบอร์ดได้เลย นอกจากนี้แล้วเรายังสามารถขยายระบบจากบอร์ดเดิมที่มีอยู่ได้อีกด้วย สำหรับข้างล่างนี้เป็นรายละเอียดของบอร์ด TMS320C5x DSP STARTER KIT

- ใช้ชิพเบอร์ TMS320C50 เป็นตัวประมวลผล

- มีหน่วยความจำประเภท PROM (Programable Read Only Memory) ขนาด 32 กิโลไบต์
- ใช้ชิพเบอร์ TLC32040 เป็นตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลและแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก (A/D and D/A converter)
- มีจุดต่อ RCA สำหรับรับและส่งสัญญาณอนาล็อกที่สามารถต่อกับไมโครโฟนและลำโพงโดยตรง
- มีจุดต่อ XDSA510 emulator connector
- มีเส้นทางในการขยาย I/O (I/O expression bus) สำหรับการออกแบบภายนอก

ภาพประกอบ 2.12 เป็นแผนภาพบล็อกพื้นฐานของ TMS320C5x ซึ่งแสดงการเชื่อมต่อระหว่างกัน (interconnections) ประกอบด้วยโฮสต์อินเตอร์เฟส (host interface), อนาล็อกอินเตอร์เฟส (analog interface), และอิมูเลชันอินเตอร์เฟส (emulation interface) และในการติดต่อกับ PC จะติดต่อกันผ่านทาง RS-232 สำหรับหน่วยความจำ PROM ขนาด 32 กิโลไบต์ จะเก็บโปรแกรมเคอร์เนล (Kernal program) ที่ใช้ในการบูต (boot)

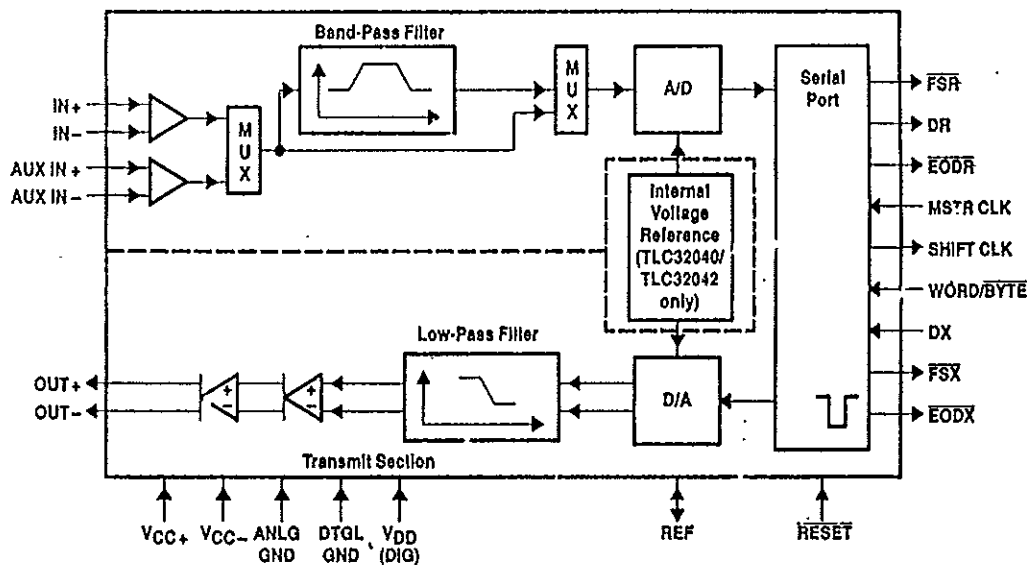


ภาพประกอบ 2.12 เป็นแผนภาพบล็อกพื้นฐานของ TMS320C5x ซึ่งแสดงการเชื่อมต่อระหว่างกัน



วงจรที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งนั่นก็คือ วงจร Analog Interface Circuit (AIC) เป็นไอซีเบอร์ TLC32040 วงจรนี้เป็นวงจรที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลและแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกในตัวเดียวกัน บอร์ด TMS320C5x DSP STARTER KIT เป็นบอร์ดที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลที่มีราคาถูก ใช้งานง่าย สามารถติดต่อกับคอมพิวเตอร์ได้โดยผ่านทางพอร์ท RS232 ดังนั้นมันจึงทำให้สามารถทำการพัฒนาและแก้ไขโปรแกรมได้ง่าย

ไอซี TLC32040 (Analog Interface Circuit :AIC) เป็นไอซีที่มีวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลและแปลงสัญญาณดิจิทัลกลับมาเป็นสัญญาณอนาล็อกในตัวเดียวกัน มีความละเอียด 14 บิต (14-bit resolution) ภายตัวไอซีดังกล่าวนี้ยังมีวงจรกรองความถี่สำหรับการป้องกันการเกิดเอเลียสซิ่งหรือที่เรียกว่าวงจร Anti-Asiasing นั้นเอง AIC อยู่บนบอร์ด DSK มันอินเตอร์เฟสโดยตรงกับ TMS320C5x ผ่านทางพอร์อนุกรม (serial port) สำหรับลักษณะภายในของไอซีเบอร์ TLC32040 แสดงดังภาพประกอบ 2.13



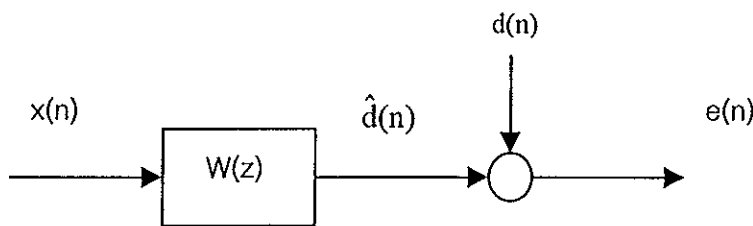
ภาพประกอบ 2.13 วงจรภายในของไอซีเบอร์ TLC32040

### บทที่ 3

#### ตัวกรองปรับค่าได้

##### 3.1 ตัวกรองแบบ FIR (Finite Impulse Response) Wiener

ในการประมาณสัญญาณหนึ่งจากสัญญาณอีกสัญญาณหนึ่ง เป็นปัญหาที่มีความสำคัญมากที่สุดปัญหาหนึ่ง ในการประมวลผลสัญญาณ ในปี 1940 Norbert Wiener ได้บุกเบิกงานวิจัยในปัญหาเรื่องการออกแบบตัวกรองที่สามารถประมาณสัญญาณได้เหมาะสม จากการวัดสัญญาณรบกวนหรือจากการสังเกตจากสัญญาณรบกวน การกรองแบบ Wiener ในลักษณะไม่ต่อเนื่อง (discrete) แสดงดังภาพประกอบ 3.1  $W(z)$  เป็นตัวกรองแบบ linear shift-invariant ซึ่งจะกรองสัญญาณอินพุต  $x(n)$  เพื่อสร้างสัญญาณประมาณ  $\hat{d}(n)$  ให้มีลักษณะเหมือนกับสัญญาณ  $d(n)$



ภาพประกอบ 3.1 แสดงรูปแบบปัญหาการกรองแบบ Wiener โดยทั่วไป กำหนดให้  $x(n)$  และ  $d(n)$  เป็น jointly wide-sense stationary (WSS) คือมีความสัมพันธ์ทางสถิติซึ่งกันและกัน  $W(z)$  เป็นตัวกรองซึ่งใช้ในการสร้างสัญญาณประมาณ  $\hat{d}(n)$

ในการออกแบบตัวกรอง FIR Wiener เราสมมติให้  $x(n)$  และ  $d(n)$  เป็น jointly wide-sense stationary (WSS) ซึ่งทราบค่าออโตคอร์รีเลชัน (autocorrelation)  $r_x(k)$  และทราบค่า คอส-คอร์รีเลชัน (cross-correlation)  $r_{dx}(k)$  สำหรับ  $w(n)$  เป็นผลตอบสนองตัวอย่างหนึ่งหน่วย (unit sample response) ของตัวกรอง Wiener และถ้าเราให้ตัวกรองมีอันดับเท่ากับ  $(p)$  ดังนั้นฟังก์ชันระบบคือ

$$W(z) = \sum_{n=0}^{p-1} w(n)z^{-n}$$

ด้วย  $x(n)$  เป็นอินพุทของตัวกรอง  $\hat{d}(n)$  เป็นเอาต์พุทของตัวกรองซึ่งได้จากการทำคอนโวลูชัน (convolution) ของตัวกรอง  $w(n)$  กับสัญญาณอินพุท  $x(n)$

$$\hat{d}(n) = \sum_{l=0}^{p-1} w(l)x(n-l) \quad (3.1)$$

และ

$$e(n) = d(n) - \hat{d}(n) \quad (3.2)$$

ในการออกแบบตัวกรอง Wiener นั้น เราต้องการหาสัมประสิทธิ์ตัวกรอง  $w(k)$  ที่ทำให้ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองเหลือน้อยที่สุด (minimize the mean-square error)

$$\xi = E\{[e(n)]^2\} = E\{|d(n) - \hat{d}(n)|^2\} \quad (3.3)$$

และเพื่อที่จะทำให้ได้สัมประสิทธิ์ตัวกรอง ซึ่งทำให้  $\xi$  มีค่าน้อยที่สุด จะต้องทำการหาอนุพันธ์ของ  $\xi$  เทียบกับ  $w^*(k)$  เท่ากับศูนย์ ( $k=0,1,\dots,p-1$ )

$$\frac{\partial \xi}{\partial w^*(k)} = \frac{\partial}{\partial w^*(k)} E\{e(n)e^*(n)\} = E\left\{e(n) \frac{\partial e^*(n)}{\partial w^*(k)}\right\} = 0 \quad (3.4)$$

$$\text{ซึ่ง} \quad e(n) = d(n) - \sum_{l=0}^{p-1} w(l)x(n-l) \quad (3.5)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{\partial e^*(n)}{\partial w^*(k)} = -x^*(n-k)$$

สมการ (3.4) เปลี่ยนเป็น

$$E\{e(n)x^*(n-k)\} = 0 \quad ; \quad k=0,1,\dots,p-1 \quad (3.6)$$

แทนสมการ (3.5) ใน (3.6)

$$E\{d(n)x^*(n-k)\} - \sum_{l=0}^{p-1} w(l)E\{x(n-l)x^*(n-k)\} = 0 \quad (3.7)$$

สุดท้ายเนื่องจาก  $x(n)$  และ  $d(n)$  เป็น jointly WSS ดังนั้น

$$E\{x(n-l)x^*(n-k)\} = r_x(k-l)$$

และ  $E\{d(n)x^*(n-k)\} = r_{dx}(k)$

ดังนั้นสมการ (3.7) เปลี่ยนเป็น

$$\sum_{l=0}^{p-1} w(l)r_x(k-l) = r_{dx}(k) \quad ; k=0,1,\dots,p-1 \quad (3.8)$$

สมการ (3.8) เป็นกลุ่มของสมการเชิงเส้น  $p$  สมการ และ  $w(k)$  ซึ่งเป็นค่าที่ไม่ทราบ (unknown)  $p$  ตัว ซึ่ง  $k=0,1,\dots,p-1$  เราเขียนสมการ (3.8) ในรูปของเมทริกซ์ และใช้ความจริงของลำดับอโตคอร์รีเลชันว่าเป็นสมมาตรเชิงคอนจูเกต  $r_x(k) = r_x^*(-k)$  ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} r_x(0) & r_x^*(1) & \dots & r_x^*(p-1) \\ r_x(1) & r_x(0) & \dots & r_x^*(p-2) \\ r_x(2) & r_x(1) & \dots & r_x^*(p-3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_x(p-1) & r_x(p-2) & \dots & r_x(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w(0) \\ w(1) \\ w(2) \\ \vdots \\ w(p-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{dx}(0) \\ r_{dx}(1) \\ r_{dx}(2) \\ \vdots \\ r_{dx}(p-1) \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

สมการ (3.9) เป็นรูปแบบเมทริกซ์ของสมการ Wiener-Hopf เขียนในรูปแบบใหม่ในรูปแบบที่รัดกุมได้ดังนี้

$$\mathbf{R}_x \mathbf{w} = \mathbf{r}_{dx} \quad (3.10)$$

เมื่อ  $\mathbf{R}_x$  เป็นเมทริกซ์ Hermitian Toeplitz ขนาด  $p \times p$  ของอโตคอร์รีเลชัน

$w$  เป็นเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ตัวกรอง

และ  $r_{dx}$  เป็นเวกเตอร์ของคออส-คอรัลเลชันระหว่างสัญญาณที่ต้องการ (desired signal)  $d(n)$  และสัญญาณสังเกต (observed signal)  $x(n)$

สำหรับค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุดในการประมาณ  $d(n)$  สามารถหาได้จากสมการ (3.3)

$$\begin{aligned}\xi &= E\{e(n)^2\} = E\left\{e(n)\left[d(n) - \sum_{l=0}^{p-1} w(l)x(n-l)\right]^*\right\} \\ &= E\{e(n)d^*(n)\} - \sum_{l=0}^{p-1} w(l)E\{e(n)x^*(n-l)\}\end{aligned}\quad (3.11)$$

ถ้าหากว่า  $w(k)$  เป็นคำตอบของสมการ Wiener-Hopf และจากสมการ (3.6)

$E\{e(n)x^*(n-k)\} = 0$  ดังนั้นเทอมที่ 2 ของสมการ (3.11) เท่ากับ 0

$$\begin{aligned}\text{และ } \xi_{\min} &= E\{e(n)d^*(n)\} \\ &= E\left\{\left[d(n) - \sum_{l=0}^{p-1} w(l)x(n-l)\right]d^*(n)\right\} \\ &= E\left\{d(n)d^*(n) - \sum_{l=0}^{p-1} w(l)x(n-l)d^*(n)\right\} \\ &= r_d(0) - \sum_{l=0}^{p-1} w(l)r_{dx}^*(l)\end{aligned}\quad (3.12)$$

เขียนในรูปแบบของเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\xi_{\min} = r_d(0) - r_{dx}^H w \quad (3.13)$$

เนื่องจาก  $w = R_x^{-1}r_{dx}$

$$\text{ดังนั้น } \xi_{\min} = r_d(0) - r_{dx}^H R_x^{-1} r_{dx} \quad (3.14)$$

### 3.2 ตัวกรองปรับค่าได้

พิจารณาปัญหาการกรองแบบ Wiener

$$\hat{d}(n) = \sum_{k=0}^p w(k) x(n-k) \quad (3.15)$$

ให้  $x(n)$  และ  $d(n)$  เป็น jointly wide-sense stationary process ค่าความผิดพลาด  $e(n) = d(n) - \hat{d}(n)$  และสัมประสิทธิ์ตัวกรองซึ่งทำให้ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง  $E\{|e(n)|^2\}$  มีค่าน้อยที่สุด หาได้จากการแก้สมการ Wiener-Hopf

$$\mathbf{R}_x \mathbf{w} = \mathbf{r}_{dx} \quad (3.16)$$

และถ้า  $x(n)$  และ  $d(n)$  เปลี่ยนแปลงตามเวลา (nonstationary) สัมประสิทธิ์ตัวกรองซึ่งทำให้  $E\{|e(n)|^2\}$  มีค่าน้อยที่สุดจะขึ้นอยู่กับค่า  $n$  และตัวกรองก็จะเป็นแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา (shift-varying) คือ

$$\hat{d}(n) = \sum_{k=0}^p w_n(k) x(n-k) \quad (3.17)$$

$w_n(k)$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองที่เวลา  $n$  และเราสามารถเขียนสมการ (3.17) ในรูปของเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\hat{d}(n) = \sum_{k=0}^p \mathbf{w}_n^T \mathbf{x}(n)$$

ซึ่ง  $\mathbf{w}_n = [w_n(0), w_n(1), \dots, w_n(n)]^T$  เป็นสัมประสิทธิ์ของตัวกรองที่เวลา  $n$   
 $\mathbf{x}(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-p)]^T$

ในการออกแบบตัวกรองแบบที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (shift-varying) หรือตัวกรองแบบปรับตัวได้ (adaptive) นั้น ทำได้ยากกว่าการออกแบบตัวกรอง Wiener ซึ่งเป็นแบบไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (shift-invariant) เนื่องจากว่าจำเป็นที่จะต้องหาค่ากลุ่มของสัมประสิทธิ์

ตัวกรอง  $w_n(k)$  (สำหรับ  $k=0, 1, \dots, p$ ) ที่เหมาะสมสำหรับทุกค่าของ  $n$  อย่างไรก็ตามปัญหานี้ อาจพิจารณาให้ง่ายขึ้น ถ้าเราลดความต้องการที่จะหา  $w_n$  ซึ่งทำให้ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองมีค่าน้อยที่สุดที่แต่ละเวลา  $n$  และมาพิจารณาสมการปรับค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งมีรูปแบบดังสมการ (3.18)

$$w_{n+1} = w_n + \Delta w_n \quad (3.18)$$

$\Delta w_n$  คือ คอรัเรคชัน (Correction) ซึ่งใช้ในการหาสัมประสิทธิ์ตัวกรองตัวใหม่  $w_{n+1}$  ที่เวลา  $n+1$  และนี่ก็เป็นสมการปรับซึ่งเป็นหัวใจของตัวกรองแบบปรับค่าได้ที่เราจะใช้ในการออกแบบ ในการออกแบบตัวกรองแบบปรับค่าได้จะเป็นการกำหนดว่าจะทำการสร้างรูปแบบของคอรัเรคชันนี้ได้อย่างไร สำหรับในกรณีที่เป็นสัญญาณที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา มีเหตุผลหลายประการด้วยกันที่ว่าทำไมเราจึงใช้สมการ (3.18) ในการหาตัวกรอง Wiener ที่เป็นแบบไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (time-invariant) อันดับแรกคือ ถ้าอันดับ  $p$  ของตัวกรองมีขนาดใหญ่ มันอาจยากหรือเป็นไปได้ในทางปฏิบัติในการแก้สมการ Wiener-Hopf โดยตรง อันที่ 2 คือถ้า  $R_x$  ถูกทำให้อยู่ในเงื่อนไขที่ไม่เหมาะสม คือ เป็นซิงกูลาร์ (singular) ทำให้การแก้ปัญหามสมการ Wiener-Hopf มีความไวต่อค่าผิดพลาดจากการปัดเศษ (round-off errors) และมีผลต่อความเที่ยงที่จำกัด (finite precision effects) สุดท้ายซึ่งบางทีอาจสำคัญที่สุด คือในการแก้สมการ Wiener-Hopf ต้องการใช้ค่าออโตโครีเลชัน  $r_x(k)$  และครอส-คอรัเรลชัน  $r_{dx}(k)$  แต่เนื่องจากว่า อยู่ในรูปที่ไม่ทราบค่า (unknown) ดังนั้นมันจึงจำเป็นที่จะต้องทำการประมาณค่าของมันจากการประมาณสัญญาณ

$$\begin{aligned} \hat{r}_x(k) &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)x^*(n-k) \\ \hat{r}_{dx}(k) &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} d(n)x^*(n-k) \end{aligned} \quad (3.19)$$

แต่เนื่องจาก ค่าออโตโครีเลชัน  $r_x(k)$  และครอส-คอรัเรลชัน  $r_{dx}(k)$  มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้น การประมาณจำเป็นต้องการปรับ (update) อย่างต่อเนื่อง

วิธีการที่จะหาค่าประกอบของตัวกรองปรับค่าจึงเป็นกฎ หรือ อัลกอริธึม ซึ่งกำหนดวิธีการสร้างรูปแบบของคอรัเรคชัน  $\Delta w_n$  ถึงแม้ว่ามันยังไม่ชัดเจนว่าคอรัเรคชันนี้จะเป็นอะไร

แต่สิ่งที่ชัดเจนคือ ลำดับของคอร์เรลชันทำให้ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองลดลง นั่นคือ อัลกอริทึม อะไรก็ตามที่ใช้แล้วทำให้ตัวกรองปรับค่าได้เป็นไปตามคุณสมบัติต่อไปนี้

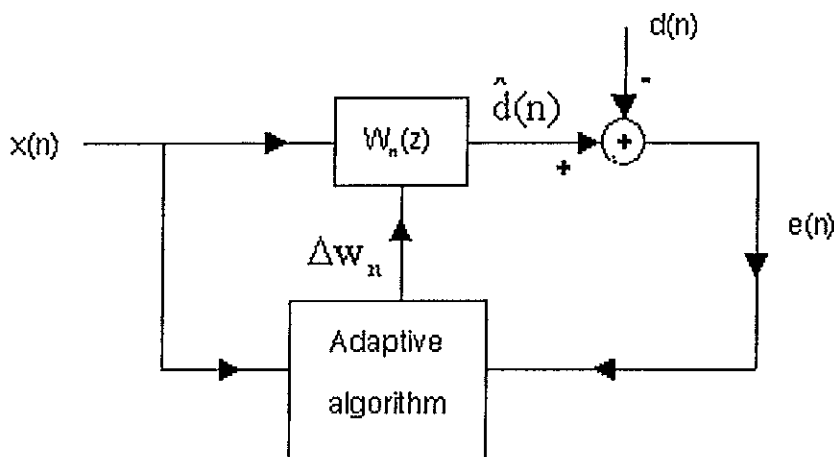
1. โดยธรรมชาติของสัญญาณที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ตัวกรองปรับค่าได้ควรจะสร้างลำดับของคอร์เรลชัน  $\Delta w_n$  ซึ่งทำให้  $w_n$  เข้าสู่วิธีการแก้สมการ Wiener-Hopf

$$\lim_{n \rightarrow \infty} w_n = R_x^{-1} r_{dx}$$

2. ไม่จำเป็นที่จะต้องทราบค่า  $r_x(k)$  และ  $r_{dx}(k)$  ซึ่งเป็นค่าทางสถิติของสัญญาณเมื่อคำนวณหา  $\Delta w_n$

3. สำหรับสัญญาณที่เป็นแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา ตัวกรองควรจะสามารปรับตาม (adapt) ตามค่าสถิติที่เปลี่ยนแปลงไป

ภาพประกอบ 3.2 อธิบายการออกแบบตัวกรองปรับค่าได้ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการกำหนดวิธีการในการจัดรูปแบบของคอร์เรลชัน จากภาพประกอบดังกล่าวจะเห็นว่าเราต้องการสัญญาณผิดพลาด (error signal)  $e(n)$  เพื่อส่งให้กับอัลกอริทึมปรับค่า เนื่องจากว่า  $e(n)$  จะเป็นตัววัดการทำงานของตัวกรองและกำหนดวิธีการที่สัมประสิทธิ์ตัวกรองควรจะทำกรปรับเปลี่ยนอย่างไร ถ้าไม่มี  $e(n)$  ตัวกรองก็จะไม่สามารถปรับค่าได้



ภาพประกอบ 3.2 แผนภาพบล็อกของตัวกรองปรับตัวได้ประกอบด้วยตัวกรอง  $W_n(z)$  และอัลกอริทึมสำหรับปรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรอง  $w_n(k)$



### 3.2.1 การออกแบบตัวกรองปรับตัวได้แบบ FIR

ในการออกแบบตัวกรองปรับตัวได้ เราจะเริ่มจากการศึกษาตัวกรองปรับตัวได้ โดยใช้ การออกแบบตัวกรองปรับตัวได้แบบ FIR ตัวกรองแบบ FIR ถูกใช้เป็นประจำในงานทางด้านกรรแบบปรับค่าได้ เช่น อีควอลไลเซอร์ปรับตัวได้ ( adaptive equalizers ) ในระบบการสื่อสารดิจิทัล, ระบบควบคุมเสียงรบกวนปรับตัวได้ มีเหตุผลหลายประการที่ตัวกรองปรับตัวได้แบบ FIR เป็นที่นิยมใช้กัน เช่น เสถียรภาพสามารถควบคุมได้ง่าย โดยที่สัมประสิทธิ์ของตัวกรองถูกทำให้อยู่ในขอบเขตได้แน่นอน, อัลกอริธึมมีความง่าย และมีประสิทธิภาพสำหรับปรับสัมประสิทธิ์ตัวกรอง, การทำงานของอัลกอริธึมเหล่านี้ทำให้ตัวกรองลู่เข้าและมีเสถียรภาพ

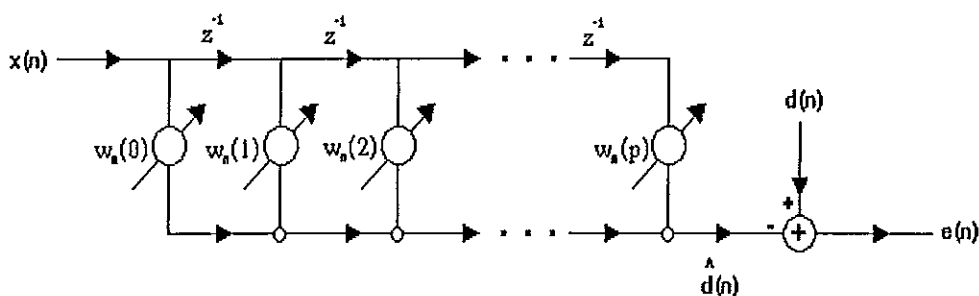
ตัวกรองปรับตัวได้แบบ FIR ที่ใช้สำหรับการประมาณสัญญาณที่ต้องการ (desired signal)  $d(n)$  จากสัญญาณ  $x(n)$  อธิบายดังภาพประกอบ 3.3 คือ

$$\hat{d}(n) = \sum_{k=0}^p w_n(k)x(n-k) = \mathbf{w}_n^T \mathbf{x}(n)$$

ในที่นี้เราสมมุติว่า  $x(n)$  และ  $d(n)$  เป็นสัญญาณสุ่ม (random) ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ( nonstationary random process ) และเป้าหมายในการออกแบบตัวกรองปรับตัวได้แบบ FIR ของเราคือ ต้องการหาเวกเตอร์ของสัมประสิทธิ์  $\mathbf{w}_n$  ที่เวลา  $n$  ซึ่งทำให้ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองมีค่าน้อยที่สุด

$$\xi(n) = E\{|e(n)|^2\}$$

ซึ่ง 
$$e(n) = d(n) - \hat{d}(n) = d(n) - \mathbf{w}_n^T \mathbf{x}(n) \quad (3.20)$$



ภาพประกอบ 3.3 รูปแบบของตัวกรองปรับค่าได้ FIR แบบ direct-form

จากตัวกรอง FIR Wiener วิธีการที่จะใช้ในการที่จะทำให้ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองมีค่าน้อยที่สุดก็คือ การหาอนุพันธ์ของ  $\xi(n)$  เทียบกับ  $w_n^*(k)$  แล้วให้เท่ากับ ศูนย์

$$\frac{\partial \xi}{\partial w^*(k)} = \frac{\partial}{\partial w^*(k)} E\{e(n)e^*(n)\} = E\left\{e(n) \frac{\partial e^*(n)}{\partial w^*(k)}\right\} = 0 \quad (3.21)$$

$$\text{จาก } e(n) = d(n) - w_n^T x(n) = d(n) - \sum_{l=0}^{p-1} w_n(l)x(n-l) \quad (3.22)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{\partial e^*(n)}{\partial w^*(k)} = -x^*(n-k)$$

ดังนั้นสมการ (3.21) จึงกลายเป็น

$$E\{e(n)x^*(n-k)\} = 0 \quad ; k=0,1,\dots,p-1 \quad (3.23)$$

แทนสมการ (3.22) ในสมการ (3.23)

$$E\left\{\left[d(n) - \sum_{l=0}^p w_n(l)x(n-l)\right]x^*(n-k)\right\} = 0 \quad k=0,1,\dots,p \quad (3.24)$$

จัดสมการใหม่

$$\sum_{l=0}^p w_n(l)E\{x(n-l)x^*(n-k)\} = E\{d(n)x^*(n-k)\} \quad ; k=0,1,\dots,p \quad (3.25)$$

จากตัวกรอง FIR Wiener เราสมมุติให้  $x(n)$  และ  $d(n)$  เป็น join WSS ซึ่งวิธีการแก้สมการเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับค่า  $n$  และเขียนสมการ (3.24) ใหม่ได้ดังนี้

$$R_x(n)w_n = r_{dx}(n)$$

ซึ่ง

$$\mathbf{R}_x(n) = \begin{bmatrix} E\{x(n)x^*(n)\} & E\{x(n-1)x^*(n)\} & \dots & E\{x(n-p)x^*(n)\} \\ E\{x(n)x^*(n-1)\} & E\{x(n-1)x^*(n-1)\} & \dots & E\{x(n-p)x^*(n-1)\} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E\{x(n)x^*(n-p)\} & E\{x(n-1)x^*(n-p)\} & \dots & E\{x(n-p)x^*(n-p)\} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{r}_{dx}(n) = [E\{d(n)x^*(n)\}, E\{d(n)x^*(n-1)\}, \dots, E\{d(n)x^*(n-p)\}]^T \quad (3.26)$$

สมการ (3.26) เป็น คออส-คอรีเลชัน ระหว่าง  $d(n)$  และ  $x(n)$  และในกรณีของสัญญาณ jointly WSS จะถูกทำให้อยู่ในรูปแบบของสมการ Wiener-Hopf และวิธีการหา  $w_n$  จะไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ดังนั้นเราจึงต้องแก้สมการ (3.26) ที่ไม่สามารถเป็นไปได้ในทางปฏิบัติรูปลักษณะของเวลาจริง (real-time) ซึ่งเราจะใช้วิธีการทำซ้ำ และใช้หลักการของวิธีการแบบสตีพเพสต์ เดสเซนต์ (steepest descent)

### 3.2.2 สตีพเพสต์ เดสเซนต์ (Steepest Descent)

วิธีการของสตีพเพสต์ เดสเซนต์ เป็นรูปแบบของการทำซ้ำ มีขั้นตอนวิธีดังนี้

1. ทำการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับอัลกอริทึมแบบสตีพเพสต์ เดสเซนต์ คือทำการประมาณค่าเริ่มต้นโดยให้  $w = w_0$  ซึ่ง  $w$  เป็นเวกเตอร์น้ำหนักที่เหมาะสม
2. หาค่าเกรเดียนต์ของ  $\zeta(n)$  ที่การประมาณค่า  $w_n$  ครั้งปัจจุบัน
3. หาค่าเวกเตอร์น้ำหนักตัวใหม่ ณ เวลา  $n$  โดยการเพิ่มค่าคอรีเรชัน ซึ่งได้จากการใส่สตีปไซ  $\mu$  ในทิศทางเกรเดียนต์ลบ

$$w_{n+1} = w_n - \mu \nabla \zeta(n)$$

4. กลับไปทำข้อ 2 และทำซ้ำกระบวนการนี้ไปเรื่อยๆ

พิจารณาการหาเกรเดียนต์เวกเตอร์  $\nabla \zeta(n)$  สมมุติว่า  $w$  เป็นจำนวนเชิงซ้อน ดังนั้นเกรเดียนต์ ก็คือการหาอนุพันธ์ของ  $E\{|e(n)|^2\}$  เทียบกับ  $w^*$

$$\nabla \zeta(n) = \nabla E\{|e(n)|^2\} = E\{\nabla |e(n)|^2\} = E\{e(n) \nabla e^*(n)\}$$

และ

$$\nabla e(n)^* = -x^*(n)$$

สมการเปลี่ยนเป็น

$$\nabla \zeta(n) = -E\{e(n)x^*(n)\}$$

ดังนั้นอัลกอริทึมสตีพเพสต์ เดสเซนต์ เปลี่ยนเป็น

$$\mathbf{w}_{n+1} = \mathbf{w}_n + \mu E\{e(n)x^*(n)\}$$

ในกรณีที่สัญญาณไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา  $x(n)$  และ  $d(n)$  เป็น jointly WSS

$$\begin{aligned} E\{e(n)x^*(n)\} &= E\{d(n)x^*(n)\} - E\{\mathbf{w}_n^T \mathbf{x}(n)x^*(n)\} \\ &= \mathbf{r}_{dx} - \mathbf{R}_x \mathbf{w}_n \end{aligned}$$

ดังนั้นอัลกอริทึมสตีพเพสต์ เดสเซนต์ คือ

$$\mathbf{w}_{n+1} = \mathbf{w}_n + \mu(\mathbf{r}_{dx} - \mathbf{R}_x \mathbf{w}_n) \quad (3.27)$$

ถ้า  $\mathbf{w}_n$  เป็นคำตอบของสมการ Wiener-Hopf, ดังนั้น  $\mathbf{w}_n = \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{r}_{dx}$  ทำให้เทอมของคอร์เรลชันเป็นศูนย์ และ  $\mathbf{w}_{n+1} = \mathbf{w}_n$  สำหรับทุกค่าของ  $n$  คุณสมบัตินี้กำหนดสิ่งที่ต้องการที่ทำให้  $\mathbf{w}_n$  อยู่เข้าสู่  $\mathbf{w}$  ซึ่งเป็นเวกเตอร์นำหนักที่เหมาะสม

สำหรับสัญญาณ  $d(n)$  และ  $x(n)$  เป็น jointly WSS ตัวกรองปรับค่าได้แบบสตีพเพสต์ เดสเซนต์ อยู่เข้าสู่คำตอบของสมการ Wiener-Hopf

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{w}_n = \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{r}_{dx}$$

ถ้าค่าเสถียรไซ  $\mu$  เป็นไปตามเงื่อนไข

$$0 < \mu < \frac{2}{\lambda_{\max}}$$

ซึ่ง  $\lambda_{\max}$  คือ ค่าไอเกนวาเลจสูงสุด (maximum eigenvalue) ของเมตริกซ์ออร์โทกอร์รีเลชัน  $\mathbf{R}_x$

อัลกอริทึมสตีพเพสต์เดสเซนต์นี้ไม่นิยมใช้ในงานทางด้านกรองแบบปรับค่าได้ เหตุผลก็เพราะว่า ต้องคำนวณหาเกรเดียนต์เวกเตอร์ และในการหาเกรเดียนต์เวกเตอร์เราจะต้องรู้ค่า  $E\{e(n)x^*(n)\}$  และสำหรับกรณีของสัญญาณแบบไม่มีการเปลี่ยนแปลง ตามเวลา เราที่ต้องการทราบค่าของเมตริกซ์ออร์โทกอร์รีเลชันของ  $x(n)$  และครอสคอรีเลชัน ระหว่าง  $d(n)$  และ  $x(n)$  แต่ในการใช้งานจริงค่า ensemble average เหล่านี้

เราไม่รู้ (unknown) และ ensemble average นี้หาได้จากการประมาณค่าจากข้อมูลของสัญญาณ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อเรื่องต่อไปคือ อัลกอริทึม LMS

### 3.2.3 อัลกอริทึม LMS (Least Mean Square Algorithm)

อัลกอริทึมแบบ LMS เป็นอัลกอริทึมที่นิยมใช้ในการประมวลผลสัญญาณแบบปรับค่าได้ ได้พัฒนามาจากตัวกรองปรับค่าได้แบบสเต็ปเพสท์เดสเซนด ( steepest descent adaptive filter) ซึ่งมีสมการปรับปรุงค่าน้ำหนักของสัมประสิทธิ์ตัวกรองดังนี้

$$w_{n+1} = w_n + \mu E\{e(n)x^*(n)\} \quad (3.28)$$

$\mu$  เป็นค่าสแต็ปไซส์ (step size) ของอัลกอริทึม ซึ่งเป็นตัวกำหนดเสถียรภาพและการลู่เข้า (convergence) ของอัลกอริทึม และ  $w_{n+1}$  เป็นเซตของสัมประสิทธิ์ตัวกรองตัวใหม่ที่เวลา  $n+1$  แต่อัลกอริทึมนี้มีข้อจำกัดในทางปฏิบัติก็คือ ค่าความคาดหวัง (expectation)  $E\{e(n)x(n)\}$  เป็นค่าที่ไม่ทราบ (unknown) ดังนั้นเราจึงแทนค่าความคาดหวังนี้ด้วยการประมาณแบบค่าเฉลี่ยตัวอย่าง (sample mean) ดังนี้

$$\hat{E}\{e(n)x(n)\} = \frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} e(n-l)x^*(n-l) \quad (3.29)$$

ดังนั้นจากสมการ (3.28) ซึ่งเป็นสมการปรับค่าน้ำหนักสัมประสิทธิ์ตัวกรองแบบสเต็ปเพสท์เดสเซนดเปลี่ยนเป็น

$$w_{n+1} = w_n + \frac{\mu}{L} \sum_{l=0}^{L-1} e(n-l)x^*(n-l) \quad (3.30)$$

ถ้าเราใช้ค่าเฉลี่ยตัวอย่างเพียงตัวเดียว ( $L=1$ ) ดังนั้น

$$\hat{E}\{e(n)x^*(n)\} = e(n)x^*(n) \quad (3.31)$$

เราเขียนสมการปรับค่าน้ำหนักสัมประสิทธิ์ตัวกรองได้ใหม่เป็น

$$w_{n+1} = w_n + \mu e(n)x^*(n) \quad (3.32)$$

สมการ (3.21) ก็คือ อัลกอริทึมแบบ LMS (Least Mean Square algorithm) นั้นเอง และจากสมการ (3.21) เราเขียนสมการปรับค่านำหนักสัมประสิทธิ์ตัวกรองลำดับที่ k ได้ดังนี้

$$w_{n+1}(k) = w_n(k) + \mu e(n)x^*(n-k) \quad (3.33)$$

ในการคำนวณหาค่าเอาต์พุตที่ต้องการหนึ่งจุด โดยใช้อัลกอริทึมแบบ LMS นั้นสมมุติว่าถ้าเราต้องการใช้สัมประสิทธิ์ของตัวกรองทั้งหมด  $p+1$  ตัว เราต้องใช้ในการคูณทั้งหมด  $p+1$  ครั้ง และการบวกอีก  $p+1$  ครั้ง เพื่อใช้ในการปรับค่านำหนักสัมประสิทธิ์ตัวกรอง, ต้องการการบวกหนึ่งครั้งในการคำนวณหาค่าความผิดพลาด (error)  $e(n) = d(n) - y(n)$ , การคูณหนึ่งครั้งจากการหาค่า  $\mu e(n)$  และสุดท้ายต้องการการคูณ  $p+1$  ครั้ง และการบวก  $p+1$  ครั้งเพื่อหาค่าเอาต์พุต  $y(n)$  ดังนั้นเราต้องการคูณทั้งหมด  $2p+3$  ครั้ง และการบวก  $2p+2$  ครั้ง ต่อการหาค่าเอาต์พุต  $y(n)$  หนึ่งค่า และตารางที่ 3.1 เป็นสรุปอัลกอริทึม LMS

ตาราง 3.1 อัลกอริทึม LMS สำหรับตัวกรองปรับตัวได้แบบ FIR อันดับตัวกรองเท่ากับ  $p$

Parameter	$p =$ อันดับของตัวกรอง
Initialization	$w_0 = 0$
Computation	For $n=0,1,2,\dots$
	(a) $y(n) = w_n^T x(n)$
	(b) $e(n) = d(n) - y(n)$
	(c) $w_{n+1} = w_n + \mu e(n)x(n)$

### 3.2.4 Recursive Least Square (RLS)

จากการออกแบบตัวกรอง Wiener ปรับตัวได้แบบ FIR สัมประสิทธิ์ของตัวกรองคือ

$$w_n = [w_n(0), w_n(1), \dots, w_n(p)]^T$$

ค่าความผิดพลาดกำลังสองน้อยสุดถ่วงน้ำหนัก (weighted least squares error)

$$\zeta(n) = \sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} |e(i)|^2 \quad (3.34)$$

ซึ่ง  $0 < \lambda \leq 1$  เป็นตัวประกอบการถ่วงน้ำหนักแบบเอ็กโพเนนเชียล และ

$$e(i) = d(i) - y(i) = d(i) - \mathbf{w}_n^T \mathbf{x}(i) \quad (3.35)$$

$e(i)$  เป็นผลต่างระหว่างสัญญาณที่ต้องการ (desired signal)  $d(i)$  และ เอาต์พุตที่ได้ผ่านการกรองที่เวลา  $i$  โดยใช้สัมประสิทธิ์ตัวกรองล่าสุด ดังนั้น ในการทำให้  $\zeta(n)$  มีค่าน้อยที่สุด กำหนดให้อนุพันธ์ของ  $\zeta(n)$  เทียบกับ  $w_n^*(k) = 0$  สำหรับ  $k=0, 1, \dots, p$  ดังนั้น

$$\frac{\partial \zeta(n)}{\partial w_n^*(k)} = \sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} e(i) \frac{\partial e^*(i)}{\partial w_n^*(k)} = - \sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} e(i) x^*(i-k) = 0 \quad (3.36)$$

สำหรับ  $k=0, 1, \dots, p$

รวมสมการ (3.35) เข้ากับ (3.36) จะได้

$$\sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} \left\{ d(i) - \sum_{l=0}^p w_n(l) x(i-l) \right\} x^*(i-k) = 0$$

ทำการสลับเปลี่ยนอันดับของซัมเมชัน (summation) และจัดเทอมใหม่ได้ดังนี้

$$\sum_{l=0}^p w_n(l) \left[ \sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} x(i-l) x^*(i-k) \right] = \sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} d(i) x^*(i-k) \quad (3.37)$$

จัดให้อยู่ในรูปแบบของเมตริกได้ดังนี้

$$\mathbf{R}_x(n) \mathbf{w}_n = \mathbf{r}_{dx}(n) \quad (3.38)$$

$\mathbf{R}_x(n)$  เป็นเมตริกซ์ออโตคอร์รีเลชันกำหนดน้ำหนักเอ็กโพเนนเชียล

(exponentially weighted deterministic autocorrelation matrix) สำหรับ  $\mathbf{x}(n)$

$$R_x(n) = \sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} x^*(i) x^T(i)$$

ซึ่ง  $x(i)$  เป็นเวกเตอร์ข้อมูล (data vector)

$$x(i) = [x(i), x(i-1), \dots, x(i-p)]^T$$

$r_{dx}(n)$  เป็นคิเทอมินิสติก กรอส-คอรัลชัน (deterministic cross-correlation) ระหว่าง  $d(n)$  และ  $x(n)$

$$r_{dx}(n) = \sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} d(i) x^*(i) \quad (3.39)$$

และจากสมการที่ได้รับซึ่งกำหนดสัมประสิทธิ์ตัวกรองที่เหมาะสม เราอาจหาค่าความผิดพลาดกำลังสองน้อยสุด (minimum squared error) ได้จาก

$$\begin{aligned} \xi(n) &= \sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} e(i) e^*(i) = \sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} e(i) \left\{ d(i) - \sum_{l=0}^p w_n(l) x(i-l) \right\}^* \\ &= \sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} e(i) d^*(i) - \sum_{l=0}^p w_n^*(l) \sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} e(i) x^*(i-l) \end{aligned}$$

ถ้า  $w_n(l)$  เป็นสัมประสิทธิ์ซึ่งทำให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองเหลือน้อยที่สุด ดังนั้นทอมที่ 2 จึงมีค่าเป็นศูนย์ และค่าความผิดพลาดน้อยสุดคือ

$$\begin{aligned} \{\xi(n)\}_{\min} &= \sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} e(i) d^*(i) \\ &= \sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} \left\{ d(i) - \sum_{l=0}^p w_n(l) x(i-l) \right\} d^*(i) \\ &= \sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} |d(i)|^2 - \sum_{l=0}^p w_n(l) \sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} x(i-l) d^*(i) \end{aligned}$$

เราสามารถเขียนสมการได้ใหม่ในรูปของเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\{\xi(n)\}_{\min} = \|d(n)\|_{\lambda}^2 - r_{dx}^H(n) w_n \quad (3.40)$$



ซึ่ง  $\|d(n)\|_2^2$  คือ ค่าน้ำหนักปกติ (weighted norm) ของเวกเตอร์

$$d(n) = [d(n), d(n-1), \dots, d(0)]^T$$

เนื่องจาก  $R_x(n)$  และ  $r_{dx}(n)$  ทั้งสองตัวนี้ขึ้นอยู่กับค่าของ  $n$  แก้สมการปกติกำหนด (deterministic normal equation) สำหรับแต่ละค่าของ  $n$  เราจะได้คำตอบปริเคอร์ซีฟในรูปแบบของ

$$w_n = w_{n-1} + \Delta w_{n-1}$$

ซึ่ง  $\Delta w_{n-1}$  เป็นค่าคอร์เรกชันซึ่งถูกใช้กับการแก้ปัญหาที่เวลา  $n-1$  และเนื่องจากว่า

$$w_n = R_x^{-1}(n)r_{dx}(n)$$

ดังนั้นอันดับแรกเราจะแสดง  $r_{dx}(n)$  ในเทอมของ  $r_{dx}(n-1)$  ต่อมาเราหา  $R_x^{-1}(n)$  ในเทอมของ  $R_x^{-1}(n-1)$  และเวกเตอร์ข้อมูลตัวใหม่ (new data vector)  $x(n)$  จากสมการ (3.40) ครอส-คอร์รีเลชันถูกปรับ (update) ตามสมการต่อไปนี้

$$r_{dx}(n) = \lambda r_{dx}(n-1) + d(n)x^*(n) \quad (3.41)$$

ในขณะเดียวกันเมตริกซ์ออโตคอร์รีเลชันจะถูกปรับโดยใช้  $R_x(n-1)$  และเวกเตอร์ข้อมูลใหม่  $x(n)$  ในรูปแบบปริเคอร์ซีฟแสดงดังนี้

$$R_x(n) = \lambda R_x(n-1) + x^*(n)x^T(n) \quad (3.42)$$

แต่สิ่งที่เราต้องการไม่ใช่  $R_x(n)$  แต่เป็นอินเวอร์ส (inverse)  $R_x(n)$  ดังนั้นเราจึงใช้เอกลักษณ์ของ Woodbury กับสมการ (3.42) เพื่อให้ได้  $R_x^{-1}(n)$  สมการข้างล่างนี้เป็นเอกลักษณ์ของ Woodbury

$$(A + uv^H)^{-1} = A^{-1} - \frac{A^{-1}uv^HA^{-1}}{1 + v^HA^{-1}u}$$

ถ้าเราให้  $A = \lambda R_x(n-1)$  และ  $u = v = x^*(n)$  และจะได้อินเวอร์สของ  $R_x(n)$  เป็น

$$R_x^{-1}(n) = \lambda^{-1} R_x^{-1}(n-1) - \frac{\lambda^{-2} R_x^{-1}(n-1) x^*(n) x^T(n) R_x^{-1}(n-1)}{1 + \lambda^{-1} x^T(n) R_x^{-1}(n-1) x^*(n)} \quad (3.43)$$

เราจะให้  $P(n)$  เป็นอินเวอร์สของเมตริกออร์โทกอร์รัลที่เวลา  $n$

$$P(n) = R_x^{-1}(n)$$

และกำหนดให้  $g(n)$  เป็นเวกเตอร์เกน (gain vector) มีค่าเท่ากับ

$$g(n) = \frac{\lambda^{-1} P(n-1) x^*(n)}{1 + \lambda^{-1} x^T(n) P(n-1) x^*(n)} \quad (3.44)$$

ดังนั้นสมการ (3.43) จะเป็น

$$P(n) = \lambda^{-1} [P(n-1) - g(n) x^T(n) P(n-1)] \quad (3.45)$$

จากสมการ (3.44) เราจะทำให้ตัวส่วนของสมการทางขวามือหายไป ดังนั้น

$$g(n) + \lambda^{-1} g(n) x^T(n) P(n-1) x^*(n) = \lambda^{-1} P(n-1) x^*(n)$$

และ

$$g(n) = \lambda^{-1} [P(n-1) - g(n) x^T(n) P(n-1)] x^*(n)$$

จะเห็นว่าเทอมที่คูณอยู่กับ  $x^*(n)$  คือ  $P(n)$  ดังนั้น

$$g(n) = P(n) x^*(n) \quad (3.46)$$

ดังนั้น

$$R_x(n) g(n) = x^*(n) \quad (3.47)$$

เช่นเดียวกับสมการปกติแบบดีเทอร์มิเนติก (deterministic normal equation)

ของค่า  $w_n$  ในสมการ (3.38) เมื่อ  $P(n) = R_x^{-1}(n)$  ดังนั้น

$$w_n = P(n)r_{dx}(n)$$

จากสมการของ  $r_{dx}(n)$  ในสมการ (3.39) แทนในสมการข้างบนจะได้

$$w_n = \lambda P(n)r_{dx}(n-1) + d(n)P(n)x^*(n) \quad (3.48)$$

และ  $P(n)$  ในสมการ (3.45) แทนลงในเทอมแรกทางขวาของสมการ (3.48) จะได้

$$w_n = [P(n-1) - g(n)x^T(n)P(n-1)]r_{dx}(n-1) + d(n)P(n)x^*(n)$$

จากสมการ (3.47) ทำให้

$$w_n = [P(n-1) - g(n)x^T(n)P(n-1)]r_{dx}(n-1) + d(n)g(n)$$

$$w_n = P(n-1)r_{dx}(n-1) - g(n)x^T(n)P(n-1)r_{dx}(n-1) + g(n)d(n)$$

$$P(n-1)r_{dx}(n-1) = w_{n-1}$$

ดังนั้น

$$w_n = w_{n-1} + g(n)[d(n) - w_{n-1}^T x(n)]$$

เขียนใหม่

$$w_n = w_{n-1} + \infty(n)g(n) \quad (3.49)$$

ซึ่ง

$$\infty(n) = d(n) - w_{n-1}^T x(n)$$

$\infty(n)$  เป็นผลต่างระหว่าง  $d(n)$  และการประมาณของ  $d(n)$  ซึ่งได้จากการใช้กลุ่มของสัมประสิทธิ์ตัวกรองที่ผ่านมาก่อนหน้านี้ (Previous)  $w_{n-1}$  กับเวกเตอร์ข้อมูลใหม่  $x(n)$  ลำดับ  $\infty(n)$  นี้เรียกว่าความผิดพลาดก่อน (priori error) เป็นค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นถ้าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองไม่ทำการปรับ ในทางกลับกัน ความผิดพลาดหลัง (posteriori error)  $e(n)$  เป็นค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นหลังจากเวกเตอร์น้ำหนักถูกปรับ

$$e(n) = d(n) - w_{n-1}^T x(n)$$

ในการหาเวกเตอร์เกณฑ์  $g(n)$  และอินเวสอโตคอร์รีเลชันเมตริกซ์ (inverse autocorrelation matrix)  $P(n)$  เพื่อให้ง่ายในการหาค่าเหล่านี้เราจะกำหนดให้

$$z(n) = P(n-1)x^*(n) \quad (3.50)$$

จากทั้งหมดที่ได้อธิบายมานั้นคือ อัลกอริทึม exponentially weighted Recursive Least Square (RLS) และตารางที่ 3.2 เป็นการสรุปอัลกอริทึม RLS นอกจากนี้แล้ว อัลกอริทึมดังกล่าว ยังจำเป็นต้องกำหนดค่าเริ่มต้นของ  $w_n$  และอินเวสอโตคอร์รีเลชันเมตริกซ์  $P(n)$  ด้วยโดยกำหนดให้

$$P(0) = \delta^{-1}I$$

$\delta$  เป็นค่าบวกคงที่ที่น้อยๆ (small positive constant) และ

$$w_0 = 0$$

ตาราง 3.2 อัลกอริทึมแบบ Recursive Least Squares

Parameters:  $p$  = Filter order

$\lambda$  = Exponential weighting factor

$\delta$  = Value used to initialize  $P(0)$

Initialization:  $w_0 = 0$

$$P(0) = \delta^{-1}I$$

Computation: For  $n=1,2,\dots$  compute

$$z(n) = P(n-1)x^*(n)$$

$$g(n) = \frac{1}{\lambda + x^T(n)z(n)} z(n)$$

$$\alpha(n) = d(n) - w_{n-1}^T x(n)$$

$$w_n = w_{n-1} + \alpha(n)g(n)$$

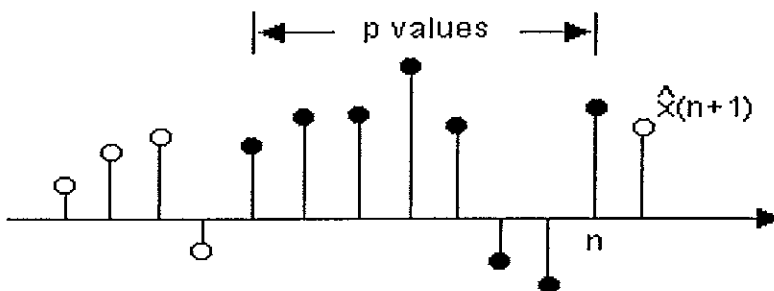
$$P(n) = \frac{1}{\lambda} [P(n-1) - g(n)z^H(n)]$$

### 3.2.5 Adaptive Linear Prediction system

การทำนายแบบเชิงเส้น (Linear Prediction) เป็นวิธีการที่ใช้ในการทำนายค่าของสัญญาณที่จะเกิดขึ้นข้างหน้า  $x(n+1)$  ว่ามีค่าเป็นอะไร โดยอาศัยเทอมของการรวมแบบเชิงเส้น (linear combination) ของค่าของสัญญาณปัจจุบัน  $x(n)$  และค่าของสัญญาณที่เกิดขึ้นผ่านมาแล้ว  $x(n-k)$  เมื่อ  $k = 0, 1, 2, 3, \dots, p-1$  แสดงดังภาพประกอบ ( 3.4 ) เราสามารถเขียนสมการของการทำนายได้ดังนี้

$$\hat{x}(n+1) = \sum_{k=0}^{p-1} w_n(k) x(n-k) \quad (3.51)$$

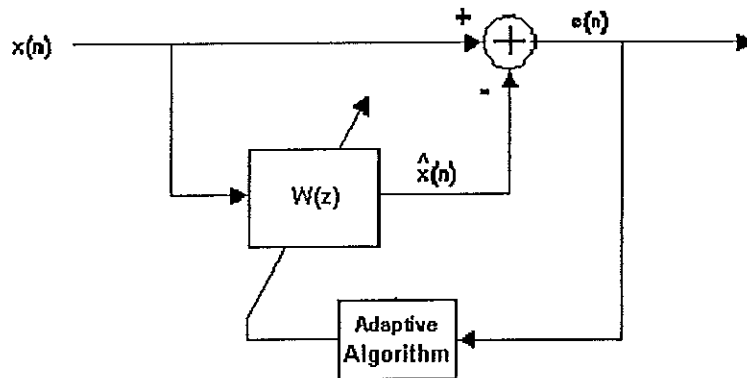
$\hat{x}(n+1)$  คือสัญญาณประมาณของ  $x(n+1)$  ที่เวลา  $n+1$   
 $w_n(k)$  (เมื่อ  $k = 0, 1, 2, 3, \dots, p-1$ ) คือสัมประสิทธิ์ของตัวกรองที่ใช้ในการทำนายที่เวลา  $n$



ภาพประกอบ 3.4 การประมาณค่าสัญญาณ  $x(n+1)$  โดยอาศัยการรวมแบบเชิงเส้นของค่าของสัญญาณจำนวน  $p$  ค่าจาก  $x(n)$  จนถึง  $x(n-p+1)$

ภาพประกอบ 3.5 แสดงระบบการทำนายเชิงเส้นแบบปรับค่าได้ ซึ่งเป็นระบบปรับตัวได้ระบบหนึ่งโดยอาศัยหลักของการทำนายเชิงเส้นและอัลกอริทึมที่ใช้ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์คือ อัลกอริทึมแบบ LMS เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$w_{n+1}(k) = w_n(k) + \mu e(n) x(n-k) \quad (3.52)$$



ภาพประกอบ 3.5 ระบบการทำนายเชิงเส้นแบบปรับตัวได้โดยใช้อัลกอริทึม LMS ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรอง

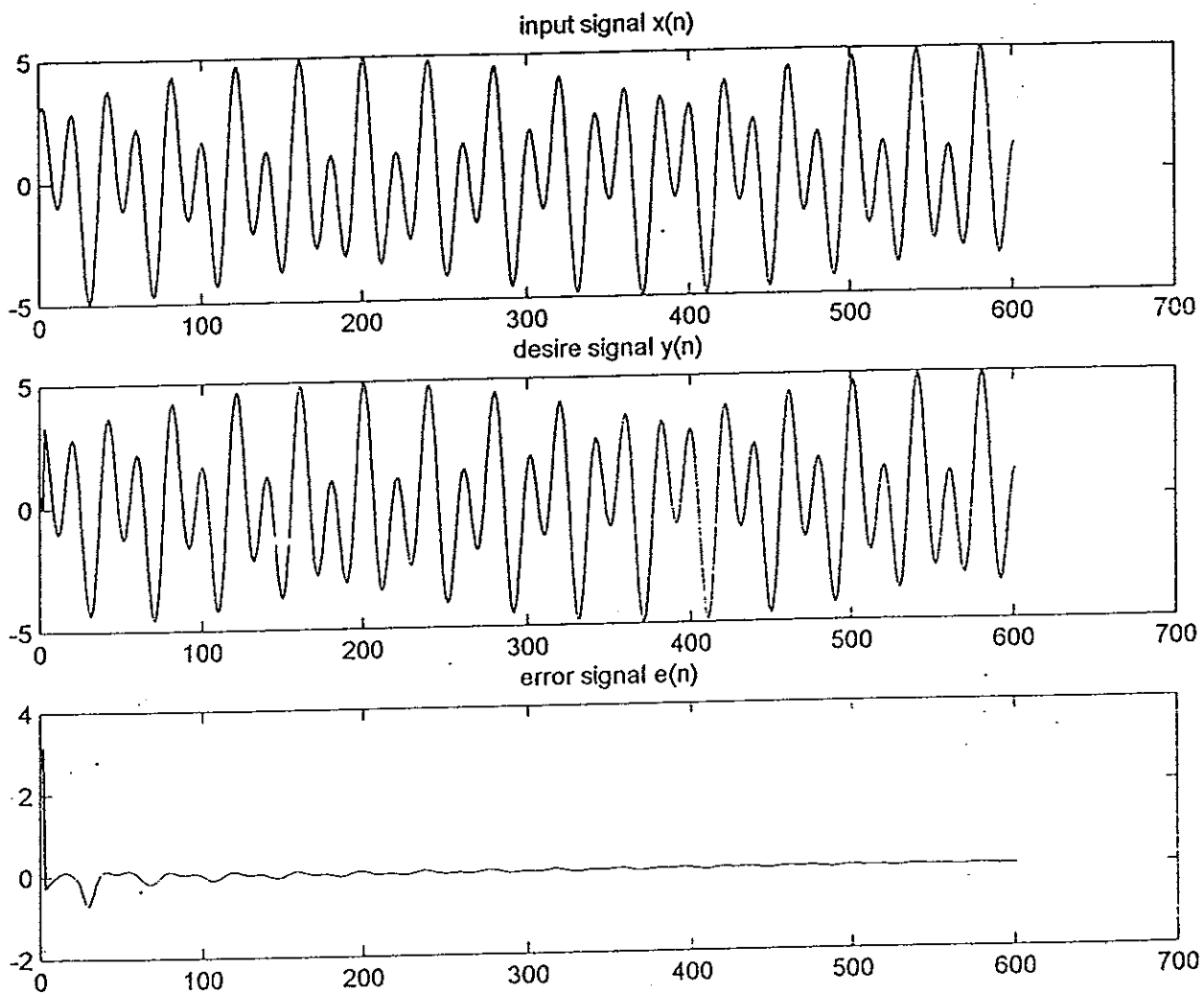
จากตาราง 3.1 และตาราง 3.2 เป็นการสรุปขั้นตอนของอัลกอริทึม LMS และ RLS ตามลำดับ สำหรับภาพประกอบ 3.6 และภาพประกอบ 3.7 เป็นผลของการจำลองอัลกอริทึม LMS และ อัลกอริทึม RLS ตามลำดับ โดยใช้โปรแกรม Matlab ในการจำลองเรากำหนดสัญญาณ  $x(n)$  ขึ้นมา ซึ่งเป็นสัญญาณที่เราต้องการทำนาย

$$x(n) = 2 \sin\left(\frac{n\pi}{19}\right) + 3 \cos\left(\frac{n\pi}{10}\right) \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

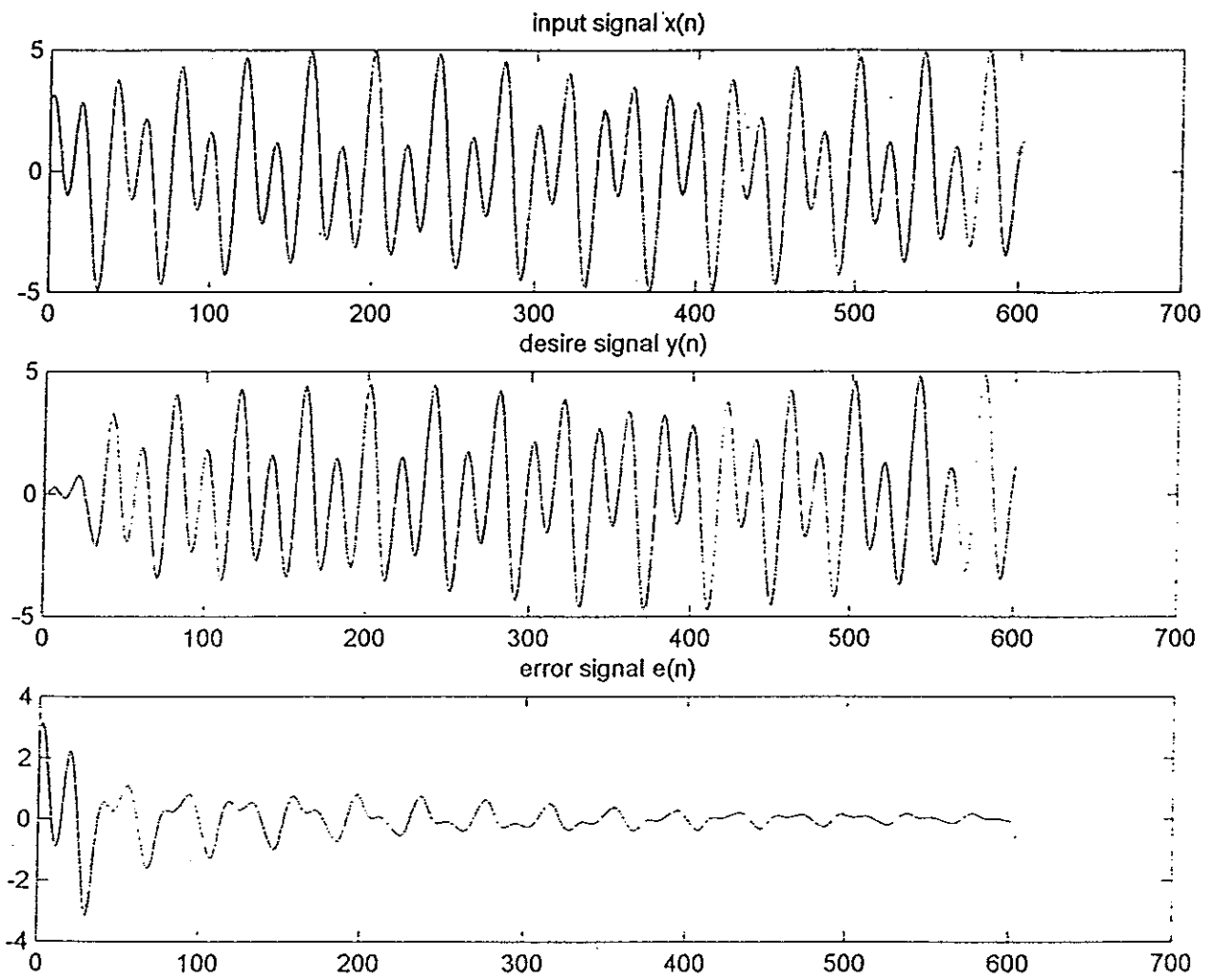
เราเขียนโปรแกรม Matlab เพื่อสร้างสัญญาณ  $x(n)$  ดังกล่าวได้ดังนี้

$$x = 2 * \sin([0 : 600] * \pi / 19) + 3 * \cos([0 : 600] * \pi / 10) \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots, 600$$

จากสัญญาณ  $x(n)$  ในโปรแกรม Matlab  $n = 1, 2, 3, \dots, 600$  และในการจำลองอัลกอริทึมทั้งสองเราใช้อันดับของตัวกรองเท่ากับ 20 ,ค่าเริ่มต้นของตัวกรองกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0 ( $w = 0$ ) ในการทำการจำลองของอัลกอริทึม LMS เราใช้ค่าสตีปไซ  $\mu = 0.001$  และสำหรับอัลกอริทึม RLS เรากำหนดค่าเคลดต้าให้เท่ากับ 0.1 และค่าแลมด้าเท่ากับ 1 ซึ่งจากผลการจำลองที่แสดงดังภาพประกอบ 3.6 และ 3.7 จะเห็นว่าอัลกอริทึม RLS ลู่เข้าค่าของสัญญาณ  $x(n)$  ได้เร็วกว่าอัลกอริทึม LMS



ภาพประกอบ 3.7 ผลของการจำลองอัลกอริทึม RLS



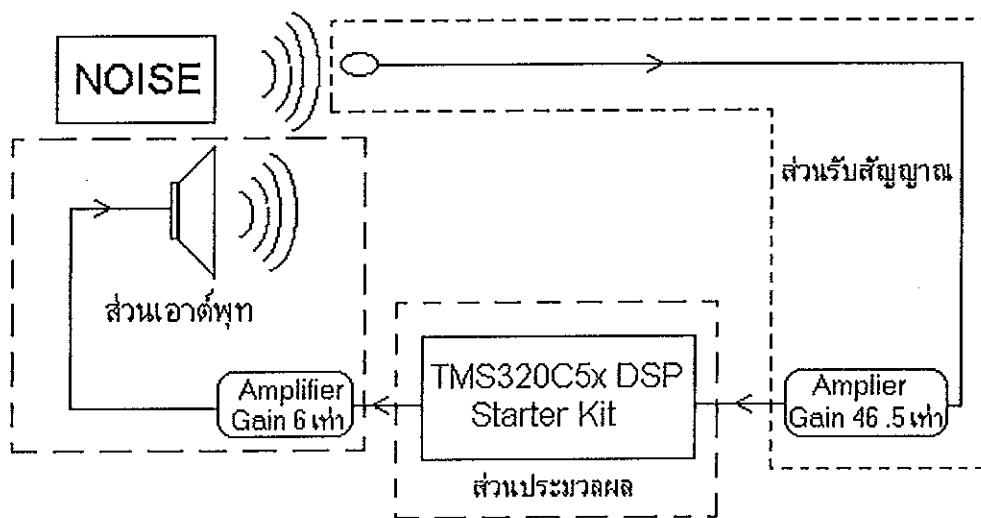
ภาพประกอบ 3.6 ผลของการจำลองอัลกอริทึม LMS



## บทที่ 4

### การทำงานของเครื่องขจัดเสียงรบกวนแบบปรับตัวได้

การทำงานของเครื่องขจัดเสียงรบกวนแบบปรับตัวได้แสดงดังภาพประกอบ 4.1



ภาพประกอบ 4.1 แผนภาพการทำงานของเครื่องขจัดเสียงรบกวนแบบปรับตัวได้

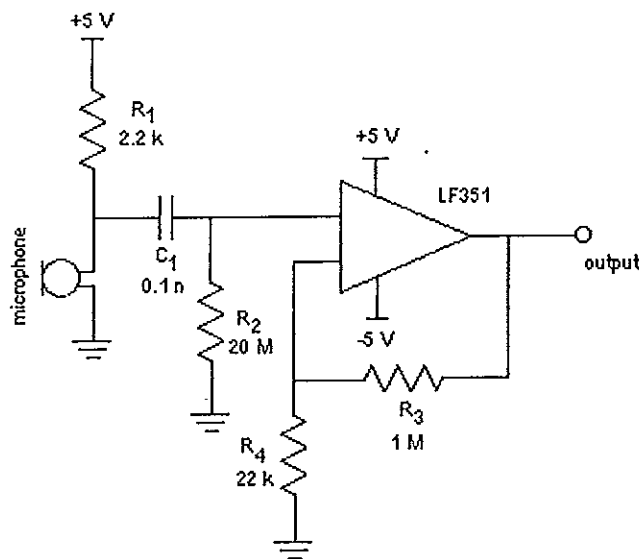
จากภาพประกอบ 4.1 เสียงรบกวนที่เกิดขึ้นจะถูกตรวจจับโดยไมโครโฟนและไมโครโฟนก็ทำหน้าที่เปลี่ยนเสียงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งเป็นสัญญาณอนาล็อก แล้วทำการขยายให้มีขนาดใหญ่เพียงพอ ก่อนในงานวิจัยนี้สัญญาณจะถูกขยายให้ใหญ่ 46.5 เท่าของสัญญาณเดิม แล้วจึงส่งเข้าวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล สัญญาณที่ได้ออกมาเป็นสัญญาณดิจิทัล ต่อจากนั้นส่งเข้าไปยังตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลก็ทำการประมวลผลสัญญาณได้สัญญาณเอาต์พุตออกมา ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ออกมาจะยังคงเป็นสัญญาณดิจิทัลอยู่ ดังนั้นก่อนที่จะถูกส่งออกไปยังส่วนของเอาต์พุตจะต้องทำการแปลงสัญญาณกลับไปเป็นสัญญาณอนาล็อกก่อนแล้วส่งเข้าสู่วงจรขยายเพื่อขยายสัญญาณให้แรงขึ้นก่อนแล้วส่งออกสู่ลำโพงกลายเป็นเสียงส่งออกไปหักล้าง

และจากภาพประกอบ 4.1 เราแบ่งส่วนการทำงานของเครื่องจัดเสียงรบกวนแบบปรับตัวได้ ดังนี้

1. ส่วนการรับเสียงรบกวน
2. ส่วนการประมวลผลสัญญาณ
3. ส่วนการส่งสัญญาณเอาต์พุต

#### 4.1 ส่วนการรับเสียงรบกวน

ส่วนนี้เป็นส่วนที่ทำหน้าที่รับเสียงรบกวนแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วทำการขยายก่อนที่จะส่งป้อนไปยังวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลต่อไป ในการเซ็นเซอร์หรือรับเสียงรบกวนที่เกิดขึ้น เราใช้ไมโครโฟนเป็นตัวรับเสียงแล้วเปลี่ยนเสียงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าก่อนที่จะส่งเข้าสู่วงจรขยายสัญญาณ วงจรขยายสัญญาณหรือวงจรปริแอมป์สำหรับไมโครโฟน ซึ่งในที่นี้เราจะใช้วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส แสดงดังภาพประกอบ 4.2 โดยออกแบบให้มีอัตราขยายเท่ากับ 46.5 เท่า และเลือกใช้ไอซีออปแอมป์เบอร์ LF351 เนื่องจากเป็นไอซีที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ



ภาพประกอบ 4.2 วงจรปริแอมป์สำหรับไมโครโฟน ( pre-amplifier circuit for microphone)

จากภาพประกอบ 4.2  $R_1$  เป็นตัวต้านทานที่ใช้กำหนดกระแสที่จ่ายให้กับคอนเดนเซอร์ไมโครโฟน ,  $R_2$  และ  $C_1$  ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองความถี่สูงผ่านเพื่อป้องกันไฟกระชากและสัญญาณไฟกระชากที่มีความถี่ต่ำๆ ส่วนวงจรขยายใช้วงจรขยายสัญญาณชนิดไม่กลับเฟส โดยอัตราขยายของวงจรจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทาน  $R_3$  และ  $R_4$  จาก  $R_2$  และ  $C_1$  ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรกรองความถี่สูงผ่าน เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนจากสัญญาณที่มีความถี่ต่ำ และเราสามารถหาความถี่ตัด (cutoff frequency) ได้จากสูตร

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_2 C_1} \quad (4.1)$$

จากรูป  $R_2 = 20$  เมกกะโอห์ม และ  $C_1 = 0.1$  นาโนฟาราด ดังนั้นความถี่ตัด คือ

$$f_c = \frac{1}{2\pi * 2M * 0.1n}$$

$$f_c = 80 \text{ Hz}$$

จากภาพประกอบ 4.2 ให้  $R_3 = 1$  เมกกะโอห์ม,  $R_4 = 1$  เมกกะโอห์ม และ  $V_{in} = 1$  mVp-p เราหาแรงดันเอาต์พุตและอัตราขยาย ( $A_v$ )

จาก

$$V_{out} = V_{in} [1 + R_3/R_4]$$

$$= 1 \text{ mVp-p} * (1 + 1M\Omega / 22k\Omega)$$

$$= 46.5 \text{ 1 mVp-p}$$

และจาก

$$A_v = V_{out} / V_{in}$$

$$= 46.5 \text{ mVp-p} / 1 \text{ mVp-p}$$

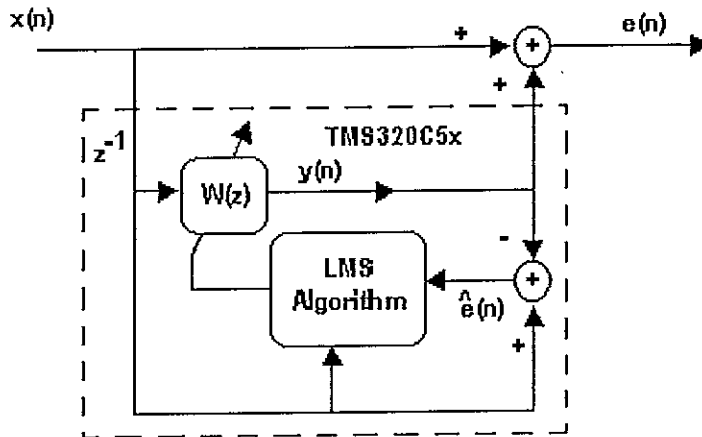
ดังนั้น

$$A_v = 46.5 \text{ เท่า}$$

#### 4.2 ส่วนประมวลผลสัญญาณ

ในการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล สำหรับงานวิจัยนี้ใช้บอร์ด TMS320C5x DSP Starter Kit (DSK) ซึ่งมีชิพ TMS320c50 เป็นตัวประมวลผล เนื่องจากว่าชิพไมโครโปรเซสเซอร์ตัวนี้มีความสามารถสูงเพียงพอที่จะใช้ในการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลคือ

มีคำสั่งที่สนับสนุนการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล มีความเร็วในการประมวลผลสัญญาณสูง คือในหนึ่งรอบคำสั่งใช้เวลาเพียง 35-50 นาโนวินาทีเท่านั้น, ทำงานในลักษณะเวลาจริง (real time) และราคาถูก



ภาพประกอบ 4.3 ระบบการทำนายแบบเชิงเส้นแบบปรับตัวได้โดยใช้อัลกอริทึม LMS ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรอง

จากภาพประกอบ 4.3 เป็นระบบที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาณเสียงรบกวนในงานวิจัยนี้ ซึ่งเรียกว่าระบบการทำนายเชิงเส้นแบบปรับตัวได้ (adaptive linear prediction system) ภายในกรอบสี่เหลี่ยมเส้นประเป็นการกระทำภายในของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C50 ซึ่งการกระทำภายในทั้งหมดเป็นการกระทำทางคณิตศาสตร์ และจากภาพประกอบดังกล่าว  $x(n)$  เป็นเสียงรบกวนที่เกิดขึ้น, สัญญาณ  $y(n)$  เป็นสัญญาณส่วนกลับ ที่ใช้ส่งออกไปหักล้างกับเสียงรบกวน  $x(n)$ ,  $e(n)$  เป็นเสียงที่ยังคงเหลืออยู่จากการส่ง  $y(n)$  ออกไปหักล้างกับ  $x(n)$  และ  $\hat{e}(n)$  เป็นการประมาณค่า  $e(n)$  เพื่อนำไปใช้ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรอง  $w(n)$  ในอัลกอริทึม LMS จากที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.3 ว่าการทำนายแบบเชิงเส้น (linear prediction) เป็นวิธีการที่ใช้ในการทำนายค่าของสัญญาณที่จะเกิดขึ้นข้างหน้า  $x(n+1)$  ว่ามีค่าเป็นอะไร โดยอาศัยเทอมของการรวมแบบเชิงเส้นของค่าของสัญญาณปัจจุบัน  $x(n)$  และค่าของสัญญาณที่เกิดขึ้นที่ผ่านมาแล้ว  $x(n-k)$  (เมื่อ  $k=0,1,2,3,\dots,p-1$ ) ทำคอนโวลูชันกับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรอง  $w(k)$  ซึ่งสมการของการทำนายเขียนได้ดังนี้

$$x(n+1) = \sum_{k=0}^{p-1} w(k)x(n-k) \quad (4.2)$$

$w(k)$  (เมื่อ  $k=0,1,2,3,\dots,p-1$ ) คือสัมประสิทธิ์ของตัวกรองที่ใช้ในการทำนาย

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ระบบทำนายแบบเชิงเส้นก็เพราะว่า ระบบนี้มีความเหมาะสมในการกำจัดเสียงรบกวน คือเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นนั้นเราไม่สามารถที่จะบอกได้ว่ามีลักษณะขนาดเป็นอย่างไร ดังนั้นเราจึงต้องใช้ข้อมูลของสัญญาณที่ผ่านมาแล้วมาทำการประมวลผลหาค่าความเป็นไปได้ว่าสัญญาณมีลักษณะอย่างไร

สำหรับอัลกอริทึมที่ใช้ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรอง ที่ได้ทำการศึกษาไว้ด้วยกัน 2 อัลกอริทึม คือ อัลกอริทึม LMS และ อัลกอริทึม RLS จากการศึกษาที่นั่นอัลกอริทึม RLS จะดูเข้าเร็วกว่าอัลกอริทึมแบบ LMS แต่เนื่องจากว่าอัลกอริทึม RLS จะต้องใช้หน่วยความจำจำนวนมาก ซึ่งตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C5x มีไม่เพียงพอจากอัลกอริทึมแบบ RLS ในตารางที่ 3.2 ของบทที่ 3 สมมุติว่าเราต้องการอันดับของตัวกรอง (p) เท่ากับ 50 เราจำเป็นต้องใช้ตำแหน่งแอดเดรสเฉพาะเมตริกส์ p เท่ากับ  $50 \times 50$  ตำแหน่ง (2500 ตำแหน่ง) ซึ่ง TMS320C5x มีหน่วยความจำที่ใช้ได้เท่ากับ 512 เวิร์ด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้อัลกอริทึม LMS ถึงแม้ว่าอัลกอริทึมนี้จะดูเข้าช้ากว่าอัลกอริทึม RLS ก็ตามแต่อัลกอริทึมนี้ใช้หน่วยความจำไม่มากนักซึ่ง TMS320C5x มีเพียงพอ และการคำนวณก็ไม่มี ความสลับซับซ้อนมากนักทำให้สามารถเขียนโปรแกรมได้ง่ายจากภาพประกอบที่ 4.3 ส่วนที่อยู่ภายในบริเวณเส้นประจะเป็นการกระทำภายในตัวประมวลผลดิจิทัล TMS320C5x เราสามารถเขียนขั้นตอนการทำงานของระบบการทำนายเชิงเส้นโดยใช้อัลกอริทึม LMS ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ได้ดังนี้

1. คำนวณหา  $\hat{x}(n) = \sum_{k=0}^p w_n(k)x(n-k)$  ซึ่งเป็นสัญญาณประมาณหรือสัญญาณ  $x(n+1)$  ในสมการ 4.2
2. ส่งสัญญาณออกไปยังเอาต์พุต
3. รับสัญญาณอินพุต
4. คำนวณหาสัญญาณค่าประมาณความผิดพลาด  $\hat{e}(n) = x(n) - \hat{x}(n)$
5. ปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองโดยใช้อัลกอริทึม LMS

$$w_{n+1}(k) = w_n(k) - \mu e(n)x(n-k) \quad (4.3)$$

6. ย้อนกลับไปทำขั้นตอนที่ 1 ใหม่

จากขั้นตอนการทำงานของระบบในข้อ 4 จะเห็นว่า  $\hat{e}(n) = x(n) + \hat{x}(n)$  ก็เนื่อง  
จากว่าสมการ 4.3 ซึ่งเป็นสมการปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองในขั้นตอนที่ 5 มีรูปแบบเป็น

$$w_{n+1}(k) = w_n(k) - \mu e(n)x(n-k)$$

ซึ่งปกติสมการการหาค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองจะเขียนได้ดังนี้ คือ

$$w_{n+1}(k) = w_n(k) + \mu e(n)x(n-k) \quad (4.4)$$

แต่ในที่นี้เราต้องการทำให้สัญญาณ  $\hat{x}(n)$  ที่หาในขั้นตอนที่หนึ่ง เป็นสัญญาณส่วนกลับกับ  
สัญญาณ  $x(n)$  ดังนั้นจึงต้องเปลี่ยนสมการปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์ใหม่ดังแสดงในสมการ  
(4.3)

จากขั้นตอนวิธีการทำงานของระบบการทำนายเชิงเส้นโดยใช้อัลกอริทึม LMS เราก็  
นำมาเขียนเป็นโปรแกรมการทำงานโดยใช้ภาษาแอสเซมบลี และเพื่อให้การเขียนภาษา  
แอสเซมบลีง่ายขึ้น เราจึงเขียนเป็นภาษาซีก่อน ในการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาแอสเซมบลี  
ของ TMS320C5x เนื่องจากคำสั่งของซีพีมีมาก ดังนั้นเราต้องเลือกคำสั่งให้เหมาะสมกับการ  
กระทำที่เราต้องการ

จากขั้นตอนแรก คำนวณหาค่า  $\hat{x}(n) = \sum_{k=0}^P w_n(k)x(n-k)$  ในที่นี้เราจะเขียน  $y(n)$   
แทน  $\hat{x}(n)$  เพื่อความสะดวกในการสมมติตัวแปร

$$y(n) = \sum_{k=0}^P w_n(k)x(n-k) \quad (4.7)$$

สมการข้างบนนี้เป็นการหาค่า  $y(n)$  จากการทำคอนโวลูชันระหว่างสัญญาณ  $x(n)$   
กับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรอง  $w_n(k)$  เราเขียนเป็นภาษาซีได้ดังนี้

```
Y[0]=0
```

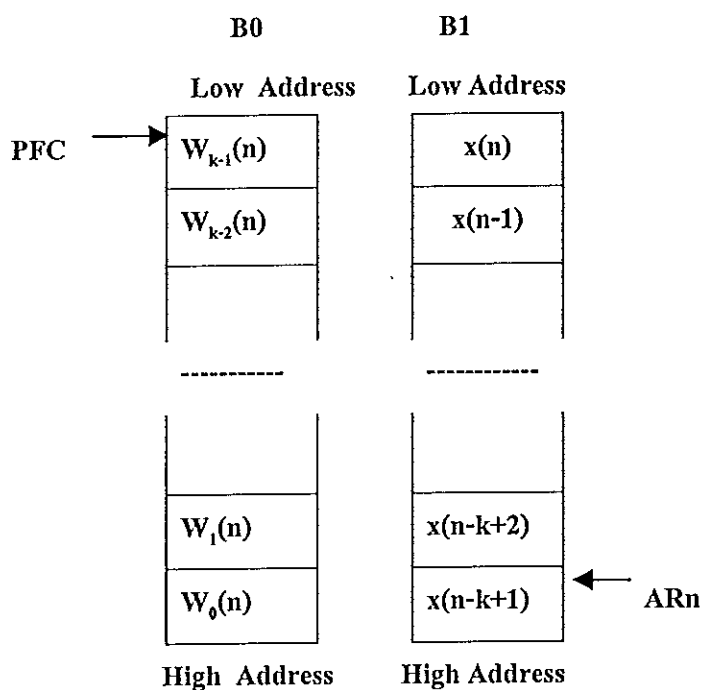
```
for (k=0; k<P+1; k++)
```

```
y[N]+ = wn[k]*xn[k]
```

wn[k] คือ  $w_n(k)$  และ xn[k] คือ  $x(n-k)$  คำสั่งที่เป็นภาษาแอสเซมบลี  
ของ TMS320C5x ที่นำมาใช้ในการทำคอนโวลูชันคือ MACD

MAR	*,AR3
LAR	ARS,#LASTAP
RPT	#127
MACD	CDEFFP,*-
APAC	
SACH	y,l

จากตัวอย่างภาษาแอสเซมบลีข้างบนนี้ เป็นการทำคอนโวลูชันระหว่าง  $x(n)$  และ  $w_n(k)$  ซึ่งอันดับของตัวกรองที่ใช้ในตัวอย่างโปรแกรมเท่ากับ 128 เราใช้รีจิสเตอร์ AR3 ซึ่งเป็นรีจิสเตอร์ช่วย ( Auxiliary register ) เป็นตัวชี้ค่าของ  $x(n-k)$  และใช้พรีเฟตช์เคาน์เตอร์ (Prefetch counter :PFC) เป็นตัวชี้ค่านำหน้าหน่วยตัวกรอง  $w_n(k)$  จากภาพประกอบ 4.4 ค่านำหน้าหน่วยของเวกเตอร์  $w_n$  ถูกเก็บไว้ใน B0 และเวกเตอร์  $x(n)$  ถูกเก็บไว้ใน B1 เมื่อคำสั่ง MACD ถูกทำซ้ำ ตำแหน่งที่เก็บค่าของสัมประสิทธิ์ที่อยู่ใน PFC จะถูกเพิ่มขึ้นทีละ 1 ในขณะที่เดียวกันตำแหน่งที่เก็บค่าตัวอย่าง  $x(n-k)$  ใน รีจิสเตอร์ช่วย AR3 ก็จะลดลงทีละ 1 ด้วย



ภาพประกอบ 4.4 แบบการวางหน่วยความจำของ ค่าเวกเตอร์นำหน้า และ ข้อมูลเวกเตอร์

จากสมการ (4.3) ซึ่งเป็นสมการปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองโดยใช้อัลกอริทึม LMS

$$w_{n+1}(k) = w_n(k) - \mu e(n)x(n-k) \quad \text{สำหรับ } k=0,1,2,\dots,p$$

จากสมการปรับค่าสัมประสิทธิ์ LMS จะเห็นว่าก่อนที่จะหาค่า  $w_{n+1}$  เราจะต้องหาค่า  $\mu e[n]$  ก่อน ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรอง เราเขียนสมการดังกล่าวโดยใช้ภาษาซีได้ดังนี้

```
muen = mu*e[n]
for (k=0, k<P+1; k++)
    w_n[k]- = muen * xn[k]
```

mu คือค่า สเตปไซ ( step size )

$e[n]$  คือ  $e(n)$  และ muen คือ  $\mu e[n]$  ซึ่งเป็นค่าผลคูณของค่าสเตปไซและค่าความผิดพลาดที่เวลา  $n$

จากภาษาซีเขียนเป็นภาษาแอสเซมบลีแสดงตามข้างล่างนี้ และคำสั่งที่สำคัญที่นำมาใช้ในการเขียนโปรแกรม คือ ZALR และ MPYS คำสั่ง ZALR จะโหลดค่าจากหน่วยความจำข้อมูลไปไว้ใน MSB ของแอสเซมบลีและทำการปิดเศษ คือ มันจะทำการปิดเศษโดยการเซต 15 บิตต่ำ ( บิต 0-14 ) ของแอสเซมบลีให้เป็นศูนย์ และบิตที่ 15 ให้เป็น 1 , คำสั่ง MPYS จะเป็นการนำข้อมูลในแอสเซมบลีลบด้วยข้อมูลในรีจิสเตอร์ P ต่อจากนั้นก็เอาข้อมูลไปเก็บในแอสเซมบลี และนำข้อมูลในรีจิสเตอร์ T คูณกับข้อมูลที่อยู่ในตำแหน่งหน่วยความจำข้อมูลที่กำหนด

```
LAR  AR1#N           ; load loop counter
LAR  AR2,#COEFFD     ; point to the coefficients WN(n)
LAR  AR3,#LASTAP     ; point to the data sample x(n-N)
LT   muen            ; T= muen, muen=muxe(n)
MPY  *,AR2           ; P=mu*e(n)*x(n-N)
ZALR *,AR3           ; Load ACCH with WN (n)
```



MPYS \*-,AR2 ; ACC=W127-mu\*e(n)\*x(n-N)  
 ; P=mu\*e(n)\*x(n-N+1)  
 SACH \*+ ; store WN(n+1)  
 BANZ ADAP,\*-,AR2 ; loop again if counter not expired  
 N คือ อันดับของตัวกรอง

#### 4.3 ส่วนการส่งสัญญาณเอาต์พุต

สัญญาณเมื่อทำการประมวลผลและแปลงกลับสู่รูปแบบของอนาล็อกเรียบร้อยแล้ว ก่อนที่จะทำการส่งออกสู่ลำโพงกลายเป็นเสียงออกไปห้กลังเสียงรบกวน จะต้องทำการขยายสัญญาณให้มีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะใช้ในการขจัดเสียงรบกวน ในงานวิจัยนี้ในส่วนของ การส่งสัญญาณเอาต์พุตจะใช้ลำโพงของคอมพิวเตอร์ ซึ่งภายในตัวลำโพงจะมีวงจรขยาย สัญญาณอยู่แล้ว เราสามารถเลือกปรับอัตราขยายของสัญญาณได้เพื่อให้เหมาะสมกับความดัง ของเสียงรบกวนในการขจัดเสียงรบกวน สำหรับอัตราขยายของลำโพงคอมพิวเตอร์ที่ใช้ใน งานวิจัยนี้สามารถปรับได้ตั้งแต่ 0 dB – 21 dB

## บทที่ 5

### ผลและการอภิปรายผลการทดลอง

ในการทดลองนี้ เป็นการทดลองเกี่ยวกับการขจัดเสียงรบกวน เพื่อให้เสียงรบกวนที่เกิดขึ้นนั้นมีระดับที่ลดลงมากที่สุด ในการลดเสียงรบกวนหรือการขจัดเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นจะใช้การประมวลสัญญาณแบบปรับตัวได้โดยอาศัยรูปแบบการทำนายเชิงเส้น ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3

ในการทดลองขจัดเสียงรบกวนจะใช้ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ (Function Generator) สร้างสัญญาณลูกคลื่นไซน์ (sine wave) ความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 500 Hz ขนาด 0.5 Vp-p แล้วทำการป้อนให้กับลำโพงกลายเป็นเสียง และในการทดลองจะใช้เสียงนี้เป็นเสียงรบกวนที่เกิดขึ้น และต้องการทำการขจัดให้ลดลง ลำโพงที่ใช้ในการทดลอง ทั้งลำโพงที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดเสียงรบกวนและลำโพงที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดเสียงหักล้างจะใช้ลำโพงของคอมพิวเตอร์ ซึ่งภายในตัวลำโพงจะมีวงจรขยายเรียบร้อยแล้ว สามารถปรับเลือกอัตราขยายได้ตั้งแต่ 0 dB – 21 dB ในการทดลองนี้เราปรับให้ลำโพงที่ทำหน้าที่เป็นตัวสร้างเสียงรบกวนและลำโพงที่ทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดเสียงหักล้างให้มีอัตราขยายเท่ากับ 16 dB

ในการขจัดเสียงรบกวนสำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้เราได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 แบบ คือ

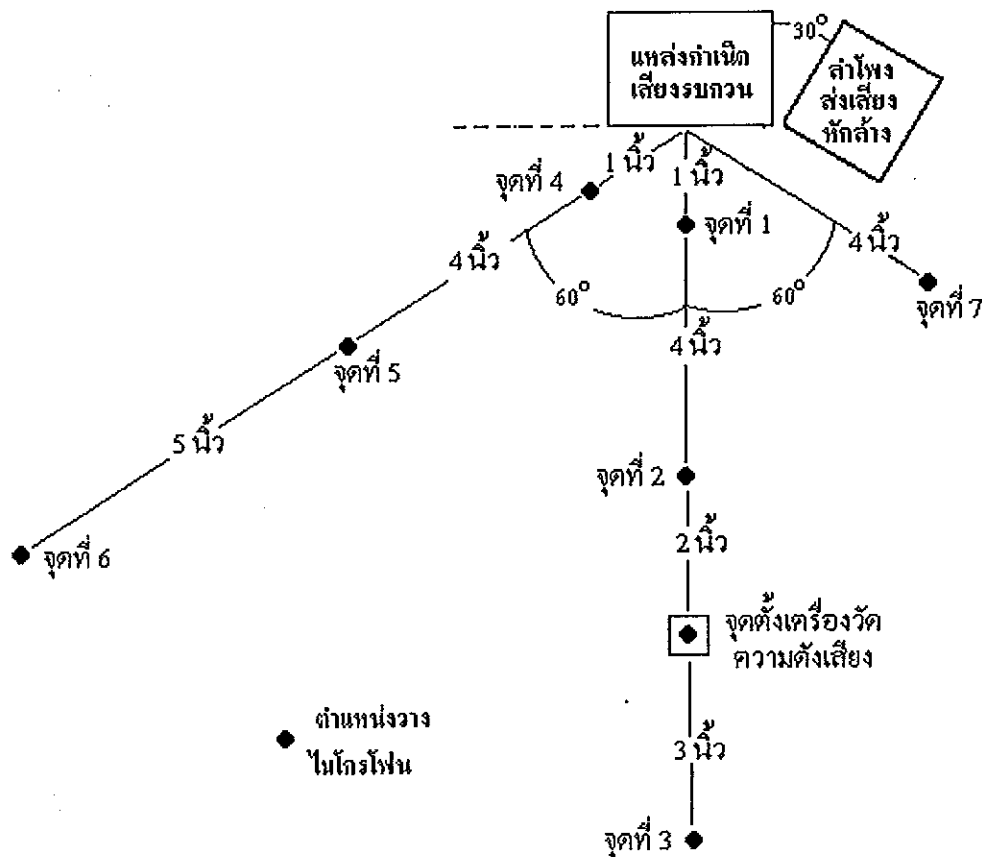
1. การทดลองเพื่อหาตำแหน่งในการวางไมโครโฟนที่เหมาะสมที่ทำให้ระดับเสียงรบกวนลดลงมากที่สุดเมื่อทำการขจัด
2. การทดลองเพื่อดูว่าในบริเวณที่เรากำหนดนั้นระดับของเสียงรบกวนลดลงหรือเพิ่มขึ้นอย่างไร

#### 5.1 การทดลองเพื่อตำแหน่งการวางไมโครโฟนที่เหมาะสมในการขจัดเสียงรบกวน

การทดลองเพื่อหาตำแหน่งการวางไมโครโฟนที่เหมาะสมที่ทำให้ระดับของเสียงรบกวนลดลงเหลือน้อยที่สุด ในการทดลองนี้จะจัดวางแหล่งกำเนิดเสียงรบกวนไมโครโฟนและลำโพงที่ใช้ในการขจัดเสียงรบกวนดังภาพประกอบ 5.1 จากภาพประกอบ 5.1 เราจัดวางลำโพงที่ใช้เป็นตัวกำเนิดเสียงหักล้างจะวางให้ทำมุมเอียงเล็กน้อยประมาณ 30 องศา กับลำโพงที่ทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดเสียงรบกวน ตามภาพประกอบดังกล่าว และการวางไมโครโฟนจะเลือกวางตามตำแหน่งที่

ต่างๆกัน โดยตำแหน่งที่ 1 วางห่างจากแหล่งกำเนิดเสียงรบกวน 1 นิ้ว ตำแหน่งที่ 2 เท่ากับ 5 นิ้ว ตำแหน่งที่ 3 เท่ากับ 10 นิ้ว สำหรับ ตำแหน่งที่ 4, ตำแหน่งที่ 5, ตำแหน่งที่ 6 วางทำมุมประมาณ 60 องศา ทิศทางตามเข็มนาฬิกาจากจุดกึ่งกลางของลำโพงที่ใช้เป็นตัวกำเนิดเสียงรบกวน เท่ากับ 1 นิ้ว, 5 นิ้ว และ 10 นิ้ว ตามลำดับ ตำแหน่งสุดท้ายคือ ตำแหน่งที่ 7 วางห่างจากแหล่งกำเนิดเสียงรบกวน 4 นิ้ว ทำมุมประมาณ 60 องศา ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาจากจุดกึ่งกลางของลำโพงที่ใช้เป็นตัวกำเนิดเสียงรบกวน สำหรับเครื่องมือที่ใช้วัดความดังของเสียงนี้คือ digital sound level meter รุ่น CDA 830 ซึ่งจุดตั้งเครื่องวัดความดังเสียงจะวางทางด้านหน้าห่างจากลำโพงที่ทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดเสียงรบกวนเท่ากับ 7 นิ้ว

การวางลำโพงที่สร้างเสียงหักล้างที่ได้จัดวางดังภาพประกอบ 5.1 นั้นเป็นเพียงการสุ่มวางเอาเท่านั้น จริงๆแล้วไม่จำเป็นที่จะต้องวางตามการทดลองนี้ได้ เราอาจจะวางทางด้านซ้ายมือทำมุมให้มากกว่า 30 องศาก็ได้ หรืออาจจะวางทางด้านหน้าแหล่งกำเนิดเสียงรบกวนก็ได้ แต่เมื่อเราเปลี่ยนตำแหน่งในการวางลำโพงที่เป็นตัวสร้างเสียงหักล้างไปแล้ว แน่ใจว่าตำแหน่งในการวางไมโครโฟนที่ทำให้ระดับของเสียงรบกวนลดลงน้อยที่สุดก็จะเปลี่ยนตามไปด้วย ในการวางไมโครโฟนและการวางลำโพงในการขจัดเสียงรบกวน ถ้าวางในตำแหน่งที่ไม่เหมาะสมก็จะเกิดอาการหวัดหรือหอนขึ้น ดังนั้นการเลือกวางตำแหน่งไมโครโฟนซึ่งเป็นตัวตรวจจับเสียงรบกวนจึงมีผลต่อการขจัดเสียงรบกวนด้วยเป็นอย่างมาก จึงได้ทำการทดลองเพื่อหาดำแหน่งการวางไมโครโฟนที่เหมาะสม



ภาพประกอบ 5.1 แสดงตำแหน่งการวางไมโครโฟนและการวางเครื่องวัดระดับความดังเสียง

ก่อนทำการทดลองเพื่อหาค่าแห่งในการวางไมโครโฟนและดูว่าบริเวณใดมีระดับเสียงรบกวนลดลงหรือเพิ่มขึ้นเมื่อทำการขจัด ได้ทำการทดลองเพื่อหาอันดับของตัวกรองที่เหมาะสม โดยการป้อนสัญญาณลูกคลื่นไซน์จากฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์เข้าไปยังเครื่องขจัดเสียงรบกวนโดยตรงโดยไม่ผ่านไมโครโฟน แล้วทดลองเปลี่ยนอันดับของตัวกรองไปเรื่อยๆ เพื่อจะดูว่าจะใช้ตัวกรองอันดับที่เท่าไรที่สามารถทำการทำนายค่าได้ถูกต้องมากที่สุด และจากการทดลองนี้พบว่าอันดับของตัวกรองที่เหมาะสมสำหรับสัญญาณลูกคลื่นไซน์คือ ประมาณ 80 ขึ้นไปจึงจะทำให้การประมาณสัญญาณได้ถูกต้อง แต่ในการทดลองจริงจะเริ่มใช้อันดับของตัวกรองตั้งแต่ 100 เนื่องจากว่าสัญญาณลูกคลื่นไซน์จากฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์เมื่อป้อนเข้าสู่ลำโพงกลายเป็นเสียงส่งออกไปในอากาศ เมื่อใช้ไมโครโฟนเป็นตัวตรวจจับอาจได้รับสัญญาณที่มีรูปแบบเปลี่ยนแปลงไปบ้างดังนั้นจึง ทำการเพิ่มอันดับของตัวกรองเป็น 100 เพื่อให้การประมาณมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น สำหรับค่า สเตปไซส์ ( $\mu$ ) ของอัลกอริทึม LMS ในสมการ (4.3) ที่เลือกในการทดลองเพื่อหา

ค่าอันดับตัวกรอง เท่ากับ 0.003, 0.005, 0.008, 0.01, 0.015, 0.02, 0.03, 0.05, 0.06 ผลจากการทดลองที่ได้จะไม่มี ความแตกต่างกันเมื่อเปลี่ยนค่าสเตปไซ ส่วนความถี่ที่ใช้ในการสุ่มเท่ากับ 11.5 kHz

จากภาพประกอบ 5.1 ในการทดลองเพื่อหาตำแหน่งการวางไมโครโฟนที่เหมาะสม เริ่มจากป้อนสัญญาณขาเข้าขนาด 0.5 Vp-p ให้กับลำโพงที่ทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดเสียงรบกวน ปรับความถี่เสียงตามที่กำหนด ทำการเปิดเครื่องและรัน (run) โปรแกรมขจัดเสียงรบกวน ช่วงแรก ยังไม่เร่งโวลุ่ม (volume) ของลำโพงที่ทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดเสียงหักล้าง ทำการวัดและบันทึกค่า ระดับความดังเสียงก่อนทำการขจัดก่อน หลังจากนั้นค่อยเร่งโวลุ่มของลำโพงที่ทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดเสียงหักล้างให้มีอัตราขยาย เท่ากับ 16 dB เพื่อส่งเสียงหักล้างออกไปขจัดเสียงรบกวน แล้วทำการบันทึกค่าระดับความดังเสียงเมื่อส่งเสียงหักล้างออกไปทำการขจัดเสียงรบกวนดังกล่าว

ตาราง 5.1 ผลการทดลองโดยใช้อันดับของตัวกรองเท่ากับ 100 ค่าสเตปไซ  $\mu=0.005$

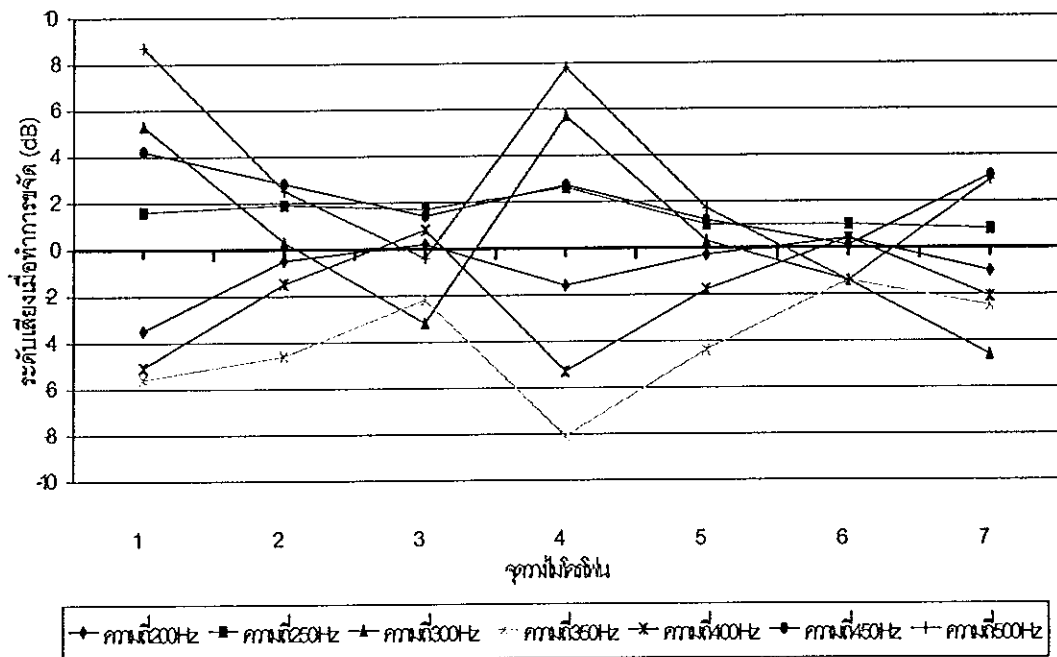
ความถี่ (Hz)	ก่อน (dB)	จุด 1 (dB)	จุด 2 (dB)	จุด 3 (dB)	จุด 4 (dB)	จุด 5 (dB)	จุด 6 (dB)	จุด 7 (dB)
200	73	69.5	72.5	73.2	71.4	72.7	73.4	72.0
250	75.2	76.8	77.1	76.9	77.8	76.2	76.2	76
300	84.7	90	85	81.5	90.4	85	83.3	80.1
350	92.6	87	88	90.4	84.5	88.2	91.2	90.1
400	88.8	83.7	87.3	89.6	83.5	87	89.2	86.7
450	95.5	99.7	98.3	96.9	98.2	96.7	95.6	98.6
500	90.9	99.6	93.4	90.5	98.7	92.6	89.5	93.8

จากตาราง 5.1 “ก่อน” หมายถึงระดับความดังของเสียงรบกวน ณ จุดตั้งเครื่องวัดความดังเสียงก่อนทำการขจัด ส่วน “จุดที่ 1 ถึง จุดที่ 7” เป็นระดับเสียงรบกวน ณ จุดวัด ภายหลังจากทำการขจัดเมื่อทำการวางไมโครโฟนที่แต่ละจุดดังกล่าว ซึ่งจุดวางเครื่องวัดความดังเสียงและจุดวางไมโครโฟนแสดงดังภาพประกอบ 5.1 และต่อไปในตารางที่มีลำดับเป็นหมายเลขก็จะหมายความเช่นเดียวกับในตาราง 5.1 และในตารางที่มีลำดับเป็นหมายเลขคู่จะหมายความเช่นเดียวกับในตาราง 5.2 คือ “จุดที่ 1 ถึง จุดที่ 7” หมายถึงผลต่างของระดับเสียงรบกวนก่อนทำการขจัดกับเสียงรบกวนภายหลังจากทำการขจัดเมื่อทำการวางไมโครโฟนที่จุดนั้นๆ

ตาราง 5.2 ผลต่างระหว่างเสียงรบกวนก่อนทำการขจัดกับเสียงรบกวนหลังทำการขจัด  
เมื่อทำการวางไมโครโฟนในตำแหน่งที่ต่าง ๆ กัน (ใช้ค่าเสตปไซเท่ากับ 0.005  
อันดับเท่ากับ 100 )

ความถี่ (Hz)	จุดที่ 1 (dB)	จุดที่ 2 (dB)	จุดที่ 3 (dB)	จุดที่ 4 (dB)	จุดที่ 5 (dB)	จุดที่ 6 (dB)	จุดที่ 7 (dB)
200	-3.5	-0.5	0.2	-1.6	-0.3	0.4	-1
250	1.6	1.9	1.7	2.6	1	1	0.8
300	5.3	0.3	-3.2	5.7	0.3	-1.4	-4.6
350	-5.6	-4.6	-2.2	-8.1	-4.4	-1.4	-2.5
400	-5.1	-1.5	0.8	-5.3	-1.8	0.4	-2.1
450	4.2	2.8	1.4	2.7	1.2	0.1	3.1
500	8.7	2.5	-0.4	7.8	1.7	-1.4	2.9

จากตาราง 5.2 ค่าติดลบหมายถึงระดับเสียงรบกวนลดลงเมื่อทำการขจัด ส่วนค่าที่เป็นบวก  
หมายความว่าระดับเสียงเพิ่มขึ้นเมื่อทำการขจัด และนำค่าในตาราง 5.2 มาทำการพล็อตกราฟเพื่อ  
ให้เห็นผลการทดลองได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น



ภาพประกอบ 5.2 กราฟแสดงผลการขจัดเสียงรบกวนที่จุดวางไมโครโฟนที่กำหนด  
ที่ความถี่ 200 Hz – 500 Hz เมื่อใช้ค่าเสตปไซเท่ากับ 0.005

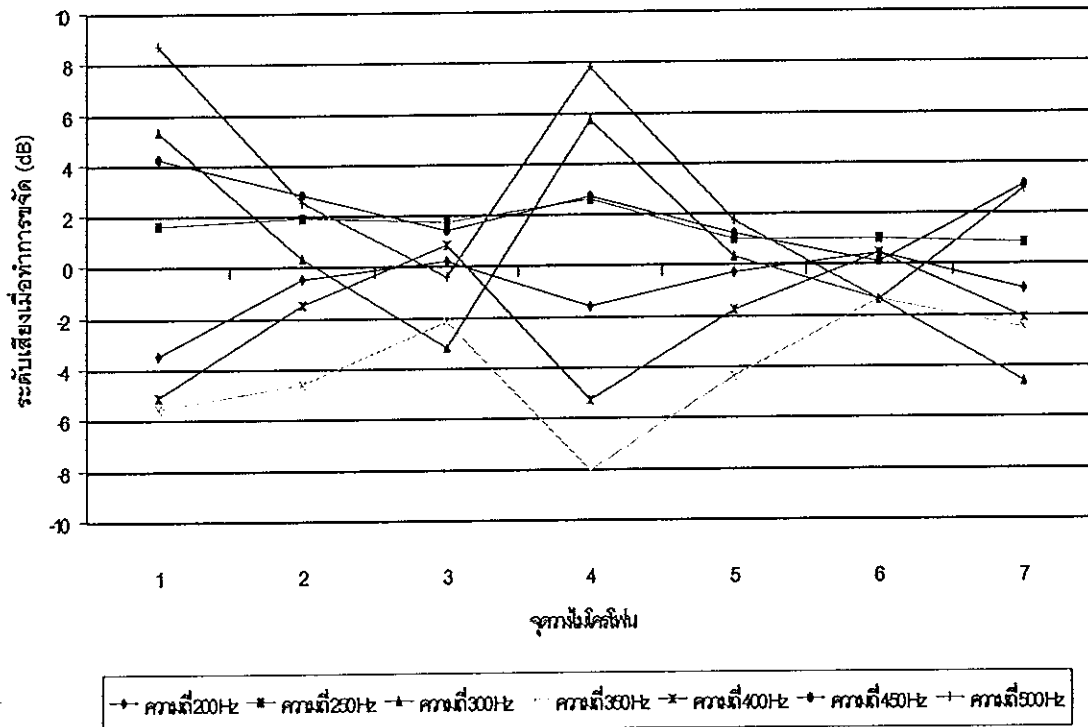
จากภาพประกอบ 5.2 จะเห็นว่าระดับเสียงรบกวนที่สามารถถูกทำให้มีระดับที่ต่ำลงมาได้ อยู่ที่ความถี่ 200 Hz , 350 Hz และ 400 Hz และตำแหน่งที่วางไมโครโฟนแล้วทำให้ระดับเสียงรบกวนลดลงมากที่สุดอยู่ที่จุดที่ 4 ซึ่งวางห่างจากแหล่งกำเนิดเสียงรบกวนหนึ่งนิ้วออกไปทางซ้ายมือประมาณ 30 องศา รองลงมาคือตำแหน่งที่ 1 วางห่างจากแหล่งกำเนิดเสียงรบกวนทางด้านหน้าเท่ากับ 1 นิ้ว

ตาราง 5.3 ผลการทดลองโดยใช้อันดับของตัวกรองเท่ากับ 100 ค่าสเกลไซ  $\mu=0.008$

ความถี่ (Hz)	ก่อน (dB)	จุด 1 (dB)	จุด 2 (dB)	จุด 3 (dB)	จุด 4 (dB)	จุด 5 (dB)	จุด 6 (dB)	จุด 7 (dB)
200	73.6	69.91	72.1	73.1	70.5	72.2	72.9	72.2
250	75.2	77.5	76.2	76.7	77.7	76.7	36.5	75.9
300	86.2	89.6	85.6	84.2	89.0	85.5	83.8	81.9
350	93.3	82.2	88.4	90.9	83.4	88.8	91.9	89.8
400	88.7	82.5	86.3	89.4	83.7	87.4	88.9	87.6
450	95.4	100.6	100.2	97.6	101.1	99.4	97.6	98.7
500	90	98.7	91.5	89	96.6	91	88.4	92.6

ตาราง 5.4 ผลต่างระหว่างเสียงรบกวนก่อนทำการขจัดกับเสียงรบกวนหลังทำการขจัด  
เมื่อทำการวางไมโครโฟนในตำแหน่งที่ต่าง ๆ กัน (ใช้ค่าสเตปไซเท่ากับ 0.008  
อันดับเท่ากับ 100)

ความถี่ (Hz)	จุดที่ 1 (dB)	จุดที่ 2 (dB)	จุดที่ 3 (dB)	จุดที่ 4 (dB)	จุดที่ 5 (dB)	จุดที่ 6 (dB)	จุดที่ 7 (dB)
200	-3.69	-1.5	-0.5	-3.1	-1.4	-0.7	-1.4
250	2.3	1	1.5	2.5	1.5	1.3	0.7
300	3.4	-0.6	-2	2.8	-0.7	-2.4	-4.3
350	-11.1	-4.9	-2.4	-9.9	-4.5	-1.4	-3.5
400	-6.2	-2.4	0.7	-5	-1.3	0.2	-1.1
450	5.2	4.8	2.2	5.7	4	2.2	3.3
500	8.7	1.5	-1	6.6	1	-1.6	2.6



ภาพประกอบ 5.3 กราฟแสดงผลการขจัดเสียงรบกวนที่จุดวางไมโครโฟนที่กำหนด  
ที่ความถี่ 200 Hz – 500 Hz เมื่อใช้ค่าสเตปไซเท่ากับ 0.008



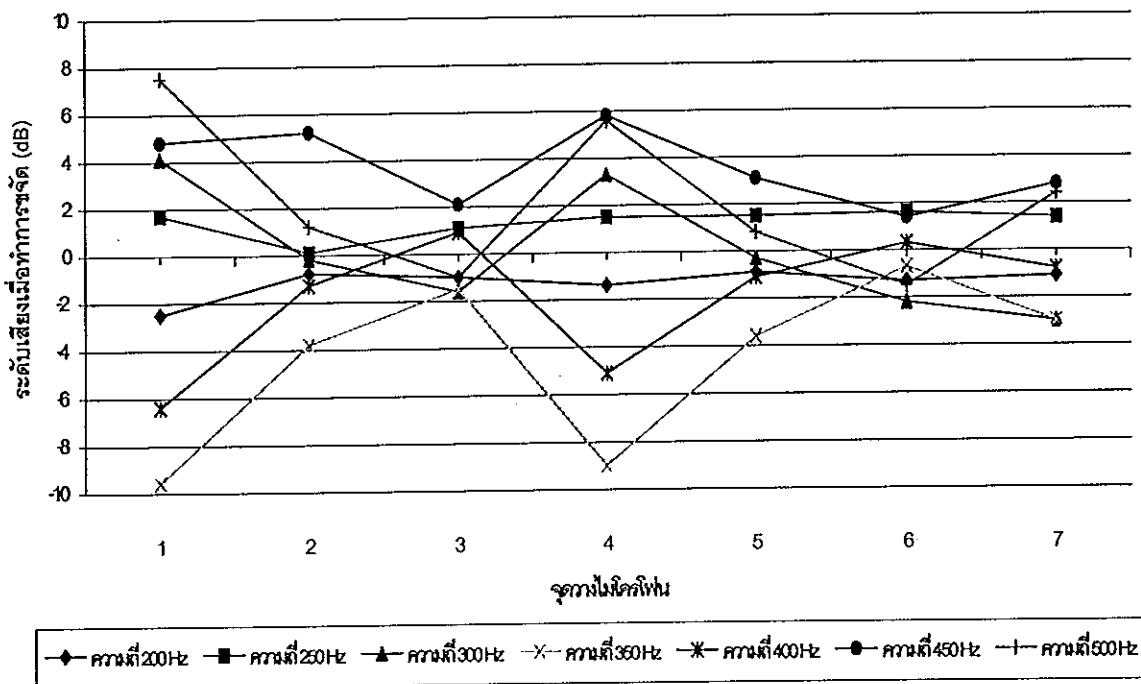
จากภาพประกอบ 5.3 เมื่อใช้ค่าสเตปป์ไซเท่ากับ 0.008 จะเห็นว่าระดับเสียงรบกวนที่ลดลงยังคงเป็นความถี่ 200 Hz , 350 Hz และ 400 Hz และลดลงมากกว่าการใช้ค่าสเตปป์ไซเท่ากับ 0.005 แต่จุดวางไมโครโฟนที่ทำให้ระดับเสียงรบกวนที่ความถี่ดังกล่าวลดลงคือจุดที่ 1 รองลงมาคือจุดที่ 4

ตาราง 5.5 ผลการทดลองโดยใช้อันดับของตัวกรองเท่ากับ 100 ค่าสเตปป์ไซ  $\mu=0.01$

ความถี่ (Hz)	ก่อน (dB)	จุด 1 (dB)	จุด 2 (dB)	จุด 3 (dB)	จุด 4 (dB)	จุด 5 (dB)	จุด 6 (dB)	จุด 7 (dB)
200	73.4	70.9	72.6	72.4	72	72.5	72.1	72.3
250	74.1	75.8	74.2	75.2	75.6	75.6	75.7	75.5
300	85.2	89.3	85	83.6	88.5	84.9	83	82.2
350	92.1	82.5	88.3	90.6	83.1	88.5	91.4	89.1
400	88.8	82.4	87.5	89.7	83.7	87.7	89.1	88.0
450	95.9	100.7	101.1	98	101.7	99	97.3	98.7
500	90.3	97.8	91.5	89.3	95.9	91.1	88.8	92.7

ตาราง 5.6 ผลต่างระหว่างเสียงรบกวนก่อนทำการจัดกับเสียงรบกวนหลังทำการจัด  
เมื่อทำการวางไมโครโฟนในตำแหน่งที่ต่าง ๆ กัน (ใช้ค่าสเตปป์ไซเท่ากับ 0.01  
อันดับเท่ากับ 100)

ความถี่ (Hz)	จุดที่ 1 (dB)	จุดที่ 2 (dB)	จุดที่ 3 (dB)	จุดที่ 4 (dB)	จุดที่ 5 (dB)	จุดที่ 6 (dB)	จุดที่ 7 (dB)
200	-2.5	-0.8	-1	-1.4	-0.9	-1.3	-1.1
250	1.7	0.1	1.1	1.5	1.5	1.6	1.4
300	4.1	-0.2	-1.6	3.3	-0.3	-2.2	-3
350	-9.6	-3.8	-1.5	-9	-3.6	-0.7	-3
400	-6.4	-1.3	0.9	-5.1	-1.1	0.3	-0.8
450	4.8	5.2	2.1	5.8	3.1	1.4	2.8
500	7.5	1.2	-1	5.6	0.8	-1.5	2.4



ภาพประกอบ 5.4 กราฟแสดงผลการขจัดเสียงรบกวนที่จุดวางไมโครโฟนที่กำหนด ที่ความถี่ 200 Hz – 500 Hz เมื่อใช้ค่าสเกลไซเท่ากับ 0.01

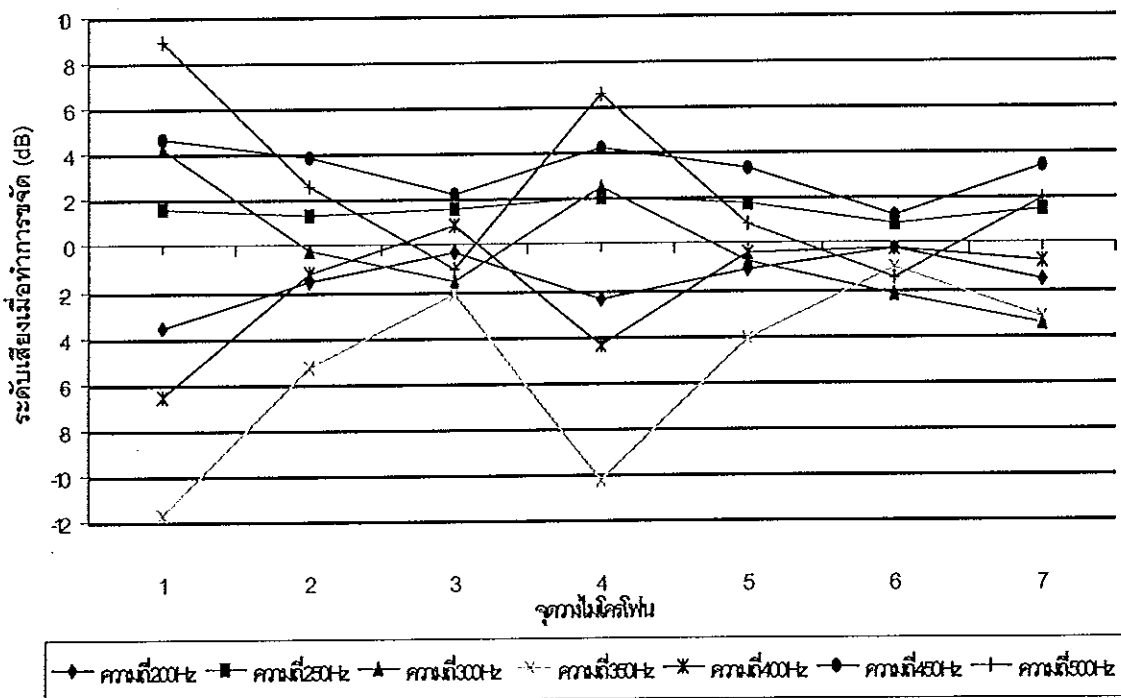
จากภาพประกอบ 5.4 เมื่อใช้ค่าสเกลไซเท่ากับ 0.01 ระดับเสียงรบกวนที่ลดลงมีความถี่เท่ากับ 200 Hz, 350 Hz และ 400 Hz และจุดวางไมโครโฟนที่ทำให้ระดับเสียงรบกวนลดลงสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งที่ 1 และรองลงมาคือตำแหน่งที่ 4

ตาราง 5.7 ผลการทดลองโดยใช้อันดับของตัวกรองเท่ากับ 100 ค่าสเกลไซ  $\mu=0.015$

ความถี่ (Hz)	ก่อน (dB)	จุด 1 (dB)	จุด 2 (dB)	จุด 3 (dB)	จุด 4 (dB)	จุด 5 (dB)	จุด 6 (dB)	จุด 7 (dB)
200	74.3	70.7	72.7	74	71.9	73.2	74.1	72.7
250	75.1	76.7	76.4	76.7	77.1	76.9	76	76.6
300	86.2	90.4	86	84.6	88.7	85.4	84	82.7
350	93.5	81.8	88.2	91.4	83.2	89.4	92.5	90.3
400	88.7	82.1	87.5	89.6	84.3	88.3	88.5	87.9
450	95.9	100.6	99.7	98.1	100.1	99.2	97.1	99.3
500	89.9	98.8	92.5	88.9	96.5	90.8	88.4	91.8

ตาราง 5.8 ผลต่างระหว่างเสียงรบกวนก่อนทำการขจัดกับเสียงรบกวนหลังทำการขจัด  
เมื่อทำการวางไมโครโฟนในตำแหน่งที่ต่าง ๆ กัน (ใช้ค่าสเตปป์ไซเท่ากับ 0.015  
อันดับเท่ากับ 100)

ความถี่ (Hz)	จุดที่ 1 (dB)	จุดที่ 2 (dB)	จุดที่ 3 (dB)	จุดที่ 4 (dB)	จุดที่ 5 (dB)	จุดที่ 6 (dB)	จุดที่ 7 (dB)
200	-3.6	-1.6	-0.3	-2.4	-1.1	-0.2	-1.6
250	1.6	1.3	1.6	2	1.8	0.9	1.5
300	4.2	-0.2	-1.6	2.5	-0.8	-2.2	-3.5
350	-11.7	-5.3	-2.1	-10.3	-4.1	-1	-3.2
400	-6.6	-1.2	0.9	-4.4	-0.4	-0.2	-0.8
450	4.7	3.8	2.2	4.2	3.3	1.2	3.4
500	8.9	2.6	-1	6.6	0.9	-1.5	1.9



ภาพประกอบ 5.5 กราฟแสดงผลการขจัดเสียงรบกวนที่จุดวางไมโครโฟนที่กำหนด  
ที่ความถี่ 200 Hz – 500 Hz เมื่อใช้ค่าสเตปป์ไซเท่ากับ 0.015

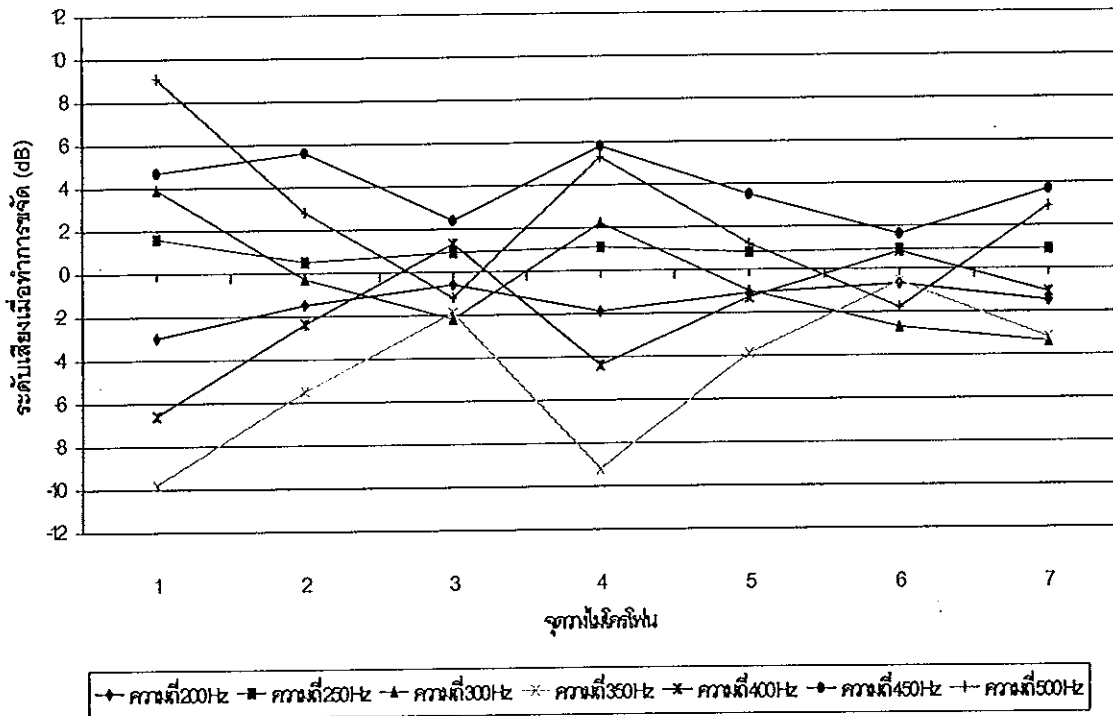
จากภาพประกอบ 5.5 จุดวางไมโครโฟนที่ทำให้เสียงรบกวนลดลงสูงสุดเมื่อทำการขจัดยังคงอยู่ที่ตำแหน่งที่ 1 รองลงมาคือตำแหน่งที่ 4 และความถี่ของเสียงรบกวนที่สามารถทำการขจัดให้มีระดับที่ต่ำลงมาได้อยู่ที่ความถี่ 200 Hz, 350 Hz และ 400 Hz

ตาราง 5.9 ผลการทดลองโดยใช้อันดับของตัวกรองเท่ากับ 100 ค่าสเกลไปซ  $\mu=0.02$

ความถี่ (Hz)	ก่อน (dB)	จุด 1 (dB)	จุด 2 (dB)	จุด 3 (dB)	จุด 4 (dB)	จุด 5 (dB)	จุด 6 (dB)	จุด 7 (dB)
200	73.8	70.8	72.3	73.2	71.9	72.7	73.1	72.3
250	75.9	77.5	76.4	76.8	77.0	76.7	76.8	76.8
300	86.3	90.2	86	84.1	88.5	85.3	83.6	82.9
350	92.4	82.6	86.9	90.5	83.2	88.5	91.8	89.2
400	88.7	82.1	86.3	90	84.3	87.4	89.5	87.6
450	95.9	100.6	101.5	98.3	101.7	99.4	97.5	99.6
500	89.9	99	92.7	88.7	95.2	91.1	88.1	92.8

ตาราง 5.10 ผลต่างระหว่างเสียงรบกวนก่อนทำการขจัดกับเสียงรบกวนหลังทำการขจัดเมื่อทำการวางไมโครโฟนในตำแหน่งที่ต่าง ๆ กัน (ใช้ค่าสเกลไปซเท่ากับ 0.02 อันดับเท่ากับ 100)

ความถี่ (Hz)	จุดที่ 1 (dB)	จุดที่ 2 (dB)	จุดที่ 3 (dB)	จุดที่ 4 (dB)	จุดที่ 5 (dB)	จุดที่ 6 (dB)	จุดที่ 7 (dB)
200	-3	-1.5	-0.6	-1.9	-1.1	-0.7	-1.5
250	1.6	0.5	0.9	1.1	0.8	0.9	0.9
300	3.9	-0.3	-2.2	2.2	-1	-2.7	-3.4
350	-9.8	-5.5	-1.9	-9.2	-3.9	-0.6	-3.2
400	-6.6	-2.4	1.3	-4.4	-1.3	0.8	-1.1
450	4.7	5.6	2.4	5.8	3.5	1.6	3.7
500	9.1	2.8	-1.2	5.3	1.2	-1.8	2.9



ภาพประกอบ 5.6 กราฟแสดงผลการขจัดเสียงรบกวนที่จุดวางไมโครโฟนที่กำหนด ที่ความถี่ 200 Hz – 500 Hz เมื่อใช้ค่าสเต็ปไซเท่ากับ 0.02

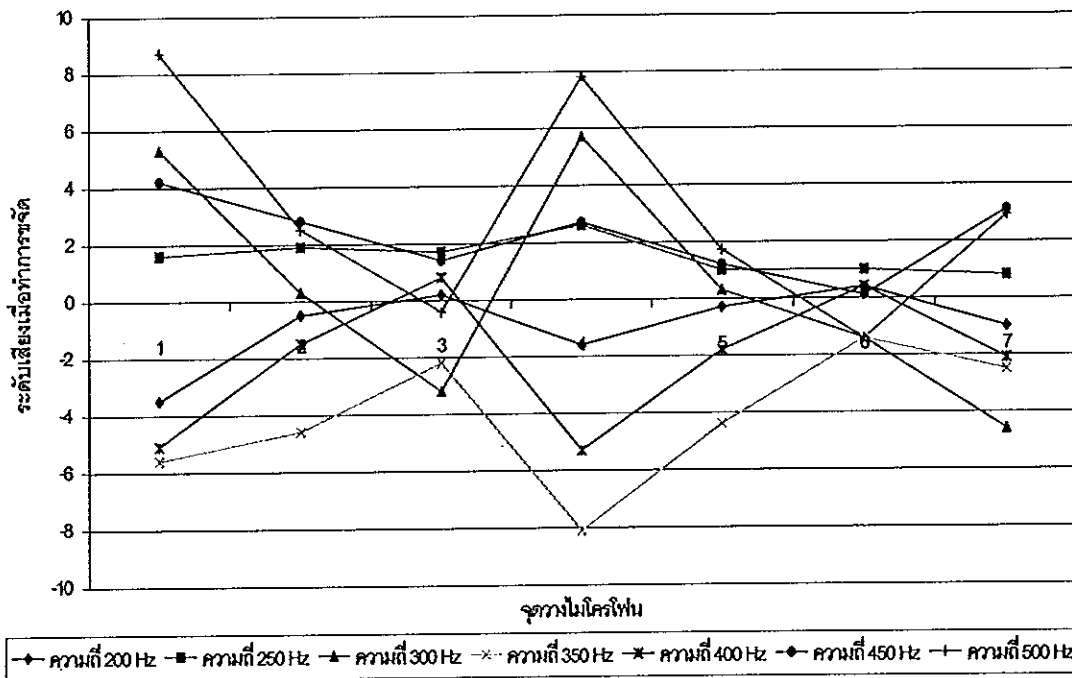
จากผลการทดลองในตาราง 5.2, 5.4, 5.6, 5.8 และ 5.10 ผลต่างระหว่างเสียงรบกวนก่อนทำการขจัดกับเสียงรบกวนหลังทำการขจัดเมื่อทำการวางไมโครโฟนในตำแหน่งที่ต่าง ๆ กัน โดยใช้อันดับของตัวกรองเท่ากับ 100 และทำการเปลี่ยนค่าสเต็ปไซ จาก 0.005, 0.008, 0.01, 0.015, 0.02 ตามลำดับ จะเห็นว่าเสียงรบกวนที่มีความถี่ 200 Hz, 350 Hz, 400 Hz สามารถทำให้มีระดับที่ต่ำลงมาได้ และตำแหน่งในการวางไมโครโฟนที่ทำให้ระดับเสียงรบกวนลดลงมากที่สุดคือตำแหน่งที่ 1 ซึ่งวางห่างจากแหล่งกำเนิดเสียงรบกวนเท่ากับ 1 นิ้ว รองลงมาคือตำแหน่งที่ 4 วางห่างจากแหล่งกำเนิดเสียงรบกวนเท่ากับ 1 นิ้ว ทำมุมประมาณ 30 องศาจากจุดกึ่งกลางของแหล่งกำเนิดเสียง รบกวน และจากตาราง 4 ซึ่งใช้ค่าสเต็ปไซเท่ากับ 0.045 จะทำให้ระดับเสียงรบกวนที่ความถี่ 200 Hz, 350 Hz และ 400 Hz ลดลงได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้ค่าสเต็ปไซอื่นๆ

ตาราง 5.11 ผลการทดลองโดยใช้อันดับของตัวกรองเท่ากับ 150 ค่าเสตปไซ  $\mu=0.005$

ความถี่ (Hz)	ก่อน (dB)	จุด 1 (dB)	จุด 2 (dB)	จุด 3 (dB)	จุด 4 (dB)	จุด 5 (dB)	จุด 6 (dB)	จุด 7 (dB)
200	74.7	71.7	73.5	74	73	74.0	74.3	73.8
250	75.8	77.4	76.5	76.9	77.2	76.8	76.7	76.5
300	85.2	89.4	85.4	83.8	88.3	84.6	82.9	81.7
350	91.2	82	86	89.8	82.3	87.5	90.6	88.4
400	87.8	82.4	86	89.1	81.9	87.3	88.5	87
450	94.4	99.2	98.2	96.4	99.5	97.4	95.9	97.3
500	88.6	96.9	91.0	87.8	94.9	89.9	87.2	87.7

ตาราง 5.12 ผลต่างระหว่างเสียงรบกวนก่อนทำการขจัดกับเสียงรบกวนหลังทำการขจัด  
เมื่อทำการวางไมโครโฟนในตำแหน่งที่ต่าง ๆ กัน (ใช้ค่าเสตปไซ  
เท่ากับ 0.005 อันดับเท่ากับ 150)

ความถี่ (Hz)	จุดที่ 1 (dB)	จุดที่ 2 (dB)	จุดที่ 3 (dB)	จุดที่ 4 (dB)	จุดที่ 5 (dB)	จุดที่ 6 (dB)	จุดที่ 7 (dB)
200	-3	-1.2	-0.7	-1.7	-0.7	-0.4	-0.9
250	1.6	0.7	1.1	1.4	1	0.9	0.7
300	4.2	0.2	-1.4	3.1	-0.6	-2.3	-3.5
350	-9.2	-5.2	-1.4	-8.9	-3.7	-0.6	-2.8
400	-5.4	-1.8	1.3	-5.9	-0.5	0.7	-0.8
450	4.8	3.8	2	5.1	3	1.5	2.9
500	8.3	2.4	-0.8	6.3	1.3	-1.4	-0.9



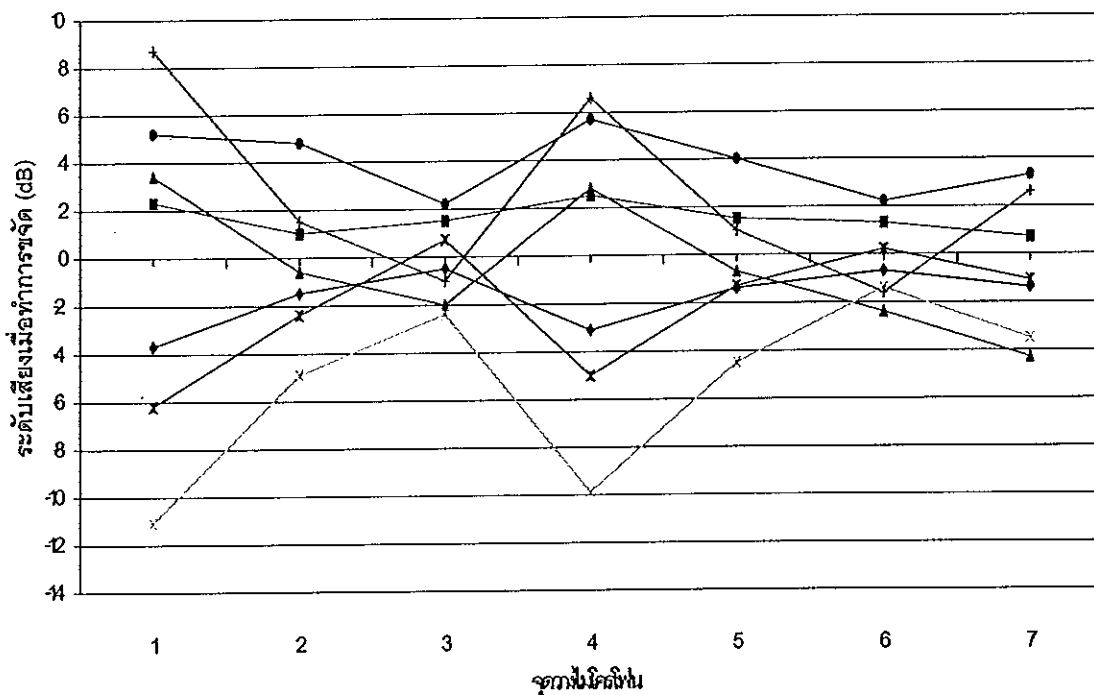
ภาพประกอบ 5.7 กราฟแสดงผลการขจัดเสียงรบกวนที่จุดวางไมโครโฟนที่กำหนด ที่ความถี่ 200 Hz – 500 Hz เมื่อใช้ค่าสเกลเท่ากับ 0.005

ตาราง 5.13 ผลการทดลองโดยใช้อันดับของตัวกรองเท่ากับ 150 ค่าสเกลไปซ  $\mu=0.008$

ความถี่ (Hz)	ก่อน (dB)	จุด 1 (dB)	จุด 2 (dB)	จุด 3 (dB)	จุด 4 (dB)	จุด 5 (dB)	จุด 6 (dB)	จุด 7 (dB)
200	72.3	68.5	70.6	71.8	69.8	71.0	71.4	70.7
250	74.5	75.5	75.6	76	76	75.9	75.8	75.4
300	85.4	88.5	84.8	83.5	88.3	84.4	82.7	81.3
350	91.8	81.9	87.4	90.2	84.3	88.3	91.1	89.1
400	87.8	82.5	86	89.0	81.6	87.1	88.5	87.0
450	94.4	99.7	99.8	97	100.6	98.4	96.5	98.5
500	88.7	98	91.5	87.7	93.5	89.4	86.9	90.9

ตาราง 5.14 ผลต่างระหว่างเสียงรบกวนก่อนทำการขจัดกับเสียงรบกวนหลังทำการขจัด  
เมื่อทำการวางไมโครโฟนในตำแหน่งที่ต่าง ๆ กัน (ใช้ค่าเสตปไซ  
เท่ากับ 0.008 อันดับเท่ากับ 150)

ความถี่ (Hz)	จุดที่ 1 (dB)	จุดที่ 2 (dB)	จุดที่ 3 (dB)	จุดที่ 4 (dB)	จุดที่ 5 (dB)	จุดที่ 6 (dB)	จุดที่ 7 (dB)
200	-3.8	-1.7	-0.5	-2.5	-1.3	-0.9	-1.6
250	1	1.1	1.5	1.5	1.4	1.3	0.9
300	3.1	-0.6	-1.9	2.9	-1	-2.7	-4.1
350	-9.9	-4.4	-1.6	-7.5	-3.5	-0.7	-2.7
400	-5.3	-1.8	1.2	-6.2	-0.7	0.7	-0.8
450	5.3	5.4	2.6	6.2	4	2.1	4.1
500	9.3	2.8	-1	4.8	0.7	-1.8	2.2



—+— ความถี่ 200 Hz —■— ความถี่ 250 Hz —+— ความถี่ 300 Hz —\*— ความถี่ 350 Hz —x— ความถี่ 400 Hz —●— ความถี่ 450 Hz —+— ความถี่ 500 Hz

ภาพประกอบ 5.8 กราฟแสดงผลการขจัดเสียงรบกวนที่จุดวางไมโครโฟนที่กำหนด  
ที่ความถี่ 200 Hz – 500 Hz เมื่อใช้ค่าเสตปไซเท่ากับ 0.008

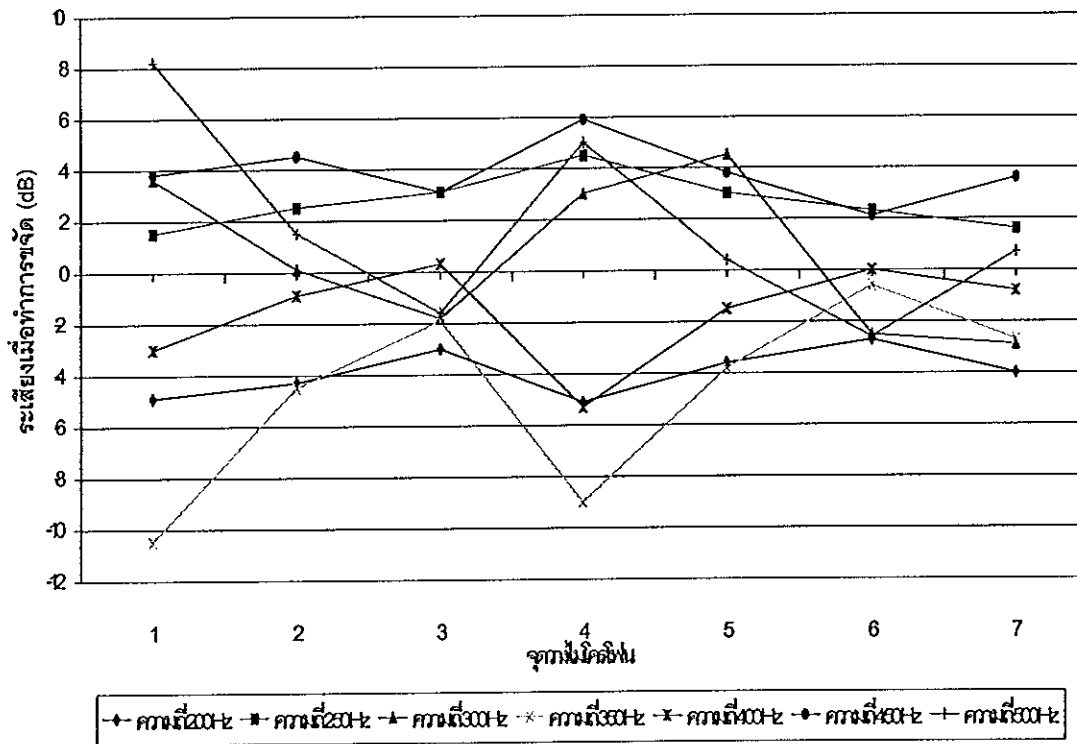


ตาราง 5.15 ผลการทดลองโดยใช้อันดับของตัวกรองเท่ากับ 150 ค่าสเตรปไซ  $\mu=0.01$

ความถี่ (Hz)	ก่อน (dB)	จุด 1 (dB)	จุด 2 (dB)	จุด 3 (dB)	จุด 4 (dB)	จุด 5 (dB)	จุด 6 (dB)	จุด 7 (dB)
200	75.2	70.3	70.9	72.2	70.1	71.6	72.5	71.2
250	74.7	76.2	77.2	77.8	79.2	77.7	77	76.3
300	85	88.6	85.1	83.2	88	89.5	82.5	82.1
350	91.7	81.2	87.2	89.8	82.7	87.9	91.1	89.0
400	87.4	84.4	86.5	87.7	82.1	85.9	87.4	86.6
450	95.1	98.9	99.6	98.2	101	98.9	97.2	98.7
500	90.2	98.4	91.7	88.6	95.2	90.6	87.6	90.9

ตาราง 5.16 ผลต่างระหว่างเสียงรบกวนก่อนทำการขจัดกับเสียงรบกวนหลังทำการขจัด  
เมื่อทำการวางไมโครโฟนในตำแหน่งที่ต่าง ๆ กัน (ใช้ค่าสเตรปไซเท่ากับ 0.01  
อันดับเท่ากับ 150)

ความถี่ (Hz)	จุดที่ 1 (dB)	จุดที่ 2 (dB)	จุดที่ 3 (dB)	จุดที่ 4 (dB)	จุดที่ 5 (dB)	จุดที่ 6 (dB)	จุดที่ 7 (dB)
200	-4.9	-4.3	-3	-5.1	-3.6	-2.7	-4
250	1.5	2.5	3.1	4.5	3	2.3	1.6
300	3.6	0.1	-1.8	3	4.5	-2.5	-2.9
350	-10.5	-4.5	-1.9	-9	-3.8	-0.6	-2.7
400	-3	-0.9	0.3	-5.3	-1.5	0	-0.8
450	3.8	4.5	3.1	5.9	3.8	2.1	3.6
500	8.2	1.5	-1.6	5	0.4	-2.6	0.7



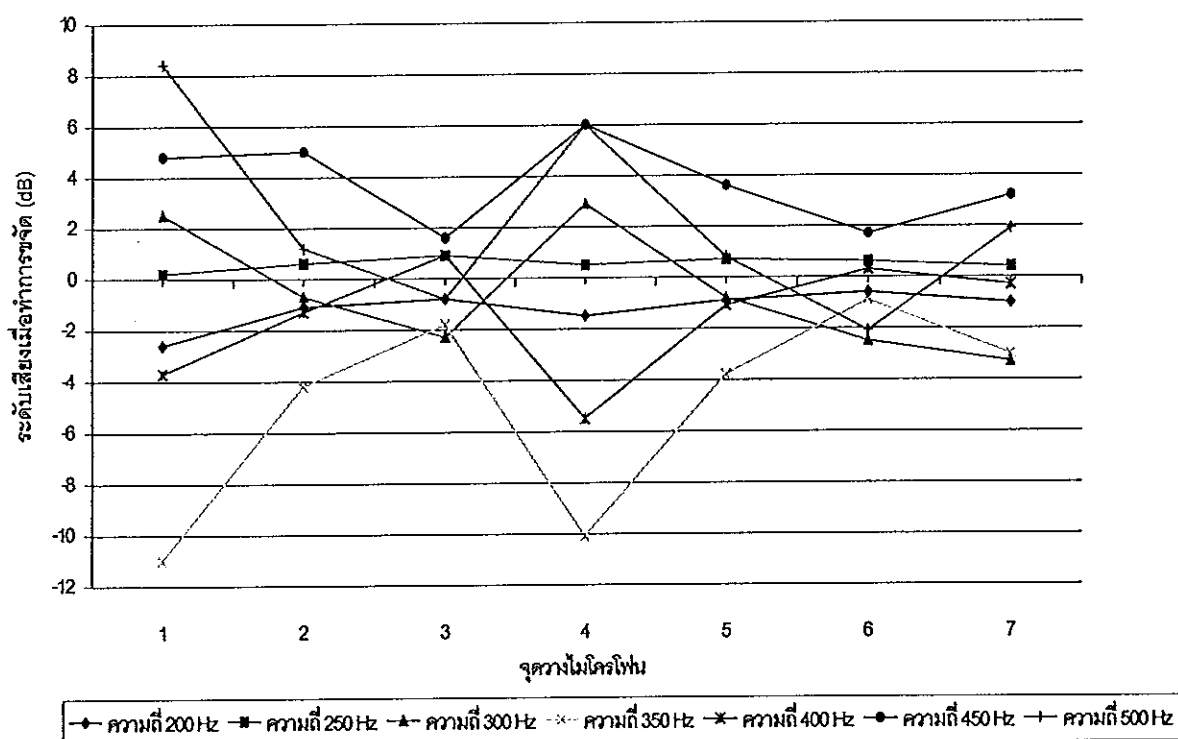
ภาพประกอบ 5.9 กราฟแสดงผลการขจัดเสียงรบกวนที่จุดวางไมโครโฟนที่กำหนด ที่ความถี่ 200 Hz – 500 Hz เมื่อใช้ค่าสเตปไซเท่ากับ 0.01

ตาราง 5.17 ผลการทดลองโดยใช้อันดับของตัวกรองเท่ากับ 100 ค่าสเตปไซ  $\mu=0.015$

ความถี่ (Hz)	ก่อน (dB)	จุด 1 (dB)	จุด 2 (dB)	จุด 3 (dB)	จุด 4 (dB)	จุด 5 (dB)	จุด 6 (dB)	จุด 7 (dB)
200	72.7	70.1	71.6	71.9	71.2	71.8	72.1	71.7
250	75.4	75.6	76	76.3	75.9	76.1	76	75.8
300	85.3	87.8	84.6	83	88.2	84.5	82.8	82
350	91.5	80.5	87.3	89.7	81.4	87.7	90.6	88.5
400	87.9	84.2	86.6	88.8	82.4	86.8	88.2	87.6
450	93.8	98.6	98.8	95.4	99.8	97.4	95.5	97
500	88	96.4	89.2	87.2	94.0	88.8	85.9	89.9

ตาราง 5.18 ผลต่างระหว่างเสียงรบกวนก่อนทำการขจัดกับเสียงรบกวนหลังทำการขจัด  
เมื่อทำการวางไมโครโฟนในตำแหน่งที่ต่าง ๆ กัน (ใช้ค่าสเกลปไซเท่ากับ  
0.015 อันดับเท่ากับ 150)

ความถี่ (Hz)	จุดที่ 1 (dB)	จุดที่ 2 (dB)	จุดที่ 3 (dB)	จุดที่ 4 (dB)	จุดที่ 5 (dB)	จุดที่ 6 (dB)	จุดที่ 7 (dB)
200	-2.6	-1.1	-0.8	-1.5	-0.9	-0.6	-1
250	0.2	0.6	0.9	0.5	0.7	0.6	0.4
300	2.5	-0.7	-2.3	2.9	-0.8	-2.5	-3.3
350	-11	-4.2	-1.8	-10.1	-3.8	-0.9	-3
400	-3.7	-1.3	0.9	-5.5	-1.1	0.3	-0.3
450	4.8	5	1.6	6	3.6	1.7	3.2
500	8.4	1.2	-0.8	6	0.8	-2.1	1.9



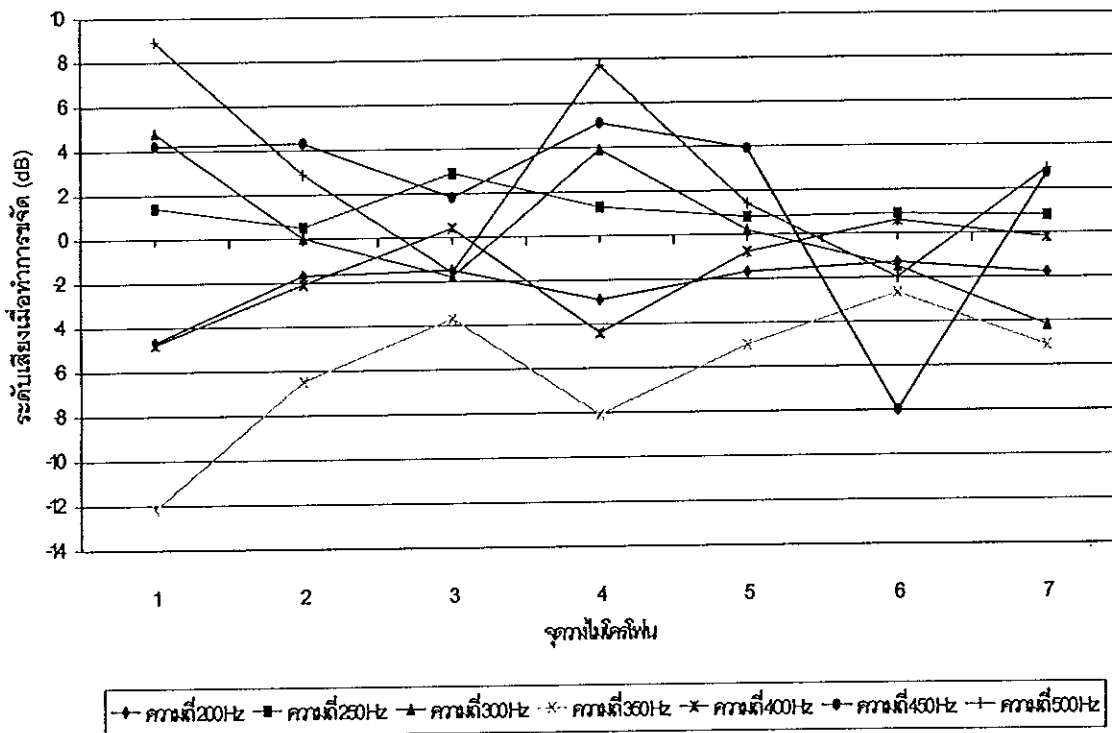
ภาพประกอบ 5.10 กราฟแสดงผลการขจัดเสียงรบกวนที่จุดวางไมโครโฟนที่กำหนด  
ที่ความถี่ 200 Hz – 500 Hz เมื่อใช้ค่าสเกลปไซเท่ากับ 0.015

ตาราง 5.19 ผลการทดลองโดยใช้อันดับของตัวกรองเท่ากับ 150 ค่าสเตปไซ  $\mu=0.02$

ความถี่ (Hz)	ก่อน (dB)	จุด 1 (dB)	จุด 2 (dB)	จุด 3 (dB)	จุด 4 (dB)	จุด 5 (dB)	จุด 6 (dB)	จุด 7 (dB)
200	73.7	69	72	72.2	70.8	72	72.4	71.9
250	76.2	77.6	76.7	79.1	77.5	77	77.1	77
300	85	89.8	85	83.2	88.9	85.2	83.5	80.8
350	92.9	80.7	86.4	89.2	84.8	87.9	90.2	87.8
400	88.2	83.4	86.1	88.6	83.8	87.4	88.8	88
450	93	97.2	97.3	94.8	98.1	96.9	85.0	95.7
500	90	98.9	92.9	88.4	97.7	91.4	88	92.9

ตาราง 5.20 ผลต่างระหว่างเสียงรบกวนก่อนทำการขจัดกับเสียงรบกวนหลังทำการขจัด  
เมื่อทำการวางไมโครโฟนในตำแหน่งที่ต่าง ๆ กัน (ใช้ค่าสเตปไซเท่ากับ 0.02  
อันดับของตัวกรองเท่ากับ 150)

ความถี่ (Hz)	จุดที่ 1 (dB)	จุดที่ 2 (dB)	จุดที่ 3 (dB)	จุดที่ 4 (dB)	จุดที่ 5 (dB)	จุดที่ 6 (dB)	จุดที่ 7 (dB)
200	-4.7	-1.7	-1.5	-2.9	-1.7	-1.3	-1.8
250	1.4	0.5	2.9	1.3	-0.8	0.9	0.8
300	4.8	0	-1.8	3.9	0.2	-1.5	-4.2
350	-12.2	-6.5	-3.7	-8.1	-5	-2.7	-5.1
400	-4.8	-2.1	0.4	-4.4	-0.8	0.6	-0.2
450	4.2	4.3	1.8	5.1	3.9	-8	2.7
500	8.9	2.9	-1.6	7.7	1.4	-2	2.9



ภาพประกอบ 5.11 กราฟแสดงผลการขจัดเสียงรบกวนที่จุดวางไมโครโฟนที่กำหนด ที่ความถี่ 200 Hz – 500 Hz เมื่อใช้ค่าสเตปไซเท่ากับ 0.02

จากการทดลองใช้อัตราส่วนของตัวกรองเท่ากับ 150 และทำการปรับเปลี่ยนค่าสเตปไซตั้งแต่ 0.005, 0.008, 0.01, 0.015, และ 0.02 ตามลำดับ จะเห็นว่าตำแหน่งการวางไมโครโฟนในตำแหน่งที่ 1 สามารถขจัดเสียงรบกวนให้มีระดับลดลงมากที่สุด เมื่อเทียบกับตำแหน่งอื่นๆ ตำแหน่งรองลงมาคือตำแหน่งที่ 4 และความถี่เสียงรบกวนที่สามารถขจัดแล้วทำให้มีระดับต่ำลงมากคือ ความถี่ 200 Hz, 350 Hz และ 400 Hz และจากตาราง 5.12, 5.14, 5.16, 5.18 และ 5.20 สังเกตที่ตำแหน่งการวางไมโครโฟนที่ตำแหน่งที่ 1 เมื่อทำการเพิ่มค่าสเตปไซขึ้น จะเห็นว่าที่ค่าความถี่ 300 Hz จะค่อยๆ ลดลง และที่ความถี่ 400 Hz ระดับความดังของเสียงรบกวนเมื่อทำการขจัดจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น แต่ก็ยังมีระดับที่ต่ำกว่าเสียงรบกวนขณะยังไม่ทำการขจัด และที่ความถี่ 350 Hz และ 450 Hz นี้ เมื่อเพิ่มค่าสเตปไซเป็น 0.015 ขณะที่ทำการขจัดมักจะเกิดเสียงหวีดหอนขึ้น

จากการทดลองใช้อัตราส่วนของตัวกรองเท่ากับ 100 และ 150 ค่าสเตปไซเท่ากับ 0.005, 0.008, 0.01, 0.015, และ 0.02 จะเห็นว่าระดับเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นเมื่อทำการขจัดสามารถทำให้ลดลงได้มาได้ที่ความถี่ 200 Hz, 350 Hz, และ 400 Hz ตำแหน่งการวางไมโครโฟนแล้วทำให้ระดับเสียงรบกวนที่ความถี่ดังกล่าวลดลงมากที่สุดคือตำแหน่งที่ 1 รองลงมาคือตำแหน่งที่ 4 และ

จากกราฟที่แสดงการขจัดเสียงรบกวนจะเห็นการใช้อันดับของตัวกรองเท่ากับ 100 และ ค่าสเกลป  
ไซเท่ากับ 0.015 สามารถทำการขจัดเสียงรบกวนให้มีระดับต่ำลงมากได้มากที่สุด

ตาราง 5.21 ผลการทดลอง เมื่อใช้อันดับของตัวกรองเท่ากับ 200 และค่าสเกลปไซ  
เท่ากับ 0.005 ( วัดเฉพาะจุดที่ 1 และ 4 )

ความถี่ (Hz)	ก่อน (dB)	จุด 1 (dB)	จุด 4 (dB)
200	73.8	71.9	70.8
250	78.4	-	78.8
300	86.0	90.6	90.4
350	92.2	-	85.1
400	88.3	-	82.8
450	93.2	97.8	98.9
500	90.8	-	98

ตาราง 5.22 ผลการทดลอง เมื่อใช้อันดับของตัวกรองเท่ากับ 200 และค่าสเกลปไซ  
เท่ากับ 0.008 ( วัดเฉพาะจุดที่ 1 และ 4 )

ความถี่ (Hz)	ก่อน (dB)	จุด 1 (dB)	จุด 4 (dB)
200	74.4	85.8	70.4
250	78.7	79.3	78.7
300	85.6	90	89.7
350	93.8	-	85.4
400	88.3	87	83.2
450	92.8	97.6	98.5
500	90.2	-	98.1

ตาราง 5.23 ผลการทดลอง เมื่อใช้อัตถัพของตัวกรองเท่ากับ 200 และค่าสตีปไซเท่ากับ 0.01 ( วัดเฉพาะจุดที่ 1 และ 4 )

ความถี่ (Hz)	ก่อน (dB)	จุด 1 (dB)	จุด 4 (dB)
200	75.1	70.4	71.8
250	76.8	77.7	77.8
300	85.7	90.0	90.3
350	93.3	83.8	84.4
400	88.2	83.7	83.3
450	94.3	99.1	99.6
500	91.7	-	99.4

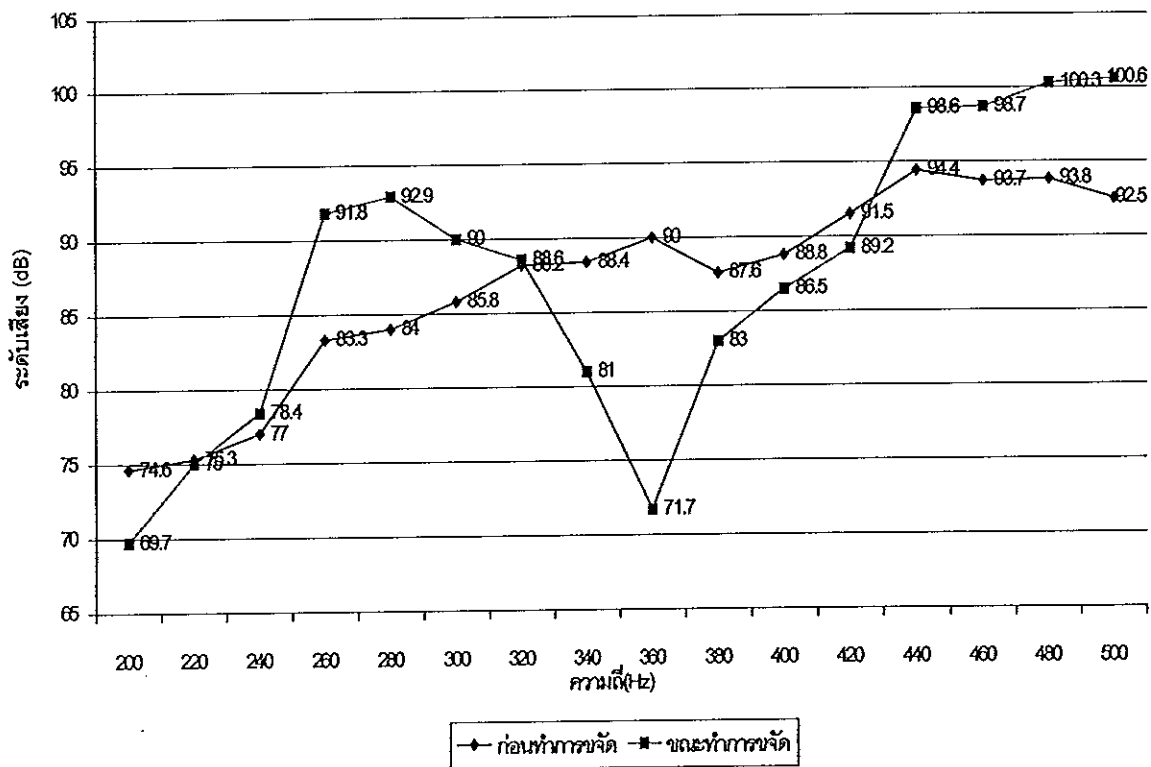
ในการทดลองโดยใช้อัตถัพของตัวกรองเท่ากับ 200 ค่าสตีปไซ 0.005, 0.008 และ 0.01 ผลของการทดลองเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 4 ในการใช้อัตถัพของตัวกรองเท่ากับ 100 และ 150 ที่ค่าสตีปไซเดียวกัน จะเห็นว่าค่าของระดับความดังเมื่อทำการขจัดอัตรบเท่ากับ 100 และ 150 สามารถทำให้เสียงรบกวนลดลงได้มากกว่า และการใช้อัตถัพของตัวกรองเท่ากับ 200 นี้ ในช่วงความถี่เท่ากับ 350 Hz, 400 Hz มักจะเกิดการหวัดหอนบ่อย

ในตาราง 24 ทำการปรับช่วงความถี่ให้ละเอียดขึ้น เพื่อดูว่าความถี่ในช่วงไหนที่เครื่องขจัดเสียงรบกวนสามารถทำให้เสียงรบกวนลดลงได้ โดยเลือกขยายจาก ตาราง 5.7 ซึ่งใช้อัตถัพของตัวกรองเท่ากับ 100 และค่าสตีปไซเท่ากับ 0.015 ซึ่งเมื่อดูจากกราฟในภาพประกอบ 5.5 แล้วระดับเสียงรบกวนลดลงมากที่สุด ในการทดลองนี้จะเลือกใช้จุดวางไมโครโฟนที่ตำแหน่งที่ 1 เพียง จุดเดียว ซึ่งเป็นจุดที่ สามารถทำให้ระดับเสียงรบกวนลดลงมากที่สุด

ตาราง 5.24 ผลการทดลองเมื่อทำการกระจายช่วงความถี่ให้ละเอียดขึ้น โดยใช้อันดับ  
ของตัวกรองเท่ากับ 100 และค่าสเกลไปซเท่ากับ 0.015

ความถี่ (Hz)	ก่อน (dB)	จุดที่ 1 (dB)
200	74.6	69.7
220	75.3	75
240	77	78.4
260	83.3	91.8
280	84	92.9
300	85.8	90
320	88.2	88.6
340	88.4	81
360	90	71.7
380	87.6	83
400	88.8	86.5
420	91.5	89.2
440	94.4	98.6
460	93.7	98.7
480	93.8	100.3
500	92.5	100.6





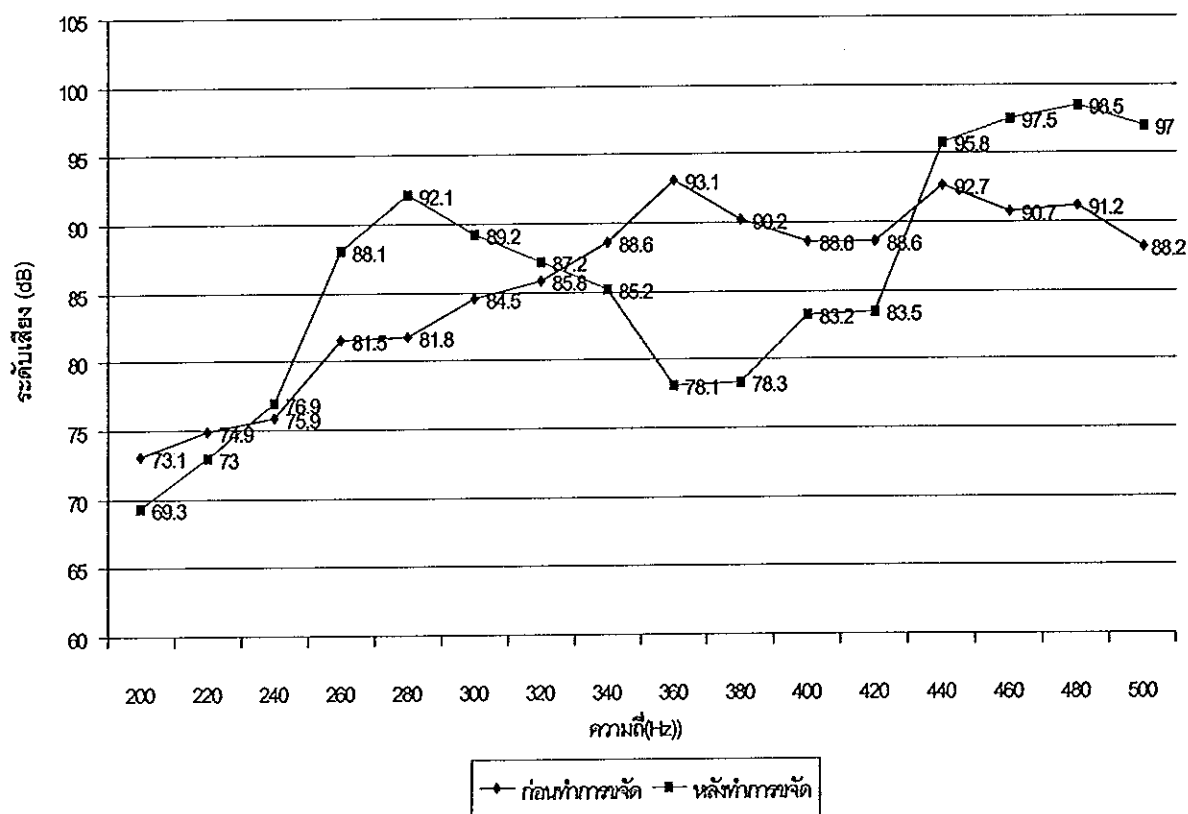
ภาพประกอบ 5.12 กราฟแสดงผลการขจัดเสียงรบกวนที่จุดวางไมโครโฟนที่กำหนด ที่ความถี่ 200 Hz – 500 Hz เมื่อใช้ค่าสเตปไซเท่ากับ 0.015

จากกราฟในภาพประกอบ 5.12 เมื่อปรับช่วงความถี่ให้ละเอียดขึ้นจะเห็นช่วงความถี่ที่สามารถทำการขจัดให้ลดลงมาได้อยู่ในช่วง 340 Hz – 440 Hz

ในตาราง 5.25 ทำการปรับช่วงความถี่ให้ละเอียดขึ้น โดยเลือกโดยใช้อันดับของตัวกรอง เท่ากับ 150 และค่าสเกลไปซเท่ากับ 0.008

ตาราง 5.25 ผลการทดลองเมื่อทำการกระจายช่วงความถี่ให้ละเอียดขึ้น โดยใช้อันดับ ของตัวกรองเท่ากับ 150 และค่าสเกลไปซเท่ากับ 0.008

ความถี่ (Hz)	ก่อน (dB)	จุด 1 (dB)
200	73.1	69.3
220	74.9	73
240	75.9	76.9
260	81.5	88.1
280	81.8	92.1
300	84.5	89.2
320	85.8	87.2
340	88.6	85.2
360	93.1	78.1
380	90.2	78.3
400	88.6	83.2
420	88.6	83.5
440	92.7	95.8
460	90.7	97.5
480	91.2	98.5
500	88.2	97



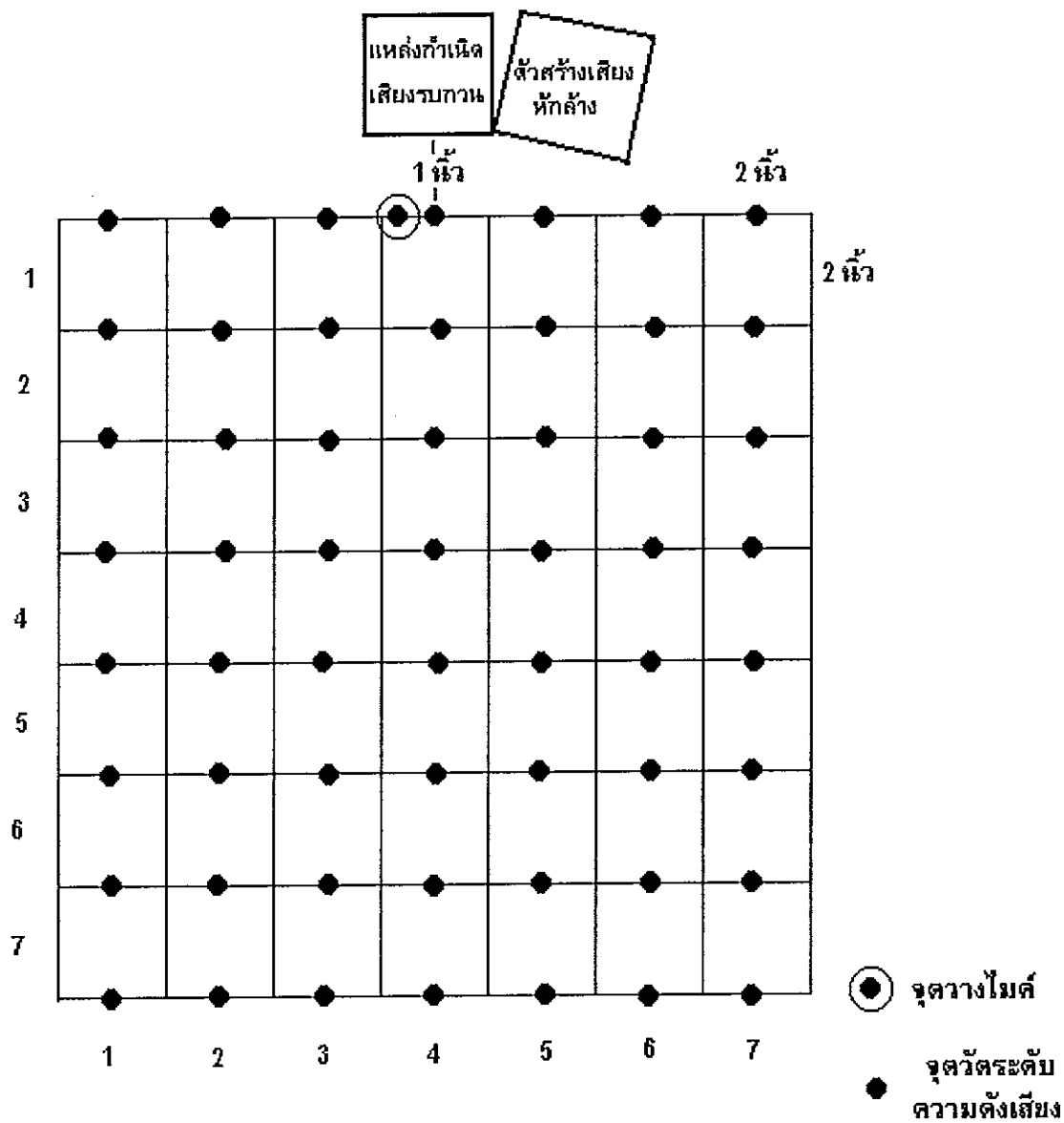
ภาพประกอบ 5.13 กราฟแสดงผลการขจัดเสียงรบกวนที่จุดวางไมโครโฟนที่กำหนด ที่ความถี่ 200 Hz – 500 Hz เมื่อใช้ค่าสเตรปไซเท่ากับ 0.008

จากภาพประกอบ 5.13 ซึ่งเป็นกราฟแสดงผลการขจัดเสียงรบกวนในช่วงความถี่ 200 Hz – 500 Hz ที่จุดวางไมโครโฟนในตำแหน่งที่ 1 เมื่อใช้ค่าสเตรปไซเท่ากับ 0.008 อันดับตัวกรองเท่ากับ 150 ช่วงความถี่ที่สามารถขจัดได้คือ 340 Hz ถึง 420 Hz เช่นเดียวกับการใช้อันดับของตัวกรองเท่ากับ 100 และค่าสเตรปไซเท่ากับ 0.015

## 5.2 การทดลองเพื่อสังเกตดูว่าบริเวณใดที่ระดับเสียงรบกวนถูกทำให้ลดลง

การทดลองเพื่อสังเกตดูว่าบริเวณใดที่ระดับเสียงรบกวนลดลง

ได้ทำการทดลองโดยกำหนดบริเวณด้านหน้าแหล่งกำเนิดเสียงรบกวนเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมขนาด  $14 \times 14$  นิ้ว โดยพื้นที่สี่เหลี่ยมนี้ได้แบ่งออกเป็นตารางขนาด  $7 \times 7$  ช่อง ซึ่งแต่ละช่องมีขนาด  $2 \times 2$  นิ้ว แสดงดังภาพประกอบ 5.14 และความถี่ที่ใช้ในการทำการทดลองจะใช้ความถี่ตั้งแต่  $320 \text{ Hz}$  จนถึงความถี่  $440 \text{ Hz}$  ซึ่งเมื่อดูจากผลการทดลองในตาราง 14 แล้วน่าจะจัดให้มีระดับเสียงที่ลดลงตามาได้



ภาพประกอบ 5.14 แสดงผังการวัดระดับเสียงรบกวนที่ตำแหน่งต่างๆ

ค่าที่แสดงในตารางต่อไปนี้เป็นค่าที่แสดงระดับความดังของเสียงรบกวน มีหน่วยวัดเป็น dB

ตาราง 5.26 ระดับความดังของเสียงรบกวนในตำแหน่งต่างๆที่กำหนด ขณะยังไม่ทำการ  
ขจัดที่ความถี่ 300 Hz

ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7
1	83.7	86.7	90.1	94	91.7	86.9	84.8
2	83.8	85.5	88.7	90.8	89.2	86.6	84.4
3	83.3	84.2	85.5	86.5	85.8	85	83.7
4	82.7	83.2	83.8	84.2	84.1	83.3	82.7
5	81.9	82.2	82.4	82.6	82.4	82.1	81.3
6	81.3	81.2	81	81.3	80.9	80.4	79.9
7	80.7	80.1	79.8	79.4	79.2	78.9	78.7

ตาราง 5.27 ระดับความดังของเสียงรบกวนในตำแหน่งต่างๆที่กำหนด ขณะทำการขจัด  
ที่ความถี่ 300 Hz

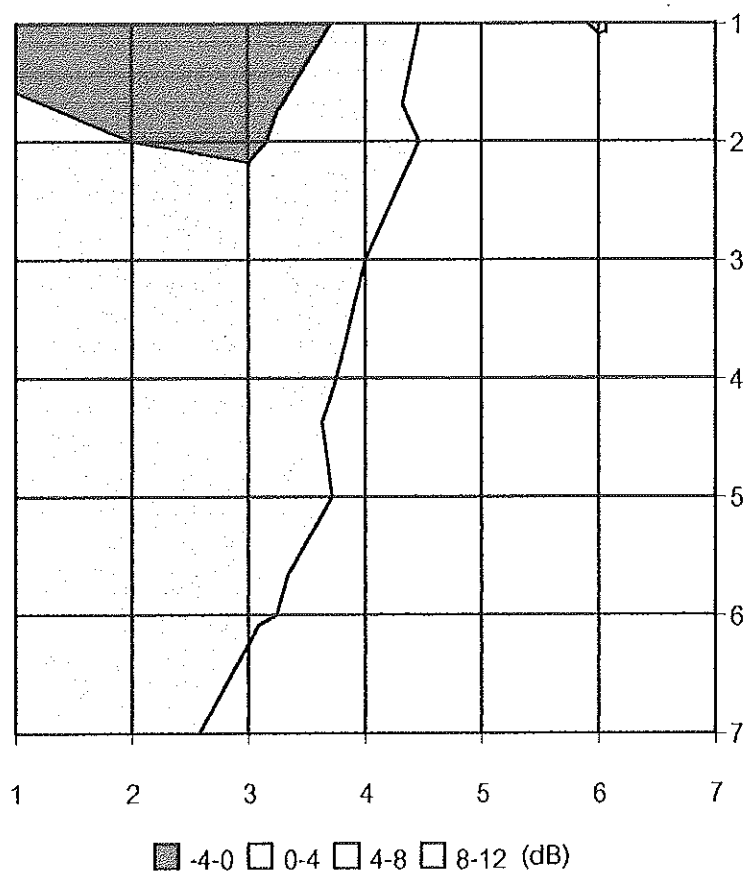
ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7
1	83.3	84.2	86.5	95.5	98.6	95	91.3
2	84.1	85.5	88.2	93.5	94.8	93.6	91.2
3	84.8	85.8	87.8	90.5	91.7	91.4	90.1
4	84.7	85.7	86.9	88.5	89.2	89.1	88.3
5	84.5	84.9	85.9	86.8	87.3	87.5	87.2
6	84.2	84.4	84.9	85.6	85.9	86	85.6
7	83.4	83.7	84.1	84.5	84.5	84.7	84.1

ตาราง 5.28 ผลต่างของระดับความดังของเสียงรบกวนขณะยังไม่ทำการขจัด  
และทำการขจัดแล้วที่ความถี่ 300 Hz

ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7
1	-0.4	-2.5	-3.6	1.5	6.9	8.1	6.5
2	0.3	0	-0.5	2.7	5.6	7	6.8
3	1.5	1.6	2.3	4	5.9	6.4	6.4
4	2	2.5	3.1	4.3	5.1	5.8	5.6
5	2.6	2.7	3.5	4.2	4.9	5.4	5.9
6	2.9	3.2	3.9	4.3	5	5.6	5.7
7	2.7	3.6	4.3	5.1	5.3	5.8	5.4

จากตาราง 5.28 ค่าตัวเลขในตารางดังกล่าวเป็นผลต่างของระดับความดังของเสียงรบกวนขณะยังไม่ทำการขจัดกับเสียงรบกวนที่ยังคงเหลืออยู่หลังจากทำการขจัดแล้ว ค่าตัวเลขในตารางนี้จะเป็นตัวบอกระดับของเสียงรบกวนเมื่อทำการขจัดแล้ว ได้ลดลงจากเดิมเมื่อยังไม่ทำการขจัดกี่ dB หรือได้มีการเพิ่มขึ้นจากเดิมกี่ dB ตัวเลขในตารางมีค่าเป็นลบแสดงว่าเสียงรบกวนได้ถูกทำให้มีทำให้มีระดับที่ต่ำลงมา ส่วนตัวเลขที่มีค่าเป็นบวกแสดงว่าไม่สามารถที่จะขจัดเสียงรบกวนให้มีระดับที่ลดลงต่ำมาได้ และมีเสียงรบกวนดังเพิ่มขึ้นจากเดิม

และจากตาราง 28 นำมาพล็อตคอนทัวร์เพื่อดูบริเวณที่ระดับเสียงรบกวนลดลงเมื่อทำการขจัดที่ความถี่ 300 Hz แสดงดังภาพประกอบ 5.15 จากภาพประกอบดังกล่าวจะเห็นว่า บริเวณที่เสียงรบกวนลดลงจะอยู่บริเวณมุมซ้ายทางด้านหน้า ซึ่งในภาพประกอบจะแทนด้วยพื้นสีน้ำเงินอ่อนๆ เป็นบริเวณไม่กว้างมากนัก ส่วนบริเวณอื่นๆที่กำหนดไม่สามารถที่จะทำให้ลดลงได้ ซึ่งในภาพประกอบดังกล่าวแทนด้วยพื้นสีที่เป็นสีเขียวอ่อน และสีเหลืองเป็นบริเวณที่มีเสียงรบกวนเพิ่มขึ้นมากกว่าบริเวณที่เป็นสีเขียวอ่อน



ภาพประกอบ 5.15 ภาพพล็อตคอนทัวร์แสดงระดับเสียงรบกวนในบริเวณที่กำหนด ที่ความถี่ 300 Hz

ตาราง 5.29 ระดับความดังของเสียงรบกวนในตำแหน่งต่างๆที่กำหนด ขณะยังไม่ทำการ ขจัดที่ความถี่ 320 Hz

ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7
1	82.2	87.2	93.6	98.3	94.6	89.7	87.9
2	82.2	86.8	90.5	92.6	91.9	89.7	87.2
3	81.6	84.6	87.4	89	89.6	88.2	86.8
4	81.6	83.5	85.6	86.9	87.2	86.7	86
5	80.9	82.4	84.1	85.2	85.9	86.1	85.6
6	80.5	81.6	83	84.1	84.5	84.9	84.8
7	80.1	80.6	81.8	82.7	83.3	83.7	83.4

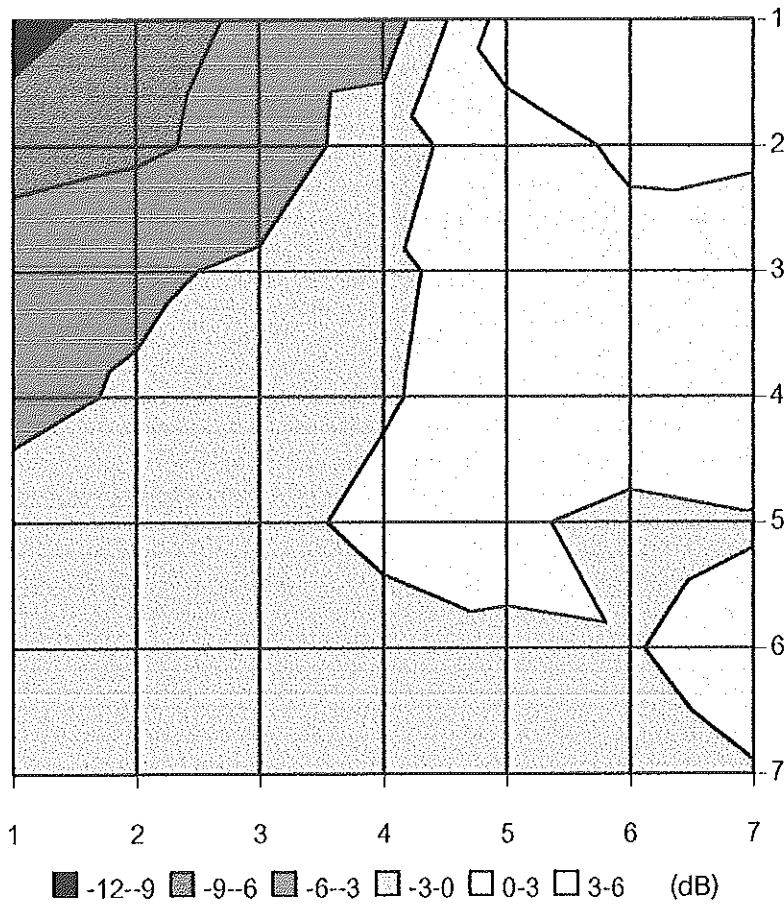
ตาราง 5.30 ระดับความดังของเสียงรบกวนในตำแหน่งต่างๆที่กำหนด ขณะทำการขจัด  
ที่ความถี่ 320 Hz

ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7
1	71.8	79.6	88.3	93.6	98.9	94.3	91
2	74.9	80.3	85.5	91.3	93.8	93.1	90.4
3	77.5	81.1	84.9	88.6	90.5	90.4	89.1
4	77.9	80.8	84.1	86.7	88.2	88.7	88
5	78.9	81	83.5	85.7	86.3	85.4	85.4
6	78.2	79.3	81.2	83.4	84.3	84.8	85.6
7	77.8	78.1	79.3	81	82.2	82.9	83.3

ตาราง 5.31 ผลต่างของระดับความดังของเสียงรบกวนขณะยังไม่ทำการขจัด  
และทำการขจัดแล้วที่ความถี่ 320 Hz

ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7
1	-10.4	-7.6	-5.3	-4.7	4.3	4.6	3.1
2	-7.3	-6.5	-5	-1.3	1.9	3.4	3.2
3	-4.1	-3.5	-2.5	-0.4	0.9	2.2	2.3
4	-3.7	-2.7	-1.5	-0.2	1	2	2
5	-2	-1.4	-0.6	0.5	0.4	-0.7	-0.2
6	-2.3	-2.3	-1.8	-0.7	-0.2	-0.1	0.8
7	-2.3	-2.5	-2.5	-1.7	-1.1	-0.8	-0.1





ภาพประกอบ 5.16 ภาพลือตคอนทัวร์แสดงระดับเสียงรบกวนในบริเวณที่กำหนด  
ที่ความถี่ 320 Hz

จากภาพประกอบ 5.16 ซึ่งเป็นภาพคอนทัวร์แสดงระดับเสียงรบกวนในบริเวณที่กำหนดที่ความถี่ 320 Hz จะเห็นว่าบริเวณพื้นที่ที่กำหนดที่มีระดับเสียงรบกวนลดลงเพิ่มมากกว่าที่ความถี่ 300 Hz บริเวณที่มีการขจัดสูงที่สุดที่ความถี่นี้อยู่บริเวณมุมซ้ายทางด้านหน้าของบริเวณที่กำหนด (บริเวณที่เป็นสีน้ำเงินเข้ม) และค่อยๆแผ่ออกในลักษณะที่การขจัดลดลง (บริเวณที่สีน้ำเงินอ่อนลงมาเรื่อยๆ) ส่วนบริเวณทางด้านหน้าซ้ายมือเสียงรบกวนจะเพิ่มขึ้นจากเดิมก่อนทำการขจัด แต่ไม่มากนัก

ตาราง 5.32 ระดับความดังของเสียงรบกวนในตำแหน่งต่างๆที่กำหนด ขณะยังไม่ทำการ  
ขจัดที่ความถี่ 340 Hz

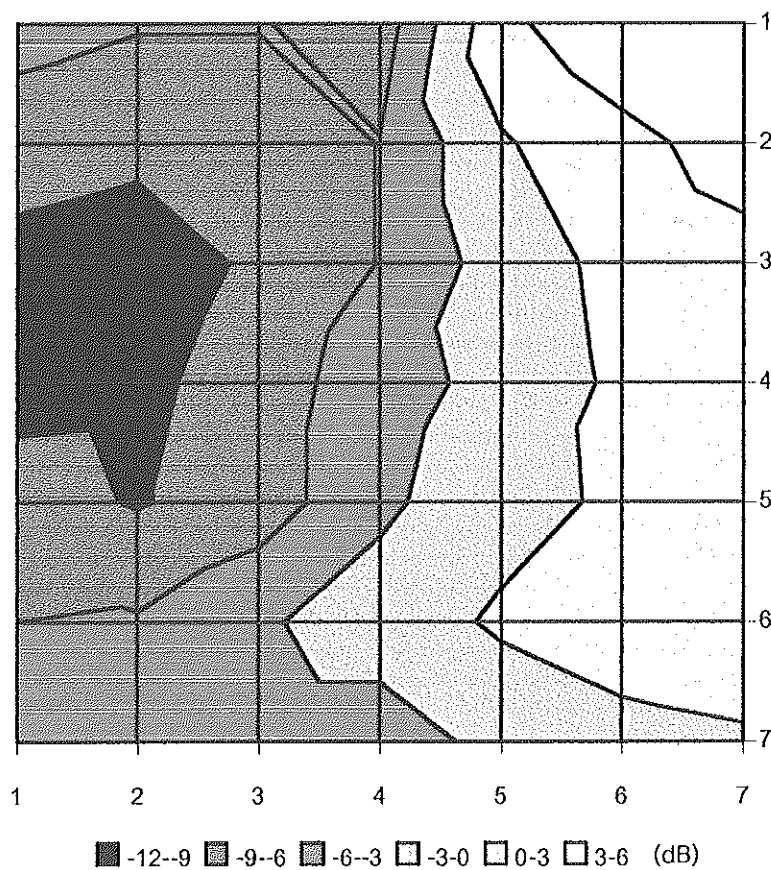
ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7
1	86.6	91.9	98.2	101.2	96.6	90.2	86.7
2	87.3	91.4	94.7	95.7	93.8	91.2	86
3	84.9	88.8	90.6	92	90.7	88.7	86.4
4	82.5	86	88	88.3	87.8	86	84.7
5	80.7	82	84.3	84.8	84.3	83.6	82.1
6	79.3	80.1	80.7	80.8	80.5	79.8	79.6
7	79.4	79.1	79.1	80	79.3	79	78.9

ตาราง 5.33 ระดับความดังของเสียงรบกวนในตำแหน่งต่างๆที่กำหนด ขณะทำการขจัด  
ที่ความถี่ 340 Hz

ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7
1	81.6	86.1	92.4	93.7	98.9	95.6	91.2
2	79.9	83.3	86.5	89.8	93.5	93.3	90.4
3	74.8	77.9	82.2	86.1	89.1	89.6	88.4
4	72.6	76.3	80.4	84.1	85.7	86.6	86.4
5	72.8	72.8	76.7	81.2	83.3	84.1	84.1
6	73.3	74.4	77.3	79.3	80.9	81.3	81.7
7	74.2	73.1	74.6	75.5	77.2	78.1	78.5

ตาราง 5.34 ผลต่างของระดับความดังของเสียงรบกวนขณะยังไม่ทำการขจัด และทำการ  
ขจัดที่ความถี่ 340 Hz

ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7
1	-5	-5.8	-5.8	-7.5	2.3	5.4	4.5
2	-7.4	-8.1	-8.2	-5.9	-0.3	2.1	4.4
3	-10.1	-10.9	-8.4	-5.9	-1.6	0.9	2
4	-9.9	-9.7	-7.6	-4.2	-2.1	0.6	1.7
5	-7.9	-9.2	-7.6	-3.6	-1	0.5	2
6	-6	-5.7	-3.4	-1.5	0.4	1.5	2.1
7	-5.2	-6	-4.5	-4.5	-2.1	-0.9	-0.4



ภาพประกอบ 5.17 ภาพพล็อตคอนทัวร์แสดงระดับเสียงรบกวนในบริเวณที่กำหนด  
ที่ความถี่ 340 Hz

ในภาพประกอบ 5.17 บริเวณที่ระดับเสียงรบกวนลดลงมีเพิ่มขึ้นมากกว่าที่ความถี่ 320 Hz บริเวณพื้นที่มีระดับเสียงรบกวนลดลงส่วนใหญ่จะอยู่ทางซ้ายมือ ระดับเสียงรบกวนลดลงสูงสุดประมาณ 10 dB

ตาราง 5.35 ระดับความดังของเสียงรบกวนในตำแหน่งต่างๆที่กำหนด ขณะยังไม่ทำการจัดที่ความถี่ 360 Hz

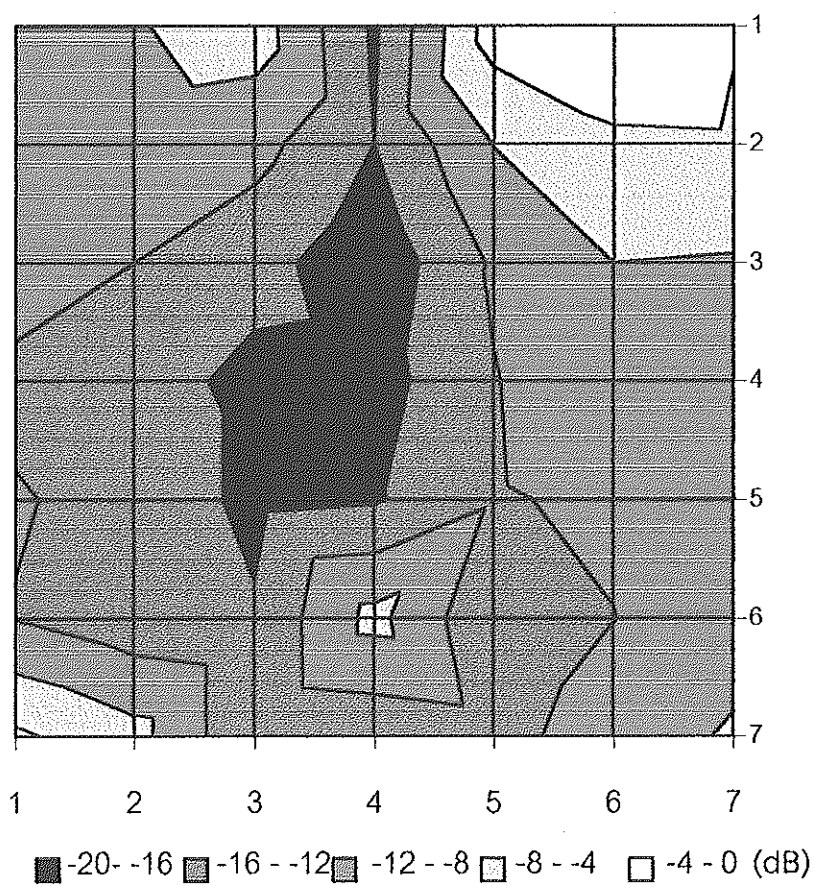
ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7
1	90.2	93.8	97.2	99.9	96.4	91.4	88.5
2	89.8	93	95.5	96	94.6	92	88.9
3	88.5	90.9	92.7	93.3	92.4	91.1	89.9
4	87.1	89.1	90.2	90.7	90.1	88.7	87.1
5	85.8	87	88	88.4	87.9	87.4	85.8
6	84	85.5	86.3	86.7	86.4	85.4	83.9
7	81.7	82.9	84	84.4	84.1	83.2	81.7

ตาราง 5.36 ระดับความดังของเสียงรบกวนในตำแหน่งต่างๆที่กำหนด ขณะทำการจัดที่ความถี่ 360 Hz

ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7
1	81.5	85.5	91.2	83.3	94.5	91.1	84.8
2	80.4	83.1	84.8	80	86.7	87.3	84.4
3	77.7	78.9	78.2	74.6	80.9	83.1	81.6
4	74.5	74.9	73.1	73.1	77.9	79.8	78.6
5	74	74.2	70.9	72	75.5	76.2	76.5
6	71.9	71	70.8	79.9	70.9	73.3	74.7
7	78.4	76.3	68.4	69.5	70.3	73.8	74

ตาราง 5.37 ผลต่างของระดับความดังของเสียงรบกวนขณะยังไม่ทำการขจัดและทำการ  
ขจัดแล้วที่ความถี่ 360 Hz

ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7
1	-8.7	-8.3	-6	-16.6	-1.9	-0.3	-3.7
2	-9.4	-9.9	-10.7	-16	-7.9	-4.7	-4.5
3	-10.8	-12	-14.5	-18.7	-11.5	-8	-8.3
4	-12.6	-14.2	-17.1	-17.6	-12.2	-8.9	-8.5
5	-11.8	-12.8	-17.1	-16.4	-12.4	-11.2	-9.3
6	-12.1	-14.5	-15.5	-6.8	-15.5	-12.1	-9.2
7	-3.3	-6.6	-15.6	-14.9	-13.8	-9.4	-7.7



ภาพประกอบ 5.18 ภาพฟลิตคอนทัวร์แสดงระดับเสียงรบกวนในบริเวณที่กำหนด  
ที่ความถี่ 360 Hz

ภาพประกอบ 5.18 ได้นำค่าใน ตาราง 5.37 มาพล็อตคอนทัวร์ จะสังเกตเห็นว่าค่าใน ตารางดังกล่าวมีค่าเป็นลบทั้งหมดแสดงว่าทั่วทั้งบริเวณที่กำหนดทั้งหมดมีระดับเสียงรบกวน ลดลง เมื่อนำมาพล็อตกราฟแสดงดังภาพประกอบ 5.18 จะเห็นว่าเป็นลีน้าเงินและสีฟ้า การ ขจัดสูงสุดอยู่ที่ตรงกลางของบริเวณพื้นที่ที่กำหนด ในภาพเป็นลีน้าเงินเข้ม

ตาราง 5.38 ระดับความดังของเสียงรบกวนในตำแหน่งต่างๆที่กำหนด ขณะยังไม่ทำการ ขจัดที่ความถี่ 380 Hz

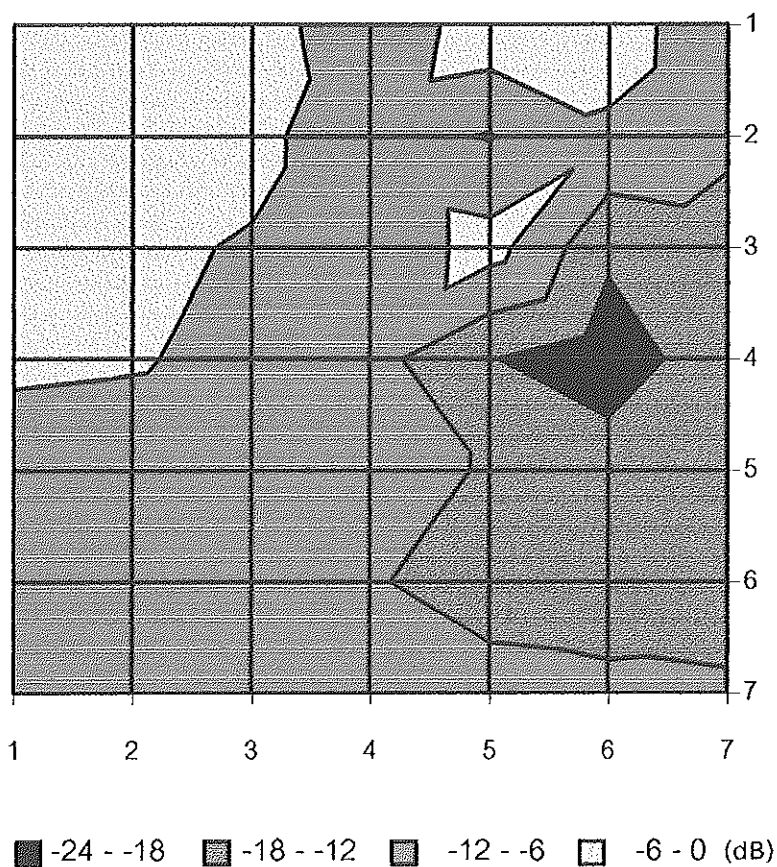
ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7
1	87.6	91.1	95.2	96.2	93.1	88.5	86.2
2	87.6	91.2	93.4	94	91.8	88.4	86.6
3	88.1	89.8	91.7	92	90.9	88.2	86.4
4	87.3	88.7	89.3	89.8	89.4	88.1	85.9
5	85.8	86.9	87.8	88.3	88	86.8	85.5
6	84.5	85.8	86.6	86.9	86.6	85.5	84.2
7	83	83.4	83.9	84.2	83.9	83.2	81.5

ตาราง 5.39 ระดับความดังของเสียงรบกวนในตำแหน่งต่างๆที่กำหนด ขณะทำการขจัด ที่ความถี่ 380 Hz

ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7
1	85.1	89.3	93.2	84.3	91.3	85.4	75.8
2	84.8	87.6	89.1	83.8	79.5	81.4	76
3	83.4	84.9	85.2	81.7	87.2	71.5	71.5
4	82	83.1	81.9	79.9	71.7	66.6	71.9
5	77.9	78.5	79	78.3	75.6	72	69.7
6	74.7	75.7	76	75.3	72.6	70.5	69.5
7	72.2	71.8	72.6	73.1	73.6	72.5	70.3

ตาราง 5.40 ผลต่างของระดับความดังของเสียงรบกวนขณะยังไม่ทำการขจัดและทำการ  
ขจัดที่ความถี่ 380 Hz

ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7
1	-2.5	-1.8	-2	-11.9	-1.8	-3.1	-10.4
2	-2.8	-3.6	-4.3	-10.2	-12.3	-7	-10.6
3	-4.7	-4.9	-6.5	-10.3	-3.7	-16.7	-14.9
4	-5.3	-5.6	-7.4	-9.9	-17.7	-21.5	-14
5	-7.9	-8.4	-8.8	-10	-12.4	-14.8	-15.8
6	-9.8	-10.1	-10.6	-11.6	-14	-15	-14.7
7	-10.8	-11.6	-11.3	-11.1	-10.3	-10.7	-11.2



ภาพประกอบ 5.19 ภาพฟลิตคอนทัวร์แสดงระดับเสียงรบกวนในบริเวณที่กำหนด  
ที่ความถี่ 380 Hz

จากตาราง 5.40 จะเห็นว่าค่าตัวเลขในตารางเป็นลบทุกค่าเช่นเดียวกับตาราง 5.37 และเมื่อนำมาพล็อตคอนทัวร์แสดงดังภาพประกอบ 5.19 จะเห็นว่าพื้นที่ที่กำหนดส่วนใหญ่จะเป็นสีน้ำเงิน และบริเวณที่ระดับเสียงรบกวนลดลงมากที่สุดพื้นกราฟเป็นสีน้ำเงินเข้มจะอยู่ตรงกลางก่อนออกไปทางขวามือ

ตาราง 5.41 ระดับความดังของเสียงรบกวนในตำแหน่งต่างๆที่กำหนด ขณะยังไม่ทำการขจัดที่ความถี่ 400 Hz

ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7
1	82.1	84.7	89.5	90.8	87.7	84.8	82.6
2	82.4	84.7	88.1	88.5	86.7	84.5	82.9
3	82.5	84.6	85.8	86.4	85.7	84.4	82.7
4	82.8	83.7	84.7	84.5	84.1	83.3	82
5	81.9	83.4	84.4	84.2	83.9	83.5	81.9
6	81.8	82.6	83.5	83.8	83.5	82.5	81.5
7	81.2	82.5	82.9	83	82.4	79.8	78.4

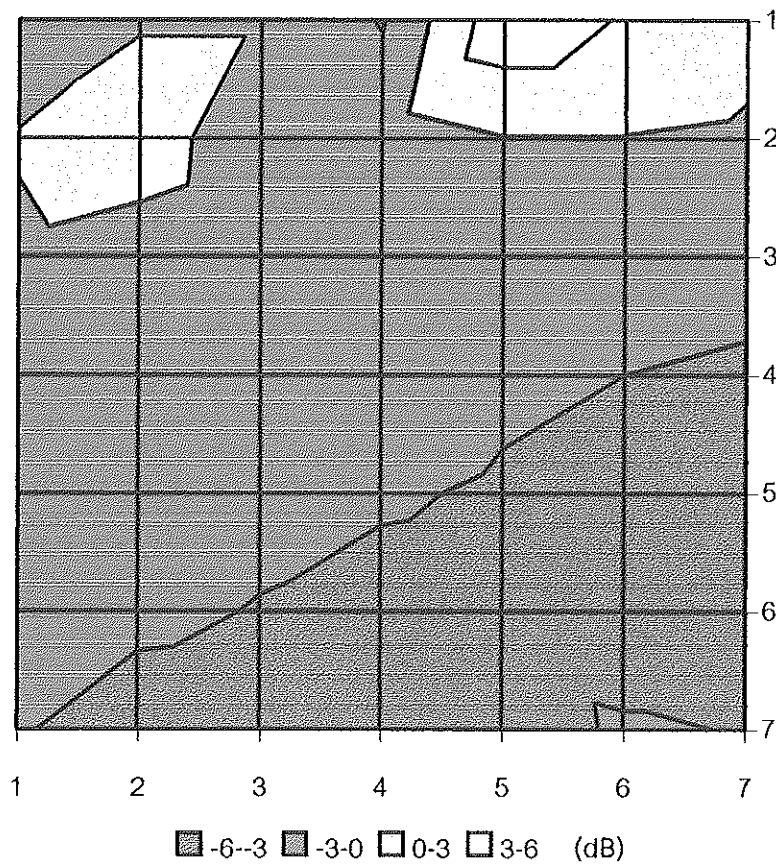
ตาราง 5.42 ระดับความดังของเสียงรบกวนในตำแหน่งต่างๆที่กำหนด ขณะทำการขจัดที่ความถี่ 400 Hz

ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7
1	81	84.6	89.4	87.6	92.8	87.5	83.8
2	82.5	85.3	87.3	87.1	86.6	84.4	82.4
3	82.3	84.1	84.9	84.4	83.5	82.3	80.7
4	82.3	82.9	83.2	83.1	81.6	80.3	78.6
5	81.1	81.4	82	81.5	80.6	79.3	78
6	79.7	80.1	80.4	80	79.5	77.9	77
7	78.4	78.5	78.7	78.7	78.2	77.1	75.3



ตาราง 5.43 ผลต่างของระดับความดังของเสียงรบกวนขณะยังไม่ทำการขจัด และทำการ  
ขจัดที่ความถี่ 400 Hz

ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7
1	-1.1	-0.1	-0.1	-3.2	5.1	2.7	1.2
2	0.1	0.6	-0.8	-1.4	-0.1	-0.1	-0.5
3	-0.2	-0.5	-0.9	-2	-2.2	-2.1	-2
4	-0.5	-0.8	-1.5	-1.4	-2.5	-3	-3.4
5	-0.8	-2	-2.4	-2.7	-3.3	-4.2	-3.9
6	-2.1	-2.5	-3.1	-3.8	-4	-4.6	-4.5
7	-2.8	-4	-4.2	-4.3	-4.2	-2.7	-3.1



ภาพประกอบ 5.20 ภาพลือตคอนทัวร์แสดงระดับเสียงรบกวนในบริเวณที่กำหนด  
ที่ความถี่ 400 Hz

จากภาพประกอบ 5.20 จะเห็นว่าบริเวณพื้นที่ที่กำหนดมีบริเวณพื้นที่ที่เป็นสีน้ำเงินค่อนข้างอ่อน ซึ่งแสดงถึงว่ามีการขจัดน้อย การขจัดสูงสุดเมื่อดูจากตารางประมาณ 4 dB สำหรับบริเวณที่มีระดับเสียงรบกวนเพิ่มขึ้นสังเกตเห็นว่ามันเพิ่มขึ้นจากเดิมไม่มากนัก

ตาราง 5.44 ระดับความดังของเสียงรบกวนในตำแหน่งต่างๆที่กำหนด ขณะยังไม่ทำการขจัดที่ความถี่ 420 Hz

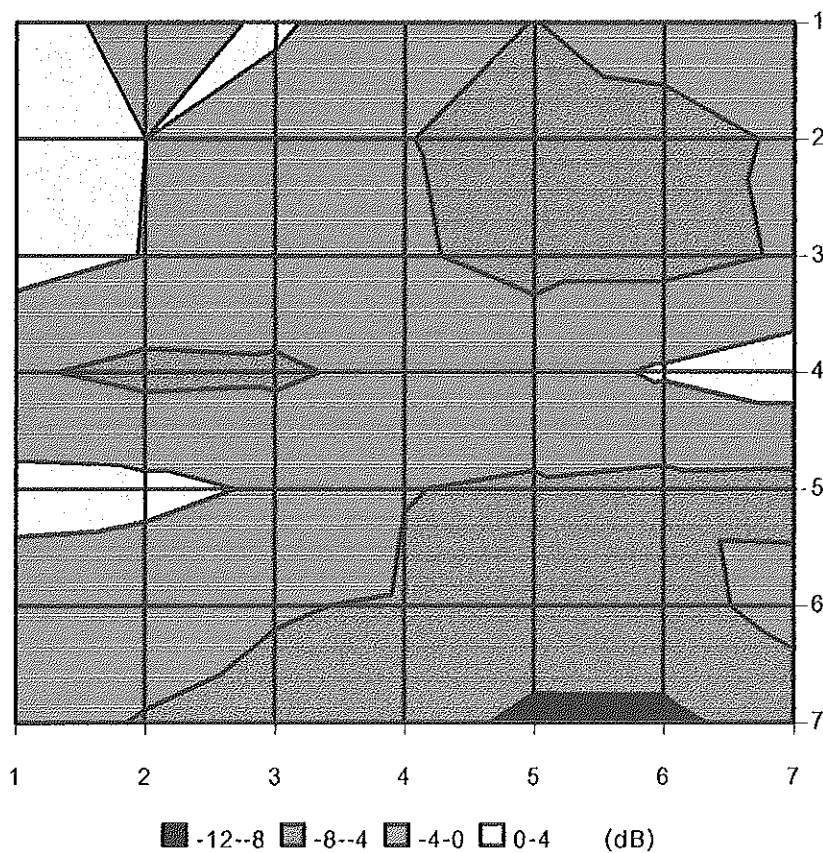
ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7
1	90.8	94.4	97.8	99.4	96.4	91.2	88.9
2	88.8	92.6	95	95.1	93.9	90.8	87.9
3	86.4	89.5	90.5	91.3	90	87.7	85.6
4	83.8	85.6	87	87.5	87.8	85.9	83.7
5	82.3	82.9	83.5	84.5	84.2	82.8	80.9
6	82.8	82.9	83	83.6	83.5	82.7	81.1
7	83.7	83.4	83.2	82.9	82.6	82	80.3

ตาราง 5.45 ระดับความดังของเสียงรบกวนในตำแหน่งต่างๆที่กำหนด ขณะทำการขจัดที่ความถี่ 420 Hz

ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7
1	92.2	93.2	98.2	97.6	92.3	89.4	87.5
2	90.1	92.6	93.7	91.3	87.4	84.9	84.6
3	87.9	89.4	89.7	87.8	84.7	82.4	82
4	80.3	80.6	82.3	84.8	86.4	86.3	85.6
5	83.4	83.8	83.1	80.6	79.7	77.7	75.7
6	81.2	80.6	79.3	79.2	77.9	77.2	78.5
7	80.9	79.2	78	76.5	73.8	73.2	73.9

ตาราง 5.46 ผลต่างของระดับความดังของเสียงรบกวนขณะยังไม่ทำการขจัด และทำการ  
ขจัดที่ความถี่ 420 Hz

ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7
1	1.4	-1.2	0.4	-1.8	-4.1	-1.8	-1.4
2	1.3	0	-1.3	-3.8	-6.5	-5.9	-3.3
3	1.5	-0.1	-0.8	-3.5	-5.3	-5.3	-3.6
4	-3.5	-5	-4.7	-2.7	-1.4	0.4	1.9
5	1.1	0.9	-0.4	-3.9	-4.5	-5.1	-5.2
6	-1.6	-2.3	-3.7	-4.4	-5.6	-5.5	-2.6
7	-2.8	-4.2	-5.2	-6.4	-8.8	-8.8	-6.4



ภาพประกอบ 5.21 ภาพพล็อตคอนทัวร์แสดงระดับเสียงรบกวนในบริเวณที่กำหนด  
ที่ความถี่ 420 Hz

จากภาพประกอบ 5.21 จะเห็นว่าบริเวณพื้นที่ที่กำหนดส่วนใหญ่จะเป็นสีน้ำเงิน และมีบางบริเวณที่เป็นสีน้ำเงินเข้มแสดงว่าบริเวณที่กำหนดมีเสียงรบกวนลดลงเมื่อทำการขจัด และเมื่อเทียบกับระดับเสียงรบกวนที่ลดลงที่ความถี่ 400 Hz ที่ผ่านมาจะเห็นว่าที่ความถี่นี้มีระดับเสียงรบกวนลดลงมากกว่า

ตาราง 5.47 ระดับความดังของเสียงรบกวนในตำแหน่งต่างๆที่กำหนด ขณะยังไม่ทำการขจัดที่ความถี่ 440 Hz

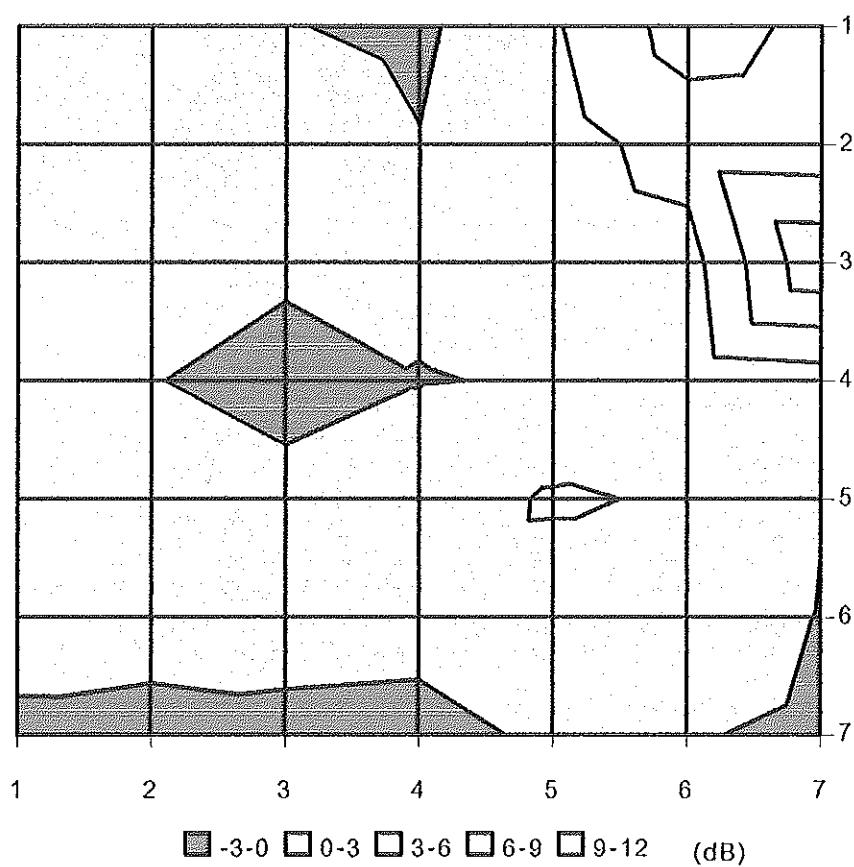
ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7
1	93.8	96.2	100.8	102.9	98.2	90.2	88.5
2	93.4	95.5	97.3	97.8	95.2	90.5	88.1
3	91.5	93.9	95.2	95	93.1	90.5	88.1
4	91.8	93.5	94	93.8	92.6	90.7	88.6
5	90.8	92.2	93	92.8	92.3	91.6	90.2
6	90.9	91.9	92.3	92.1	91.7	90.9	89.6
7	89.2	90.1	90.8	90.9	90.9	90.3	89.7

ตาราง 5.48 ระดับความดังของเสียงรบกวนในตำแหน่งต่างๆที่กำหนด ขณะทำการขจัดที่ความถี่ 440 Hz

ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7
1	95.5	98.4	100.9	102.4	100.9	97.6	93.7
2	95.2	97	98.6	97.9	96.9	94.8	92.1
3	93.7	95.2	96.1	95.5	94.1	92.3	99.6
4	93.2	93.7	92.2	93.7	92.8	91.6	90.1
5	93.3	93.7	94.5	94.3	95.6	94.3	90.3
6	93.1	94.2	94.2	93.8	93.2	92.4	89.5
7	88.1	88.3	89.6	89.4	91.7	90.5	89.2

ตาราง 5.49 ผลต่างของระดับความดังของเสียงรบกวนขณะยังไม่ทำการขจัด และทำการ  
ขจัดที่ความถี่ 440 Hz

ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7
1	1.7	2.2	0.1	-0.5	2.7	7.4	5.2
2	1.8	1.5	1.3	0.1	1.7	4.3	4
3	2.2	1.3	0.9	0.5	1	1.8	11.5
4	1.4	0.2	-1.8	-0.1	0.2	0.9	1.5
5	2.5	1.5	1.5	1.5	3.3	2.7	0.1
6	2.2	2.3	1.9	1.7	1.5	1.5	-0.1
7	-1.1	-1.8	-1.2	-1.5	0.8	0.2	-0.5



ภาพประกอบ 5.22 ภาพลึ่อกอนทัวร์แสดงระดับเสียงรบกวนในบริเวณที่กำหนด  
ที่ความถี่ 440 Hz

จากภาพประกอบ 5.22 เป็นภาพพล็อตคอนทัวร์แสดงระดับเสียงรบกวนในบริเวณที่กำหนด ที่ความถี่ 440 Hz ซึ่งเป็นความถี่สุดท้ายที่นำมาพิจารณาในการพล็อตคอนทัวร์ จากภาพจะเห็นว่า บริเวณพื้นที่ที่กำหนดส่วนใหญ่เป็นสีน้ำเงินน้อยมากและเป็นสีน้ำเงินที่ค่อนข้างอ่อน ส่วนใหญ่จะเป็นสีเขียวอ่อนและเหลือง ซึ่งแสดงถึงว่าพื้นที่ส่วนใหญ่ไม่สามารถทำการขจัดให้ระดับเสียงรบกวนลดลงมาได้

## บทที่ 6

### บทวิจารณ์สรุป

จากการทดลองในบทที่ 5 ในช่วงแรกเป็นการทดลองเพื่อหาตำแหน่งการวางไมโครโฟนซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับเสียงรบกวนที่เหมาะสม เมื่อทำการวางลำโพงที่ใช้เป็นตัวส่งเสียงหักล้างออกไปจัดเสียงรบกวนทางด้านขวามือทำมุมประมาณ 30 องศา กับแหล่งกำเนิดเสียงรบกวน แสดงดังภาพประกอบ 5.1 จากการทดลองพบว่าตำแหน่งในการวางไมโครโฟนที่เหมาะสมที่สามารถทำให้เสียงรบกวนลดลงมาได้มากที่สุดคือ ตำแหน่งทางด้านหน้าแหล่งกำเนิดเสียงรบกวน ห่างจากแหล่งกำเนิดเสียงรบกวน 1 นิ้ว และยังพบอีกว่าในการจัดเสียงรบกวนนั้นต้องวางลำโพงซึ่งสร้างเสียงหักล้าง และไมโครโฟนซึ่งเป็นตัวตรวจจับเสียงรบกวนในตำแหน่งที่เหมาะสมจึงจะทำให้การจัดเกิดประสิทธิภาพมากที่สุด

ในช่วงที่สองเป็นการทดลองเพื่อดูบริเวณที่มีเสียงรบกวนลดลงเมื่อทำการจัดในบริเวณที่กำหนดซึ่งเป็นพื้นราบด้านหน้าแหล่งกำเนิดเสียงรบกวนขนาด 14 x 14 นิ้ว โดยช่วงความถี่เสียงรบกวนที่กำหนดในการทดลองเริ่มตั้งแต่ 320 Hz – 440 Hz และทำการปรับค่าความถี่เสียงในการทดลองเพิ่มขึ้นครั้งละ 20 Hz จากการทดลองนี้พบว่าเครื่องจัดเสียงรบกวนแบบปรับตัวได้สามารถทำการจัดเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นให้มีระดับลดลงได้ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 320 Hz จนถึง 420 Hz และยังพบว่าเมื่อความถี่ของเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นเปลี่ยนไปบริเวณที่มีเสียงรบกวนลดลงก็จะเปลี่ยนตามไปด้วย

เครื่องจัดเสียงรบกวนแบบปรับตัวได้ที่ได้สร้างขึ้นมาโดยใช้รูปแบบของการทำนายแบบเชิงเส้นนี้ ไม่สามารถทำการจัดเสียงรบกวนที่เป็นลูกคลื่นขายน้ได้ตลอดช่วงความถี่ที่ต้องการคือ 100 Hz – 500 Hz นอกจากนี้แล้วเสียงรบกวนที่เกิดจากอุปกรณ์เครื่องใช้ เครื่องจักรกลต่างๆ และเสียงอื่นๆที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติซึ่งเป็นเสียงที่เราไม่ต้องการ เครื่องจัดเสียงรบกวนที่ได้สร้างขึ้นนี้ก็ไม่สามารถทำการจัดให้เสียงรบกวนดังกล่าวลดลงได้

แต่อย่างไรก็ตามในการทำวิจัยในครั้งนี้ อาจเป็นประโยชน์ไม่มากนักน้อยต่อผู้สนใจเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องจัดเสียงรบกวนแบบปรับตัวได้ต่อไปให้มีความสามารถที่จะจัดเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นจากเครื่องจักรกล อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ รวมทั้งเสียงที่เกิดจากธรรมชาติซึ่งเป็นเสียงที่เราไม่ต้องการได้ โดยอาศัยหลักการของการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ซึ่งเป็นวิธีการที่ประหยัด เนื่องจากการทำงานของระบบหรือเครื่องส่วนใหญ่จะเป็น

การกระทำของส่วนที่เป็นโปรแกรมทั้งหมดโดยไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งต้องการออกแบบและการประกอบวงจรที่ยุ่งยาก



## บรรณานุกรม

กิตติพัฒน์ ดันตระรุ่งโรจน์. 2540 สัญญาณและระบบเวลาเต็มหน่วย. กรุงเทพฯ :  
วิทย์พัฒน์.

Graupe, Daniel. and Efron, Adam J. 1991. "An Output-Whitening Approach to  
Adaptive Noise Cancellation" IEEE Transaction on Circuit and System.  
38(11 november 1991),1306-1313

Candy, Jame V. 1988 Signal Processing the Modern Approach. Singapore :  
Mcgraw-Hill.

Heyes, Monson H. 1976. Statistical Digital Signal Processing and Modeling.  
United State of Amarica :John Wiley and Sons.

Mitra, Sanjit K . 1998 Digital Signal Processing a Computer-Based Approach.  
Singapore : McGraw-Hill.

Ogata, Katsuhiko. 1995. Modern Control Engineering. 2<sup>nd</sup> ed. Singapore :  
Prentice Hall.

Texas Instruments. 1996. Design of Active Noise Control Systems with The  
TMS320 Family. United State of Amarica : Texus Instruments Incorporated.

Texas Instruments. 1993. TMS320C5x DSP Starter Kit : Texus Instruments  
Incorporated.

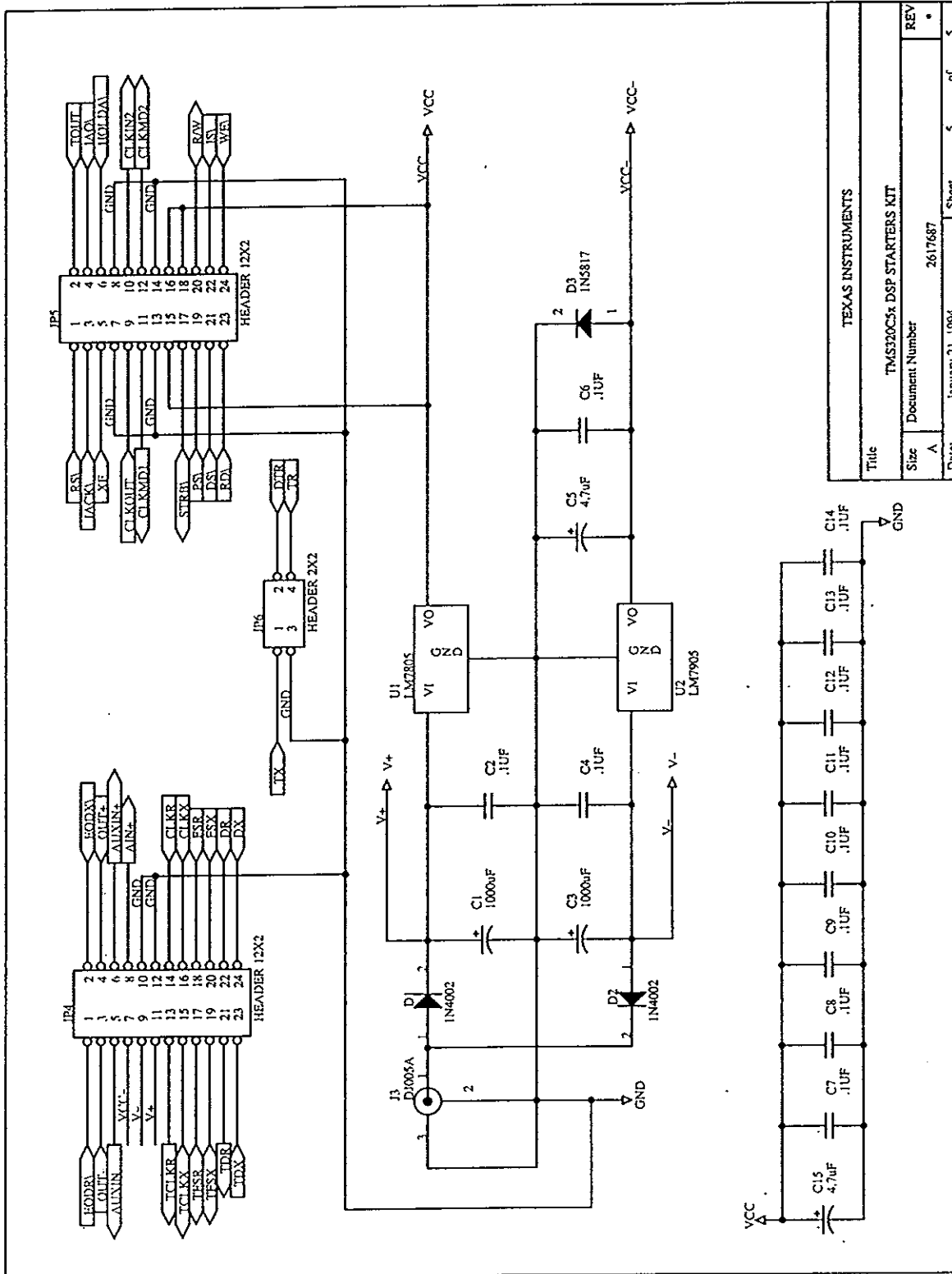
Texas Instruments. 1993. TMS320C5x User 's Guild. : Texus Instruments  
Incorporated.

Ingle Vinay K. and Proakis John G. 1997. Digital Signal Processing Using  
MATLAB V.4 : PWS Publishing Company.

ภาคผนวก

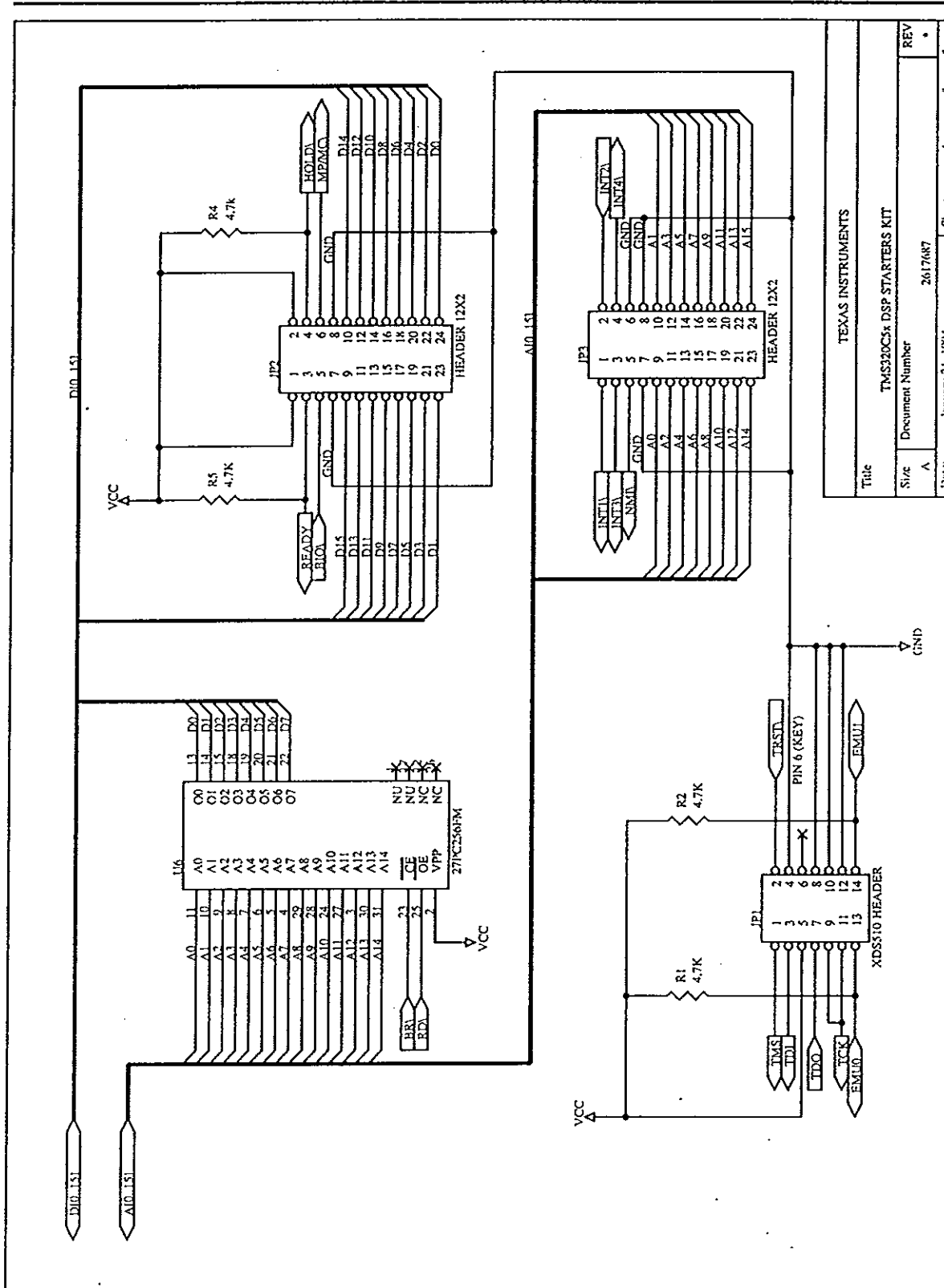
ภาคผนวก ก. รูปแบบลักษณะของบอร์ดวงจร TMS320C5x DSP Starter Kit (DSK)  
และแผนผัง

Schematic Diagrams



Title		TEXAS INSTRUMENTS	
Size	A	Document Number	2617687
Date	January 21, 1994	Sheet	5 of 5

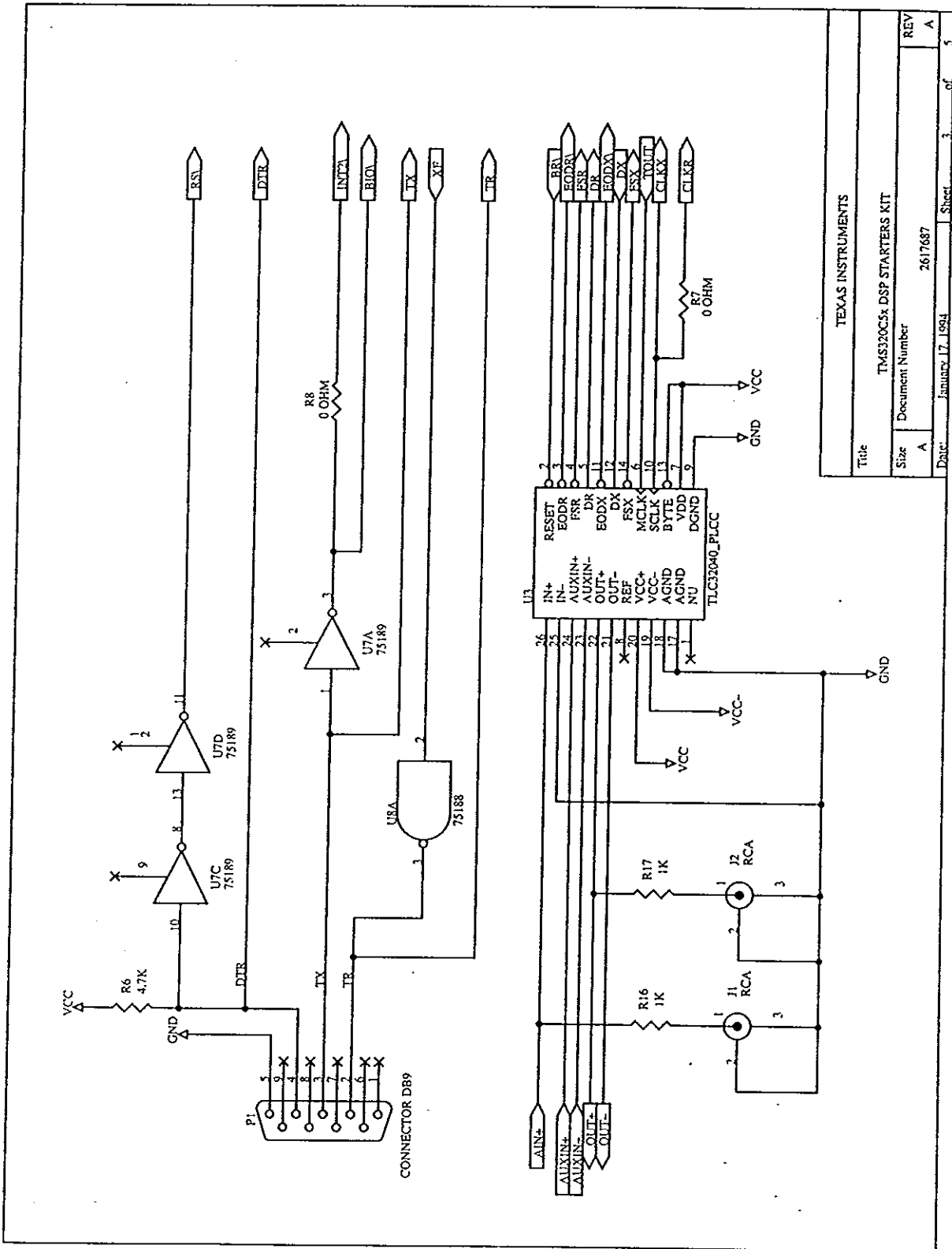
Title		TMS320C3x DSP STARTERS KIT	
Size	A	Document Number	2617687
Date	January 21, 1994	Sheet	5 of 5



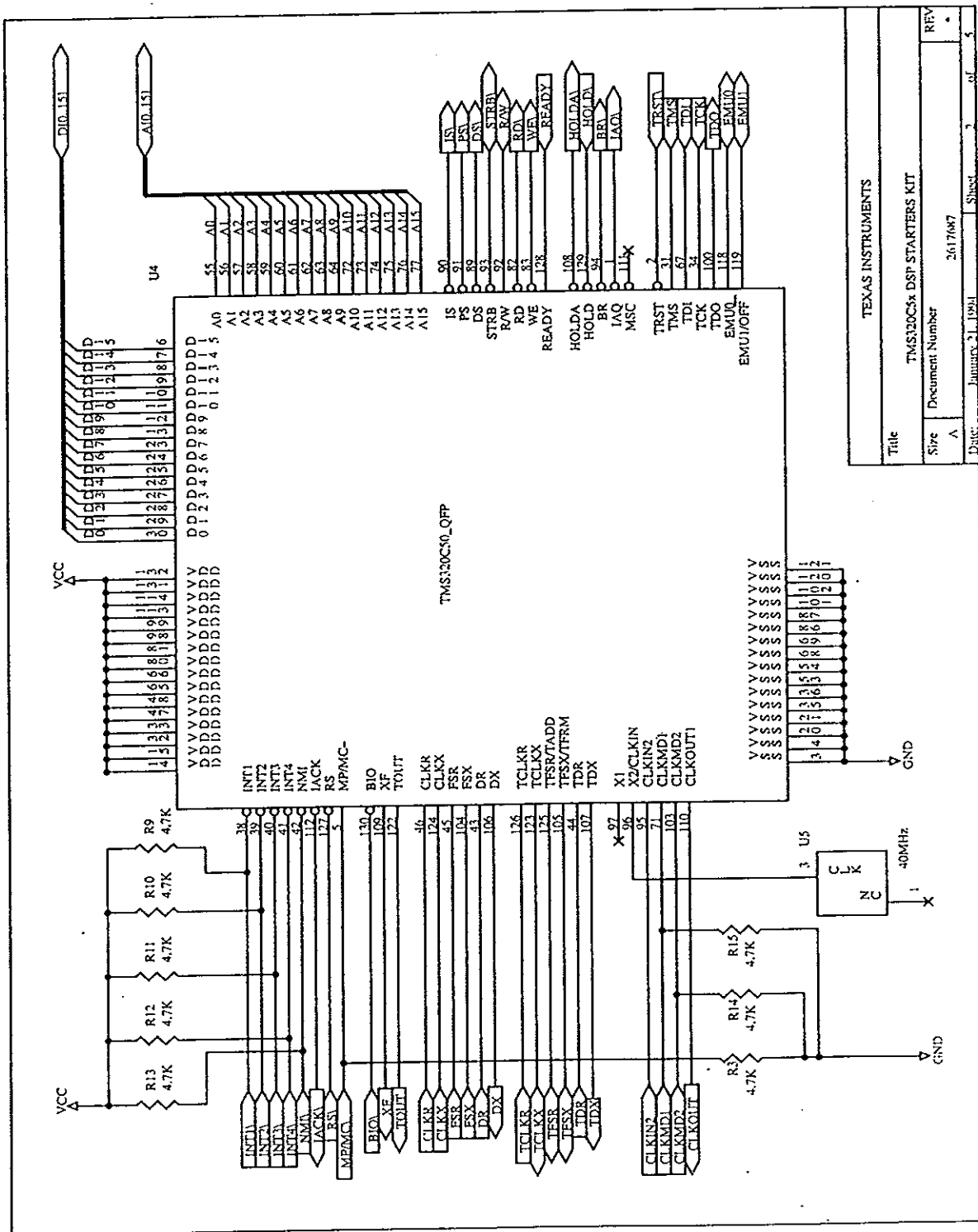
Title		TEXAS INSTRUMENTS	
Size	Document Number	TMS320C5x DSP STARTERS KIT	
A	2617687	Date:	January 31, 1994
REV	•	Sheet	4 of 5

DSK Circuit Board Dimensions and Schematic Diagrams

Schematic Diagrams



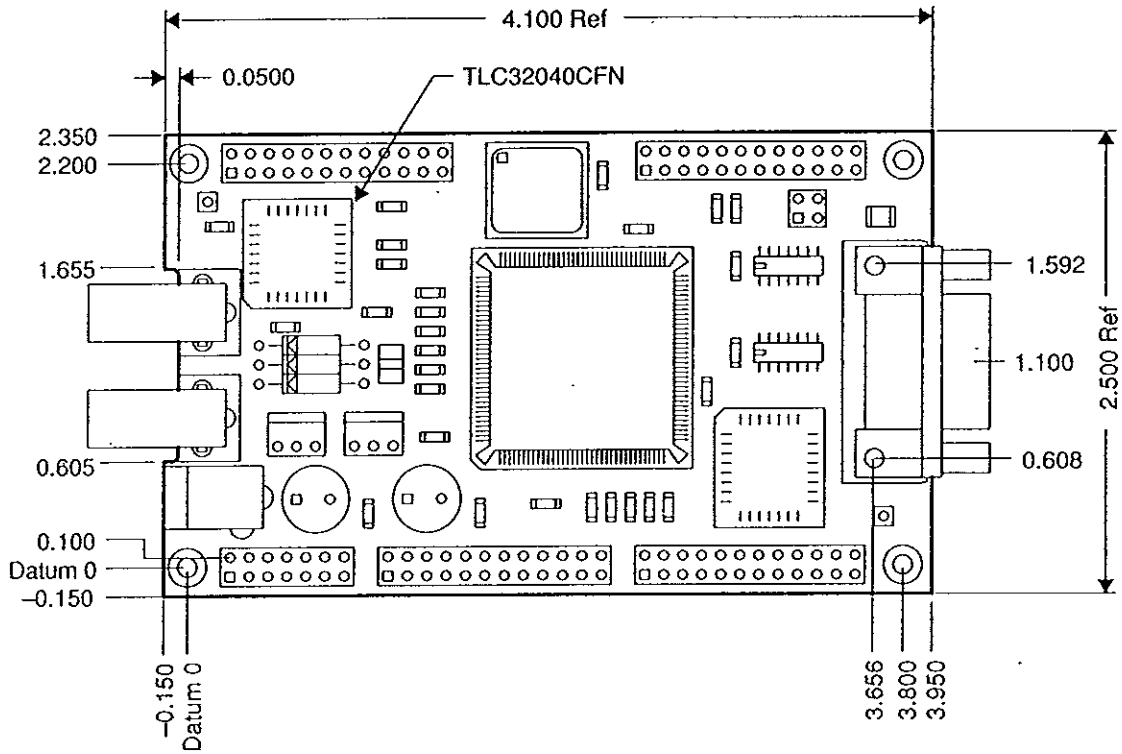
Title		TEXAS INSTRUMENTS	
Size		TMS320C4x DSP STARTERS KIT	
Document Number		2617687	
Date:	January 17, 1994	Sheet	3 of 5
REV	A		



DSK Circuit Board Dimensions and Schematic Diagrams

## Circuit Board Dimensions

Figure A-1. TMS320C5x DSP Starter Kit (DSK) Circuit Board Dimensions



Note: Dimensions are in inches.

ภาคผนวก ข. โปรแกรมการจำลองอัลกอริทึม LMS , อัลกอริทึม RLS โดยใช้โปรแกรม Matlab  
 และโปรแกรมการขจัดเสียงรบกวนโดยใช้ภาษาแอสเซมบลีของชิพ  
 TMS320C5x

### 1. โปรแกรมการจำลองอัลกอริทึม LMS

```
function [W]=lms1(x,n,mu)

[M,N]=size(x);
W=zeros(1,n);
X=zeros(1,n);
for i=1:N
    X(1,i)=x(i);
    y(i)=W*X';
    e(i)=x(i)-y(i);
    for j=1:n
        W1(1,j)=W(1,j)+mu*e(i)*X(1,j)';
    end
    W=W1;
    for j=1:n-1
        X1(1,j+1)=X(1,j);
    end
    X=X1;
end

subplot(3,1,1),plot(x),title('input signal x(n)')
subplot(3,1,2),plot(y),title('desire signal y(n)')
subplot(3,1,3),plot(e),title('error signal e(n)')
```



## 2. โปรแกรมการจำลองอัลกอริทึม RLS

```
function [W]=rls(x,n,mu)

delta=0.1;
lamda=1;
P=eye(n)/delta;
[M,N]=size(x);
W=zeros(1,n);
X=zeros(1,n);
for i=1:N
    X(1,1)=x(i);
    z=P*X.';
    g=z/(lamda+X*z);
    y(i)=W*X';
    e(i)=x(i)-y(i);
    en=e(i);
    for j=1:n
        W1(1,:)=W(1,:)+e(i)*g';
    end
    W=W1;
    P=(P-g*z')/lamda;
    for j=1:n-1
        X1(1,j+1)=X(1,j);
    end
    X=X1;
end

subplot(3,1,1),plot(x),title('input signal x(n)')
subplot(3,1,2),plot(y),title('desire signal y(n)')
subplot(3,1,3),plot(e),title('error signal e(n)')
```

### 3. โปรแกรมการจัดตั้งสัญญาณเสียงรบกวนโดยใช้ภาษาแอสเซมบลีของชิพ TMS320C50

```

mmregs
    .ds 0f00h    ;

TA    .word 24    ; Fcut = 8 KHz
RA    .word 24    ; Fcut = 8 KHz
TB    .word 18    ; Fs = 2*Fcut
RB    .word 18    ; Fs = 2*Fcut
AIC_CTR .word 01h

EN    .word 0
ERRF  .word 0

INPUT .word 0
OUTPUT .word 0
TEMP  .word 0

    .ds 01000h

    .ps 080ah
rint: B    RECEIVE    ;0A; Serial prot receive interrupt RINT.
xint: B    TRANSMIT   ;0C; Serial port transmit interrupt XINT.

    .ds 0300h

RN    .set 301h
VN    .set 303h
XN    .set 30Ah
YN    .set 380h
LAST_XN .set 3A1h

```

```

COEFF .set 1C00h
COEFF_D .set 1C00h
*
*****
* TMS32C05X INITIALIZATION *
* *
*****
    .ps 0a00h

    .entry
SETUP: SETC INTM      ; Disable interrupts
    LDP #0           ; Set data page pointer
    OPL #0834h,PMST
    LACC #0
    SAMM CWSR        ; Set software wait state to 0
    SAMM PDWSR       ;

* Reset AIC by writing to PA2 (address >52) to DSK

    SPLK #022h,IMR   ; Using XINT syn TX & RX
    CALL AICINIT     ; initialize AIC and enable interrupts
*
*****
* This routine enables serial port rx interrupts & configures *
* TLC32040 for the frame sync. When RINT is triggered, read a *
* dummy data word from the AIC then generate a sine wave to *
* send out. *
*****
;
    CLRC OVM         ; OVM = 0

```

```

SPM  0          ; PM = 0
SPLK #012h,IMR
CLRC INTM      ; enable
          ; SETC SXM

WAIT  NOP
      NOP
      NOP
      B  WAIT

;----- end of main program -----;

;
; RECIEVER INTERRUPT SERVICE ROUTINE
;
RECEIVE:
      LDP #6
      LAMM DRR      ; read data from DRR
      SACL XN

      ZAP
      LACC #1,14
      MAR *,AR3
      LAR AR3,#LAST_XN
FIR  RPT #150
      MACD COEFF,*-
      APAC
      SACH VN,1

          ; NEG
      LAR AR3,#XN

```

```
ADD *,15
SACH EN,1
DMOV *

LT EN
MPY #650
PAC
ADD #1,14
SACH ERRF,1

LACC #149
SMMM BR CR
LAR AR2,#COEFF_D
LAR AR3,#LAST_XN
LT ERRF
MPY *-,AR2
RPTB LOOP -1
ADAPT ZALR *,AR3
MPYS *-,AR2
SUB *,2
SACH *+
LOOP ZALR *
APAC
SACH *+

LACC VN,15
AND #0FFFCh,15
RPT #14
SFR
```

```

SAMB DXR
RETE
;
; TRANSMIT INTERRUPT SERVICE ROUTINE
;
TRANSMIT:
    RETE

*
*****
* DESCRIPTION: This routine initializes the TLC320C40 for *
*           a 8Khz sample rate with a gain setting of 1 *
*****
* aic initialization data
*
AICINIT: SPLK #20h,TCR ; To generate 10 MHz from Tout
        SPLK #01h,PRD ; for AIC master clock
        MAR *,AR0
        LACC #0008h ; Non continuous mode
        SACL SPC ; FSX as input
        LACC #00c8h ; 16 bit words
        SACL SPC
        LACC #080h ; Pulse AIC reset by setting it low
        SACH DXR
        SACL GREG
        LAR AR0,#0FFFFh
        RPT #10000 ; and taking it high after 10000 cycles
        LACC *,0,AR0 ; (.5ms at 50ns)
        SACH GREG
;-----

```

```

LDP #TA      ;
SETC SXM     ;
LACC TA,9    ; Initialized TA and RA register
ADD RA,2     ;
CALL AIC_2ND ;
;-----
LDP #TB
LACC TB,9    ; Initialized TB and RB register
ADD RB,2     ;
ADD #02h     ;
CALL AIC_2ND ;
;-----
LDP #AIC_CTR
LACC AIC_CTR,2 ; Initialized control register
ADD #03h     ;
CALL AIC_2ND ;
RET          ;

```

AIC\_2ND:

```

LDP #0
SACH DXR     ;
CLRC INTM
IDLE
ADD #6h,15   ; 0000 0000 0000 0011 XXXX XXXX XXXX XXXX b
SACH DXR     ;
IDLE
SACL DXR     ;
IDLE
LACL #0      ;
SACL DXR     ; make sure the word got sent

```

```
IDLE
SETC INTM
RET      ;
      .end
```



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายสิทธิชัย กุลศรี

วัน เดือน ปีเกิด 17 สิงหาคม 2516

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
ประกาศนียบัตรครุเทคนิคชั้นสูง	วิทยาลัยช่างกลปทุมวัน	2539